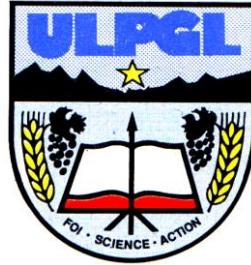


**UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES**



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**CONCEPTION D'UN SYSTEME HYBRIDE
SOLAIRE ET BIOGAZ : cas de l'hôpital
général de Munkongola à Kabare**

Par : **CITO BAKABAGANE Julien**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Bachelor en Sciences de l'Ingénieur

Mention : Génie Electrique

Directeur : Prof. **BARAKA MUSHAGE OLIVIER**

Encadreur : CT. **JANVIER KAMUNDALA**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2024 - 2025

Epigraphe

« Pas de rose sans épine et rien ne se fait sans effort »

Jean Paul sartre

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents pour m'avoir donné la vie et le goût de l'effort.

Je le dédie également à tous mes bienfaiteurs qui ont financé et soutenu mon parcours académique.

BAKABAGANE CITO Julien

Remerciements

Au terme de ce cycle de formation, il est un devoir agréable de témoigner ma reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Avant tout, je rends grâce au Seigneur Dieu Tout-Puissant pour le souffle de vie, la santé et la persévérance qu'il m'a accordées tout au long de mon parcours académique. Sa grâce m'a soutenu dans les moments de doute et de fatigue.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur BARAKA MUSHAGE OLIVIER, qui a accepté de diriger ce travail, ainsi qu'au Chef de Travaux JANVIER KAMUNDALA, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité constante et ses précieux conseils techniques qui ont guidé mes pas.

Mes remerciements s'adressent ensuite à mes parents. Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices permanents et votre soutien indéfectible. Ce diplôme est autant le vôtre que le mien.

Toute ma reconnaissance va à Matt Spector et Lisa Griffin Vincent. Je vous remercie profondément d'avoir cru en mon potentiel, de m'avoir soutenu moralement et matériellement, et de m'avoir donné la force de poursuivre mes rêves jusqu'au bout. Votre confiance a été la pierre angulaire de ma réussite.

Mes hommages vont également à l'ensemble du corps professoral de la Faculté des Sciences et Technologies de l'ULPGL. Merci de m'avoir transmis de nouvelles connaissances et d'avoir forgé en moi l'esprit d'ingénierie nécessaire pour affronter les défis professionnels de demain.

À mes collègues et compagnons de lutte, avec qui j'ai partagé les bancs et les nuits de réflexion. Merci pour la fraternité et l'entraide qui ont régné entre nous durant ces années d'études.

Enfin, que toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre, par un conseil, un geste ou une présence, trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

BAKABAGANE CITO Julien

Résumé

Ce travail présente la conception et la simulation d'un système énergétique hybride (solaire photovoltaïque et biogaz) pour l'Hôpital général de référence de Mukongola à Kabare. L'objectif est de pallier l'instabilité du réseau électrique et de réduire la dépendance coûteuse aux hydrocarbures, garantissant ainsi une autonomie énergétique durable.

La recherche vise à dimensionner une solution hybride capable de couvrir une demande journalière de 222,4 kWh. L'étude cherche à assurer la continuité des soins vitaux (chirurgie, maternité, froid médical) par une source d'énergie propre et résiliente.

L'étude s'appuie sur une enquête de terrain pour l'audit énergétique, suivie d'un dimensionnement analytique des composants (61,4 kWc solaire et ceux de générateur biogaz de 15kVA). La validation technique et la viabilité économique ont été confirmées par simulation informatique (Logiciel HOMER Pro), permettant d'optimiser le mix énergétique.

La configuration optimale retenue comprend 100 panneaux photovoltaïques de 620 Wc et un système de valorisation des déchets organiques en biogaz. Ce couplage permet une production hybride où le solaire assure la base diurne et le biogaz complète le stockage par batteries pour la demande nocturne.

Sur le plan financier, ce projet permet une économie annuelle de plus de 6 000 USD en frais de carburant. Sur le plan social, il transforme l'hôpital en une structure autonome et écologique, sécurisant les interventions médicales d'urgence indépendamment des pannes de réseau.

Mots-clés : Système hybride, Photovoltaïque, Biogaz, Autonomie énergétique, Mukongola.

Abstract

This work presents the design and simulation of a hybrid energy system (solar photovoltaic and biogas) for the Mukongola General Reference Hospital in Kabare. The objective is to mitigate the instability of the public power grid and reduce the costly dependence on fossil fuels, thereby ensuring sustainable energy autonomy.

The research aims to size a hybrid solution capable of meeting a daily energy demand of 222.4 kWh. The study seeks to ensure the continuity of vital medical services (surgery, maternity, medical cold chain) through a clean and resilient energy source.

The study is based on a field survey for the energy audit, followed by an analytical sizing of the components (61,4kWp solar and biogas generator 15kVA). Technical validation and economic viability were confirmed through computer simulation using HOMER Pro software, allowing for the optimization of the energy mix.

The optimal configuration selected includes 100 photovoltaic panels of 620Wp and a system for converting organic waste into biogas. This coupling enables a hybrid production where solar power provides the daytime base and biogas complements battery storage to meet nighttime demand.

On a financial level, this project allows for an annual saving of over 6,000USD in fuel costs. On a social level, it transforms the hospital into an autonomous and ecological facility, securing emergency medical interventions regardless of grid failures.

Keywords: Hybrid system, Photovoltaic, Biogas, Energy autonomy, Mukongola.

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
0. Introduction générale	1
0.1. Identification et formulation du problème	1
0.2. Questions de recherche.....	2
0.3. Formulation des hypothèses	3
.1. Justification du choix du sujet et motivations	3
0.4. Énoncé des objectifs de recherche	3
0.4.1. L'objectif général.....	3
0.4.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques	4
0.5. Méthodologie et délimitation du travail	5
a) Méthodologie	5
b) Délimitation du travail	5
0.6. Subdivision du travail.....	5
Chapitre 1 GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES PHOTOVOLATAIQUE-BIOGAZ.....	6
1.1 Présentation de l'hôpital générale de référence de Mukongola	6
1.1.1 Historique de l'HGR.....	6

1.1.2	Situation géographique	7
1.1.3	Situation démographique	8
1.1.4	Carte postale de l'hôpital général de référence de Mukongola [4].....	8
1.1.5	Infrastructures	8
1.2	Etude technologique du système photovoltaïque	9
1.2.1	L'énergie solaire [5].....	9
1.2.2	Effet photovoltaïque [6].....	10
1.2.3	Eléments d'un système photovoltaïque [5].....	10
1.2.4	Potentiel de l'énergie solaire en RDC et au Sud-Kivu [10].....	18
1.3	Généralités sur le biogaz	20
1.3.1	Biomasse	20
1.3.2	Méthanisation [14].....	22
1.3.3	Digesteur de biogaz [15].....	23
1.3.4	Valorisation de biogaz [16].....	26
1.3.5	Avantage du biogaz [14].....	26
1.4	Conclusion partielle.....	27
Chapitre 2 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE SOLAIRE-BIOGAZ		28
2.1	Evaluation des besoins énergétiques	28
2.1.1	Liste des différentes appareils électriques/ équipements utilisés à l'hôpital	28
2.1.2	Calcul de l'énergie à produire.....	34
2.2	Dimensionnement du système photovoltaïque.....	36
2.2.1	Calcul de la puissance crête de panneaux	36
2.2.2	Calcul du nombre de panneaux.....	37
2.2.3	Dimensionnement du régulateur	38
2.2.4	Dimensionnement de système de stockage pour les panneaux solaires	40
2.2.5	Dimensionnement de l'onduleur.....	42
2.3	Dimensionnement du système à biogaz	44
2.3.1	Évaluation de la biomasse disponible ou intrants	44

2.3.2	Calcul du volume de digesteur.....	45
2.3.3	Dimensionnement pour la production d'électricité via générateur à gaz	48
2.4	Conclusion partielle.....	49
Chapitre 3 LA SIMULATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS		51
3.1	Présentation des outils de simulation	51
3.1.1	Présentation du logiciel HOMER Pro (hy)	51
3.1.2	Présentation du site	52
3.2	Construction du système hybride de génération de l'énergie	54
3.3	Simulation et interprétation.....	56
3.4	Coût d'implémentation de notre système hybride solaire et biogaz	60
3.5	Discussion et interprétation des résultats	61
3.5.1	Analyse de la stabilité et de la fiabilité de la fourniture électrique.....	61
3.5.2	Évaluation de la réduction des coûts opérationnels par rapport au diesel	62
3.6	Conclusion partielle.....	63
CONCLUSION GÉNÉRALE		64
Bibliographie.....		66
Annexe A		69
A.1	Présentation de quelques images et quelques matériels de l'hôpital générale de Mukongola	69
A.1.1	Représentation de l'hôpital de Mukongola.....	69
	.....	69
	.....	69
	.....	70
A.1.2	Quelques matériels de l'hôpital de Mukongola.....	70
	.....	71
	.....	71
A.2	Représentation des appareils à utiliser dans notre travail	71

Liste des abréviations

HGR : Hôpital Général de Référence.

FBI : Fond de Bien-être Indigent.

CS : Centre de Santé.

UNTI : Unité Nutritionnelle Thérapeutique Intégrée.

ZS : Zone de Santé.

PNKB : Parc National de Kahuzi-Biega.

FOSA: Formation Sanitaire.

PNLP : Programme National de Lutte contre le Paludisme.

CDV/DCIP : Conseil et Dépistage Volontaire / Dépistage et Conseil à l'Initiative du Prestataire.

PTME : Prévention de la Transmission Mère-Enfant.

SAA : Soins et Accompagnement (ou Service d'Appui Administratif selon le contexte hospitalier local).

PF : Planification Familiale.

AG : Administrateur Gérant.

MD : Médecin Directeur.

CE : Consultation Externe.

BCZ : Bureau Central de Zone.

UV : Ultraviolet.

IR : Infrarouge.

PV : Photovoltaïque.

DC : Courant Continu

AC : Courant Alternatif

HT : Haute Tension.

MT : Moyenne Tension.

Wc / kWc : Watt-crête / Kilowatt-crête (Unité de puissance des panneaux solaires).

kWh / Wh : Kilowatt-heure / Watt-heure (Unité d'énergie).

USD : United States Dollar (Monnaie utilisée pour les bilans financiers).

SNEL : Société Nationale d'Électricité.

HGR : Hôpital Général de Référence (Bien que présent dans le texte et le titre, il est parfois utilisé sans définition préalable dans certaines sections).

EVA : Ethylène-Vinyle-Acétate (Matériau encapsulant des cellules solaires).

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur (Utilisé pour les calculs du biogaz).

DoD : Depth of Discharge / Profondeur de décharge (Mentionné dans les calculs de batteries).

BMS : Battery Management System (Système de gestion des batteries).

DMAP : Data Management and Analysis Plan (Utilisé dans les titres des figures de simulation).

GD : Générateur Diesel (Utilisé dans les légendes de simulation).

O et M : Opération et Maintenance.

FC : Franc Congolais.

BP : Boîte Postale.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les différentes technologies des panneaux photovoltaïques [5]	13
Tableau 2 : les onduleurs monophasés.....	16
Tableau 3: Représentation d'ensoleillement au niveau de Mukongola au sud-kivu [11].....	19
Tableau 4 : composant de biogaz.....	23
Tableau 5: Estimation de l'énergie journalière du bloc opératoire.....	29
Tableau 6: Estimation de l'énergie journalière du bloc d'obstétrical (maternité).....	30
Tableau 7: Estimation de l'énergie journalière du bloc d'imagerie médical.	31
Tableau 8: Estimation de l'énergie journalière du bloc de laboratoire.....	31
Tableau 9: Estimation de l'énergie journalière du bloc de malade, soins intensifs et pédiatrie.	32
Tableau 10: Estimation de l'énergie journalière du bloc des services généraux.	33
Tableau 11: Estimation de l'énergie journalière cas des infirmiers.....	34
Tableau 12: Estimation de l'énergie journalière total générale.	34
Tableau 13 : Représentation de tension du système [20].....	41
Tableau 14 : Représentation des déchets disponible.....	45
Tableau 15 : les composant utilisé et ses puissances	56
Tableau 16 : Taux de production d'énergie	58
Tableau 17 : Les paramètres de fonctionnement de la production pv	58
Tableau 18 : Représentons les paramètres de fonctionnement de générateur à gaz	59
Tableau 19 : représentation du coût de notre système	61

Liste des figures

Figure 1-1 : système photovoltaïque avec un système de stockage par batterie [6]	11
Figure 1-2: Représente la cellule photovoltaïque [4].....	12
Figure 1-3: module photovoltaïque [6] [4]	13
Figure 1-4 : représentation de l'onduleur.....	15
Figure 1-5 : onduleur couplé au réseau.....	16
Figure 1-6 : schéma d'un onduleur triphasé [4]	18
Figure 1-7 : Représentation de la carte de potentiel du Mukongola, sud-kivu et ceux de la rdc [11].....	18
Figure 1-8 : représente la structure de la biomasse [14].....	21
Figure 1-9 : représentation de déchet [15]	22
Figure 1-10 : Digesteur à dôme flottant [16]	24
Figure 1-11: Production de biogaz en fonction de la température.....	25
Figure 1-12 : Groupe électrogène qui produit de l'électricité [18].....	26
Figure 3-1 : représentation de niveau d'insolation	52
Figure 3-2 représentation de la température	53
Figure 3-3 : représentation de biomasse	54
Figure 3-4 représentation de la production journalière.....	54
Figure 3-5 : construction du système hybride.....	55
Figure 3-6 : interprétation de résultat par ce tableau	57
Figure 3-7 : Représente l'allure de la production de notre système	57
Figure 3-8 : Présentation DMAP de production d'énergie par le PV	58
Figure 3-9Présentation DMAP de production d'énergie grâce au générateur à biogaz	59
Figure 3-10 : Présentation DMAP de production d'énergie par le GD.	59
Figure 3-11 : Production d'énergie pendant la journée.	60
Figure 3-12 : représentation du coût de notre système	60

0. Introduction générale

De nos jours, l'accès à une énergie fiable et durable est devenu un besoin fondamental, surtout dans les secteurs sensibles comme la santé. Les hôpitaux en particulier, nécessitent une alimentation continue en électricité pour faire fonctionner les équipements médicaux, conserver les médicaments à des températures appropriées, assurer l'éclairage dans les salles d'opération, les services d'urgence, les maternités et les services administratifs. Dans plusieurs régions du monde, et plus particulièrement dans certaines zones rurales ou semi-urbaines des pays en développement, les infrastructures électriques sont encore insuffisantes [1]. C'est le cas de la région de Mukongola, où l'Hôpital Général de Référence fait face à des problèmes fréquents de coupures d'électricité, d'insuffisance de puissance et de dépendance à une source d'énergie centrale souvent instable. Cela limite considérablement la qualité des soins offerts à la population locale [1].

Pour répondre à ce besoin, il devient nécessaire de chercher d'autres sources d'énergie pouvant nous donner la solution la plus fiable ou efficace, notamment celles qui utilisent les ressources naturelles disponibles localement. L'énergie solaire et le biogaz apparaissent comme deux options complémentaires, durables et économiques pouvant aider à la structure de santé de Mukongola. Le présent travail vise donc à concevoir et simuler un système énergétique hybride combinant les deux sources (Solaire Photovoltaïque et Biogaz), adapté aux besoins spécifiques de l'hôpital de Mukongola.

0.1. Identification et formulation du problème

L'hôpital général de référence de Mukongola rencontre souvent plusieurs problèmes à cause du manque d'une fourniture fiable en énergie qui pousse au mauvais fonctionnement de

certaines services de l'hôpital. Nous pouvons énumérer certains problèmes ou difficultés liés à l'électricité dont :

- **Les coupures fréquentes d'électricité** : Le réseau public ou encore le réseau de la SNEL (Société Nationale d'Electricité) est souvent instable, ce qui perturbe les activités médicales et compromet la sécurité des patients ;
- **Coût élevé de l'énergie** : L'utilisation de groupes électrogènes au gasoil, comme source de secours, engendre des coûts élevés d'achat de carburant et d'entretien. La consommation est de 15 litres par jour pendant 365 jours, au moment qu'un litre coûterait 3500fc, il faudrait donc dépenser un montant de 13912500fc soit 6048,91\$ par ans [2];
- **Manque de fiabilité** : Certains équipements essentiels ne peuvent pas fonctionner en permanence, ce qui affecte les soins, surtout en cas d'urgence ;
- **Absence d'une solution durable** [1] : Jusqu'à présent, l'hôpital ne dispose pas d'un plan d'électrification basé sur des énergies renouvelables, malgré la présence de ressources naturelles disponibles comme le soleil et les déchets organiques issus de l'activité humaine et médicale ;

0.2. Questions de recherche

Pour guider cette recherche, nous nous posons les questions suivantes :

- Quelle est la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter efficacement tous les services de l'hôpital de MUKONGOLA ?
- Comment faire pour que le système hybride puisse améliorer l'efficacité de la gestion de l'énergie électrique à l'hôpital général de MUKONGOLA ?
- Comment peut-on optimiser un système hybride solaire-biogaz à l'aide de simulations informatiques afin d'assurer une production d'énergie fiable et économique pour l'hôpital de MUKONGOLA ?

0.3. Formulation des hypothèses

- L'hôpital de Mukongola nécessiterait une quantité journalière estimée d'énergie (en kWh) qui serait déterminée par inventaire des équipements et par simulations, afin de concevoir un système hybride qui pourrait couvrir efficacement l'ensemble de ses besoins critiques.
- Le système hybride solaire-biogaz permettrait une alimentation continue en électricité grâce à la complémentarité entre l'énergie solaire, utilisée le jour, et le biogaz, exploité la nuit ou en cas de mauvais temps.
- La simulation informatique permettrait d'optimiser le dimensionnement et la configuration du système hybride solaire-biogaz, en assurant une production d'énergie qui serait stable, économique et adaptée aux besoins énergétiques de l'hôpital de Mukongola.

