

Etude comparative des différents modes d'alimentation en électricité en Afrique rurale

Auteur : Jetteur, Claire

Promoteur(s) : Andre, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/4989>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège - Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
Année académique 2017-2018

Etude comparative des différents modes d'alimentation en électricité en Afrique rurale

Claire Jetteur

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en sciences
et gestion de l'environnement

Promoteur académique : Philippe André

Maître de stage : Claude Jussiant

Lecteurs :

Damien Ernst

Samuel Hennaut

« Copyright »

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège »

* « L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège. »

« Le présent document n'engage que son auteur. »

« Auteur du présent document : Claire JETTEUR c.jetteur@gmail.com »

Remerciements

Afin de mener à bien ce travail, une aide précieuse m'a été fournie par plusieurs personnes. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée, de près ou de loin, pendant toute la durée de ce projet.

Tout d'abord, je tiens à remercier les personnes qui m'ont soutenue lors de mon stage chez Ingénieurs sans frontières, en particulier mon maître de stage Claude Jussiant pour son accueil au sein de l'association, son soutien et ses conseils inestimables. Je remercie également tous les membres de l'association que j'ai pu rencontrer au cours de ce stage pour leur sympathie.

Deuxièmement, merci à mon promoteur académique Philippe André pour la supervision de ce travail.

Je remercie également ma soeur, ma mère et mon copain pour leur relecture attentive de ce rapport, leurs commentaires utiles et leur vérification orthographique.

Enfin, je voudrais remercier ma famille, mon copain et mes amis pour leur attitude compréhensive et leur soutien durant ce mémoire.

Table des matières

1	Introduction	6
2	L'électrification en Afrique rurale	8
2.1	Contexte	8
2.2	Electrification centralisée et décentralisée	9
2.3	L'association Ingénieurs sans frontières	10
3	Technologies de production d'électricité	12
3.1	Critères de comparaison	12
3.2	Energie solaire	13
3.3	Energie hydraulique	15
3.4	Energie éolienne	16
3.5	Energie venant de la biomasse	17
3.6	Energie fossile	18
3.7	Analyse comparative	19
3.7.1	Performance économique	19
3.7.2	Impact environnemental	20
3.7.3	Tableau comparatif	21
4	Cas d'étude : l'hôpital de Pawa, RD Congo	23
4.1	Description du projet	23
4.2	Courbe de charge	25
4.3	Présentation des différentes solutions étudiées	26
4.3.1	Solution groupe électrogène	27
4.3.2	Solution tout solaire	31
4.3.3	Solution hybride	34
4.3.4	Résumé des solutions obtenues	35
4.4	Performance économique	37
4.5	Impact environnemental	39
4.6	Analyse et discussion des résultats	41
4.6.1	Performance économique	42
4.6.2	Performance environnementale	43
4.6.3	Technologie adaptée	44
4.6.4	Choix de la solution optimale	44
4.6.5	Optimisation	44

5	Conclusion	46
6	Annexes	51

Liste des abréviations

AC	Alternating current (courant alternatif)
ACV	Analyse du cycle de vie
CO ₂	Dioxyde de carbone
DC	Direct current (courant continu)
GE	Groupe électrogène
GES	Gaz à effet de serre
HGR	Hôpital général de référence
ISF	Ingénieurs sans frontières
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
NO _x	Oxydes d'azote
ONG	Organisation non gouvernementale
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PRG	Potentiel de réchauffement global
PV	Photovoltaïque
RDC	République démocratique du Congo
SNEL	Société Nationale d'Electricité
SO ₂	Dioxyde de soufre
VAN	Valeur Actuelle Nette
VLRA	Valve Regulated Lead Acid

Unités de mesure

Ah	Ampère-heure
h	heure
l	litre
lm	lumen
J	Joule
kgCO ₂ eq	kilogramme de CO ₂ équivalent
kW	kilowatt
kWc	kilowatt-crête
kWh	kilowatt-heure
US\$	US Dollar
W	watt

1 Introduction

Parmi les 17 Objectifs de développement durable établis par les Nations Unies pour éradiquer la pauvreté, protéger la Planète et garantir la prospérité pour tous à l'horizon 2030, se trouve l'accès pour tous à une énergie propre et à un coût abordable. A l'heure actuelle, une personne sur cinq dans le monde n'a pas accès à l'électricité moderne [1].

En particulier, 600 millions de personnes en Afrique subsaharienne n'ont pas accès à ce vecteur énergétique [2]. Le continent africain reste le continent le moins électrifié et cela risque de se marquer davantage dans les années à venir étant donné l'importante croissance démographique à laquelle ce continent doit faire face [1]. Cette situation se retrouve dans les zones urbaines, où le réseau est peu fiable, soumis à de nombreuses coupures et délestages, ainsi que dans les zones rurales. En effet, le réseau national est rarement étendu jusqu'aux campagnes reculées, qui se retrouvent alors isolées de toute forme d'énergie moderne. Dans ces régions, la biomasse traditionnelle est grandement utilisée pour cuisiner, s'éclairer et se chauffer.

Pour remédier au problème de l'accès à l'électricité en milieu rural isolé, des solutions de production d'électricité dites décentralisées existent. Ces solutions, déconnectées du réseau principal, permettent de produire de l'électricité de manière autonome. Un grand nombre de technologies différentes sont utilisées à cette fin.

Parmi les projets d'électrification réalisés en Afrique rurale, nombreux sont ceux qui furent défectueux, mal réalisés et qui n'ont pas abouti. Alors que les aspects sociologiques constituent une part importante des causes de succès ou d'échec d'un projet d'électrification, un choix important réside également dans le choix de la technologie employée. Le contexte de l'Afrique rurale, isolée, défavorisée et de main d'oeuvre peu qualifiée, ne doit pas être négligé lors du choix technique.

L'association Ingénieurs sans frontières, active dans la lutte contre la pauvreté dans le monde, est spécialisée dans le domaine de l'électrification en Afrique rurale subsaharienne. Un de leurs projets en cours consiste au renforcement du système d'accès à l'électricité de l'hôpital général de référence de Pawa, village situé dans le nord-est de la République Démocratique du Congo. L'objet de ce travail est de trouver la technologie de production d'électricité la plus adaptée pour cet hôpital d'un point de vue technique, économique et environnemental.

Sont d'abord présentés dans ce rapport le contexte de l'étude, la différence entre électricité centralisée et décentralisée et l'association Ingénieurs sans frontières.

Ensuite, une présentation des technologies de production d'électricité décentralisée existantes et de leurs avantages et inconvénients est réalisée à partir de sources venant de la littérature et de retours d'expériences. Seules les techniques matures à l'heure actuelle ont été étudiées, à savoir le photovoltaïque, l'hydro-électricité, l'éolien, la production à partir de biomasse et le générateur électrique. Un classement entre ces différentes solutions est ensuite établi selon trois critères afin de démarquer les solutions les plus favorables d'un point de vue économique, technique et environnemental.

Pour terminer, l'étude est consacrée au cas pratique de Pawa. Parmi les technologies présentées précédemment, celles possibles et applicables à ce cas sont étudiées ainsi que l'éventualité d'un mini-réseau hybride combinant plusieurs sources d'énergie différentes. Elles sont ensuite comparées selon les critères de performance économique, performance

environnementale et praticité d'utilisation, afin de déterminer celle optimale pour l'électrification de l'hôpital.

2 L'électrification en Afrique rurale

2.1 Contexte

A l'heure actuelle, où se multiplient smartphones, tablettes et objets connectés en tout genre dans nos sociétés occidentales, l'accès à l'électricité est considéré comme un droit acquis, faisant partie de notre quotidien. Cependant, il n'en est pas de même dans tout le reste du monde. Dans le monde, 1,2 milliards d'êtres humains n'ont pas accès à l'électricité, dont 600 millions en Afrique subsaharienne [2] (figure 1).

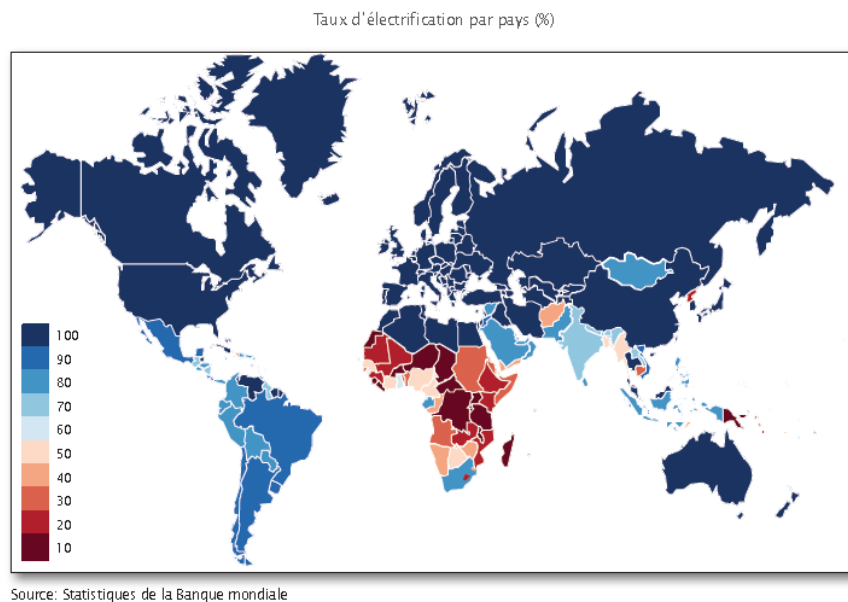


FIGURE 1 – Taux d'électrification par pays dans le monde [3]

Les activités quotidiennes nécessitant de l'énergie, comme l'éclairage par exemple, sont alors approvisionnées par des moyens alternatifs tels que les bougies ou lampes à kérosène, dont les risques, fumées toxiques, incendie, sont bien connus. De nombreuses études citent les bénéfices de l'accès à l'électricité et le lien entre énergie et développement. Bien que celui-ci ne soit pas prouvé comme étant un facteur suffisant au développement, il reste tout de même nécessaire et permet une amélioration dans un grand nombre de domaines, tels que l'activité économique, l'éducation ou encore la santé [4].