.1. Justification du choix du sujet et motivations

Nous avons choisi ce sujet en raison de l'insuffisance de l'énergie fournie par la SNEL, qui empêche l'hôpital de Mukongola de fonctionner normalement. Ces coupures de courant surviennent fréquemment, y compris pendant les consultations des patients, ce qui perturbe gravement les activités de l'établissement concerné.

0.4. Énoncé des objectifs de recherche

0.4.1. L'objectif général

Ce travail a pour objectif la conception d'un système destiné à l'Hôpital Général de Référence de Mukongola. L'objectif principal est de développer un système hybride capable d'assurer une fourniture d'énergie fiable et efficace, afin de garantir le bon fonctionnement de l'établissement. La simulation de ce système permettra de tester différentes hypothèses, d'identifier d'éventuels problèmes et d'apporter des améliorations, tout en prenant en compte les contraintes spécifiques propres à l'hôpital.

0.4.2. Les objectifs opérationnels/spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Analyser les problèmes énergétiques spécifiques liés à l'hôpital GENERALE DE REFERENCE DE MUKONGOLA ;
- Identifier les besoins en énergie ;
- Proposer un système hybride capable de maintenir la stabilité et fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique.

0.5. Méthodologie et délimitation du travail

a) Méthodologie

Pour ce qui concerne les méthodes que nous allons appliquer pour aboutir à la réalisation de notre travail, nous avons opté pour :

- Méthode de documentaire : cette méthode nous a permis de savoir comment faire pour aboutir à la réalisation de notre travail ;
- Technique d'interview : cette méthode nous a permis de faire un sondage sur terrain ou au niveau de l'hôpital ;
- Méthode analytique : La modélisation et la simulation du système servent ici à vérifier si l'intégration d'une solution hybride garantit l'efficacité de l'établissement, la réduction des coûts et l'amélioration de la prise en charge des patients. ;
- Méthode expérimentale : Cette approche nous a permis d'estimer la capacité du digesteur, le nombre de panneaux requis ainsi que la quantité d'énergie produite. (en kWh).

b) Délimitation du travail

Ces travaux se limite à la conception et la simulation du système hybride sans faire l'implémentation réelle.

0.6. Subdivision du travail

Le travail est subdivisé en trois chapitres, hormis l'introduction et la conclusion :

- Le premier chapitre porte sur des généralités sur les systèmes hybrides solaire-biogaz.
- Le deuxième chapitre porte sur la conception et le dimensionnement du système hybride solaire-biogaz.
- Le troisième chapitre porte sur la simulation et discussion des résultats.

Chapitre 1

GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES PHOTOVOLATAIQUE-BIOGAZ

De nos jours, face à la hausse des besoins en énergie et aux limites des réseaux électriques classiques, surtout dans les zones rurales, les systèmes hybrides combinant plusieurs sources renouvelables comme le système photovoltaïque, le biogaz, groupe électrogène, les éoliennes s'imposent comme des solutions efficaces [3]. Le système hybride solaire-biogaz, en particulier, permet d'assurer une alimentation électrique continue en tirant parti de l'abondance du soleil et des déchets organiques disponibles localement. Cette combinaison offre une alternative durable, fiable et économiquement avantageuse, notamment pour les infrastructures sensibles comme les hôpitaux.

Ce chapitre s'articule autour de trois axes principaux : la présentation de l'Hôpital Général de Référence de Mukongola à Kabare, l'étude des principes de production d'énergie photovoltaïque, et enfin, les généralités relatives biogaz.

1.1 Présentation de l'hôpital générale de référence de Mukongola

1.1.1 Historique de l'HGR

Vers les années 1954 à 1958, l'HGR MUKONGOLA était construit par le financement du FBI (Fond de Bien-être Indigent).

L'HGR Mukongola a pour origine un dispensaire fondé par les Sœurs de la Sainte Famille au sein de leur concession. Sous la direction des Sœurs Émilienne et Mariska, cette structure a initialement assuré l'administration des soins, parallèlement à trois autres dispensaires de la contrée, devenus aujourd'hui les centres de santé (CS) de Cirunga, Bugobe et MUSHWESHWE.

Au début de 1959, ce fut l'arrivée du Docteur GALLE-WART, celui-ci était chargé des consultations à travers les villages pour déceler les cas à hospitaliser et préparer les vaccinations.

En 1960, ce fut la création de la maternité, au vu du nombre croissant des parturientes et la salle de pédiatrie devenant petite. Au milieu de cette même année, un groupe de lépreux et de tuberculeux venait de SHABUNDA et occupait la salle IV actuel pédiatrie et Unité Nutritionnelle Thérapeutique intégrée(UNTI).

En 1963, la première pierre a été posé par MWAMI MPOZI accompagné de Monsieur BAUDHAR administrateur du territoire de Kabare et par le révérend Père CORNEILLE, curé à l'époque de la paroisse saint Joseph de KABARE pour la construction de la maternité.

En 1983, a vu le jour la première cession en gestion de l'hôpital à l'Archidiocèse de Bukavu (BDOM) [4].

1.1.2 Situation géographique

L'Hôpital Général de Référence de MUKONGOLA se trouve en République Démocratique du Congo dans sa partie Est, Province du Sud-Kivu, Territoire de KABARE, Groupement de KAGABI, Localité de CIDJO et implanté dans le village de KAMPAMBA. Il est situé à l'Ouest de la ville de Bukavu, à environ 20-22 km de l'HGPR de Bukavu.

- L'HGR de MUKONGOLA est la FOSA de référence primaire se trouvant dans la ZS KABARE. Qui, ce dernier s'étend sur quatre groupements à savoir : BUSHWIRA, KAGABI, CIRUNGA, BUGOBE.

Néanmoins, l'HGR de MUKONGOLA reçoit la population du groupement de MUDAKA en ZS de MITI-MURHESA.

- Administrativement, la ZS de KABARE est limitée : Au nord par la ZS de MITI-MURHESA, Au sud par la ZS de WALUNGU et NYANGEZI, A l'Est par la ZS de BAGIRA, A l'ouest par le Parc National de KAHUZI-BIEGA (PNKB).

Son relief est principalement constitué des plateaux, des collines, des vallées et des montagnes. La Zone de Santé jouit d'un climat tropical d'altitude avec influence des alizés jusqu'à 200m. La précipitation annuelle augmente de l'Est à l'Ouest 1200 à 1700 m³[source]. La température est située entre 17,7 et 18,9°C pour le mois le plus chauds. Il est à environ 1800m d'altitude.

A KABARE il y a deux saisons prédominant dont : Saison sèche qui débute au mois de mai et couvre le mois de juin, juillet et août ; Saison de pluie qui couvre le reste des mois de l'année.

1.1.3 Situation démographique

L'hôpital a en sa charge des patients issus principalement de la chefferie de KABARE, qui est occupée par un peuple à majorité « **SHI** », qui parle le dialecte « MASHI », le swahili, et le Français ; une population estimée à 242310 habitants [4].

1.1.4 Carte postale de l'hôpital général de référence de Mukongola [4].

L'Hôpital Général de Référence de MUKONGOLA est une structure étatique cédée en gestion à l'archidiocèse de Bukavu depuis 1983. Différentes conventions de collaboration ont été initiées. A titre illustratif : la convention N° DS 1257/21/078 du 25 septembre 1989 et les avenants de reconduction N° DS 1257/21/98 et N° DS 1257/21/002/2003. La dernière convention date de 2006.

Il est la structure de référence de la ZS Rurale de KABARE pour 19 formations Sanitaires dont 15 Centres de Santé parmi lesquels 2 Centres de Santé de Référence et 4 postes de santé.

Pour une capacité de 135 lits budgétisés sur 254 lits montés, hormis les 4 services traditionnels (Pédiatrie (25lits), Médecine Interne (25lits), Gynécologie (11lits), Maternité (25lits) et Chirurgie (49lits)), l'Hôpital Général de Référence de MUKONGOLA organise à son sein :

- Le service d'appui au diagnostic : laboratoire et imagerie médicale (échographie pour les examens gynécologiques et obstétricaux et la radiographie pour les incidences simples), encore rudimentaire.
- La pharmacie avec une grande dépendance extérieure (En grande partie des génériques) alimentée par le partenaire IRC via la pharmacie zonale.
- Les services spécialisés (UNTI, Lèpre et tuberculose, PNL, CDV/DCIP, PTME, Sécurité transfusionnelle, SAA, PF,)
- Les services administratifs et de finance.
- Le secrétariat informatisé ouvert pour tous.

1.1.5 Infrastructures

Sur le plan structural, ses bâtiments sont repartis en quatre blocs : le bloc-1 pour l'hospitalisation avec 4 pavillons; dont la chirurgie (P1), médecine interne femme (P2), la médecine homme (P3) et la pédiatrie-UNTI (P4), le bloc-2 pour les services administratifs qui

sont administratif-1 (la salle d'opération, la réception et perception, la pharmacie, bureau de l'AG, bureau du MD, le secrétariat et le Laboratoire, et le service de CE, administratif-2 pour la R-X, caisse, Banque de sang, salle de réunion et buanderie), et administratif-3, Bloc-3 pour le BCZ, le bloc-4 pour la maternité et le « BINYOLA » et en fin le bloc-5 pour le camp du personnel.

1.2 Etude technologique du système photovoltaïque

1.2.1 L'énergie solaire [5]

L'énergie solaire est la forme de l'énergie produite par le rayonnement de soleil, émise sous forme de lumière et de chaleur, qui atteint la terre et peut être captée pour être transformé sous forme d'énergie utilisable par l'homme. Elle provient de réaction de fusion nucléaire se produisant au cœur du soleil, où l'hydrogène se transforme en hélium en libérant d'énormes des quantités d'énergie sur la terre, cette énergie peut être exploitée des différentes manières comme :

- ✓ Par conversion photovoltaïque, où la lumière est transformée directement en électricité grâce aux cellules solaires. Ces cellules sont directement produites en silicium ou en d'autres matériaux semi-conducteurs [5];
- ✓ Par conversion thermique, où le rayonnement chauffe un fluide ou un matériau pour produire de la chaleur, utilisée directement pour générer de l'électricité ;

La nature de cette énergie est multiple car elle se manifeste sous différentes formes :

- Énergie lumineuse : c'est la lumière visible, qui éclaire la Terre et rend possible la vision et la photosynthèse des plantes.
- Rayonnements invisibles : une partie de l'énergie solaire est transportée sous forme d'ultraviolet (UV), d'infrarouge (IR) et d'autres radiations électromagnétiques.

Sur le plan scientifique, on peut dire que l'énergie solaire est essentiellement de la radiation électromagnétique dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet (≈ 100 nm) jusqu'à l'infrarouge lointain (≈ 1 mm), avec un maximum d'intensité autour de 500 nm (couleur vert-

jaune), ce qui correspond à la lumière visible [5]. La nature de l'énergie solaire est donc renouvelable, inépuisable à l'échelle humaine, propre et universelle.

1.2.2 Effet photovoltaïque [6]

L'effet photovoltaïque est un phénomène fondamental dans la conversion de l'énergie solaire en électricité. Elle se caractérise par la génération d'un courant électrique lorsque deux matériaux différents sont en contact et exposés à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique. Cet effet est principalement activé par la lumière du soleil, bien qu'il puisse être déclenché par des sources de lumière naturelle ou artificielle. Or, dans la pratique, la grande majorité des panneaux photovoltaïques utilisent exclusivement la lumière solaire comme source d'énergie. C'est le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel qui a découvert ce phénomène en 1839 alors qu'il étudiait l'interaction entre la lumière et l'électricité, marquant ainsi le début du développement de la technologie photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque commence lorsqu'un photon frappe un électron de la dernière orbite d'un atome de silicium. Ce dernier électron est appelé électron de valence s'est déplacé.

1.2.3 Eléments d'un système photovoltaïque [5]

Un système photovoltaïque est un ensemble d'équipements électriques ou électroniques qui permet de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique, de la stocker de la rendre compatible avec les appareils électriques et l'acheminer vers les charges.

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou à proximité d'un réseau, utilisation de batterie... etc. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque, dont les principaux sont :

- Les cellules solaires ou panneau solaire qui forment le champ photovoltaïque ;
- Les convertisseurs DC/DC et DC/AC pour les différentes transformations ;
- Les batteries de stockage pour réserver de l'énergie pour un besoin ultérieur.

Le système photovoltaïque se compose d'un champ de module et d'un ensemble des composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des

récepteurs. Cet ensemble appelé aussi « Balance of System » ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ des modules solaires et la charge finale, à savoir : le support rigides (fixe ou mobile) pour la pose des modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [7].

La figure 1-1 illustre les différentes parties d'un système photovoltaïque.

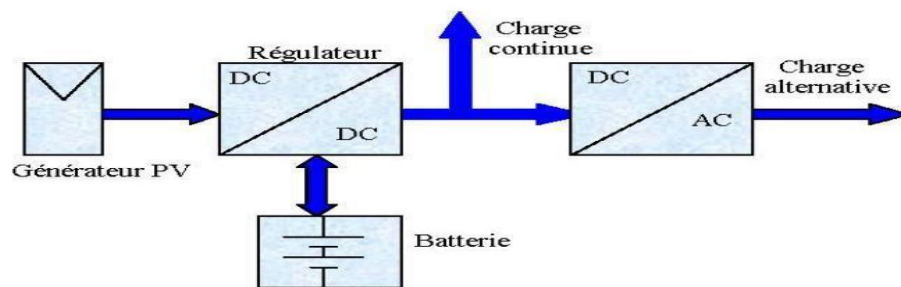


Figure 1-1 : système photovoltaïque avec un système de stockage par batterie [6]

Ainsi on peut dire qu'un système photovoltaïque est un ensemble d'un générateur photovoltaïque et des équipements de consommation.

1) Structure d'un système photovoltaïque (PV) [5] [8]

Les systèmes PV peuvent être classés selon leur mode de fonctionnement et leur connexion au réseau. Nous pouvons citer les deux types de système PV et chacun avec ses avantages dont :

- a) Le système PV autonome qui fonctionne indépendamment du réseau électrique, il est utilisé dans des zones isolées où l'électricité ne parvient pas à arriver.
- b) Le système PV raccordé au réseau possède trois configurations dont :
 - Vente totale : L'énergie produite est intégralement injectée dans le réseau public (HT ou MT), tandis que les besoins locaux sont couverts par ce même réseau
 - Autoconsommation sans stockage La production alimente prioritairement la consommation locale. Le réseau public assure l'appoint en cas de déficit ou absorbe l'excédent en cas de surplus

- **Autoconsommation avec stockage** Le surplus de production est d'abord stocké en batteries avant d'être injecté dans le réseau. Celui-ci n'intervient qu'en cas d'insuffisance simultanée de la centrale et du stockage

La différence majeure réside dans l'onduleur : en autonome, il adapte le courant aux besoins de la charge ; en réseau, il se synchronise sur les paramètres du secteur et devient bidirectionnel pour gérer les flux d'énergie [8].

2) Cellule photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules PV montées en série ou en parallèle afin d'obtenir les caractéristiques électriques voulues telles que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

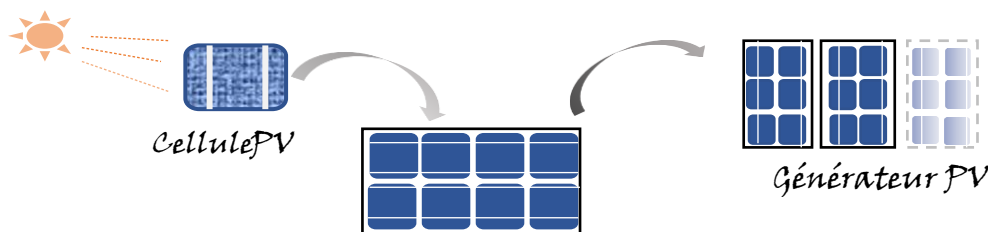


Figure 1-2: Représente la cellule photovoltaïque [4]

a. Principe de fonctionnement [7] [5]

Une cellule PV est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons) produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés" : Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. L'ensemble des cellules photovoltaïques reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque et la mise en commun de ces modules en grande quantité constitue un panneau solaire. L'énergie produite sera utilisée selon le besoin : soit consommée directement

soit stockée dans des batteries d'accumulateurs. Voici une illustration du principe de fonctionnement d'un module photovoltaïque présentée à la figure (I.3)

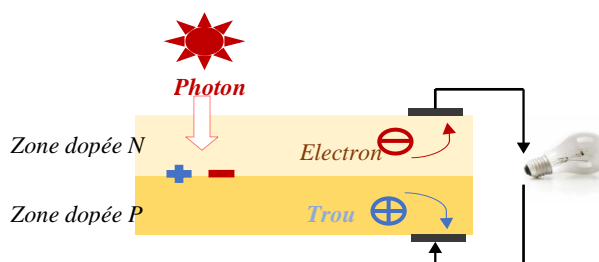

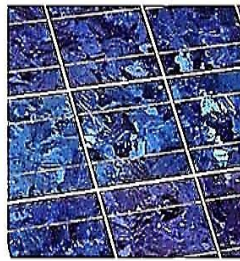


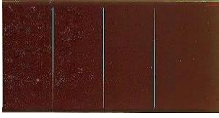
Figure 1-3: module photovoltaïque [6] [4]

b. Différents types des cellules photovoltaïques [5]

Les cellules photovoltaïques sont les composants de base des panneaux solaires, capables de convertir directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Tableau 1 : Les différentes technologies des panneaux photovoltaïques [5]

Cellules en silicium cristallin	rendement	Durée de vie	Avantage	Inconvénients	dessin
Cellules monocristallines	18–24%	25 à 30 ans	Très bonne efficacité énergétique ;	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse à fabriqué • Rendement plus faible 	
Cellules à couches Polly-cristallines	15–18 %	25 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Moins coûteuses à fabriquer • Bonne fiabilité et 		

			<i>robustesse</i>		
Cellules en Silicium amorphes	6–10 %	10 ans	Facile à Fabriquer	Mauvais Rendement	

A. Régulateurs [9]

Le régulateur est le noyau du système de captage photovoltaïque. C'est un dispositif qui sert de liaison avec la charge. Principalement pour notre cas il servira à extraire la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. Les régulateurs de charge se divisent en deux catégories : les régulateurs PWM et les régulateurs MPPT

➤ **Les régulateurs de charge PWM** (Pulse Width Modulation) : ils modulent la largeur des impulsions de tension envoyées à la charge, ce qui permet de réguler la tension de charge. Les régulateurs PWM sont moins chers et plus simples que les régulateurs MPPT, mais ils sont également moins efficaces.

- Ils sont donc idéals pour les petites installations (inférieures à 150W) du fait de leur faible coût.
- Ils ne permettent pas de charger un parc batterie 12V avec un panneau dont la tension est supérieure à 23V.

➤ **Les régulateurs de charge MPPT** (Maximum Power Point Tracking), Grâce à leurs algorithmes MPPT, ils optimisent la production en suivant en permanence le point de puissance maximale du panneau.

Les régulateurs MPPT sont plus performants et maximisent la production d'énergie, mais ils s'avèrent plus coûteux et complexes que les modèles PWM.

B. Onduleurs [5]

Les onduleurs sont des dispositifs d'électronique de puissance qui convertissent l'énergie continue en courant alternatif tout en optimisant le point de fonctionnement du système.

Contrairement aux modèles classiques, ils recherchent en permanence l'efficacité maximale pour adapter la production aux besoins de la charge ou du réseau.

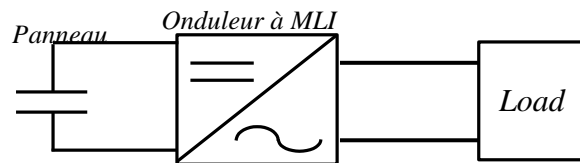


Figure 1-4 : représentation de l'onduleur

Ils sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

Trois catégories d'onduleurs sont distinguées :

- **Onduleur autonome** : c'est un système de commutation à transistors ou à thyristors, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes, la nature de la charge est importante pour cette catégorie d'onduleur.
- **Onduleur assisté (non autonome)** : c'est un système de commutation à thyristors, à fréquence fixe, dont les instants de commutations sont imposés par la charge. Son fonctionnement est réversible (redresseur et onduleur).
- **Onduleur hybride** : L'onduleur hybride est conçu pour le système hybride qui combine le solaire avec d'autres sources d'énergie renouvelables.

a) Onduleur couplé au réseau

L'onduleur couplé au réseau adapte le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

- Onduleurs modulaires (module inverter) ;
- Onduleurs centralisés (central inverter) ;
- Onduleurs string ou « de Rangée »

Les types des onduleurs couplés au réseau sont représentés à la figure 1.6 ci-dessous :

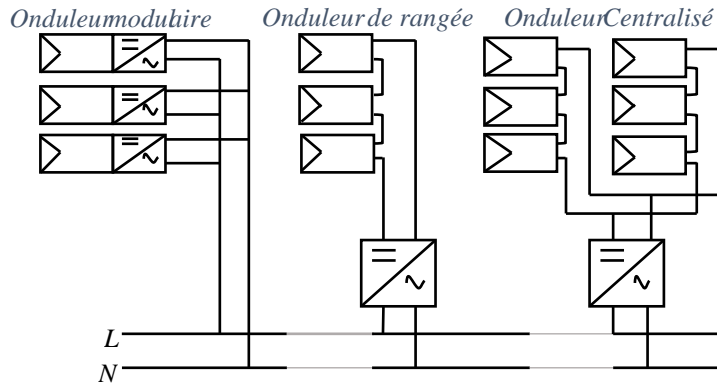
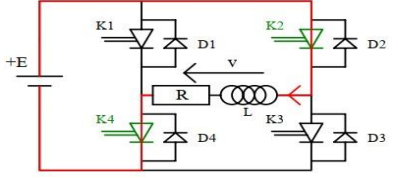
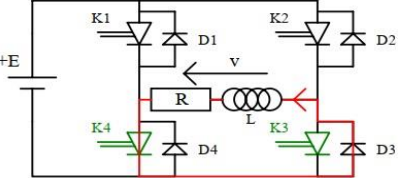


Figure 1-5 : onduleur couplé au réseau

b) Onduleur autonome monophasé : Le tableau 6 donne le principe de fonctionnement des onduleurs monophasés pour les différentes périodes de conduction des interrupteurs qui donnent le sens du courant dans la charge.

Tableau 2 : les onduleurs monophasés

$0 < t < T/2$	$K1$ et $K3$ fermés ; $K2$ et $K4$ ouverts \rightarrow $v = E (> 0)$
<p>$0 < t < t1$: phase de récupération ($i < 0$)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le courant négatif impose la conduction des diodes $D1$ et $D3$ tant qu'il reste dans le sens passant - La puissance $p = E.i$ est aussi négative 	
<p>$t1 < t < T/2$: phase active ($i > 0$)</p> <ul style="list-style-type: none"> - i s'annule et devient positif ce qui impose la conduction des interrupteurs $K1$ et $K3$ - La puissance $p = E.i$ devient positive 	
$T/2 < t < T$	$K2$ et $K4$ fermés ; $K1$ et $K3$ ouverts \rightarrow $v = -E (< 0)$
<p>$T/2 < t < t2$: phase de récupération ($i > 0$) - Ce courant positif impose la conduction des diodes $D2$ et $D4$</p> <ul style="list-style-type: none"> - La puissance $p = -E.i$ est négative 	

<p>$t_2 < t < T$: phase active ($i < 0$)</p> <ul style="list-style-type: none"> - A t_2, i devient négative et impose la conduction des interrupteurs K_2 et K_4 - La puissance $p = E.i$ devient positive 	
<p>$0 < t < \tau$: phase de roue libre ($i < 0$)</p>	<p>K_2 et K_4 fermés ; K_1 et K_3 ouverts $\rightarrow v = -E (< 0)$</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Le courant négatif impose la conduction de l'interrupteur K_4 et de la diode D_3 - La puissance $p = 0$ (pas de transfert d'énergie) 	

Les onduleurs monophasés dont le fonctionnement est décrit dans le tableau 2, sont de deux types :

- Les onduleurs de tension : la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.
- Les onduleurs de courant : la source continue impose le courant à l'entrée du convertisseur et donc à la sortie.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux.

c. Onduleur autonome triphasé

Un onduleur triphasé est réalisé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés et commander de façon à obtenir à la sortie trois phases décalées de 120° tel que visualisé à la figure 1.6.

Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un transistor commandé et d'une diode montée en antiparallèle.

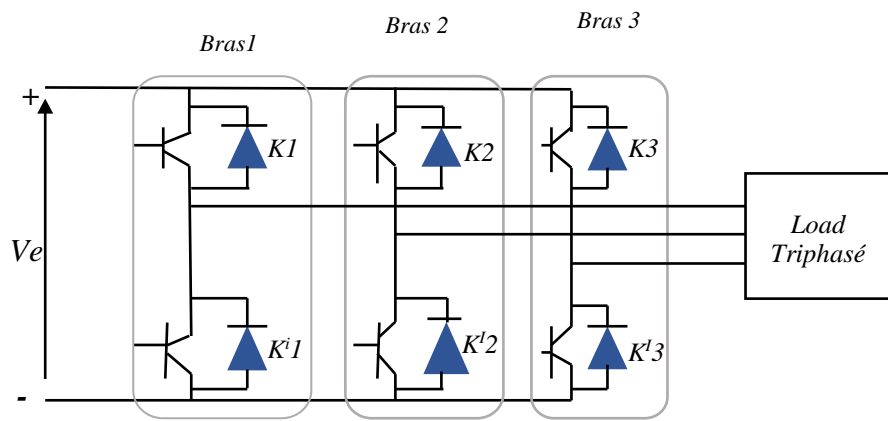


Figure 1-6 : schéma d'un onduleur triphasé [4]

Chaque interrupteur conduit durant 180° , c'est-à-dire la commande en pleine onde (180°),

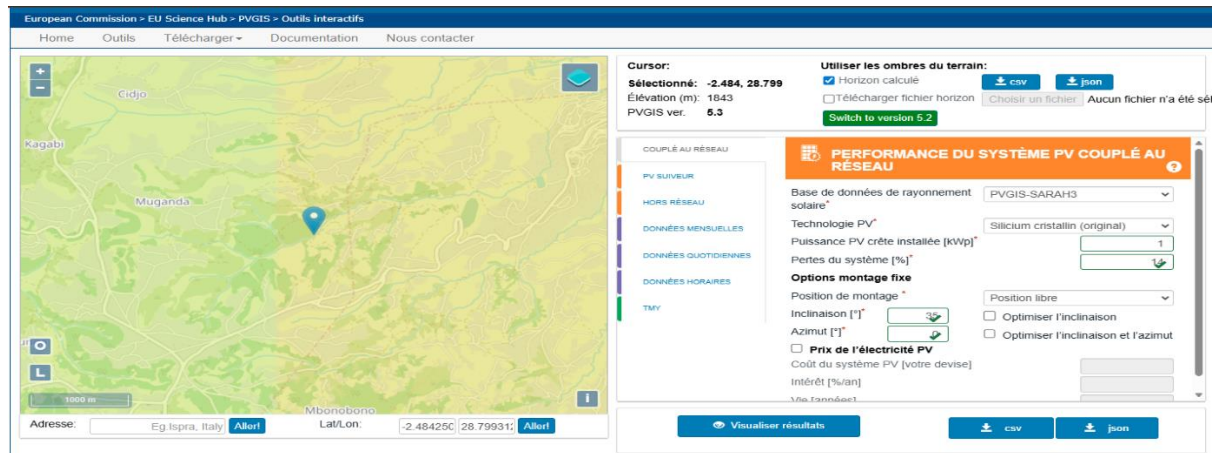
La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre.

1.2.4 Potentiel de l'énergie solaire en RDC et au Sud-Kivu [10]

Le déficit énergétique observé en RDC a des conséquences profondes sur le développement économique et social du pays. Les innovations énergétiques, telles que les panneaux solaires photovoltaïques et les systèmes de stockage, émergent comme des solutions prometteuses pour surmonter ces obstacles. La RDC possède l'un des plus grands potentiels solaires au monde, grâce à sa position géographique et à son climat tropical.

En adoptant la technologie des systèmes photovoltaïques, la RDC pourrait améliorer l'accès à l'électricité, stimuler la croissance économique et réduire sa dépendance aux combustibles fossiles.

Figure 1-7 : Représentation de la carte de potentiel du Mukongola, sud-kivu et ceux de la rdc [11]



L'interface de simulation PVGIS se divise en plusieurs sections stratégiques permettant une analyse rigoureuse des performances photovoltaïques pour le site de l'Hôpital de Munkongola. Dans la partie supérieure, le logiciel identifie précisément les coordonnées géographiques (latitude -2.484 et longitude 28.799) et l'altitude élevée de 1843 mètres, tout en intégrant l'option « horizon calculé » pour simuler l'impact réel du relief environnant de Kabare sur l'ensoleillement. Le cœur de la configuration repose sur l'utilisation de la base de données satellitaire PVGIS-SARAH3 et le choix de la technologie au silicium cristallin, avec une puissance crête de référence fixée à 1 kWp et un taux de pertes système de 14 % pour refléter les contraintes techniques réelles. Enfin, le paramétrage de l'installation en position libre avec une inclinaison de 35° permet d'optimiser l'exposition des modules, tandis que le module de calcul économique et le bouton de visualisation des résultats offrent une synthèse complète de la production énergétique mensuelle et annuelle indispensable à la validation du système hybride.

L'estimation annuelle de la production de l'énergie solaire grâce au rayonnement du soleil qui peut s'exprime en kWh/m² par jour ou par mois et ce de la production journalière.

Tableau 3: Représentation d'ensoleillement au niveau de Mukongola au sud-kivu [11]

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
140	154.9	157.2	154.56	151.26	151.04	174.15	172.77	160.26	151.84	154.44	156.13
4.52	5.31	5	5.15	4.87	5	5,61	5.57	5.34	4.9	5.1	5

1.3 Généralités sur le biogaz

Le biogaz est une source d'énergie produite par la dégradation anaérobie (sans oxygène) de matières organiques comme les déchets alimentaires, les excréments humains et animaux, les résidus agricoles, etc. Cette décomposition produit un gaz riche en méthane (CH_4), qui peut être utilisé pour faire fonctionner des groupes électrogènes, produire de la chaleur ou même alimenter des cuisines, produire de l'électricité. Le biogaz présente l'avantage de valoriser les déchets tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en réduisant les déchets dans quartier de village mais aussi dans des villes [2].

1.3.1 Biomasse

La biomasse est la matière vivante végétale et animale dont la combustion est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme. Elle remonte à la découverte du feu à la préhistoire. Elle permet de produire de l'électricité, dans des centrales biomasse, grâce à la chaleur dégagée par la combustion de matières organiques (bois, végétaux, déchets agricoles ou ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières [12].

Ces matières organiques qui proviennent des plantes sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à la chlorophylle. La biomasse correspond à la fraction biodégradable

- Des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales,
- Des produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture et des industries connexes,
- Des déchets et résidus végétaux de l'industrie (bois, issu de l'exploitation forestière, déchets organiques des industries agro-alimentaires...) et aussi des déchets ménagers [13].

Voici le schéma structural de la biomasse jusqu'à la production de biogaz :

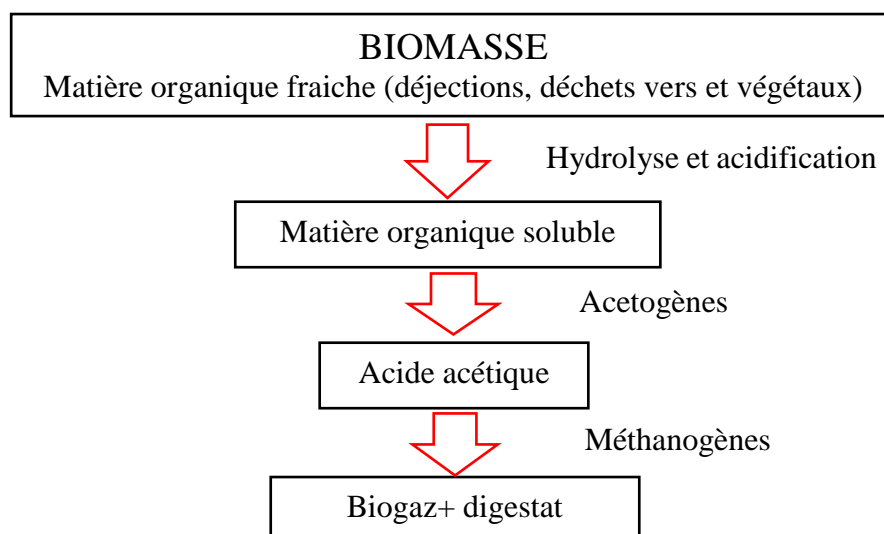


Figure 1-8 : représente la structure de la biomasse [14].

1) Types des biomasses

Il existe deux principaux types de biomasse dont :

- La biomasse primaire ;
- La biomasse secondaire.

Les origines de la biomasse se déclinent en trois catégories:

- Forestière, comme la sciure et le bois ;
- Agricole, tels que le lisier, le fumier et la paille ;
- Fermentescible, comme les boues des stations d'épuration ;
- Biomasse d'origine aquatique.

Ces organismes ont une croissance rapide et peuvent accumuler des lipides, glucides ou protéines exploitables pour l'énergie ou d'autres usages.

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- Les liquides (ex : huiles végétales, bio alcools) ;
- les gazeux (ex : biogas)

La représentation de déchet qu'on peut retrouver dans un milieu rural



Figure 1-9 : représentation de déchet [15]

2) Biomasse par combustible

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco, etc.)

1.3.2 Méthanisation [14]

La méthanisation est un processus biologique de dégradation de la matière organique, par des bactéries, en absence d'oxygène et à température constante. Ce processus conduit à la formation de deux produits :

- ✓ Un mélange gazeux composé majoritairement de méthane : le biogaz ;
- ✓ Un produit digéré contenant de la matière organique non dégradée, de la matière minérale.

On distingue classiquement quatre phases successives dont:

a) L'hydrolyse

Dans le réacteur, des micro-organismes transforment les matières complexes en molécules simples via l'hydrolyse. Cette étape peut freiner la production si les composants (lignine, cellulose) sont lents à décomposer ou peu accessibles.

b) L'acidogènes

Lors de l'acidogènes, des bactéries convertissent les molécules simples en acides gras, alcools, CO₂ et hydrogène. Ce processus ultra-rapide s'exécute 30 à 40 fois plus vite que l'étape précédente d'hydrolyse.

c) L'acétogénèse

Cette étape permet la transformation des divers composés issus de la phase précédemment précurseurs directs du méthane : l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène.

d) La méthanogène

A cette étape, l'hydrogène est normalement utilisé par les bactéries méthanogènes hydrogénophiles pour réduire le gaz carbonique en méthane tandis que l'acétate est transformé par les bactéries méthanogènes acétoclastes en méthane.

Composant typiques de biogaz sont présenté dans le tableau suivant

Tableau 4 : composant de biogaz

Composants	Symbole	Présence
Méthane	CH ₄	50%-70%
Gaz carbonique	CO ₂	30-40%
Hydrogène	H ₂	5-10%
Azote	N ₂	1-2%
Autres gaz	H ₂ O, H ₂ S	traces

1.3.3 Digesteur de biogaz [15]

La digestion anaérobie est un processus biologique naturel où des micro-organismes décomposent la matière organique en l'absence d'oxygène. Réalisée dans des milieux naturels (marécages) ou artificiels (digesteurs), elle produit simultanément du biogaz et un résidu fertile appelé digestat.