En Afrique subsaharienne, seul un tiers de la population a accès au réseau électrique [2]. Cette accessibilité reste faible même au niveau urbain, qui subit les conséquences d'une croissance de population exorbitante, résultat de l'augmentation de la démographie et de l'exode vers les villes. Le réseau, non accessible à tous et souvent mal dimensionné par rapport à la demande, y est également fréquemment sujet à de nombreuses coupures régulières. L'électrification rurale est donc un facteur important qui permettrait d'éviter cet exode rural vers les zones périurbaines où la misère économique règne.

En milieu rural, étant donné la faible démographie et la grande dispersion de la demande, il est peu rentable d'y étendre le réseau électrique national et ces populations se retrouvent souvent délaissées de tout accès à la technologie. Il est alors important d'y développer l'accès à l'électricité par des solutions de productions décentralisées, indépen-

dantes du réseau principal. Cependant, ces solutions exigent généralement des investissements élevés et la capacité à payer relativement faible des habitants rend par conséquent la réalisation de tout projet d'électrification rurale presque impossible sans financements extérieurs [2].

2.2 Electrification centralisée et décentralisée

Le système de production d'électricité centralisé, tel qu'il est connu en Belgique, correspond à la production d'énergie électrique par des centrales électriques très puissantes, principalement thermiques ou hydroélectriques. Ce système, profitant de l'effet d'économie d'échelle, est à ce jour encore le plus utilisé. Cependant, il se peut que pour différentes raisons, par choix citoyen ou politique ou pour raison économique, les producteurs doivent faire appel à des solutions dites décentralisées, déconnectées du réseau principal.

Grâce à la récente émergence des énergies renouvelables, se prêtant mieux à la décentralisation que les grandes installations thermiques (on citera, entre autres, les productions photovoltaïques et éoliennes), la production décentralisée, dont la portée est d'un ménage à plusieurs villages, devient de plus en plus accessible.

Il existe trois degrés de décentralisation de la production d'électricité :

Production centralisée Réseau électrique principal, alimenté par de grandes centrales électriques très puissantes. Il assure l'accès à l'électricité sur une portée nationale.

Mini-réseau Petits réseaux électriques indépendants, ils possèdent leurs propres capacités de production, de stockage et de transport de l'électricité. Intermédiaires entre production centralisée et décentralisée, ils peuvent desservir plusieurs ménages, des entreprises isolées ainsi que des installations communautaires comme l'éclairage public [4].

Production décentralisée individuelle Installation individuelle autonome, généralement photovoltaïque, elle assure l'accès à l'électricité d'un ménage. L'émergence récente des *Solar Home System* a permis l'accès à l'électricité à plus de 20 millions de ménages dans le monde [5]. Cette solution intègre généralement une lampe et des prises pour recharger les appareils électroniques tels que téléphones portables, raccordés à un panneau solaire.

La production décentralisée se justifie en particulier pour une densité de population faible, très dispersée et à faible consommation, pour lesquels le coût de l'extension du réseau serait prohibitif. De plus, ces dispositifs permettent une plus grande autonomie, permettant de remédier aux problèmes de pannes sur le réseau. D'un point de vue économique, la rentabilité reste toutefois généralement plus faible que des solutions centralisées urbaines, et des dispositifs d'aide et de subventions sont bien souvent indispensables.

Le coût de l'extension du réseau pour un site donné, et par conséquent le choix entre solution centralisée ou décentralisée, est fonction de la distance au réseau en place le plus proche, de la densité de population et de leur capacité à payer [6]. Pour le cas de l'Afrique rurale subsaharienne, composée de multiples régions peu habitées, éloignées des villes principales, et une densité de population de 44 habitants/km² [7], la distance moyenne au réseau électrique central en dessous de laquelle une extension du réseau devient avantageuse économiquement est estimée à 5 km [6].

2.3 L'association Ingénieurs sans frontières

Ingénieurs sans frontières (ISF) est une association belge active dans la lutte contre la pauvreté dans le monde à travers des missions d'appui en ingénierie. Elle est spécialisée dans trois domaines de compétences : l'adduction d'eau, la gestion des déchets et l'électrification.

L'association soutient des projets initiés par les acteurs des pays en développement lorsqu'ils rencontrent un problème technique dans un de ces trois domaines. Les projets sont donc réalisés répondant toujours à la demande de pays du Sud, et sont traités selon un aspect purement technique, fournissant un appui au niveau de l'outil, des conseils techniques,... Les projets types sont toujours structurés selon quatre phases principales :

- La phase d'identification : identifier sur place les besoins des populations locales et le soutien que peut apporter ISF.
- La phase d'analyse et d'étude : phase technique, calcul et choix des installations nécessaires pour répondre aux besoins et permettant d'évaluer l'aspect financier du projet.
- La phase de collecte de fonds : recherche de fonds afin de pouvoir subsidier le projet.
- La phase d'installation : mettre en place les installations sur place et éventuellement former la population.

A la fin de l'intervention d'ISF, les membres des communautés locales doivent être capables d'être autonomes et d'assurer eux-mêmes le maintien des installations. La mise en place de projets passe donc également par la formation aux nouvelles installations et l'implication au maximum des populations locales.



FIGURE 2 – Electrification d'une école à Boma, RDC [8]

De petite taille, l'organisation bénéficie de sources de financement et réalise principalement des projets à petite échelle (un hôpital, une école, un village,...). Alors que de grandes organisations planifient l'électrification de l'Afrique rurale à grande échelle et sur le long terme, ISF met des solutions en place plus directes, au cas par cas, et, bien que n'ayant que peu d'impact au niveau global, permet l'amélioration des conditions de vie de centaines de personnes.

La solution d'électrification privilégiée par l'association est principalement la produc-

tion photovoltaïque. Un élément important à prendre en considération dans le contexte d'électrification dans des pays en voie de développement est le suivi et la maintenance des installations par les populations locales. En effet, les citoyens vivant dans des régions reculées ont un accès à l'éducation limité et n'ont pas le même bagage technique que les sociétés occidentales. C'est pour cette raison que la production solaire est préférée, grâce à sa facilité de mise en oeuvre.

3 Technologies de production d'électricité

3.1 Critères de comparaison

Afin de mener à bien un projet d'électrification rurale et d'assurer le succès de celui-ci, de nombreux critères sont à prendre en compte. En effet, le processus décisionnel d'électrification rurale est un problème multifactoriel, pour lequel le choix économique de technologies exige également la considération des conséquences socio-économiques et environnementales [9]. Une étude sur les causes de succès et d'échec des projets d'électrification rurale basée sur une grande revue de la littérature et de projets existants a permis de mettre en avant une série de critères visant à l'évaluation de tels projets [4] :

- Coût par rapport à la concurrence technologique
- Participation des bénéficiaires
- Démonstrateurs et adoption de la technologie
- Technologie adaptée
- Transferts de technologie et maintenance
- Décentralisation
- Identification des besoins
- Impact environnemental
- Marché
- Financement et subsidiation

Ce travail porte principalement sur l'évaluation et la comparaison des différentes technologies existantes et le choix approprié dans le cadre de l'électrification de l'hôpital de Pawa, et non sur le déroulement de tout un projet. Par conséquent, seuls les critères directement liés au choix de la technologie et non à la mise en oeuvre totale du projet seront étudiés, à savoir : technologie adaptée, coût par rapport à la concurrence technologique et impact environnemental. Ces derniers sont repris et détaillés dans le tableau 1.

La participation des bénéficiaires, les démonstrateurs et adoption de la technologie et le transfert de technologie ne dépendent pas directement du choix de la technologie. Ces critères relèvent plutôt de dimensions sociologiques et culturelles, et dépendent principalement de la mise en place du projet. Les critères de décentralisation et d'identification des besoins sont considérés comme remplis, l'étude portant sur un projet dans des régions trop éloignées des réseaux centralisés et répondant directement à une demande locale, dont les besoins ont pu être identifiés. Toutefois, l'identification des besoins doit être jugée avec précaution et un certain recul. En effet, la compréhension de leur demande peut parfois être biaisée par notre expérience et culture occidentale, ne permettant pas d'interpréter les besoins avec succès. Enfin, le mode d'introduction sur le marché et le financement sortent également du cadre de cette étude.