1. Types de digesteur

Il en a existé plusieurs types de digesteur en anaérobie dont nous allons essayer d'énumérer quelqu'un :

a. Digesteur à dôme fixe

Ce modèle à dôme fixe utilise un digesteur souterrain hémisphérique en maçonnerie où la décomposition des déchets génère du biogaz. La pression accumulée déplace le lisier vers un réservoir externe pour servir d'engrais, tandis que le gaz est collecté par le haut pour la cuisson ou le chauffage.

b. Tambour flottant

Ce modèle, dit « indien », associe un digesteur souterrain en maçonnerie à une cloche en acier flottante qui fait office de réservoir mobile. Le tambour monte ou descend selon le volume de gaz stocké, garantissant une pression constante pour l'utilisation domestique (cuisson, éclairage).

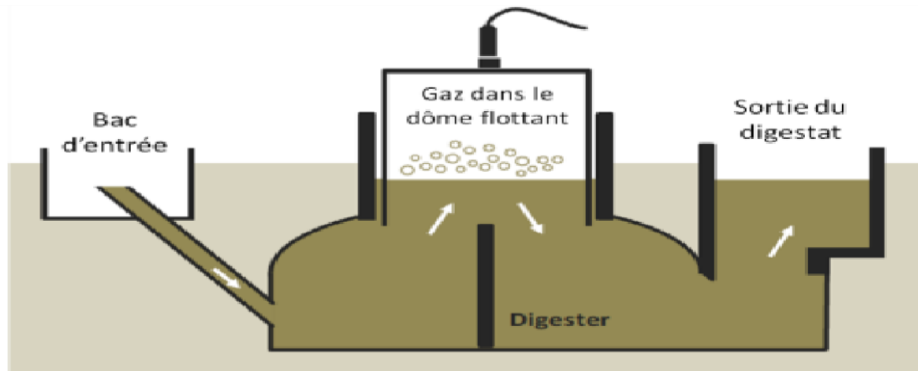


Figure 1-10 : Digesteur à dôme flottant [16]

c. Digesteur à ballon

Le digesteur à ballon utilise une membrane flexible unique servant à la fois de cuve et de réservoir. La matière circule entre les extrémités opposées, tandis que le gaz s'accumule en haut, où sa pression peut être ajustée par l'ajout de poids.

2. Caractéristiques de digestion

Les principales grandeurs qui caractérisent un réacteur de digestion anaérobie sont :

- La charge volumique appliquée : il s'agit de la quantité de DCO introduite dans le réacteur par jour et par unité de volume du réacteur. Elle permet de comparer la quantité de pollution traitée par différents types de réacteur.
- Le temps de séjour hydraulique (TSH) correspond à la durée du contact entre l'effluent et la biomasse. Il représente le rapport entre le volume du réacteur et le débit d'alimentation. Le TSH permet de connaître le volume d'effluent qu'on peut traiter chaque jour dans le réacteur.

- La quantité et la composition du gaz: la quantité de gaz peut être rapportée à la quantité de matière organique éliminée (rendement) ou au volume du réacteur (productivité). La composition du gaz est variable selon l'état du réacteur [17].

3. Les conditions de la réaction de la méthanisation [16]

La réaction de méthanisation est globalement accélérée par la chaleur mais dans le détail, ce mécanisme est plus complexe. Chaque groupe de bactéries a une température de confort différente et en dehors de ces domaines de température, il peut avoir une inhibition des réactions. Il existe trois zones de températures pour la méthanisation :

- Digestion psychrophile : c'est une réaction très lente de 4 à 25 °C
- Digestion mésophile : de 32 à 42°C : c'est la température la plus utilisée car la production de biogaz est assez rapide et le milieu est stable.
- Digestion thermophile de 50 à 57°C, la production de biogaz est rapide mais le milieu est très sensible aux variations de températures et de charges entrants.

Les courbes suivantes nous montrent un exemple de taux de production du biogaz en fonction de la température.

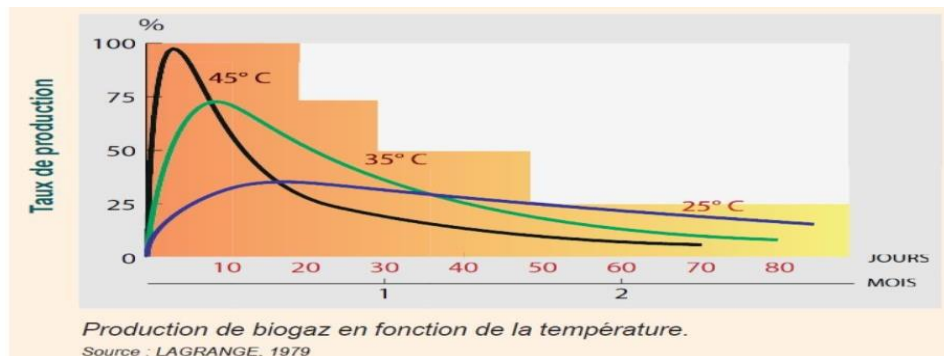


Figure 1-11: Production de biogaz en fonction de la température

Des variations journalières de 1°C peuvent perturber la digestion thermophile alors que la digestion mésophile résiste à des variations de 2 à 3°C. Dans tout le cas, les changements de température sont à éviter car les bactéries hydrolytiques et acidogènes résistent mieux aux

variations que les autres groupes de bactéries, il y a donc un risque d'accumulation d'acides dans le digesteur, donc un arrêt de la réaction.

1.3.4 Valorisation de biogaz [16]

Le biogaz alimente un moteur ou un groupe électrogène qui produit de l'électricité et de la chaleur (système de cogénération au rendement de 35 % de la production de l'électricité et de 85 % si toute la chaleur est valorisée). Dans ce cas, le biogaz doit être préalablement traité et épuré (réduction du taux de dioxyde de carbone et de l'eau pour obtenir un maximum de méthane).



Figure 1-12 : Générateur à gaz qui produit de l'électricité [18]

1.3.5 Avantage du biogaz [14]

Le biogaz s'impose comme une solution majeure de la transition énergétique grâce à sa production continue et renouvelable à partir de déchets organiques. Contrairement au solaire ou à l'éolien, il offre une source d'énergie stable et pilotable 24h/24, garantissant un approvisionnement fiable pour les ménages et les industries tout en valorisant des résidus qui seraient autrement polluants.

Sur le plan écologique, ce processus réduit les émissions de gaz à effet de serre en captant le méthane et en s'intégrant dans un cycle carbone neutre. En plus de l'énergie produite, la méthanisation génère du digestat, un fertilisant naturel précieux qui remplace les engrais chimiques, favorisant ainsi une économie circulaire et une agriculture durable.

1.4 Conclusion partielle

Ce premier chapitre a permis de décrire le cadre physique de l'Hôpital de Munkongola et de présenter les fondements théoriques des technologies solaires et l'identification de la biomasse disponible sur le site, notamment les déchets organiques nécessaires à la production du biogaz. En exposant les caractéristiques du site et le fonctionnement des équipements envisagés, nous avons posé les bases descriptives du projet. Cette étape était essentielle pour identifier les ressources disponibles, mais elle reste préliminaire. Il convient désormais de passer à la phase d'analyse approfondie dans le chapitre suivant, où nous évaluerons précisément les besoins énergétiques de l'hôpital et les capacités réelles de production afin de procéder au dimensionnement rigoureux du système hybride.

Chapitre 2 CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE SOLAIRE-BIOGAZ

Le présent chapitre est consacré à la conception technique et au dimensionnement rigoureux des composantes du système hybride proposé pour l'HGR de MUKONGOLA. Partant d'un inventaire exhaustif des besoins énergétiques de l'hôpital, nous déterminons avec précision la capacité du champ photovoltaïque, le volume du bio digesteur ainsi que la puissance du générateur à biogaz nécessaire pour garantir une autonomie énergétique totale. Cette démarche va nous permettre de faire le dimensionnement du système de stockage par batteries et le choix des convertisseurs statiques, formant ainsi une architecture cohérente capable de stabiliser la fourniture électrique et d'optimiser la gestion des flux d'énergie entre les différentes sources renouvelables.

2.1 Evaluation des besoins énergétiques

2.1.1 Liste des différents appareils électriques/ équipements utilisés à l'hôpital

Bloc de structure médical [4]

Le bloc médical est un ensemble technique complexe composé de salles de soins, de laboratoires et de bureaux de consultation. En raison de la sensibilité des équipements médicaux qu'il abrite, ce bloc nécessite une alimentation électrique stable et continue. Sa modélisation énergétique est donc prioritaire pour assurer la continuité du service de santé, particulièrement dans le cadre d'un système hybride

2.1.1.1 Bloc opératoire

En tant qu'unité de soins intensifs, le bloc opératoire présente des exigences techniques spécifiques, notamment en matière d'éclairage scialytique, de monitoring et de système de ventilation stérile. Sa dépendance énergétique est absolue : toute interruption de l'alimentation

électrique peut engager le pronostic vital. Dans le cadre d'un système hybride, ce bloc est classé comme une charge prioritaire nécessitant une continuité de service sans basculement (zéro milliseconde).

Tableau 5: Estimation de l'énergie journalière du bloc opératoire.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
aspirateur chirurgical	400	1	400	2	800
aspirateur d'anesthésie	250	1	250	3	750
climatiseur	1500	2	3000	2	6000
concentrateur d'oxygène	400	1	400	3	1200
défibrillateur	200	1	200	0,5	100
éclairage général du bloc	15	7	105	8	1200
électrocoagulation	400	1	400	1	400
lampe scialytique	200	1	200	3	600
moniteur multiparamétrique	120	2	240	2	480
ordinateur	120	2	240	2	480
réfrigérateur médical	150	1	150	24	3600
stérilisateur	800	1	800	1	800
table d'opération	500	1	500	1	500
ventilateur respiratoire	200	1	200	2	400
			6685		16510

Le bloc opératoire constitue le service le plus critique de l'hôpital avec une consommation journalière de 16,51 kWh. Sa sécurisation par le système hybride est donc impérative pour garantir le fonctionnement ininterrompu des équipements vitaux et la sécurité des interventions chirurgicales.

2.1.1.2 Bloc d'obstétrical (maternité)

En tant que service de soins permanents, la maternité nécessite une alimentation électrique stable pour le fonctionnement de dispositifs essentiels tels que les tables chauffantes, les moniteurs fœtaux et l'éclairage de soins. Dans le cadre d'un système hybride, ce bloc est

considéré comme une charge stratégique nécessitant une autonomie garantie, particulièrement pour les interventions d'urgence nocturnes.

Tableau 6: Estimation de l'énergie journalière du bloc d'obstétrical (maternité)

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
aspirateur néonatal	200	2	400	0,25	100
chauffe bébé	400	2	800	6	4800
climatiseur	700	1	700	1	700
concentrateur d'oxygène	350	1	350	2	700
éclairage	15	50	750	9	6750
lampe d'accouchement	200	2	400	3	1200
moniteur faetal	120	2	240	8	1920
ordinateur	95	2	190	6	1140
pompe à perfusion	40	2	80	4	320
réfrigérateur médical	150	1	150	24	3600
stérilisateur	800	2	1600	1	1600
table d'accouchement	600	3	1800	4	7200
total général			7460		30030

Le bloc d'obstétrique constitue une unité de soins permanents dont la consommation journalière s'élève à 30,03kWh. L'intégration de cette charge dans le système hybride garantit la sécurité des accouchements et le fonctionnement continu des équipements de soins néonataux, même en période d'instabilité du réseau électrique.

2.1.1.3 Bloc d'imagerie médicale

Le bloc d'imagerie médicale se caractérise par des équipements électroniques sensibles qui exigent une alimentation électrique d'une grande stabilité. Les variations de tension peuvent non seulement fausser les résultats des examens, mais aussi endommager les composants coûteux des appareils. Dans le cadre d'un système hybride, ce bloc nécessite un courant de haute qualité (pur sinus) pour garantir la fiabilité des diagnostics.

Tableau 7: Estimation de l'énergie journalière du bloc d'imagerie médical.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
Appareil Radio (en veille + clichés)	1500	1	1500	2	3000
Échographe	450	2	900	5	4500
PC de traitement + Écrans	300	2	600	8	4800
			3000		12300

Le bloc d'imagerie médicale représente un centre névralgique pour le diagnostic, avec une consommation journalière évaluée à 12,3kWh. L'intégration de ce service au système hybride est fondamentale pour assurer la stabilité de tension nécessaire à la protection des équipements électroniques sensibles et pour garantir la continuité des examens radiologiques indispensables aux soins.

2.1.1.4 Bloc de laboratoire

Le bloc de laboratoire se distingue par la présence d'équipements hautement sensibles, tels que les microscopes, les centrifugeuses et les réfrigérateurs de stockage des réactifs. Ces dispositifs exigent une alimentation électrique permanente et une stabilité de tension optimale pour éviter toute altération des échantillons ou des résultats d'analyse. Dans cette étude, il est considéré comme une charge stratégique nécessitant une source d'énergie fiable et continue.

Tableau 8: Estimation de l'énergie journalière du bloc de laboratoire.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
Bin marin	800	1	800	2	1600
Centrifugeuse Labo	400	2	800	3	2400
Microscope électronique	100	1	100	5	500
pool bioanalysis	450	1	450	1	450
Réfrigérateur à vaccins/sang	150	2	300	24	7200
Stérilisateur	800	1	800	4	3200
thermo Fisher	1500	1	1500	1	1500
			4750		16850

Le laboratoire affiche une consommation journalière évaluée à 16, 85 Wh. La sécurisation de ce bloc par le système hybride est fondamentale pour maintenir la chaîne de froid et garantir la précision des analyses médicales à tout moment.

2.1.1.5 Bloc de malade, soins intensifs et pédiatrie.

Ces services constituent le cœur de la prise en charge médicale permanente à l'HGR Mukongola. Tandis que le bloc d'hospitalisation assure le séjour et le rétablissement des patients, l'unité de soins intensifs et le service de pédiatrie abritent des équipements de survie critiques tels que des respirateurs, des moniteurs multiparamétriques et des couveuses néonatales. La dépendance de ces unités envers l'énergie électrique est absolue, car toute interruption de l'alimentation peut avoir des conséquences vitales immédiates.

Tableau 9: Estimation de l'énergie journalière du bloc de malade, soins intensifs et pédiatrie.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
Ampoule	15	62	930	9	8370
con-trex medical systems	1500	1	1500	1	1500
digital ultra	320	1	320	3	960
GE médical system it	120	1	120	2	240
moniteur	45	5	225	3	675
Respirateur kennesau	150	2	300	0,34	102
centrifugeuse d'oxygène	200	2	400	2	800
			3795		12647

Cet ensemble de services représente une consommation énergétique journalière globale de 12,647kWh. Leur intégration prioritaire au système hybride est fondamentale pour garantir une autonomie totale et une stabilité de tension, assurant ainsi la continuité des soins vitaux de jour comme de nuit.

2.1.1.6 Bloc des services généraux.

Les services généraux constituent l'ensemble des unités logistiques et administratives qui assurent le fonctionnement quotidien et le soutien opérationnel de l'hôpital. Ce bloc est essentiel pour maintenir l'hygiène, la gestion administrative et la sécurité de l'institution.

Ce bloc se caractérise par une diversité de charges, allant de l'éclairage aux équipements de bureau et aux moteurs de blanchisserie. Bien que certaines de ces activités ne soient pas critiques pour la survie immédiate des patients, leur bon fonctionnement est indispensable à la qualité globale des soins et à la gestion rigoureuse de l'établissement.

Tableau 10: Estimation de l'énergie journalière du bloc des services généraux.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
Accessoire imprimante	900	1	900	1	900
Lampe couloir et intérieur	15	40	600	9	5400
lampe extérieur	75	15	1125	8	9000
ordinateur	95	8	760	4	3040
Salle de corps	500	1	500	9	4500
ventilateur	120	3	360	2	720
			4695		24460

Le bloc des services généraux représente une charge énergétique journalière évaluée à 24,46kWh. Son intégration dans le système hybride solaire-biogaz permet de sécuriser les fonctions administratives et logistiques tout en réduisant considérablement les dépenses annuelles liées au carburant des groupes électrogènes.

2.1.1.7 Camp des infirmiers

Les camp des infirmiers correspondent aux logements de fonction situés au sein de la concession hospitalière. Cette infrastructure est conçue comme une maison d'habitation destinée à accueillir quelques familles des infirmiers de l'HGR Mukongola. Sa fonction principale est de garantir la proximité immédiate du personnel soignant, assurant ainsi une meilleure réactivité pour les services de garde et les urgences nocturnes. En tant qu'espace résidentiel, les besoins énergétiques de bloc diffèrent des services purement médicaux.

Tableau 11: Estimation de l'énergie journalière cas des infirmiers.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Énergie journalière
chargeurs	15	23	345	3	1035
fer à repasser	2000	4	8000	0,5	4000
lampe	12	60	720	8	5760
mixeur	15	15	225	0,3	67,5
pc portable	95	23	2185	6	13110
réfrigérateur	200	5	1000	24	24000
télévision	150	19	2850	6	17100
			15325		65072,5

Le bloc destiné aux logements des infirmiers présente une consommation énergétique journalière de 65,072kWh. L'intégration de cette charge domestique au système hybride est essentielle pour assurer le confort et la sécurité des familles du personnel soignant, garantissant ainsi leur disponibilité immédiate et leur réactivité lors des interventions d'urgence nocturnes à l'hôpital.

2.1.1.8 Total générale

Après avoir analysé les charges spécifiques de chaque bloc fonctionnel, nous synthétisons ici le bilan de puissance ainsi que l'énergie journalière nécessaire au fonctionnement de l'hôpital. Cette caractérisation de la demande est cruciale pour garantir la fiabilité du système de production et assurer la continuité des soins dans toutes les unités de santé.

Tableau 12: Estimation de l'énergie journalière total générale.

Désignation des équipements	Puissances unitaire en w	Quantité	Puissance total	Durée d'utilisation	Energie journalière
TOTAL GENERALE			45710		177869,5

2.1.2 Calcul de l'énergie à produire

Après avoir évalué l'énergie journalière consommée par l'HGR Mukongola, il est indispensable de déterminer l'énergie réelle à produire (E_p) en tenant compte des pertes intrinsèques au système. Conformément aux règles de l'art du dimensionnement des systèmes autonomes, nous appliquons un coefficient de sécurité de 25 % (soit un facteur de 1,25) [19]. Ce surplus permet

de compenser les pertes par effet Joule dans les câblages, le rendement de conversion des onduleurs ainsi que les pertes liées au stockage.

Le calcul de la consommation énergétique globale a été effectué en suivant les conventions de calcul de puissance et d'énergie électrique, dont l'expression mathématique est donnée ci-après [19] :

$$E_p = E_c + (25\% * E_c) \quad (1)$$

Pour illustrer l'application de cette formule, nous nous appuyons sur les données collectées lors de notre inventaire technique. Cette démarche permet de traduire les besoins réels de l'institution en valeurs numériques exploitables pour le dimensionnement :

$$E_p = 177869,5 + (0,25 * 177869,5)$$

$$\Rightarrow E_p = 222336,875 \text{ watt} - \text{heure}$$

Ainsi, l'énergie totale à produire par notre système s'élève à 222 336,875 Wh, soit une valeur arrondie de 222,4 kWh. Pour satisfaire cette demande, nous exploitons une configuration hybride associant le solaire photovoltaïque et le biogaz. Dans cette architecture, la source solaire est définie comme prioritaire pour couvrir les charges diurnes. La source biogaz intervient comme unité secondaire de secours (back-up), prenant le relais lors des périodes de faible ensoleillement ou durant la nuit afin de garantir la continuité de service.

L'architecture du système de production retenue pour l'Hôpital Général de Référence de Mukongola repose sur une stratégie d'hybridation optimisée. Afin de garantir une disponibilité énergétique permanente tout en maximisant l'exploitation des ressources renouvelables locales, les sources de production sont hiérarchisées comme suit :

- Source primaire (photovoltaïque) : Le champ solaire est dimensionné pour couvrir l'intégralité (100 %) de la demande énergétique journalière projetée. Cette source constitue l'unité de base du système, assurant la production d'énergie durant les périodes d'ensoleillement et la recharge du parc de batteries pour les besoins nocturnes.

- Source secondaire (biogaz) : Le générateur à biogaz est intégré au système en tant qu'unité de soutien et de régulation. Son rôle est double : il intervient d'une part comme appoint stratégique lors des pics de demande (heures de pointe) dépassant la capacité instantanée du champ solaire, et d'autre part comme source de secours (back-up) pour pallier les déficits de rayonnement ou l'épuisement du stockage.

2.2 Dimensionnement du système photovoltaïque

Cette partie de dimensionnement du système photovoltaïque constitue notre réponse technologique pour l'électrification de l'HGR de Mukongola. Cette phase repose sur l'exploitation du gisement solaire local, comme l'irradiation dans notre site.

Cette section est consacrée au dimensionnement des composants critiques de la chaîne de production photovoltaïque. La détermination de la capacité du champ solaire repose impérativement sur les spécifications techniques du module photovoltaïque retenu. Avant de procéder aux calculs de configuration, il convient donc de définir les caractéristiques électriques et physiques du panneau de référence qui servira de base à notre installation PV :

- La puissance maximale (P_{max}) ;
- Tension de circuit ouvert (U_{cc}) ;
- Courant de court-circuit (I_{sc});
- Facteur de forme (FF) appelé aussi facteur d'idéalité ;
- Rendement de conversion [19].

Après avoir donné les caractéristiques des panneaux solaires, nous pouvons commencer par faire le dimensionnement.

2.2.1 Calcul de la puissance crête de panneaux

Pour calculer la puissance crête P_c , nous allons procéder de la manière suivante :

$$P_c = \frac{E_j}{H_i * PR} \quad (2)$$

- Où : E_j est l'énergie journalière
- H_i est l'irradiation journalière minimale
- Pr est rendement

En tenant compte d'une énergie journalière de 222336,875Wh, une irradiation journalière minimale de 4,52kWh/m²/jour et un rendement de 80%, la puissance crête obtenue à l'aide de la relation (2) vaut :

$$P_c = \frac{222336,875}{4.52h * 80\%} Wh = \frac{222336,875}{3,616} Wh$$

$$\Rightarrow P_c = 61486,96Wc$$

2.2.2 Calcul du nombre de panneaux

La détermination du nombre de modules permet de matérialiser la puissance crête nécessaire en une configuration physique adaptée aux contraintes d'espace de l'hôpital. Cette étape est indispensable pour concevoir le schéma de câblage série-parallèle compatible avec les caractéristiques techniques des onduleurs hybrides.

La détermination du nombre total de modules nécessaires à l'alimentation de l'Hôpital Général de Référence de Mukongola repose sur le rapport entre la puissance crête globale du champ solaire et la puissance unitaire d'un panneau de référence. Le calcul du nombre de panneaux (N_p) est ainsi établi selon la relation mathématique suivant :

$$N_p = \frac{P_c}{P_{mod}} \quad (3)$$

À partir de la puissance crête totale calculée pour l'énergie à produire, soit 61 486,96Wc, nous procédons à la détermination du nombre d'unités nécessaires pour constituer le champ solaire. En optant pour un module photovoltaïque de référence présentant une puissance unitaire de

620Wc, le calcul du nombre de panneaux (N_p) s'établit par le rapport entre la puissance totale requise et la puissance nominale d'un seul module :

$$\Rightarrow N_p = \frac{61486,96}{620} w_c = 99,17 \text{ Panneaux}$$

Par mesure de sécurité et pour respecter la symétrie du couplage électrique, nous arrondissons ce résultat à l'unité supérieure, soit un total de 100 panneaux photovoltaïques. Cette configuration permet d'assurer une puissance installée réelle légèrement supérieure à la puissance théorique, garantissant ainsi la fiabilité de l'alimentation de l'HGR Mukongola même lors des phases de faible ensoleillement.

L'interconnexion des 100 modules photovoltaïques de 620Wc est conçue selon une architecture série-parallèle, optimisée pour répondre aux exigences techniques du régulateur de charge. Le choix de ce couplage vise à maintenir la tension d'entrée du champ solaire (V_{mp}) à l'intérieur de la plage de recherche du point de puissance maximale (MPPT), tout en limitant l'intensité totale pour protéger les composants du système.

2.2.3 Dimensionnement du régulateur

Le dimensionnement du régulateur repose sur une architecture à haute tension de 600V pour le champ solaire, choix stratégique permettant d'optimiser le transport de l'énergie pour une puissance de 61,48kWc. Cette configuration, couplée à des onduleurs-chargeurs triphasés, assure l'interface avec un parc de batteries Lithium BYD en 48V. L'adoption du 600V vise ici à minimiser les pertes en ligne et la section des conducteurs avant la conversion vers le palier de stockage. Le régulateur garantit ainsi une gestion intelligente de la charge tout en sécurisant l'intégrité des accumulateurs.

2.2.3.1 Calcul du courant nominal (I_{nom})

Le calcul du courant nominal permet de dimensionner les protections en exploitant une architecture à 600V pour minimiser les pertes de transport. Cette étape est cruciale pour quantifier l'intensité réelle avant de convertir la puissance de 62kWc vers le palier de stockage de 48V.

Après avoir justifié les paliers de tension du système, nous procédons à la détermination des intensités de fonctionnement. Cette étape consiste à distinguer le courant nominal d'entrée (I_e), lié au transport de l'énergie à 600 V, du courant nominal de sortie (I_s), dédié à la charge du parc de batteries en 48 V.

a. Calcul du courant nominal d'entrée (I_e)

Ce premier calcul permet de déterminer l'intensité circulant entre le champ photovoltaïque et les régulateurs. En exploitant la haute tension de 600V, l'objectif est de quantifier la réduction du courant de transport afin de valider le choix des conducteurs de faible section pour une puissance de 62kWc.

$$I_{nom} = \frac{Pc}{U_{PV}} = \frac{61486,96}{600} = 102,47A \quad (4)$$

b. Calcul du courant nominal de sortie (I_s)

À l'inverse de l'entrée, le calcul du courant de sortie définit l'intensité réelle injectée dans le parc de stockage après conversion. Ce résultat est crucial pour dimensionner la capacité de charge vers les batteries Lithium BYD sous 48 V et déterminer le nombre de régulateurs à monter en parallèle pour gérer le flux énergétique global.

$$I_{nom} = \frac{Pc}{U_{bat}} = \frac{61486,96}{48} = 1280,91A \quad (5)$$

- ❖ Afin d'assurer une gestion optimale de la charge des batteries, le courant total issu du champ solaire doit être réparti sur plusieurs unités de régulation. Pour un modèle de régulateur standard de 100 A, le calcul du nombre d'appareils à installer s'effectue selon la relation suivante, garantissant ainsi la sécurité thermique des composants :

$$Nr = \frac{1280,91}{100}A = 12,8 \text{ regulateurs, soit } 13 \text{ regulateurs} \quad (5)$$

Le dimensionnement théorique aboutit à la nécessité d'installer 13 unités de régulation montées en parallèle pour supporter l'intensité totale de charge du parc de batteries. Plutôt qu'une simple division du nombre de modules, l'architecture retenue repose sur la segmentation du champ solaire en 13 sous-champs indépendants. Chaque sous-champ est constitué de chaînes de panneaux (strings) raccordées en série pour atteindre la tension de service de 600 V, puis couplées en parallèle pour fournir la puissance unitaire admissible par chaque régulateur. Cette configuration garantit une redondance du système et optimise le suivi du point de puissance maximale (MPPT) par section du générateur solaire.

2.2.4 Dimensionnement de système de stockage pour les panneaux solaires

Afin de garantir la stabilité et la fiabilité opérationnelle de notre système hybride, il est indispensable de procéder à un dimensionnement rigoureux de l'unité de stockage d'énergie. Cette section est spécifiquement dédiée au dimensionnement du système de stockage de l'alimentation de l'hôpital, organe central pour assurer la continuité des soins durant les périodes d'absence de source primaire.

2.2.4.1 Consommation nocturne

La consommation nocturne constitue le paramètre le plus contraignant pour le système de stockage. À l'HGR de Mukongola, elle est estimée à environ 30% de la charge globale journalière. Pour garantir la stabilité de l'alimentation durant cette période, le système hybride propose une gestion intelligente : l'utilisation du parc de batteries couplée à un appoint par le groupe électrogène à biogaz lors des pointes de demande nocturnes. Cette approche permet de limiter la profondeur de décharge des batteries, augmentant ainsi leur durée de vie opérationnelle.

2.2.4.2 Types de batteries solaire

Le stockage de l'énergie produite par le champ photovoltaïque repose sur l'utilisation d'accumulateurs électrochimiques, dont le choix technologique conditionne la durée de vie et le rendement global de l'installation de l'HGR Mukongola dont :

- **Plomb-acid** : C'est la solution la plus moins chère mais la plus contraignante, car elle nécessite un entretien régulier (ajout d'eau) et une ventilation stricte à cause des émanations de gaz toxiques
- **AGM** : C'est une batterie étanche et sans entretien qui supporte bien les courants élevés, mais elle s'use rapidement si on la décharge profondément chaque jour.
- **Gel** : Conçue spécifiquement pour le solaire, elle utilise un électrolyte figé qui lui permet de mieux résister aux cycles de décharge quotidiens et aux variations de température sans entretien.

- Lithium : C'est la technologie la plus performante et rentable sur le long terme, offrant une durée de vie 5 fois supérieure aux autres et permettant d'utiliser la quasi-totalité de l'énergie stockée sans dégradation.

Pour le stockage de l'énergie, notre choix s'est porté sur la technologie des batteries au lithium (LiFePO4). Ce choix se justifie par leur efficacité énergétique supérieure et leur densité énergétique élevée, permettant une optimisation significative de l'espace d'installation grâce à leur compacité. En outre, leur grande résistance aux cycles de décharge profonde garantit la longévité du système. Nous avons retenu la marque BYD, reconnue pour la fiabilité de ses solutions de stockage stationnaire.

2.2.4.3 Choix de la tension du parc de batteries en fonction de la puissance

Tableau 13 : Représentation de tension du système [20]

Puissance de crête du système (W) ▼	Tension du parc recommandée (V) ▼	cellule ▼
De 0 à 1000W	12V	36
De 1000 à 2000W	24V	48
De 2000W au-delà	48V	144

Le choix d'une tension de service de 48V pour le parc de stockage ne repose pas uniquement sur la puissance installée, mais résulte d'une analyse multicritère de l'énergie quotidienne à stocker. Cette configuration permet de limiter l'intensité du courant de décharge tout en optimisant l'autonomie du système face au degré de décharge autorisé pour les batteries Lithium BYD.

2.2.4.4 Dimensionnements des batteries

Le dimensionnement du parc de batteries constitue le garant de la sécurité énergétique des soins en palliant l'instabilité de la ressource solaire. Cette architecture de stockage permet de convertir une production journalière variable en une réserve d'énergie constante, assurant ainsi le fonctionnement ininterrompu des équipements médicaux essentiels.

La capacité totale des accumulateurs est calculée selon la relation suivante, intégrant la consommation journalière et la profondeur de décharge [20] :

$$C_{batterie} = \frac{E_{autonomie} * 1000}{V_{système} * DOD * \eta_{bat}} \quad (6)$$

$$C_{batterie} = \frac{222336,875}{48 * 0,8 * 0,9} = \frac{222336,875}{34,56} = 6433,35Ah$$

À partir de la capacité totale déterminée, le nombre d'unités à coupler en parallèle est calculé en utilisant des modules de 200 Ah comme capacité unitaire de référence. Cette configuration permet d'atteindre l'autonomie énergétique requise tout en respectant les spécifications techniques des batteries de stockage.

Nombre de batteries en parallèle :

$$N_p = \frac{C_{batterie}}{C_{unitaire}}$$

$$N_p = \frac{6433,35}{200} = 32,16 \text{ batteries, soit } 33 \text{ batteries}$$

Compte tenu d'une tension de service du parc de stockage fixée à 48 V et d'une tension unitaire de batterie également de 48 V, le nombre d'unités à coupler en série est égal à un, résultat du rapport entre la tension nominale du système et celle d'un seul module.

2.2.5 Dimensionnement de l'onduleur

L'onduleur constitue l'élément central de la chaîne de conversion. Son rôle est de transformer le courant continu (DC) issu des batteries ou des panneaux en courant alternatif (AC) de 400 V triphasé, compatible avec les équipements médicaux de l'hôpital.

2.2.5.1 Détermination de la puissance nominale

Le dimensionnement de l'onduleur doit non seulement couvrir la puissance de crête identifiée 61486,96Wc, mais aussi supporter les courants d'appel lors du démarrage des moteurs (réfrigérateurs médicaux, centrifugeuses, etc.).

La puissance apparente nécessaire (Sva) se détermine de la manière suivante [21] :

$$S_{va} = \frac{P_{peak}}{\cos\phi * \eta}$$

La détermination de la puissance apparente du système s'effectue en divisant la puissance de crête de 61486,96 W par le facteur de puissance (cos) de 0,8, tout en intégrant le rendement de conversion de 0,9. Ce calcul aboutit à une puissance installée de 85,39kVA, nécessaire au dimensionnement des onduleurs-chargeurs.

2.2.5.2 Configuration triphasée et facteur de sécurité

Il est fortement déconseillé de dimensionner un onduleur à sa limite stricte. Pour garantir la longévité du matériel et absorber les pics de charge, nous appliquons un facteur de sécurité de 1,25 (25 %) [21].

$$S_{dim} = S_{VA} * 1,25 = 85,39 * 1,25 = 106,7kVA$$

L'HGR de Munkongola nécessitant une alimentation triphasée (400V) pour ses services critiques, nous optons pour un couplage de trois onduleurs monophasés (un par phase).

La puissance apparente par phase, notée S_{phase} , est déterminée en répartissant la puissance de dimensionnement totale (S_{dim}) sur les trois phases du système. Pour une puissance de dimensionnement de 106,7kVA dans un système triphasé équilibré, la puissance allouée à chaque phase est calculée selon la relation suivante :

$$S_{phase} = \frac{106,7kVA}{3} = 35,56kVA$$

Cette répartition permet de s'assurer que l'onduleur triphasé pourra supporter la charge de l'hôpital de manière équilibrée sur chacune de ses trois sorties (L1, L2, L3).

Le système repose sur neuf onduleurs-chargeurs de 15kVA couplés en parallèle par groupes de trois pour couvrir la puissance de dimensionnement de 106,7kVA. Cette architecture triphasée équilibrée garantit une puissance par phase de 45kVA, supérieure aux 35,5kVA requis, assurant ainsi la protection et la redondance des équipements médicaux. La communication entre les unités via un bus CAN permet une synchronisation parfaite de l'onde sinusoïdale et une gestion optimale du couplage avec la source biogaz.

2.3 Dimensionnement du système à biogaz

Cette partie constitue une étape technique déterminante pour garantir la production d'une énergie stable et complémentaire au champ photovoltaïque de l'HGR de Mukongola. Cette phase consiste à calibrer l'ensemble de la chaîne de méthanisation de la fosse de mélange au groupe électrogène en se basant sur la disponibilité réelle des intrants organiques produits par l'activité hospitalière. La productivité du digesteur varie entre 0,15 et 0,3 m³ de biogaz/m³ du digesteur/jour dont la moyenne donne 0,225m³ de biogaz/m³ de digesteur/jour avec un temps de séjour dans le digesteur de 55 jours. Le pouvoir calorifique inférieur moyenne du biogaz est de 6 kWh/m³ [22]. L'objectif est de concevoir une installation capable de traiter efficacement les déchets organiques tout en assurant un volume de stockage de gaz suffisant pour répondre aux besoins énergétiques ciblés, particulièrement lors des pics de demande ou en l'absence de rayonnement solaire.

2.3.1 Évaluation de la biomasse disponible ou intrants

Cette phase consiste à identifier la quantité totale de ressource naturelle disponible pouvant nous permettre d'alimenter quotidiennement l'hôpital en faisant extraire le potentiel énergétique. Cette partie vise à identifier le type des déchets disponibles et leur potentiel méthanogène.