Les sources d'énergie renouvelable offrent de multiples avantages tels que l'absence de carburant (à l'exception de la biomasse), peu de maintenance nécessaire et de coûts d'opération ainsi que de faibles impacts environnementaux. Cependant, pour certaines raisons principalement économiques, il se peut que le générateur à énergie fossile soit encore favorisé. Leur développement grandissant permet d'atteindre des coûts de plus en plus compétitifs, et on s'attend à ce que leurs coûts continuent à diminuer drastiquement dans les années à venir [5]. Ces énergies "vertes" permettent en outre de faire appel à des

Principe	Critères	Brève description
Coût par rapport à la concurrence technologique	Coût unitaire actualisé	Coût prenant en compte les coûts d'investissement, de combustible ou de maintenance sur toute la durée de vie du système
	Capital de départ	Un capital de départ important peut constituer un frein à la diffusion de la technologie, particulièrement dans les régions où l'accès au crédit est malaisé.
	Externalités	Les externalités sont les coûts liés aux impacts environnementaux et sociaux non inclus dans le prix du kWh acheté
Technologie adaptée	Fiabilité	La technologie doit présenter une faible probabilité de panne, y compris dans des conditions de fonctionnement difficiles.
	Maturité technologique	La maturité technologique est un garant de la fiabilité du système. Notons que certains systèmes nécessitent plusieurs dizaines d'année d'existence avant d'atteindre un niveau de fiabilité acceptable.
	Simplicité	La simplicité d'un système permet de favoriser son adoption. Un système trop complexe et incompris court le risque d'être rejeté.
	Appropriabilité	La technologie doit être accessible à ses utilisateurs, qui doivent pouvoir se "l'approprier", notamment en étant habilités à y apporter des modifications.
Impact environnemental	Adaptabilité	La technologie doit pouvoir évoluer en fonction des besoins locaux, parfois inattendus.
	Cycle de vie	La quantité de polluants émise doit être considérée sur l'entièreté du cycle de vie du système et pas uniquement lors de sa période "productive"
	Polluants atmosphériques Pollutions diverses	Ceux-ci incluent les gaz à effet de serre, les gaz destructeurs de la couche d'ozone ou les émissions toxiques. Celles-ci incluent les impacts visuels, la perte de biodiversité, les déchets, la toxicité des matières utilisées, etc.

Tableau 1 – Critères retenus pour l'évaluation des différentes technologies [4]

sources d'énergie disponibles localement, telles que le soleil, l'eau ou encore le vent.

Les différentes sources d'énergie renouvelable étudiées dans ce travail et la chaîne des processus impliqués dans la production d'énergie décentralisée sont représentées à la figure 3. Certains autres types de production d'énergie, tels que l'énergie géothermique ou encore l'énergie marémotrice, ne sont pas considérés ici pour cause de non applicabilité à petite échelle, non maturité de la technologie, ou de grande spécificité de site [10].

3.2 Energie solaire

Ces dernières années, le monde entier a pu assister à la fulgurante émergence de la production d'électricité solaire, à partir de panneaux photovoltaïques. Utilisée aussi bien dans le cadre industriel que par des particuliers, elle devient en effet chaque jour plus com-

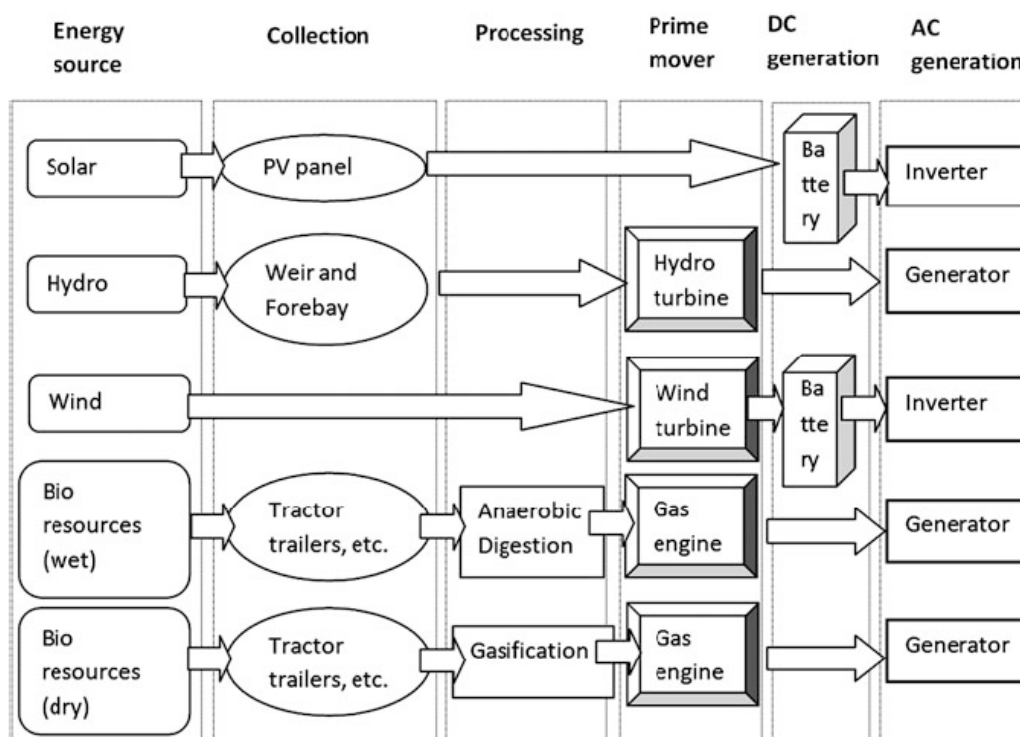


FIGURE 3 – Chaîne des opérations dans la production d'énergie décentralisée [10]

pétitive encore, ses coûts diminuant drastiquement. Grâce à leur facilité d'utilisation et le peu de maintenance exigé, les panneaux solaires permettent une production d'électricité fiable et prévisible, à condition de bénéficier d'un ensoleillement suffisant.

Dans le cadre de projets d'électrification en Afrique rurale, cette solution reste effectivement la favorite à l'heure actuelle. Nombreux sont les villages bénéficiant de cette source d'énergie, mise en place de différentes façons. Les *Solar home system* (SHS), solutions individuelles de production d'électricité permettant aux foyers de s'éclairer et recharger leurs téléphones portables, ou encore les kiosques solaires sont largement utilisés. Cette préférence s'explique notamment par la simplicité de ces équipements, nécessitant peu de maintenance. En effet, le système étant statique, aucune pièce mécanique davantage susceptible à l'usure ne s'y trouve. Cependant, la technologie reste complexe et compliquée voire impossible à réparer sur place dans le cas d'une panne éventuelle.

Le rayonnement solaire dans ces régions peut atteindre jusqu'à plus de 2500 kWh/m² par an, soit plus de deux fois et demi l'irradiation reçue dans nos contrées (figure 4). Il convient toutefois d'étudier ce rayonnement avec précaution, celui-ci variant sur une échelle horaire, au rythme de la journée, mais également annuelle, au rythme des saisons (hiver/été, saison sèche/saison des pluies). Dû à cette intermittence et selon l'utilisation voulue des équipements électriques, un système de stockage est presque toujours indispensable, augmentant drastiquement le coût des installations. Si le gisement solaire est dépendant de nombreux facteurs tels que la latitude du site, l'heure, la saison et les conditions météo, il peut tout de même être facilement estimé, l'énergie totale solaire reçue d'une année à l'autre restant sensiblement constante.

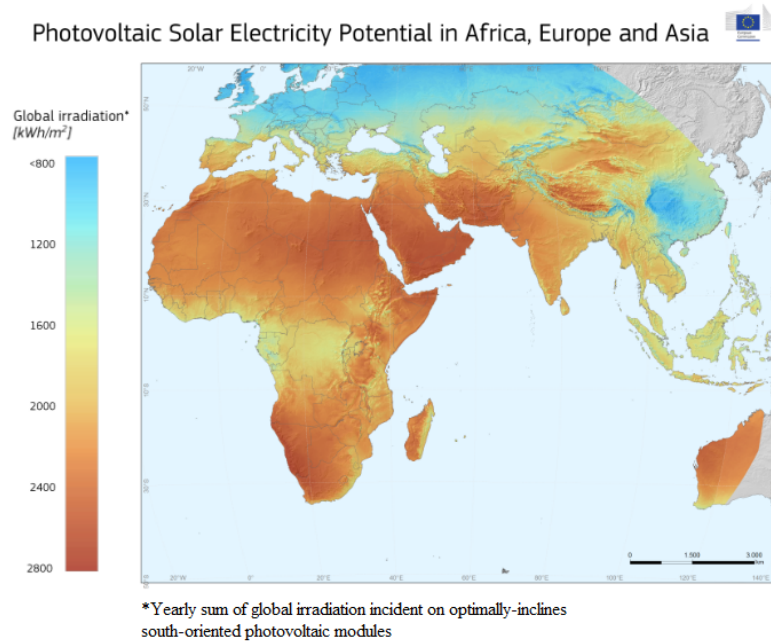


FIGURE 4 – Rayonnement solaire en Afrique, Europe et Asie [11]

3.3 Energie hydraulique

L'hydroélectricité est la source d'électricité d'origine renouvelable la plus utilisée dans le monde. Source d'énergie mature et fiable, elle permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie potentielle de l'eau. Outre les grands barrages, avec tous les problèmes qu'ils comportent (politiques, déplacement de la population,...), on s'intéressera plutôt ici aux solutions de production décentralisées.

Micro-turbines, installations au fil de l'eau (sans retenue) et autres sont des dispositifs permettant une production d'hydroélectricité décentralisée, directement au service de la population locale. Ils peuvent en général être produits avec des matériaux disponibles sur place et l'entretien peut être assuré par des travailleurs locaux.

Les centrales hydroélectriques peuvent être réparties en différentes catégories selon leur puissance. Bien que la définition diffère selon les différentes sources, une répartition comme telle est généralement admise :

- Les grandes centrales hydroélectriques (GCH), d'une puissance de plus de 10 MW ;
- Les petites centrales hydroélectriques (PCH), subdivisées en petites centrales (500 kW à 10 MW), microcentrales (20 kW à 500 kW) et picocentrales (moins de 20 kW).

Les petites centrales hydroélectriques sont celles opportunes pour un approvisionnement hors réseau dans les zones rurales, plus faciles à mettre en place, adaptées pour de faibles consommations et moins chères que leurs homologues de grandes tailles. Les ouvrages de petite hydraulique sont presque essentiellement des installations au fil de l'eau, avec peu ou pas d'accumulation.

Mature, de longue durée de vie, de faible coût et fiable, son avantage par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable est également son fonctionnement continu. En effet, contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, une centrale hydraulique fonctionne 24h/24.

Le principal problème au niveau de son utilisation dans un contexte de développement rural réside dans la connaissance du gisement disponible. En effet, de nombreux cours d'eau existants ne sont pas répertoriés ou parfois répertoriés avec des chiffres peu fiables, ce qui rend l'identification et le repérage de gisements problématiques. De plus, sa mise en place nécessite des travaux de génie civil, exigeant des coûts et du temps supplémentaires. Un réseau électrique doit être installé pour acheminer l'électricité produite jusqu'aux utilisateurs. Le coût des lignes électriques étant proportionnel à la distance, cette solution devient peu intéressante si aucun cours d'eau ne se trouve à proximité.

Le potentiel électrique d'un cours est calculé à partir de la formule suivante :

$$P = QHeg \quad (1)$$

Avec P la puissance électrique [W], Q le débit utilisable [m^3/s], H la hauteur de chute [m], e le facteur d'efficacité et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ la constante gravitationnelle. Il est donc proportionnel au débit et à la hauteur de chute du cours d'eau. Les périodes de saisons sèches, typiques des pays tropicaux, ne doivent pas être négligées, afin de s'assurer que le débit sera tout de même suffisant pour produire la quantité d'électricité désirée.

3.4 Énergie éolienne

Le petit éolien est une solution envisageable pour l'électrification de sites isolés, que ce soit dans les pays développés ou dans le cadre de projets d'électrification dans les pays en voie de développement. Les éoliennes produisent de l'électricité à partir de l'énergie du vent, exploitant l'énergie cinétique de ce dernier.



FIGURE 5 – Petite éolienne en Afrique [12]

La puissance maximale générée par une éolienne est liée à la vitesse du vent et à son diamètre par la formule :

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2)$$

Avec $16/27$ la limite de Betz, la limite physique du rendement d'une hélice, ρ la masse volumique de l'air [kg/m^3], $A = \pi r^2$ la surface balayée par les pales de l'éolienne [m^2] et U la vitesse du vent [m/s]. Une éolienne sera donc avantageuse dans des endroits présentant de grandes vitesses de vents.

Les vents variant sensiblement d'une région à l'autre selon le relief et le paysage (côte, grands arbres,...) et étant une source d'énergie très intermittente, une mesure précise sur les lieux pendant une longue durée est indispensable pour tout projet éolien. En effet, le potentiel éolien est fortement variable et il est donc peu fiable d'utiliser des données satellites pour ce genre de dispositif, contrairement aux données solaires qui donnent une bonne approximation.

Au niveau technique, les pales de l'éolienne tournant avec le vent, ces dernières subissent de grandes charges mécaniques et nécessitent donc une maintenance régulière. Le système risque également d'être endommagé lors de fortes tempêtes. Pour stabiliser la production, les petites éoliennes sont généralement associées à un générateur ou à des batteries. En raison du faible potentiel en Afrique subsaharienne, cette technologie est majoritairement utilisée pour son énergie mécanique comme éolienne de pompage pour l'eau, et non pour produire de l'énergie électrique.

3.5 Energie venant de la biomasse

La biomasse, ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale, peut être utilisée sous différentes formes, solide, liquide ou gazeuse et pour diverses finalités, telles que le chauffage ou l'électricité, mais aussi comme biocarburant pour le transport. En Afrique, elle est actuellement principalement utilisée sous sa forme traditionnelle pour le chauffage ou la cuisson, entraînant des conséquences parfois désastreuses pour la santé et l'environnement.

L'énergie produite à partir de la biomasse est considérée comme renouvelable et durable. En effet, les émissions de CO_2 émises lors de sa combustion correspondent aux quantités de gaz carboné capté de l'atmosphère par la photosynthèse. Elle n'est toutefois renouvelable que si sa consommation ne dépasse pas sa production, une mauvaise gestion pouvant mener à des problèmes de déforestation.

Afin de produire de l'électricité, la biomasse est transformée en carburant permettant d'alimenter un moteur. De nombreux processus existent avec différents types de conversion : biochimique, thermo-chimique et physico-chimique [13]. Parmi ceux-ci, les procédés les plus largement utilisés pour la production d'électricité décentralisée sont le procédé de méthanisation (conversion biochimique) et le procédé de gazéification (conversion thermo-chimique), produisant tous deux un gaz permettant d'alimenter un moteur [10].

La gazéification permet de convertir les matières organiques solides en un gaz de synthèse (appelé "syngas"), composé majoritairement de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce procédé résultant de l'action de la chaleur, il doit être réalisé à très haute température. Le gaz obtenu peut ensuite être utilisé comme source de production d'électricité en actionnant une turbine.

La méthanisation, aussi appelée fermentation anaérobie, permet de fabriquer du biogaz, composé principalement de méthane et dioxyde de carbone. Dans une cuve appelée digesteur, la matière organique est décomposée à l'aide de bactéries en l'absence d'oxygène.

A l'inverse des autres sources de production d'énergie renouvelables, la biomasse comporte le grand avantage d'être stockable. Elle permet donc une production d'électricité continue et modulable, une consommation selon la demande, présentant ainsi une bonne



FIGURE 6 – Digesteur à biogaz utilisé pour la fermentation anaérobie [14]

alternative au groupe électrogène alimenté par des combustibles fossiles. De plus, elle est disponible en abondance dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne, particulièrement en milieu rural. Elle exige donc néanmoins un approvisionnement en combustible régulier.

Outre le fait d'être stockable, la biomasse comporte de nombreux autres atouts. Près de 70 à 80 % du coût de la production d'électricité à partir de biomasse revient à la communauté rurale par l'emploi de main-d'oeuvre locale et le coût des matières organiques [10]. Cette technologie génère des revenus pour les agriculteurs locaux, principale activité économique en milieu rural. De plus, le digestat, deuxième produit de la méthanisation avec le biogaz, est valorisable.

En pratique toutefois, cette production d'énergie ne fonctionne pas toujours. Elle exige une certaine gestion de la part du personnel sur place afin d'assurer l'approvisionnement en combustible régulier, une main d'oeuvre qualifiée et une quantité importante d'eau. Elle reste encore peu adaptée au contexte rural subsaharien à l'heure actuelle.

Relativement bon marché, cette source d'énergie dépend fortement du coût et de la disponibilité des matières premières organiques, des coûts de main d'oeuvre, du facteur d'utilisation de la capacité de l'installation et de la distance sur laquelle la charge doit être transportée [10]. De plus, de grandes économies d'échelle peuvent être réalisées en augmentant la capacité des installations.

3.6 Energie fossile

Technologie bien connue pour l'électrification décentralisée, le groupe électrogène est encore actuellement la solution la plus utilisée en Afrique rurale. Appelé également générateur électrique, c'est un dispositif autonome qui permet de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un moteur thermique.