2.3.1.1 Nature de déchets disponibles

Les déchets disponibles à Mukongola peuvent être subdivisés en deux catégories dont :

- **Les déchets biodégradables** : Ce sont des matières organiques qui peuvent être décomposées par des micro-organismes (bactéries) dans un environnement sans oxygène. Il s'agit notamment :
 - Des déchets agricoles : Résidus de récoltes, pailles, tiges de maïs.
 - Des déchets alimentaires : Restes de cuisine, épluchures, nourriture périmée.
 - Des déchets animaux : Fumier, lisiers, déjections d'élevage.

- Des déchets humains ou excréta : Matières fécales et urines provenant des blocs sanitaires.
- **Les déchets non biodégradables** : Ce sont des matières qui ne se décomposent pas naturellement à l'échelle de temps humaine ou qui nécessitent des processus chimiques complexes. Il s'agit :
- Des déchets inorganiques : Plastiques, verres, métaux, canettes, pierres ;
 - Des déchets médicaux spécifiques : Seringues, gants en latex, pansements synthétiques, flacons de médicaments.

L'HGR de Mukongola doit mettre en place des poubelles de couleurs différentes comme par exemple : vert pour le biodégradable, rouge pour le médical pour protéger le digesteur et pour éviter qu'on puisse encore venir faire le triage de déchets.

2.3.1.2 Estimation de valeur de déchet qu'on peut retrouve

Ici, nous allons donner l'estimation de déchets que nous pouvons avoir à l'hôpital général de Mukongola [4].

Tableau 14 : Représentation des déchets disponible

Types des dechets ▼	Quantité des dechets disponibles ▼
dechets alimentaire	215kg
dechets agricole	490kg
dechets animaux	280kg
dechets humains	120kg

2.3.2 Calcul du volume de digesteur

Pour déterminer le volume du digesteur, le dimensionnement s'appuie sur deux paramètres statistiques fondamentaux : le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biogaz et la productivité spécifique du digesteur. Ces indicateurs permettent d'ajuster la capacité de stockage et de production en fonction des besoins énergétiques réels de l'hôpital.

Le dimensionnement du système repose sur des paramètres énergétiques et productifs spécifiques au site de l'Hôpital de Munkongola. En premier lieu, le Pouvoir Calorifique

Inférieur (PCI) du biogaz est estimé à 6kWh/m³, ce qui définit le potentiel énergétique du combustible produit. Parallèlement, la productivité spécifique (P) du digesteur est fixée à 0,225m³ de biogaz par mètre cube de digesteur et par jour, déterminant ainsi le rendement biologique de l'installation.

L'objectif principal du système est de couvrir un besoin énergétique journalier (B) évalué à 222,4kWh pour les activités hospitalières. À partir de cette demande, deux variables volumétriques fondamentales sont déduites : le volume de biogaz quotidien (Vbiogaz) nécessaire pour satisfaire la consommation B, ainsi que le volume total du digesteur (Vd) requis pour produire et stocker cette quantité de gaz de manière optimale.

a) Évaluation du besoin et volume de biogaz

L'Hôpital de Munkongola présente un besoin énergétique journalier de 110,4 kWh (soit 110421,25 Wh multiplié par le nombre de jour donc par deux jour autonomie). Pour couvrir ce besoin, nous devons déterminer le volume de biogaz nécessaire en fonction du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) du gaz, estimé à 6 kWh [15].

$$V_{biogaz} = \frac{B}{PCI}$$

$$V_{biogaz} = \frac{222,4kWh}{6kWh} = 37kWh$$

Une fois le volume de la biomasse quotidiennement disponible déterminé, l'étape suivante consiste à évaluer les dimensions structurelles du biodigesteur. Ce calcul est crucial car il doit garantir un temps de rétention suffisant pour une méthanisation complète de la matière organique

$$Vd = \frac{B}{PCI * P} \quad (9)$$

$$Vd = \frac{222,4 kWh}{6kWh * 0,225m^3} = 164,74kWh - m^3$$

D'où le volume du digesteur capable de satisfaire le besoin individuel journalier avec un PCI de 6 kWh par mètre cube et une productivité de 0,225 mètre cube de biogaz par mètre cube de digesteur par jour est de 164,74kWh/m³.

b) Calcul de la Masse Totale du mélange

Pour assurer une production stable, nous utilisons la relation fondamentale de dimensionnement qui lie le besoin énergétique aux caractéristiques physiques de la biomasse et de l'eau. Nous allons procéder de la manière suivante en asseyant de donner quelques données qui va nous permettre à procéder à faire nos calculs.

Considérons que nous avons les données suivantes :

- $B = 222,4 \text{Kwh}$
- $PCI = 6 \text{kwh/m}^3$
- $P = 0,225$
- $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{kg/m}^3$
- $\rho_{\text{biom}} = 800 \text{kg/m}^3$ (la densité de déchets organique)

Précédons aux calculs [22]

$$M_{\text{tot}} = \frac{B * \rho_{\text{bio}} * \rho_{\text{eau}}}{PCI * P * (\rho_{\text{bio}} + \rho_{\text{eau}})}$$

$$M_{\text{tot}} = \frac{222,4 * 800 * 1000}{6 * 0,225 * (800 + 1000)}$$

$$M_{\text{tot}} = 73218,1 \text{kg}$$

Le volume opérationnel du digesteur correspond à une masse de substrat estimée à 73,2 tonnes. Cette quantité représente le stock permanent de matière en fermentation nécessaire à la stabilité de la production de biogaz.

c) Détermination de la part de Biomasse et de la Charge Journalière

La masse totale de biomasse pure présente dans le digesteur est obtenue en isolant la part de déchets dans le mélange (25% de biomasse pour 75% d'eau) :

$$M_{\text{t. biom}} = M_{\text{tot}} * 25\% = 73218,1 * 25\% \quad (23)$$

$$M_{\text{tot, biom}} = 18304,52 \text{kg}$$

Pour maintenir cette production, la charge journalière (apport quotidien de matière fraîche) est calculée en fonction du Temps de Séjour Hydraulique (TSH) de 40 jours dont nous allons procéder de la manière suivante :

- Masse total du mélange par jour

$$M_j = \frac{M_{tot}}{tsh} = \frac{73218,1}{40} = 1830,45kgj \quad (24)$$

- Quantité de déchets par jour

$$M_{biomj} = \frac{M_{tot, biom}}{tsh} = \frac{18304,52kg}{40} = 457,6kg \text{ par jour} \quad (25)$$

- Quantité d'eau par jour :

$$M_{eau.j} = M_j - M_{biomj} = 1830,45 - 457,6 = 1372,85kg(litre) \text{ par jours} \quad (26)$$

2.3.3 Dimensionnement pour la production d'électricité via générateur à gaz

2.3.3.1 Analyse de la charge et conversion d'énergie

La production d'électricité à l'Hôpital de Munkongola sera assurée par un groupe électrogène alimenté au biogaz. Le système est conçu en triphasé (400V entre phases / 230V entre phase et neutre) à une fréquence de 50 Hz. Ce choix permet d'alimenter les équipements médicaux de forte puissance tout en minimisant les pertes en ligne.

Le besoin énergétique journalier étant de 222,4kWh, nous devons dimensionner la source de biogaz en tenant compte du rendement thermodynamique du moteur et du rendement électrique de l'alternateur triphasé. Nous retenons un rendement global de $\eta = 30\%$ [22].

L'énergie brute nécessaire est :

$$B_{bruit} = \frac{E_p}{\eta} = \frac{222,4kwh}{0,3} = 741,3kWh \text{ par jour} \quad (27)$$

2.3.3.2 Dimensionnement de la puissance du générateur à gaz (kVA)

Pour déterminer la puissance du groupe électrogène à installer, nous supposons un temps de fonctionnement journalier de 10 heures pour couvrir la demande de pointe et recharger les batteries. Pour devoir déterminer la puissance de notre générateur à gaz nous allons procéder comme suit :

- ❖ Calcul de puissance active :

$$P = \frac{Ep}{h} = \frac{222,4kwh}{24h} = 9,26kW$$

- ❖ Puissance apparente (S) : En considérant un facteur de puissance standard ($\cos \Phi$) de 0,8 pour un alternateur triphasé :

$$S = \frac{P}{\cos\Phi} = \frac{9,26kW}{0,8} = 11,58KVA$$

Le choix se portera sur un groupe électrogène triphasé de puissance standard supérieure, soit 15kVA.

2.3.3.3 Équilibrage des phases et rendement

L'utilisation d'un système triphasé impose un équilibrage des charges sur les trois phases (L1, L2, L3) de l'hôpital. Un déséquilibre important (supérieur à 15%) entraînerait :

- ❖ Une augmentation des pertes par effet Joule dans l'enroulement de l'alternateur.
- ❖ Une instabilité de la tension neutre-phase.
- ❖ Une surconsommation de biogaz pour une même puissance utile produite.

C'est pourquoi le dimensionnement de kg de déchets par jour inclut une marge de sécurité permettant au moteur de fonctionner dans sa plage de rendement optimale malgré les variations de charge de l'hôpital.

2.4 Conclusion partielle

Au terme de ce deuxième chapitre, il ressort que l'analyse rigoureuse des gisements solaires et de la biomasse constitue le socle technique indispensable à la viabilité de notre projet pour l'Hôpital Général de Référence de Munkongola. L'exploitation des données géospatiales via PVGIS et l'évaluation quantitative des déchets organiques ont permis de confirmer une

complémentarité énergétique idéale pour pallier l'intermittence des ressources naturelles à Kabare. Cette caractérisation précise des sources d'énergie nous permet désormais de disposer de tous les paramètres d'entrée nécessaires pour aborder, dans le chapitre suivant, le dimensionnement optimal des composants et la configuration technique du système hybride.

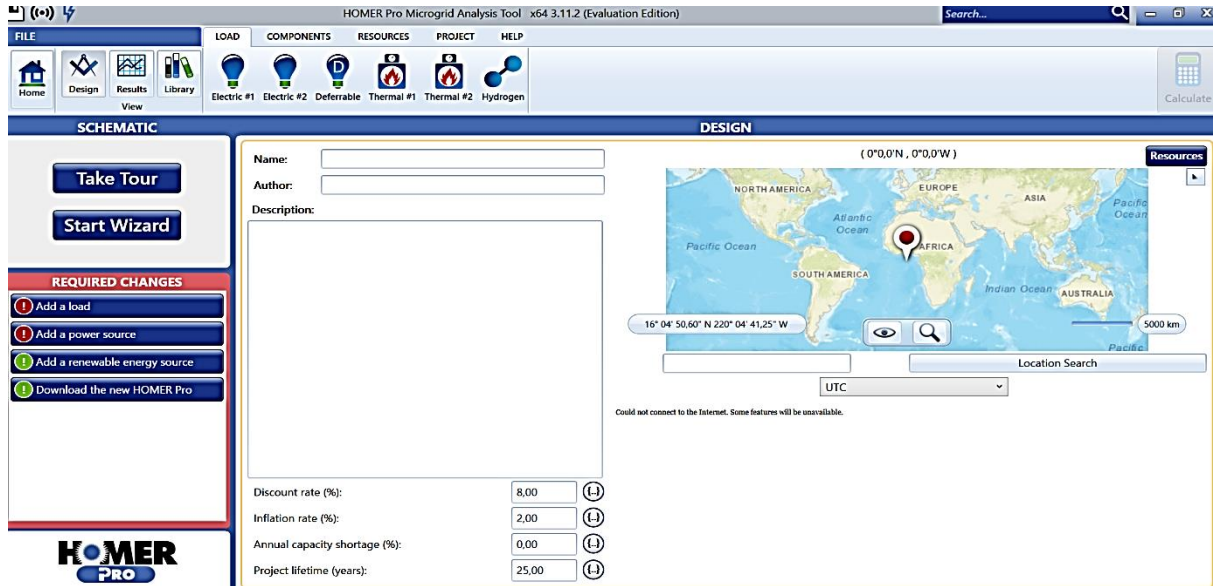
Chapitre 3 LA SIMULATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Après avoir défini les bases technologiques et dimensionné les composants du système hybride (solaire et biogaz) dans les chapitres précédents, ce troisième chapitre est consacré à la modélisation, la simulation et à l'analyse des résultats obtenus. L'objectif est de vérifier, par le biais de simulations informatiques, la viabilité du système pour couvrir les 222,4 kWh journaliers requis par l'HGR de Mukongola. Nous analyserons l'efficacité de la gestion des flux énergétiques entre les panneaux photovoltaïques et le groupe électrogène à biogaz afin de garantir une fourniture électrique stable, économique et continue pour les services critiques de l'hôpital.

3.1 Présentation des outils de simulation

3.1.1 Présentation du logiciel HOMER Pro (hy)

Le logiciel de dimensionnement Homer (hybrid optimization model for electric renewables) est un outil connu pour sa fiabilité dans la conception et l'analyse des systèmes d'énergies hybrides, qui contiennent un regroupement de générateurs conventionnels, des éoliennes, des générateurs photovoltaïques, etc... Le logiciel HOMER développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux étas unis, prend en charge l'opération d'évaluation des conceptions des différents systèmes de génération d'énergie électrique, que ce soit connecter à un réseau électrique classique ou bien éloigné de ce dernier pour une variété d'applications. Ainsi, pour une ou plusieurs installations connectées au réseau ou autonomes, Homer permet d'obtenir la configuration optimale après une étude technico-économique. HOMER simule plusieurs configurations, il optimise le coût pour un cycle de vie donnée et génère des résultats de sensibilité pour la plupart des situations [23].



3.1.2 Présentation du site

Pour rappel, l'hôpital général de Mukongola se situe dans la province du Sud-Kivu, territoire de Kabare, groupement de Kagabi, quartier Cidjo.

a. Etat de l'ensoleillement présenté dans Homer pro

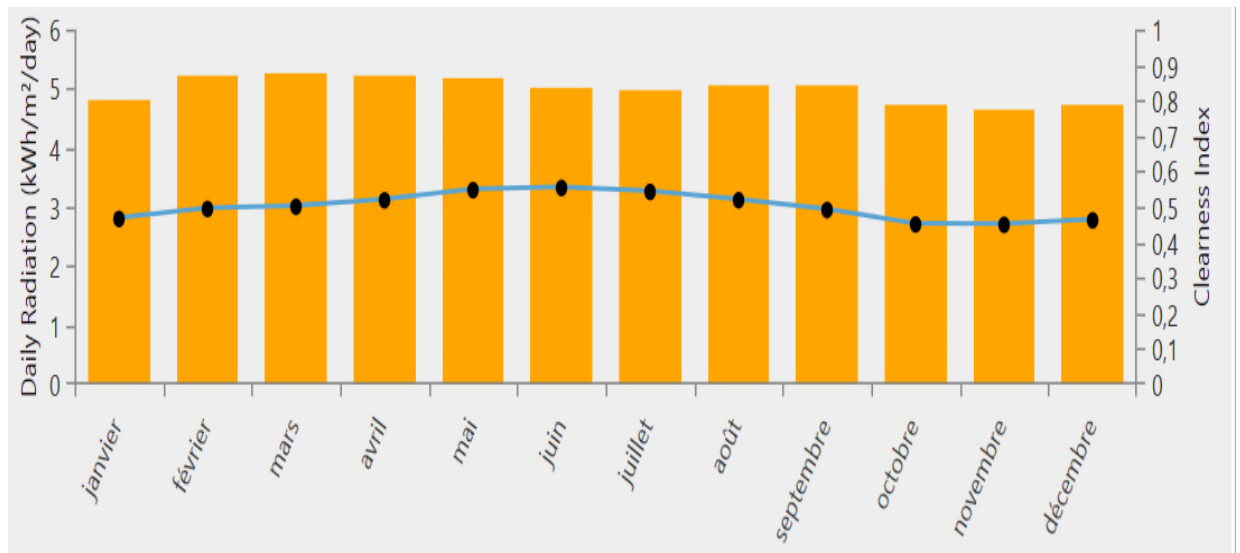


Figure 3-1 : représentation de niveau d'ensoleillement

La caractérisation de la ressource solaire, telle que présentée dans l'environnement Homer Pro, met en évidence l'irradiation globale horizontale (GHI) moyenne annuelle. Ce profil d'ensoleillement sert de base à l'algorithme d'optimisation du logiciel pour déterminer la production horaire du champ photovoltaïque et anticiper les périodes de déficit nécessitant l'apport de la source biogaz.

b. Etat de la température pour la méthanisation

Le contrôle de la température est un facteur déterminant pour l'efficacité de la méthanisation. Dans le cadre de ce projet, le choix s'est porté sur un régime de digestion mésophile. Cette configuration offre un compromis idéal entre la vitesse de réaction biochimique et la faible consommation d'énergie nécessaire au maintien de la chaleur interne du réacteur, assurant ainsi la viabilité du système hybride.