Grandement favorisé de la part des utilisateurs ruraux en raison de ses faibles coûts d'investissement, le dispositif étant relativement bon marché, son coût de revient au kilowatt-heure est cependant relativement élevé par rapport aux autres technologies. En effet, la phase d'exploitation est la plus coûteuse car le carburant nécessaire à la com-

bustion est cher, en particulier pour des régions difficiles d'accès. Il en résulte également une difficulté d'approvisionnement pour ces régions isolées. De plus, son faible rendement, inférieur à 30 %, entraîne de grandes consommations de carburant.

Lors de la combustion, le générateur rejette de grandes quantités de gaz à effet de serre et autres polluants nocifs pour la population et l'environnement. Le carburant le plus souvent rencontré en Afrique rurale est le diesel. Le groupe électrogène est également très bruyant et nécessite une maintenance régulière.

Bien que cette solution reste souvent la préférée des petits budgets qui ne peuvent se permettre des coûts d'investissement plus conséquents, elle possède donc de nombreux inconvénients.

3.7 Analyse comparative

3.7.1 Performance économique

Au niveau économique, alors que certaines technologies nécessitent des coûts d'opération conséquents comme la biomasse ou le générateur électrique en raison du carburant, d'autres à l'inverse nécessitent un capital d'investissement important, comme le photovoltaïque. Afin de comparer les solutions sur une base commune, le coût de revient moyen au kilowatt-heure d'électricité produit, appelé *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) et décrit plus en détails à la section 4.4, est évalué pour les différentes technologies et illustré à la figure 7.

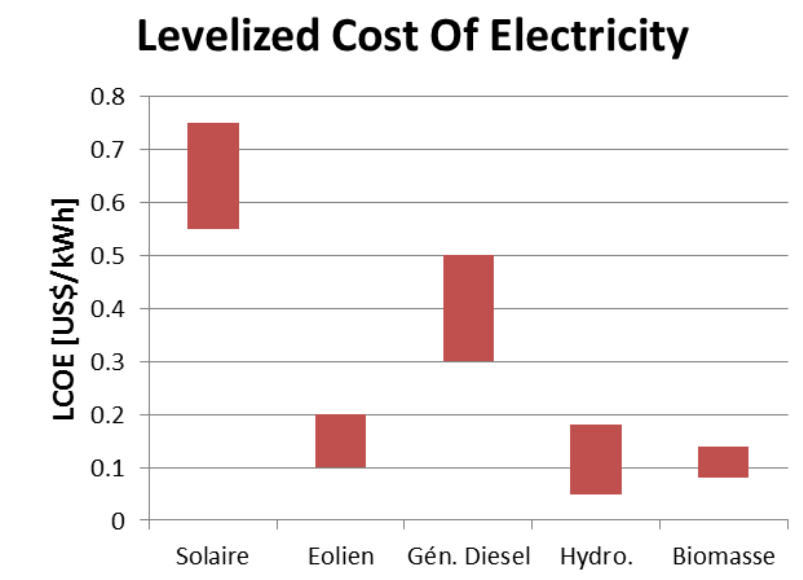


FIGURE 7 – Coût moyen au kilowatt-heure des différentes technologies en Afrique subsaharienne (Sources : [15], [10])

Les coûts affichés sont des valeurs moyennes sur le matériel rencontré en Afrique subsaharienne et pour des solutions hors réseau. Il s'agit toutefois d'une valeur moyenne et d'une estimation, les coûts pouvant varier très fort selon la région et la taille de l'installation. En effet, pour la plupart des technologies, des grandes économies d'échelle sont

possibles, ce qui explique les coûts élevés d'installation de petite taille. En particulier, une petite installation de lampe solaire individuelle de type *Solar Home System* peut monter jusqu'à 1.5 US\$/kWh [16] !

3.7.2 Impact environnemental

D'un point de vue environnemental, comme expliqué dans le tableau 1, il est important de démarquer les polluants atmosphériques, tels que gaz à effet de serre ou les oxydes d'azote, de l'impact environnemental local, tel que l'impact visuel, les déchets éventuels produits, la perturbation de l'écosystème,...

Les polluants atmosphériques sont nombreux dans notre environnement et ont un effet négatif sur la qualité de l'air, susceptible de provoquer un effet nuisible sur notre santé.

En particulier, les émissions d'oxyde d'azote, NO et NO₂, sont responsables de la formation d'ozone troposphérique et du smog photochimique, de la destruction de l'ozone stratosphérique ainsi que des pluies acides. Le dioxyde d'azote (NO₂) est également hautement toxique, entraînant des irritations du système respiratoire [17].

Le dioxyde de soufre (SO₂) est également responsable de la formation de pluies acides et du smog acide. C'est un gaz irritant, entraînant des problèmes de toux, bronchite et asthme. Il peut être mortel au-delà d'un certain seuil [17].

Le dioxyde de carbone (CO₂), grandement connu pour son lien avec le réchauffement climatique, n'est pas à proprement parler un polluant atmosphérique. En effet, contrairement aux NO_x et SO₂ décrits ci-dessus, il n'est pas directement toxique pour la santé, mais est un puissant gaz à effet de serre (GES) provoquant un dérèglement climatique. Bien qu'étant le plus connu, il n'est pas le seul gaz à effet de serre. Il existe plusieurs sortes de gaz à effet de serre, citons notamment le méthane et le protoxyde d'azote. Afin de calculer le potentiel de réchauffement climatique global des différents produits, celui-ci est mesuré en "équivalent CO₂", unité créée afin de pouvoir cumuler les émissions des différents GES [18].

Les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre sont évaluées sur l'entièreté du cycle de vie des technologies de production d'électricité, afin de prendre en compte non seulement les émissions dues à la phase d'utilisation des installations, mais également les émissions lors de chaque phase de la vie du produit, de l'extraction des matières premières à sa gestion de fin de vie. Celles-ci sont illustrées à la figure 8.

Les émissions liées au générateur à diesel sont nettement plus élevées que les autres. Ces dernières sont principalement dues à sa phase d'utilisation. La production d'électricité à partir d'un groupe électrogène se réalisant par la combustion de combustible fossile, de grandes quantités d'oxyde de soufre, d'oxydes d'azote et de dioxyde de carbone sont émises.

Au sein des énergies renouvelables, on remarque que les panneaux photovoltaïques émettent globalement davantage de gaz néfastes que les autres systèmes. C'est une technologie complexe, qui nécessite une grande quantité d'énergie pour sa production et qui entraîne donc une grande quantité d'émissions de polluants. Ces systèmes étant peu recyclables, la gestion de fin de vie est également responsable d'une partie des émissions. Un pic au sein des émissions de NO_x est observé pour la production d'électricité à partir

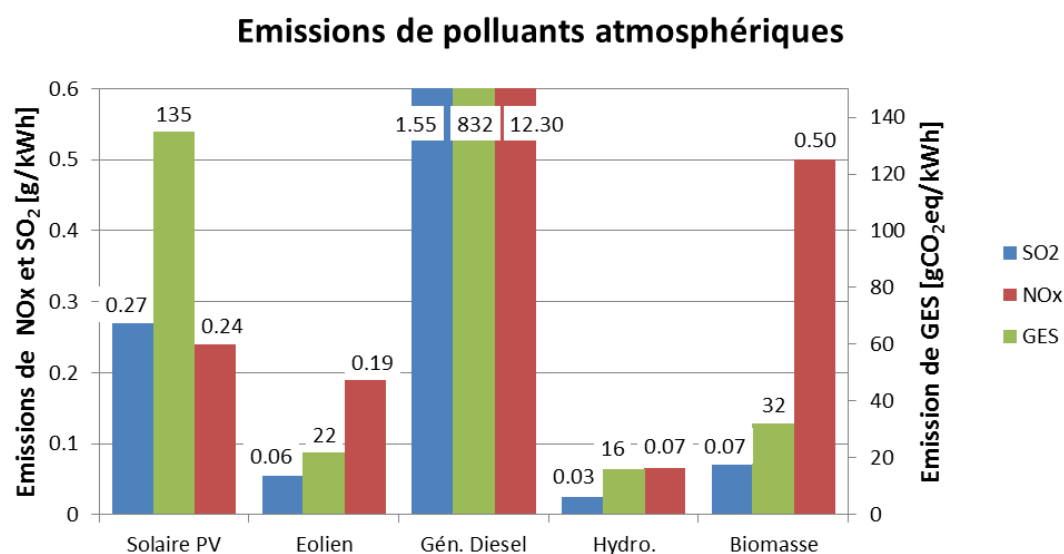


FIGURE 8 – Emissions moyennes de NO_x, SO₂ et de gaz à effet de serre par type d'énergie sur l'ensemble du cycle de vie [4], [9], [19]

de biomasse. Ceci s'explique par la combustion de composés organiques, émettant des composés azotés.

Les impacts environnementaux locaux ont été détaillés dans les sous-sections précédentes pour chaque technologie de production d'électricité. Rahman et al. (2013) [9] classe ces systèmes selon ce critère environnemental de la manière suivante, par ordre croissant d'impact sur l'environnement :

1. Solaire photovoltaïque - peu ou pas d'impact au niveau local.
2. Biomasse - impact positif car permet de valoriser les déchets organiques. Une mauvaise gestion pourrait toutefois entraîner des problèmes de déforestation.
3. Petit éolien - impact visuel.
4. Microcentrales hydroélectriques - impact sur le paysage et la gestion en eau.
5. Générateur à diesel - émissions de polluants sur place, lors de l'utilisation.

3.7.3 Tableau comparatif

Sur base des critères établis précédemment, une comparaison peut être réalisée entre les différentes technologies de production d'électricité, de manière à évaluer la technologie la plus appropriée. Une grille d'évaluation est établie afin d'examiner et de comparer la performance de ces différentes technologies.

La grille d'évaluation a été construite selon l'étude des différentes technologies existantes exprimées ci-dessus, établie à partir d'une revue de la littérature et de retours d'expériences. Les solutions sont classées de 1 à 5, avec 1 représentant la meilleure valeur, soit la technologie remplissant au mieux le critère. La grille est illustrée au tableau 2.

Une pondération des différents critères peut être utilisée, mais sera ici laissée au jugement de l'utilisateur. En effet, chaque critère ici a sa part d'importance et la prééminence

Technologie	Coût	Technologie adaptée	Impact environnemental	Remarque
PV	5	1	3	Nécessité de ressources suffisantes à proximité Très intermittent et imprévisible, difficulté d'obtenir des mesures fiables
Hydro-électricité	1	2	2	
Eolien	3	3	1	
Biomasse	2	5	4	
Fossile	4	4	5	

Tableau 2 – Tableau comparatif des différentes technologies sur base des critères établis

éventuelle d'un par rapport à l'autre dépendra du but final recherché, ainsi que bien souvent du budget disponible.

Cette approche donne donc un premier résultat sur l'étude comparative des différentes solutions de production d'électricité. Cependant, ce tableau est à utiliser avec précaution et dépend beaucoup des conditions propres au projet, telle que la météo, la disponibilité du matériel, la formation des personnes locales,... De plus, l'approche comporte un certain degré de subjectivité, notamment concernant l'adaptabilité de la technologie, qui est peu quantifiable. Elle donne donc une estimation, mais davantage de données sont nécessaires afin de pouvoir quantifier plus précisément les coûts, les impacts environnementaux et déterminer la solution la plus adaptée.

Latitude	2°31'35.8"N (2.526602)
Longitude	27°42'13.1"E (27.703631)
Altitude	775 m

Tableau 3 – Coordonnées GPS du site étudié

service d'urgence. Dans la pyramide de l'organisation des soins, il est en seconde position, la première étant les centres de santé qui, en principe, sont consultés en premier lieu par les malades.

Les locaux sont constitués de plusieurs pavillons en carré autour d'un espace vert d'une superficie de 1 hectare. Le pavillon central est le bâtiment principal hébergeant l'accueil des malades et les services administratifs (figure 10). Le plan de l'hôpital peut être consulté à l'annexe 1.



FIGURE 10 – Vue satellite de l'hôpital

Le réseau électrique national ne parvient pas jusqu'à l'hôpital. Il dispose donc actuellement de son propre réseau électrique, relié à un groupe électrogène récent, ainsi qu'un réseau complémentaire de panneaux photovoltaïques.

Le groupe électrogène est utilisé certains jours uniquement, lors d'opérations nécessitant plusieurs équipements gourmands en énergie, en raison du prix élevé du carburant et de sa difficulté d'acheminement. L'endroit d'approvisionnement en carburant le plus proche est Isiro, situé à 50 km, dont l'accès est compliqué : de Isiro à Pawa, alors que la première partie de l'itinéraire est une route principale en bon état, la deuxième moitié est une route secondaire, peu voire pas du tout praticable en saison des pluies. Le réseau de panneaux solaires, quant à lui, utilisé quotidiennement pour l'éclairage principalement, est vétuste et défectueux.

Les installations électriques sont précaires et en mauvais état : mauvais câblages, problèmes de dimensionnement, batteries défectueuses,... Il est donc recommandé, dans le cadre du renforcement du système d'électricité de l'hôpital, de passer par le démantèlement

des réseaux actuels et le dimensionnement de nouvelles installations sur base des besoins actuels.

Dans le cadre de ce travail, seul le groupe électrogène, récent, sera donc considéré comme équipement existant, les installations photovoltaïques actuellement sur place étant obsolètes. Une étude sur les différents modes de production d'électricité possibles sur base de la courbe de charge de l'hôpital est réalisée afin de déterminer la solution adéquate, sur base des critères définis précédemment.

4.2 Courbe de charge

Dans un projet d'électrification, l'indispensable avant tout choix de solutions productrices d'énergie et tout calcul de dimensionnement est d'estimer précisément la consommation électrique du projet. Cette première étape est d'autant plus exigeante lors de l'emploi d'énergies renouvelables. En effet, ces dernières étant intermittentes, il convient d'estimer précisément, heure par heure, la courbe de charge afin d'assurer la sécurité de l'approvisionnement.

Dans le cas d'un hôpital, il est primordial de pouvoir estimer la charge et de ne pas la dépasser, afin d'éviter toute coupure lors d'interventions considérables, qui pourraient avoir de grandes conséquences sur la santé des individus.

La méthode utilisée afin d'estimer la charge est la suivante : calcul des puissances instantanées des différents appareils multipliées par le temps d'utilisation. Cela donne donc la quantité d'énergie consommée aux différents moments de la journée. L'électricité appelant l'électricité, il est impératif d'évaluer les besoins actuels, mais également futurs. En effet, non seulement de nouveaux appareils pourraient être à pourvoir dans un futur plus ou moins proche, mais l'accès à un approvisionnement en électricité fiable pourrait également pousser à une plus grande utilisation des équipements déjà sur place.

Dans le cas du HGR de Pawa, l'inventaire des appareils électriques et leur durée de fonctionnement ont été fournis par des personnes s'étant rendues sur place. Il convient tout de même de tenir compte de ce relevé avec un certain esprit critique, certaines heures de fonctionnement semblant peu réalistes. De plus, quelques appareils très énergivores sont intermittents et ne fonctionnent en réalité que peu de temps alors que d'autres (couveuses par exemple) ne seront pas utilisés tous les jours. Après discussion avec un spécialiste de la santé de l'ONG médicale Memisa responsable du projet, la liste des équipements et de leur consommation a été mise à jour. Celle-ci se trouve en annexe 2.

Il est également important de hiérarchiser les charges [4] et les répartir en différentes catégories selon leur importance, à savoir les charges critiques, les charges essentielles et les charges non critiques. Ces dernières représentant respectivement les appareils devant fonctionner en permanence (réfrigérateur à vaccin), les appareils importants tant que l'électricité est disponible (éclairage, ordinateurs) et les appareils utiles mais non indispensables (climatiseur, ventilateur).

Au niveau de l'éclairage, la plupart des ampoules actuelles sont obsolètes et très consommatrices d'énergie. Un remplacement de celles-ci sera donc réalisé lors de l'installation du niveau système de production d'électricité.

N'ayant pas encore obtenu toutes les informations concernant le niveau d'éclairage

désiré dans les différentes pièces au moment de la réalisation de ce travail, un calcul est réalisé afin de pouvoir estimer la consommation des futurs points lumineux. Toutefois, un calcul du besoin en éclairage sur base de tables définissant le niveau d'éclairement recommandé d'une pièce en lux selon son utilisation n'est pas réalisable ici. En effet, au vu de la taille de certaines salles, un éclairage suffisant et homogène demanderait une quantité démesurée de points lumineux par rapport au budget alloué.

L'estimation a donc été réalisée selon le raisonnement suivant :

- A partir des données obtenues sur le nombre et le type d'ampoules utilisées sur place, le flux lumineux actuel dans les différents endroits est connu.
- L'efficacité lumineuse des ampoules de remplacement, moins énergivores et de type led, est estimée à 100 lumen/W [23]
- La puissance des nouvelles installations d'éclairage est obtenue :

$$P[W] = \frac{\text{flux lumineux}[lm]}{\text{efficacité lumineuse}[lm/W]} \quad (3)$$

Ce sont ces puissances qui sont utilisées pour l'étude et reprises dans la table 10 de l'annexe 2.

La courbe de charge de la consommation d'électricité de l'hôpital est représentée à la figure 11. Cette courbe est considérée comme constante au cours de l'année et ne subissant aucune variation au niveau saisonnier. En effet, alors que la plupart des appareils sont indépendants des conditions météorologiques, les systèmes nécessaires à la production de froid, climatiseurs et ventilateurs, sont nécessaires toute l'année étant donné les températures de la région.