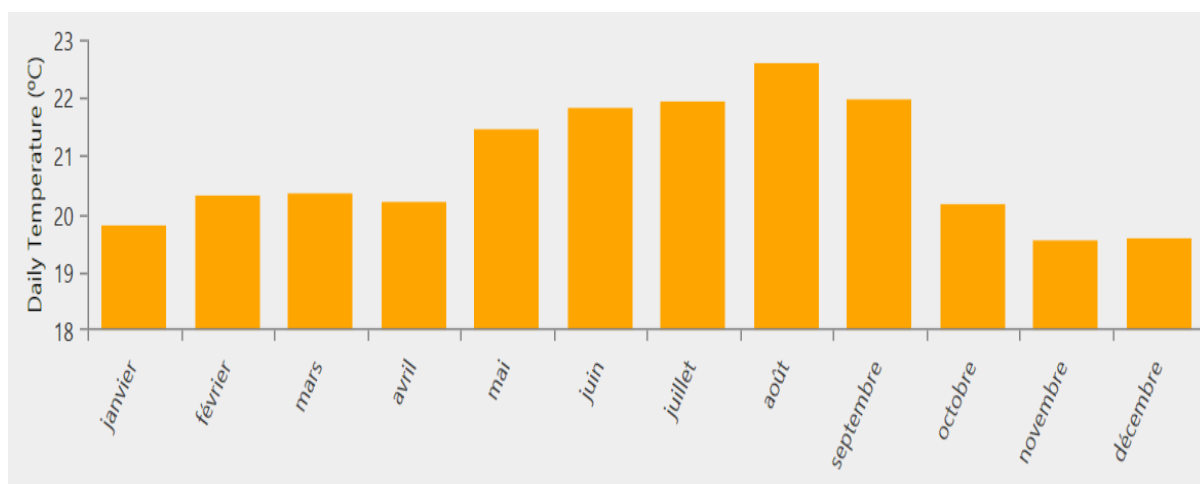


Figure 3-2 représentation de la température

c. Etat de la biomasse

Les relevés effectués sur le site de l'HGR Mukongola montrent une production diversifiée de matières organiques, incluant des déchets de cuisine, des résidus agricoles et des excréta humains. Cette biomasse constitue un gisement stable dont le potentiel méthanogène est exploité pour produire le biogaz nécessaire au fonctionnement du groupe électrogène.

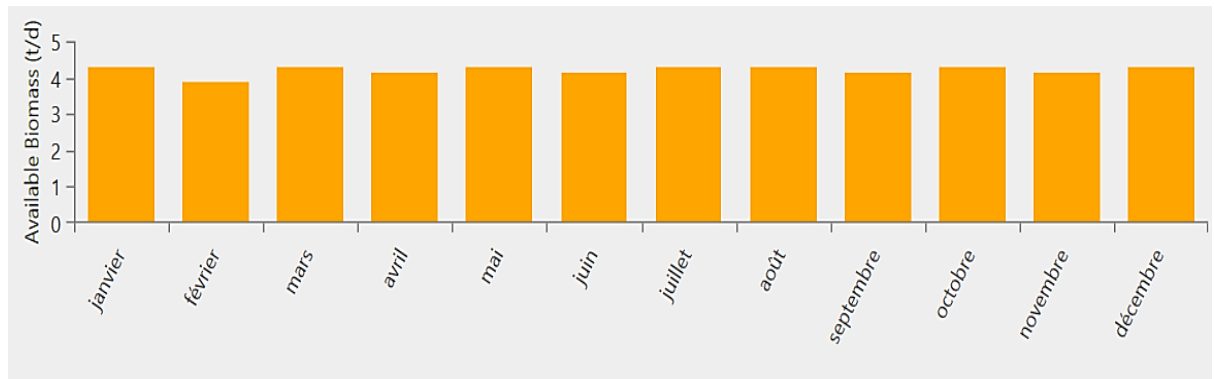


Figure 3-3 : représentation de biomasse

d. Etat de la production de l'énergie journalière

Le système hybride destiné pour alimenter une charge à usage communautaire ou hospitalier avec une puissance du point de 25,6 kW

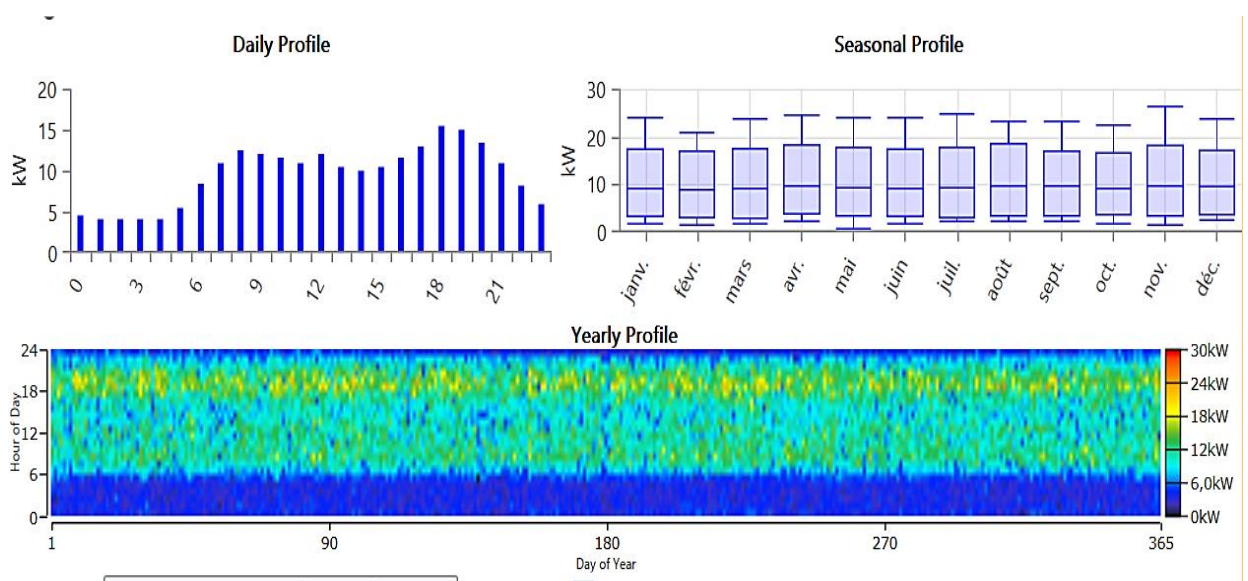


Figure 3-4représentation de la production journalière

3.2 Construction du système hybride de génération de l'énergie

La conception de l'architecture de ce système repose sur une configuration hybride intelligente articulée autour d'un double bus (AC et DC), permettant d'interconnecter efficacement trois sources d'énergie complémentaires pour l'hôpital de Mukongola. Le champ photovoltaïque de

62 kW et le parc de batteries au lithium forment le cœur du système sur le bus DC, assurant la production gratuite durant la journée et le stockage de l'énergie pour couvrir les besoins nocturnes. En parallèle, un générateur à biogaz de 15kVA alimenté par la valorisation des déchets organiques de l'hôpital, est raccordé au bus AC pour servir de source d'appoint et garantir la continuité des soins lors des périodes de faible ensoleillement ou de forte demande. L'ensemble est synchronisé par un convertisseur bidirectionnel qui gère intelligemment les flux énergétiques, transformant une contrainte environnementale (les déchets) en une ressource stable tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles coûteux.

L'architecture de système hybride à dimensionner sous homer pro est représenté de la manière suivante :

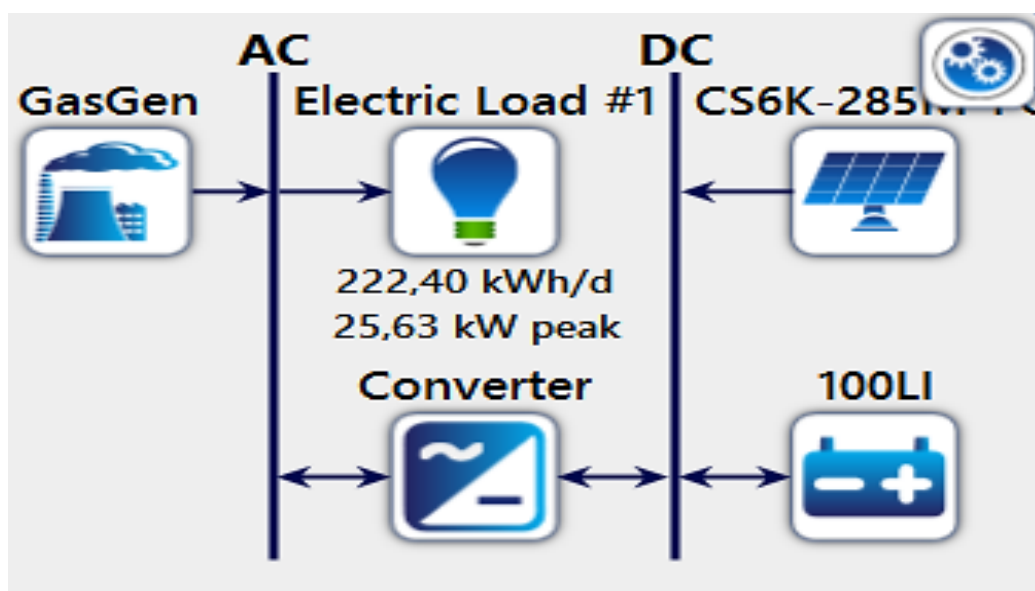


Figure 3-5 : construction du système hybride

Cette figure illustre la modélisation technique de l'installation, servant de base de calcul pour la simulation. Elle met en évidence l'interconnexion entre le champ photovoltaïque, le générateur à biogaz et le parc de batteries, tous couplés pour alimenter la charge électrique de l'hôpital. L'intégration d'un convertisseur bidirectionnel assure la gestion des flux entre le courant continu et alternatif, garantissant ainsi la stabilité du réseau et la continuité de service de l'infrastructure.

Pour déterminer la puissance optimale des différentes composantes du système, le logiciel HOMER Pro s'appuie sur plusieurs paramètres d'entrée fondamentaux. Ces données permettent à l'algorithme d'identifier les solutions les plus efficaces et rentables. Les principaux paramètres pris en compte sont les suivants :

- Le profil de charge électrique : Il s'agit de la courbe de consommation détaillée de l'hôpital, permettant au logiciel de comprendre les pics de demande et les besoins énergétiques constants.
- Le gisement renouvelable local : Les données météorologiques précises de la zone de Kabare, notamment l'irradiation solaire globale et les températures ambiantes.
- Les caractéristiques techniques des composants : Le rendement des panneaux photovoltaïques, l'efficacité de la conversion de l'onduleur, ainsi que la capacité et la profondeur de décharge des batteries au lithium.
- Les paramètres économiques : Le coût d'investissement initial, les frais de maintenance et de remplacement, ainsi que la durée de vie estimée de chaque équipement.
- La ressource en biomasse : La disponibilité quotidienne des déchets organiques et la productivité spécifique du biodigester pour alimenter le groupe électrogène à biogaz.

Le tableau ci-dessous présente l'inventaire des composants sélectionnés ainsi que leurs puissances nominales respectives :

Tableau 15 : les composant utilisé et ses puissances

Composant	Puissance (kW)
Générateur PV	61
Générateur à biogaz	30
Nombre de batteries	2600kWh
Inverseur ou onduleur différentiel	25,06

3.3 Simulation et interprétation

Les résultats de simulation sont fournis sous la forme de liste suivant les tailles des composantes de tout le système avec les différentes contraintes, et Homer propose plusieurs configurations classées par le coût net actuel.

Architecture				Cost				System		Cmns30			
PV-285M-FG (kW)	Cmns30 (kW)	100LI	Converter (kW)	Dispatch	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (m³)
	30,0			CC	0,162 €	170 042 €	13 092 €	800,00 €	0	65 458	8 760	89 994	65 458
40,0	30,0		40,0	CC	0,344 €	360 739 €	14 638 €	1 715 10 €	5,80	61 504	8 751	76 467	61 504
60,0	30,0		40,0	CC	0,351 €	368 750 €	14 843 €	1 768 65 €	7,20	60 886	8 687	75 328	60 886
80,0	30,0		40,0	CC	0,355 €	373 054 €	14 762 €	1 822 19 €	10,4	58 835	8 396	72 763	58 835
100	30,0		40,0	CC	0,357 €	374 818 €	14 484 €	1 875 74 €	14,8	55 800	7 951	69 197	55 800
60,0	30,0	10	40,0	CC	0,415 €	435 094 €	13 787 €	2 568 65 €	95,5	1 608	124	3 630	1 608
80,0		10	40,0	CC	0,419 €	439 745 €	13 794 €	2 614 19 €	100	0			
80,0	30,0	10	40,0	CC	0,420 €	440 545 €	13 794 €	2 622 19 €	100	0	0	0	0
100		10	40,0	CC	0,428 €	449 353 €	14 123 €	2 667 74 €	100	0			
100	30,0	10	40,0	CC	0,429 €	450 153 €	14 123 €	2 675 74 €	100	0	0	0	0
40,0	30,0		60,0	CC	0,430 €	451 590 €	15 477 €	2 515 10 €	5,80	61 504	8 751	76 467	61 504

Figure 3-6 : interprétation de résultat par ce tableau

En faisant la simulation de notre système, nous avons pu obtenir une combinaison de nos deux sources et dont l'énergie produite du système optimal est montrée dans la Figure 3-7 de la manière suivante :

L'image représente l'allure de la production de notre système en deux couleurs :

- Le couleur marron de notre figure représente la production de PV et
- La couleur verte représente la production du générateur à gaz.

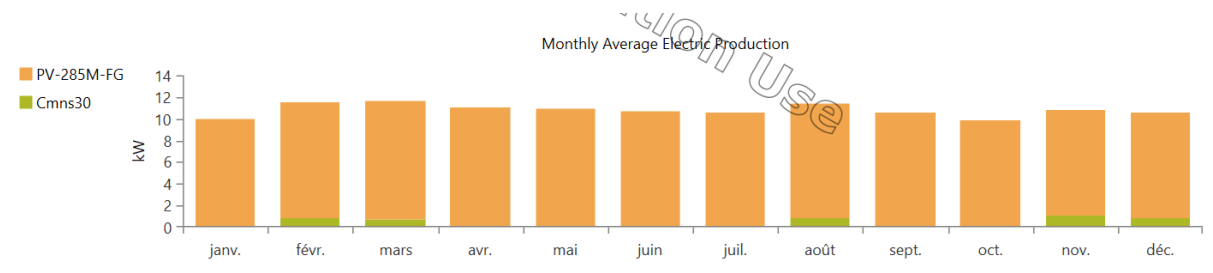


Figure 3-7 : Représente l'allure de la production de notre système

Dans le tableau suivant, on présente des résultats approfondis pour le même système. Le tableau 8 présente le taux de production d'énergie électrique pour chaque générateur tout au long de l'année.

Tableau 16 : Taux de production d'énergie

Production	kWh/an	%
Panneaux solaire	121891	100
Générateur à gaz	0	0
Total général	121891	100

Présentation DMAP de production d'énergie par le PV. Cette présentation permet de voir plus clairement les informations utiles pendant tout l'année pour une interprétation facile.

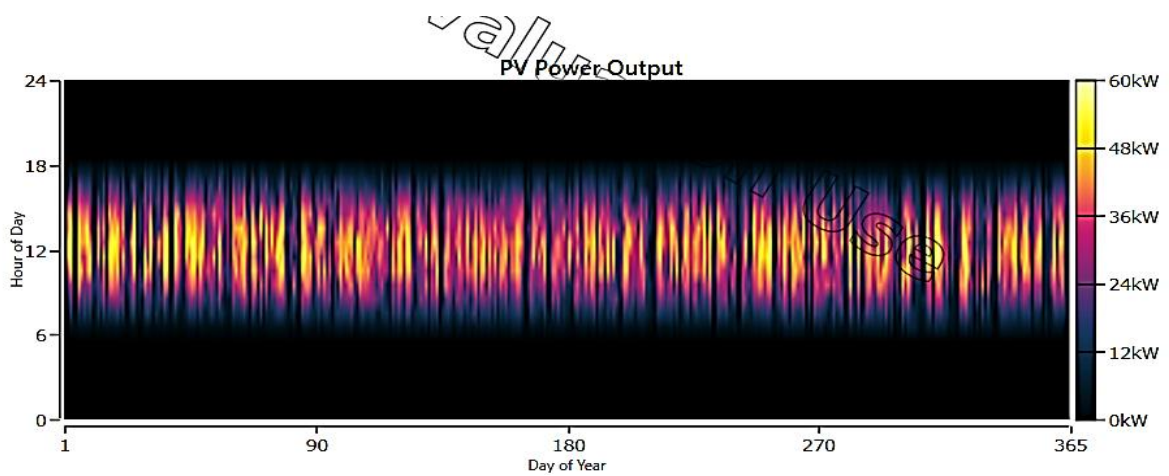


Figure 3-8 : Présentation DMAP de production d'énergie par le PV

On peut remarquer que la période de fonctionnement de GP est bornée entre 7h du matin au 18h. La production des GPs est nulle dans l'heure de pointe (17h à 20h et de 6h à 7h) selon le profil de la charge, ce qui introduit en parallèle le fonctionnement de générateur à gaz ou bien le recours d'énergie stockée dans les batteries pour répondre à la demande de la charge

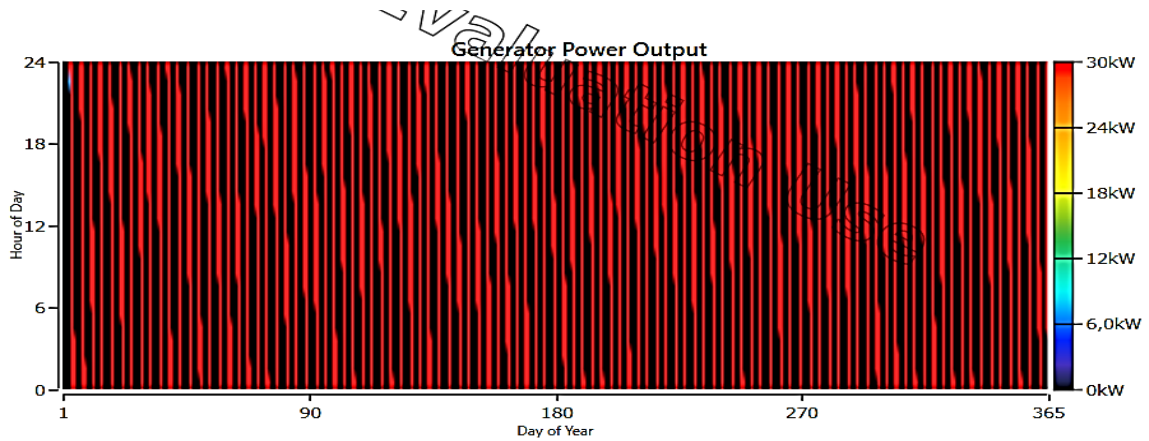
Les paramètres de fonctionnement de G sont montrés dans le tableau 9 suivant :

Tableau 17 : Les paramètres de fonctionnement de la production pv

Variable	valeur
Heure de fonctionnement	4380h/an
Puissance maximale produite	74,9kw
Total de production d'énergie	121891

Présentation DMAP de production d'énergie grâce au générateur à biogaz

Figure 3-9 Présentation DMAP de production d'énergie grâce au générateur à biogaz



Représentons les paramètres de fonctionnement de générateur à gaz qui sont montrés dans le tableau 10 suivant :

Variable	valeur
Heure de fonctionnement	3089h/an
Puissance maximale produite	30kw
Consommation de carburant	401977m ³ /an
Total de production d'énergie	92648kwh/an

Tableau 18 : Représentons les paramètres de fonctionnement de générateur à gaz

Présentation DMAP de production d'énergie par le GD.