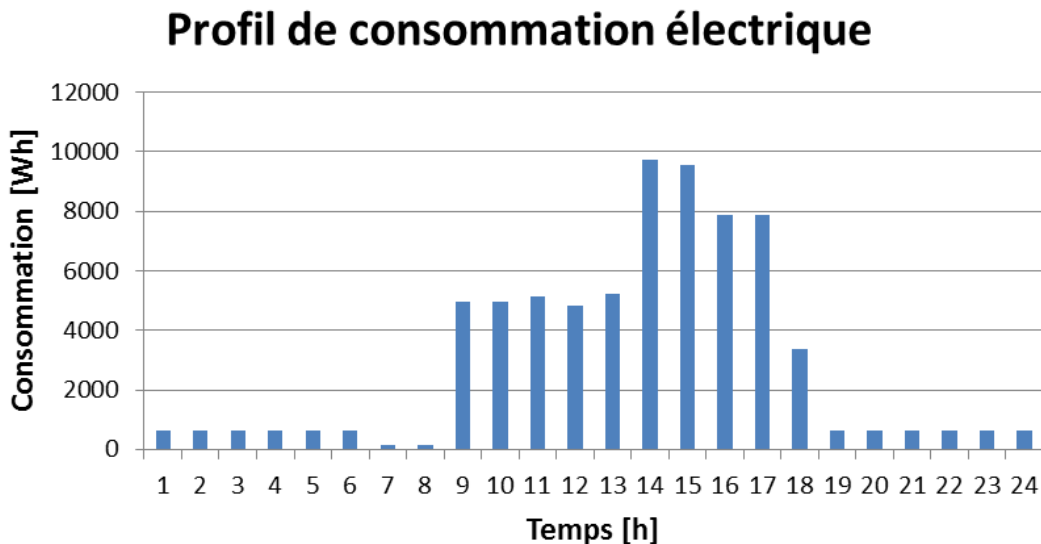


FIGURE 11 – Consommation électrique horaire de l'hôpital

4.3 Présentation des différentes solutions étudiées

Parmi les différentes technologies présentées à la section précédente, toutes ne sont pas toujours applicables. En particulier, pour le cas de l'électrification de l'hôpital de Pawa

et pour les raisons citées plus haut, certaines solutions sont à proscrire.

Petit éolien En raison de l'absence de mesures concernant la vitesse du vent et le potentiel éolien sur place, cette solution ne sera pas étudiée ici. En effet, sans données fiables, le dimensionnement est impossible. De plus, le site étudié ne se trouvant pas sur la côte ou dans des zones particulièrement venteuses, cette solution semble en tout état de cause inadéquate.

Hydroélectricité Aucun cours d'eau ne se trouve à proximité du site pour permettre une production d'hydroélectricité.

Biomasse Cette solution est impossible dans les conditions actuelles. Un travail de sensibilisation du personnel local est nécessaire en amont afin d'assurer la bonne gestion logistique d'une installation de méthanisation.

En raison des différents motifs présentés ci-dessus, les solutions applicables se limitent à une production d'électricité d'origine solaire ou fossile. Afin d'évaluer la combinaison la plus adéquate des dispositifs panneaux-batteries-groupe électrogène, une étude technico-économique est réalisée. En effet, une solution hybride peut être imaginée, avec une proportion appropriée de chaque type, mais également une solution tout solaire, avec le groupe électrogène en secours uniquement.

L'étude est réalisée à l'aide du logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) développé par le "National Renewable Energy Laboratory (NREL)", aux Etats-Unis. Le logiciel *HOMER Pro* est un des grands standards mondiaux dans le domaine de l'optimisation de micro-réseau dans tous secteurs, des villages décentralisés aux grandes structures connectées au réseau. Il intègre de puissants outils permettant de simuler et optimiser des analyses technico-économiques. [24].

Après une première présentation et description des solutions applicables, celles-ci seront ensuite comparées au niveau de leurs coûts, de leur adaptabilité au contexte social et culturel ainsi qu'au niveau de leur impact environnemental.

Concernant le type de régime de fonctionnement, en courant continu ou alternatif, un choix est à réaliser. Alors que le courant desservi par les panneaux photovoltaïques et les batteries est continu, celui produit par le groupe électrogène est alternatif. Nombre d'équipements présents sur place fonctionnant en courant alternatif, seule la solution courant alternatif (AC) sera considérée pour le réseau de l'hôpital. Le courant continu pouvant alors être transformé à l'aide d'un onduleur.

Lors des calculs, une proportion de charge non desservie de maximum 10 % de la charge demandée est admise annuellement. Cela permet d'éviter tout surdimensionnement de l'installation solaire. Lors d'éventuel pic de charge inhabituel ou lors de journées de très faible ensoleillement, la charge pourra être assurée par un groupe électrogène de secours.

4.3.1 Solution groupe électrogène

Le groupe électrogène déjà présent sur place (figure 12) est en bon état et permet à l'hôpital de s'approvisionner en électricité à l'heure actuelle. Toutefois, il n'est utilisé que certains jours lorsque l'hôpital a besoin d'utiliser quelques équipements gourmands en énergie (pour réaliser des opérations), en raison du prix élevé de carburant et de la difficulté de l'acheminement de celui-ci jusque Pawa.



FIGURE 12 – Groupe électrogène présent sur place

Le dispositif étant déjà sur place dans ce cas-ci, le calcul économique sera donc exempt de son coût d'investissement. Celui-ci étant de toute manière faible par rapport à son coût d'utilisation, cela n'aura que peu d'influence sur les résultats. En effet, le coût d'utilisation est le coût significatif à prendre en compte pour un générateur électrogène, en raison de l'approvisionnement en combustible.

Les caractéristiques relatives au générateur électrique sont reprises dans le tableau 4. Le prix actuel du diesel à Isiro, l'endroit le plus proche pour un approvisionnement, est de 1.35 \$/l. La durée de vie dépend du fabriquant, des dimensions, de son utilisation et de son entretien. La durée de vie pour un groupe électrogène diesel refroidi par eau et fonctionnant à 1500tr/min., tel que celui-ci, est estimée à 15000 heures [25].

Puissance	13.2 kW
Groupe électrogène	8800 US\$ [15]
Coût du combustible	1.35 US\$/l
Durée de vie	15000 heures
PCI du diesel	35280 kJ/l [26]
Coût de maintenance	198 US\$/an [9]

Tableau 4 – Caractéristiques du groupe électrogène

L'efficacité d'un groupe électrogène diminue fortement avec la diminution de la charge appelée. En effet, le rendement est maximal lorsque celui-ci est utilisé à sa puissance nominale. Cependant, lorsque les besoins en puissance diminuent et qu'il n'est utilisé qu'à un pourcentage inférieur à sa charge nominale, son rendement s'en retrouve diminué également. La courbe de rendement en fonction du pourcentage de la charge nominale est calculée à partir des données constructeur de la fiche technique du groupe électrogène [27] et de la méthode de calcul utilisée par le logiciel HOMER [28].

La consommation de combustible du groupe électrogène [l/h] en fonction de sa puissance électrique est donnée comme suit :

$$\dot{m} = F_0 \times Y_{gen} + F_1 \times P_{gen} \quad (4)$$

Avec F_0 le coefficient d'interception de la courbe de consommation [l/h/kW], F_1 la pente de la courbe de consommation [l/h/kW], Y_{gen} la puissance électrique nominale du générateur [kW] et P_{gen} la puissance électrique du générateur [kW].

A partir de la fiche technique du modèle présent sur place [27], les consommations lorsque le groupe tourne à 50 et 100% de sa charge nominale sont connues, permettant d'obtenir une première courbe linéaire de consommation en fonction de la charge. Connaissant le débit de combustible et la puissance électrique de deux points, les coefficients F_0 et F_1 peuvent être obtenus.

Le rendement du groupe électrogène est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique délivrée par celui-ci et la puissance contenue dans le combustible brûlé, liée à son pouvoir calorifique inférieur, ce qui donne pour un fonctionnement à charge nominale :

$$\eta = \frac{P_{gen}}{\frac{\dot{m}}{3600} \times PCI} = \frac{13.2}{\frac{4.5}{3600} \times 35280} = 0.2993 = 29.93\% \quad (5)$$

Avec P_{gen} la puissance délivrée par le groupe électrogène [kW], PCI le pouvoir calorifique inférieur du combustible [kJ/l] et $\dot{m}$ le débit de combustible consommé pour délivrer la puissance nominale [l/h].

En remplaçant le débit de combustible brûlé par sa formule dans l'équation 5 et en divisant numérateur et dénominateur par la puissance nominale Y_{gen} , l'équation du rendement en fonction de la puissance relative du générateur devient :

$$\eta = \frac{3600 * p_{gen}}{(F_0 + F_1 * p_{gen}) \times PCI} \quad (6)$$

Avec $p_{gen} = P_{gen}/Y_{gen}$ la puissance relative par rapport à la puissance nominale. Cette formule est illustrée à la figure 13.

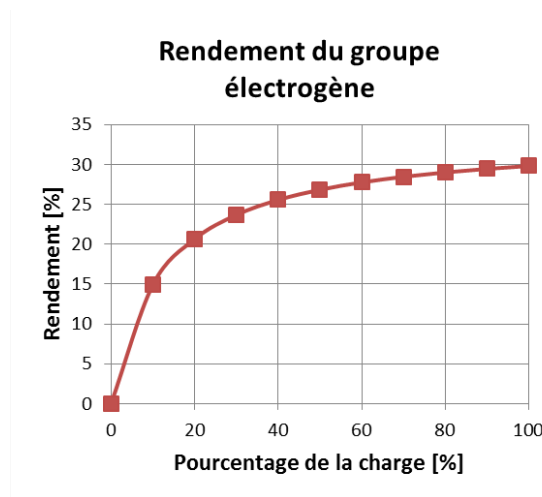


FIGURE 13 – Rendement du groupe électrogène

Il est donc observé que le rendement se comporte de manière logarithmique avec le pourcentage de la charge, et qu'une utilisation du groupe électrogène à faible puissance est à proscrire. Il est idéalement à utiliser à sa puissance nominale afin d'éviter toute

perte inutile. Si sa production est supérieure à la charge nécessaire, le surplus pourrait être utilisé pour la recharge de batteries éventuelles.