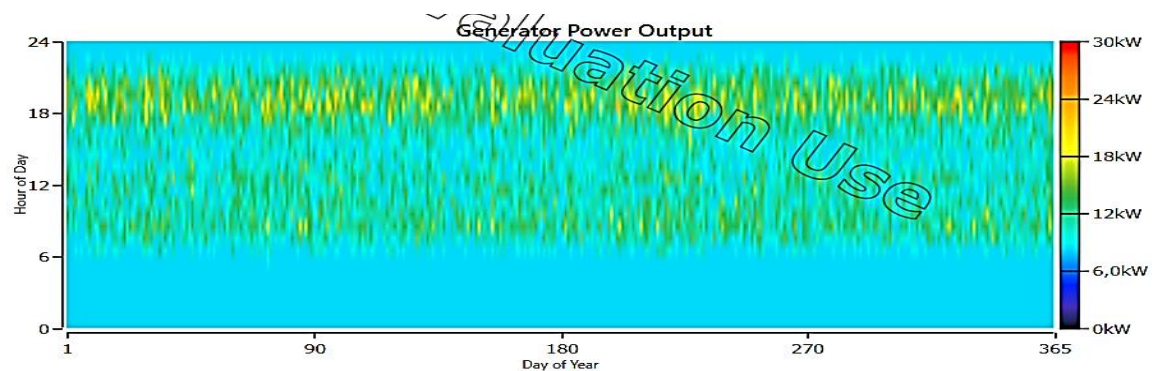


Figure 3-10 : Présentation DMAP de production d'énergie par le generateur à gaz.

Nous remarquons qu'entre 7h du matin et 20h, le groupe à gaz s'arrête. Il fonctionne pendant la nuit et les heures de pointe.

La figure représente l'allure de la production d'énergie pendant la journée.

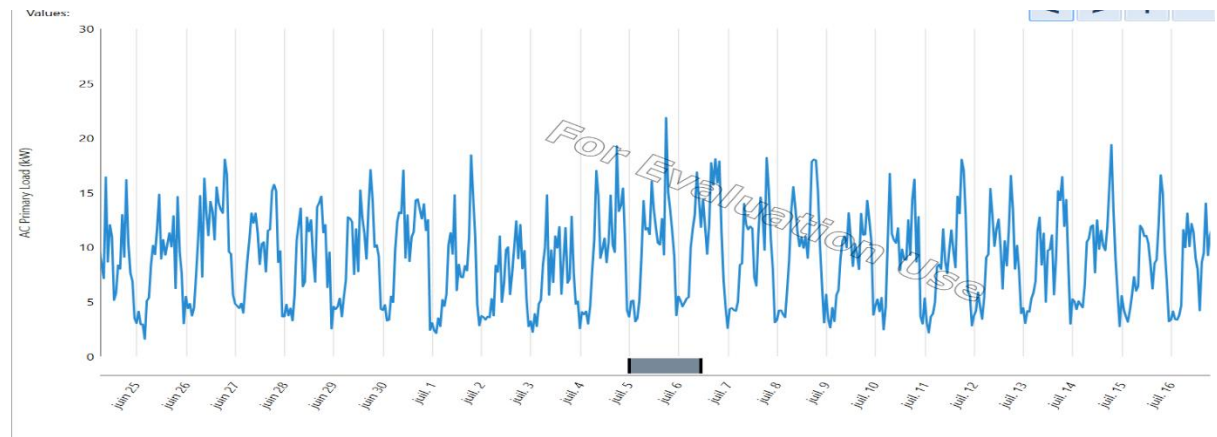


Figure 3-11 : Production d'énergie pendant la journée.

3.4 Coût d'implémentation de notre système hybride solaire et biogaz

L'acquisition d'équipements performants et la garantie d'une rentabilité optimale reposent sur la mobilisation de financements adéquats, l'efficacité des composants étant déterminante pour la viabilité du système. C'est pourquoi, après avoir sélectionné les matériels via la simulation, une évaluation rigoureuse des coûts d'implémentation a été réalisée. La structure budgétaire nécessaire à la mise en œuvre de l'installation est détaillée dans la figure suivante :

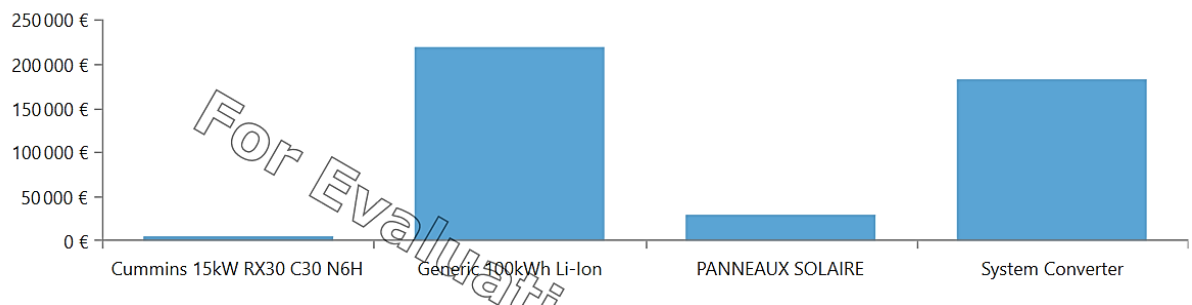


Figure 3-12 : représentation du coût de notre système

L'évaluation financière du projet, incluant les coûts d'investissement initial, est synthétisée dans le tableau récapitulatif ci-après :

composant	Capital \$	Remplacement \$	O et m \$	Fuel \$	Salvage \$ moins	Total \$
Gene à gaz	1100	229,41	0	0	83,15	1016,85
Batteries	80000	12728,21	129275,7	0	2395,58	219607,80
Panneaux solaire	21419,35	0	17014,28	0	0	38433,63
convertisseur	160000,47	20365,14	5171,01	0	3832,93	181703,22
Système	262519,35	33093,36	151460,45	0	6311,65	440761,51

Tableau 19 : représentation du coût de notre système

3.5 Discussion et interprétation des résultats

3.5.1 Analyse de la stabilité et de la fiabilité de la fourniture électrique

a. Complémentarité des sources (Stabilité)

L'analyse de la stabilité repose sur la répartition stratégique entre les deux sources d'énergie pour garantir une fourniture ininterrompue :

- La source solaire (primaire) : Elle couvre 100% des besoins énergétiques annuels. Elle est active durant la journée, généralement entre 7h et 18h.
- La source biogaz (secondaire) : Elle prend le relais pour le temps d'un ensoleillement. Le groupe électrogène à gaz fonctionne principalement les jours où il n'y a pas du soleil et lors des heures de pointe pour pallier l'absence d'ensoleillement.

b. Fiabilité de la fourniture de l'électricité

La fiabilité du système pour l'Hôpital de Mukongola est assurée par plusieurs mécanismes dimensionnés dans votre étude :

- Le stockage par batteries : Il permet de lisser la production solaire et d'assurer l'autonomie nocturne ou lors de passages nuageux, évitant ainsi les coupures fréquentes rencontrées avec le réseau SNEL actuel.
- Le dimensionnement avec marge de sécurité : Pour garantir la fiabilité, nous avons inclus une marge de 25 % pour les pertes de raccordement et les variations de charge.
- L'onduleur-chargeur central : Cet élément est crucial pour la fiabilité car il transforme le courant continu en courant alternatif triphasé (400V) de manière stable, ce qui est indispensable pour protéger les équipements médicaux sensibles de l'hôpital.

3.5.2 **Évaluation de la réduction des coûts opérationnels par rapport au diesel**

L'évaluation de la réduction des coûts opérationnels par rapport au diesel pour l'Hôpital Général de Référence de Mukongola met en évidence un fardeau financier important lié à l'utilisation actuelle des groupes électrogènes.

- **Indépendance vis-à-vis des coûts variables** : Le système hybride solaire-biogaz permet d'éliminer cette dépendance aux combustibles fossiles, dont les prix sont élevés et sujets à des variations, en exploitant des ressources naturelles gratuites disponibles localement (le soleil et les déchets organiques).
- **Réduction de la maintenance** : Contrairement aux groupes électrogènes classiques qui nécessitent un entretien régulier et coûteux, le système proposé vise à réduire ces frais grâce à la fiabilité des panneaux photovoltaïques et à la valorisation continue des déchets via le digesteur.
- **Optimisation économique par simulation** : L'utilisation de simulations informatiques (comme HOMER Pro) permet de configurer le système pour qu'il soit le plus économique possible tout en restant fiable, assurant ainsi que l'investissement initial est rentabilisé par l'absence de frais de carburant sur le long terme.

3.6 Conclusion partielle

En concluant ce troisième chapitre, nous disons que les résultats obtenus grâce à la simulation confirment la viabilité technique et économique du système hybride proposé, démontrant qu'une combinaison optimale entre l'énergie photovoltaïque (assurant 100% de la production) et le biogaz (couvrant les temps d'un ensoleillement, principalement la nuit et lors des pics de demande) garantit une autonomie énergétique totale à l'Hôpital Général de Référence de Mukongola. L'analyse montre que le groupe électrogène à gaz ne fonctionne que de manière stratégique en dehors des heures d'ensoleillement (entre 20h et 7h), permettant ainsi de stabiliser la fourniture électrique tout en réduisant drastiquement les coûts opérationnels liés au diesel, qui représentaient auparavant une charge annuelle de plus de 6 000 \$. L'évaluation financière finale, intégrant les coûts de capital, de remplacement et de maintenance, souligne qu'en dépit d'un investissement initial significatif pour les batteries et les convertisseurs, la solution hybride s'impose comme un modèle de développement durable capable d'améliorer durablement la qualité des soins médicaux par une gestion optimisée et fiable des ressources renouvelables locales.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cette étude consacrée à la conception d'un système hybride solaire-biogaz pour l'Hôpital Général de Référence de Munkongola, il ressort que la transition vers les énergies renouvelables constitue la solution la plus efficace pour pallier l'instabilité du réseau électrique et réduire les coûts d'exploitation. Cette recherche nous a permis d'apporter des réponses concrètes aux problématiques initialement soulevées.

Premièrement, l'audit énergétique détaillé a permis de quantifier avec précision les besoins de l'établissement, fixant la demande à 222,4kWh par jour, incluant une marge de sécurité de 25% pour couvrir les pertes techniques et les appels de charge.

Deuxièmement, pour optimiser la gestion de cette énergie, l'étude a validé une architecture hybride intelligente où la complémentarité des sources assure une continuité de service absolue. Le solaire photovoltaïque a été dimensionné comme source primaire couvrant la totalité de la production annuelle, tandis que le biogaz, issu de la valorisation des déchets organiques locaux, agit comme une unité de relève dynamique durant la nuit et les périodes de faible ensoleillement. Ce couplage est soutenu par un choix technologique robuste de neuf onduleurs-chargeurs totalisant 106,7kVA, garantissant la protection des équipements médicaux sensibles. Enfin, les simulations réalisées avec le logiciel HOMER Pro démontrent la viabilité de ce modèle : ce système hybride permet non seulement de sécuriser les services critiques comme le bloc opératoire, mais aussi de réaliser une économie annuelle substantielle de plus de 6 000\$ en éliminant la dépendance au carburant diesel.

En définitive, ce projet prouve qu'un investissement dans des technologies durables et locales est capable de transformer l'efficacité opérationnelle d'une infrastructure de santé en milieu rural. Nous recommandons ainsi la mise en œuvre effective de ce modèle pour garantir une qualité de soins constante et une souveraineté énergétique durable à l'hôpital de Munkongola. Une perspective majeure consisterait à intégrer un système de monitoring intelligent basé sur l'Internet des Objets (IoT), permettant de suivre en temps réel la production du digesteur et l'état de charge des batteries afin d'optimiser la maintenance préventive à distance. Par ailleurs, une analyse approfondie sur la cogénération pourrait être menée pour récupérer la chaleur dégagée par le groupe à biogaz et l'utiliser pour la stérilisation ou le chauffage de l'eau sanitaire

de l'hôpital. Enfin, l'étude pourrait s'élargir à l'évaluation de l'impact socio-économique à long terme, en analysant comment l'excédent d'énergie produit pourrait alimenter des activités génératrices de revenus pour la communauté environnante de Kabare, renforçant ainsi la résilience économique de la région.

Bibliographie

- [1] OMS, «Access to modern energy services for health facilities in resource-constrained settings: a review of status, significance, challenges and measurement,» Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 2014-2015.
- [2] J. K. MIHAL, «Manuels sur la transformation des déchets en biogaz,» 2023. [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/684134028/Manuel-Sur-La-Transformation-Des-Dechets-en-Biogaz>. [Accès le Le 28 FEVRIER 2026].
- [3] IRENA, Off-grid Renewable Energy Solutions: Global and Regional Status and Trends, Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- [4] h. g. d. mukongola, historique de l'hopitale general de mukongola.
- [5] K. M. Welcome, Dimensionnement optimal des équipements d'un central solaire isolée avec stockage par la methode LPSP, GOMA: ULPGL, 2021-2022.
- [6] A.-E. Becquerel, les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, Paris: Académie des sciences, 1839.
- [7] M. K. Boni-Sylvestre, Conception et realisation d'un système de controle et de gestion optimale de l'énergie: cas de système énergetiques hybrides photovoltaïque-groupe électrogène, GOMA: ULPGL, 2018-2019.
- [8] L. GOMOZ, Dimensionnement par optimisation d'un systeme photovoltaïque pour une alimentaion isolée avec profil de charge constant, Abomey-Calavi: Université d'Abomey-Calavi, 2016.
- [9] M. B. Enock, «ETUDE ET CONCEPTION D'UN REGULATEUR SOLAIRE AVEC LA COMMANDE MPPT: Cas de l'algorithme Perturb and Observe,» ULPGL, GOMA, 2023-2024.
- [10] l. science. [En ligne]. Available: <https://africacoeurnews.com/2025/08/13/energie-solaire-cle-du-developpement-durable-en-rdc/>.

- [11] PVGS, «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM,» Commission européenne, Centre commun de recherche, 2001 à nos jour. [En ligne]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR. [Accès le le 10 Fevrier 2026].
- [12] «edf,» [En ligne]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/thermique/biomasse>.
- [13] P. K. HABOUDI, «Energie biomasse,» [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/461517896/Cours-Energie-Biomasse-Converted-1?>
- [14] M. N. e. O. A. Ikram, Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-biomasse connecté au réseau pour alimenter la ferme agricole d'élevage de l'université de Mostaganem, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2020.
- [15] K. T. ALAIN, Conception d'un biodigesteur menager pour la cuisson dans la ville de goma, GOMA: ULPGL, 2022-2023.
- [16] R. T. J. Bosco, DIMENSIONNEMENT D'UN DIGESTEUR SELON LE TYPE DE SUBSTRATS, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO , 23 Novembre 2023.
- [17] wikipedia, «digesteur,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Digesteur>.
- [18] Amazon, «VINCO,» [En ligne]. Available: <https://www.bing.com/images/search?q=Generateur+%c3%80+Gaz&form=REATAB&first=1>. [Accès le 20 FEVRIER 2026].
- [19] M. D. tolli, «Dimenssionnent photovoltaïque,» [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/694705818/Manuel-de-Dimensionnement-Photovoltaïque-2>.
- [20] E. Chimeshula, «Goshop energy,» goshop, 03 OCTOMBRE 2025. [En ligne]. Available: <https://www.goshop.cd/fr/slides/cours-complet-sur-le-kit-solaire-victron-55>. [Accès le le 15 Fevrier 2026].
- [21] T. Wildi, «electrotechnque,» Boeck université, 05 Juillet 2000. [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/352533828/WILDI-electrotechnique-4-pdf>. [Accès le 15 Fevrier 2026].
- [22] K. T. Alain, «CONCEPTION D'UN BIODIGESTEUR MENAGER POUR LA CUISSON DANS LA VILLE DE GOMA,» ULPGL, 2022-2023.

- [23] N. (. R. E. Laboratory), «HOMER Pro – Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources,» UL Solutions, 09 mai 2024. [En ligne]. Available: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>. [Accès le 19 mars 2026].
- [24] O. Planas, «Energie solaire,» 2024. [En ligne]. Available: <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements/panneau-photovoltaique/types>.
- [25] «CONNAISSANCE DES ENERGIES,» 09 mai 2024. [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>. [Accès le 24 09 2025].
- [26] image, «Collecte dechets alimentaire,» [En ligne]. Available: https://www.ville-romainville.fr/uploads/Image/ff/6203_465_Collecte-dechets-alimentaires.jpg. [Accès le 2025].
- [27] RDC, GLOBAL PETROL, «Prix du diesel en RDC,» 04 08 2025.
- [28] M. Solar, «Structure des panneaux solaires : 6 composants clés,» Maysun Solar, Un Intégrateur de la nouvelle technologie photovoltaïque, Le 04 Janvier 2024. [En ligne]. Available: <https://www.maysunsolar.fr/blog/structure-des-panneaux-solaires-6-composants-cles>. [Accès le le 28 fevrier 2026].

Annexe A

A.1 Présentation de quelques images et quelques matériels de l'hôpital générale de Mukongola

A.1.1 Représentation de l'hôpital de Mukongola





A.1.2 Quelques matériels de l'hôpital de Mukongola



A.2 Représentation des appareils à utiliser dans notre travail

Panneaux solaire



Batterie