De plus, une utilisation à charge faible pendant de longues périodes ne permettra pas au moteur de fonctionner à une température suffisamment élevée pour permettre de brûler la totalité du carburant. Le carburant non consommé s'accumulera alors dans le système d'échappement, ce qui peut l'encrasser et réduire la performance opérationnelle [29]. Cette mauvaise combustion à faible charge est un problème courant dans les moteurs diesel. Afin de l'éviter, une charge minimum de fonctionnement à ne pas dépasser est définie, fixée en général à 25 % de la puissance nominale [29].

Le groupe électrogène étudié ici a une puissance de 13.2 kW et le pic de charge qu'expérimente le système au cours d'une journée type est de 9.7 kW. Afin de pouvoir fournir l'entièreté de la charge de manière efficace, sa puissance nominale devrait être égale au pic de charge. Toutefois, une marge de sécurité d'un facteur de 1.3 est souvent admise lors du dimensionnement de générateur électrique, permettant de faire face à une éventuelle augmentation de la charge, ce qui donne :

$$\text{Puissance nominale} = \text{charge maximale} \times 1.3 \quad (7)$$

$$= 9.7 \times 1.3 = 12.61 \text{ kW} \quad (8)$$

Le générateur de 13.2 kW est donc considéré comme bien dimensionné pour répondre à la charge demandée par l'hôpital.

Toutefois, excepté les pics de consommation, les charges sont relativement inférieures durant le reste de la journée, ce qui provoquera une diminution de l'efficacité du groupe électrogène, comme illustré à la figure 13.

Par ailleurs, durant plus de la moitié de la journée, la charge est relativement faible, l'électricité n'étant requise pratiquement que pour l'éclairage durant la nuit. Cependant, afin d'éviter le problème de non combustion correcte du diesel comme expliqué plus haut, le générateur devra tout de même fonctionner à 25 % de sa puissance nominale, ce qui entraînera de grandes pertes d'énergie si aucune solution de stockage n'est prévue.

En utilisant uniquement le groupe électrogène, sans aucune solution de stockage, et en tenant compte de la diminution de rendement et de la puissance minimale de fonctionnement, une consommation journalière de carburant de 45.2 litres est nécessaire pour subvenir à la charge quotidienne, soit environ 16500 litres par an.

Cette importante consommation de carburant entraîne des coûts exorbitants, détaillés à la section 4.4. Ceci est principalement dû à l'électricité produite en excès afin d'atteindre la charge minimale de 25 % de la puissance nominale. De plus, étant donné sa durée de vie limitée à 15000 heures, un fonctionnement en permanence demande le remplacement du groupe tous les 2 ans.

L'ajout de batteries permet de remédier au problème de l'électricité produite en excès. Le générateur fonctionnera ainsi uniquement à charge importante et stockera l'électricité produite en excès dans les batteries, afin d'arriver à un bilan électrique nul (ni excès, ni déficit). Cette solution diminue grandement la consommation de carburant, à hauteur de 27.6 l/jour mais demande toutefois l'investissement de batteries. Les batteries utilisées pour le calcul ainsi que les résultats seront décrits plus en détail dans les sections 4.3.2 et 4.3.4.

4.3.2 Solution tout solaire

La première solution alternative à envisager est de se passer totalement du groupe électrogène. Pawa étant une région reculée et peu accessible, sa localisation rend l'approvisionnement en combustible compliquée. De plus, pour les raisons citées précédemment, la production d'électricité à partir de combustible fossile est à éviter.

Connaissant les coordonnées GPS du lieu étudié (tableau 3), le potentiel solaire peut être facilement estimé à partir de différents outils existants. Le logiciel HOMER fait appel aux données météorologiques de la NASA (NASA Surface meteorology and Solar Energy database [30]), détenant des données satellites pour l'ensemble du monde sur une période de 22 ans (juillet 1983 à juin 2005).

Afin de maximiser la production d'électricité à partir de panneaux solaires, il est nécessaire de connaître leur orientation et inclinaison optimales. En effet, pour produire au maximum de ses capacités, un panneau photovoltaïque doit avoir le plan du capteur perpendiculaire aux rayons solaires. Le site se situant pratiquement à l'équateur (latitude de 2.53 degrés), l'inclinaison optimale est nulle et des panneaux placés horizontalement sont adéquats, l'orientation important donc peu. En pratique, ceux-ci devront tout de même être légèrement inclinés afin de permettre l'écoulement de l'eau en cas de pluies. Afin de simplifier les calculs, des panneaux horizontaux seront donc considérés.

Le rayonnement solaire global moyen reçu sur surface horizontale au cours de l'année dans la région étudiée est illustré à la figure 14. Le rayonnement global horizontal annuel à Pawa est de 1850 kWh/m².

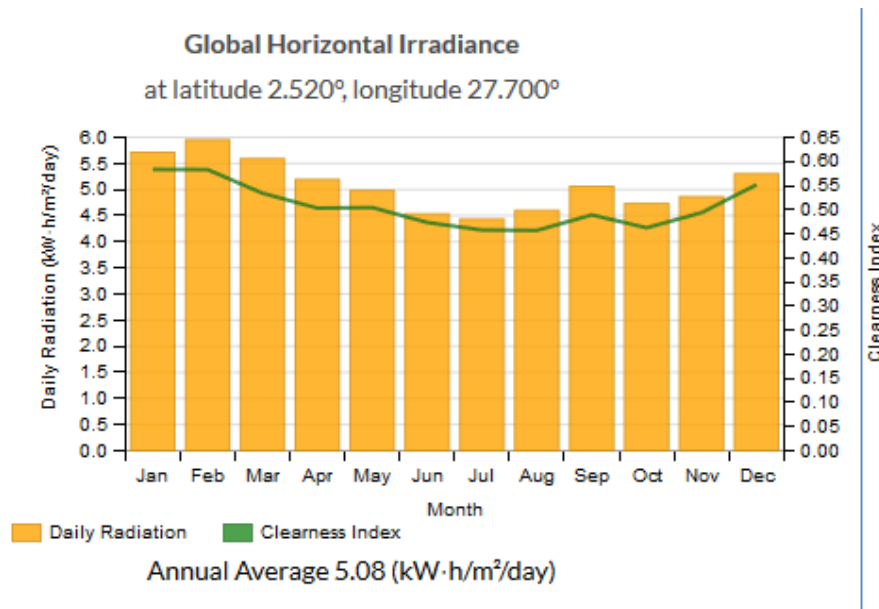


FIGURE 14 – Rayonnement global horizontal moyen sur une surface horizontale à Pawa [30]

Contrairement à nos régions au climat plus tempéré, les variations mensuelles d'ensoleillement sont relativement faibles pour un climat équatorial. Un ensoleillement plus faible est observé pour les mois de juin à août, correspondant à la saison des pluies. L'indice de clarté, correspondant au rapport entre le rayonnement arrivant à la surface et le

rayonnement hors atmosphère, est également représenté. Il donne une mesure du degré de clarté.

La production d'électricité P_{PV} pour des panneaux donnés dépend de deux choses :

- Le rayonnement solaire $[W/m^2]$: la production augmente avec le rayonnement.
- La température des cellules $[^{\circ}C]$: la production diminue lorsque la température des cellules augmente.

La puissance de fonctionnement des panneaux est calculée par le logiciel par la formule suivante :

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad (9)$$

Avec

- Y_{PV} la puissance crête des panneaux $[kW]$, sous les conditions standards ($1000 W/m^2$, $25^{\circ}C$)
- f_{PV} le facteur de réduction $[\%]$, permettant de modéliser la réduction de puissance suite à la présence d'ombrage, de neige, de poussières,...
- $\bar{G}_T$ le rayonnement solaire incident au temps t $[kW/m^2]$
- $\bar{G}_{T,STC} = 1 kW/m^2$ le rayonnement solaire incident sous les conditions standards
- α_P le coefficient de température $[\%/^{\circ}C]$, dépendant du panneau employé
- T_c la température des cellules au temps t $[^{\circ}C]$
- $T_{c,STC} = 25^{\circ}C$ la température des cellules sous les conditions standards

Cette formule permet donc de calculer la production d'électricité pour une puissance installée à chaque pas de temps t , fixé ici à 1h. La température des cellules est calculée à partir du rayonnement solaire, de la température ambiante et de la température en conditions NOCT (Nominal Operating Cell Température : température des cellules sous les conditions $\bar{G}_T=0.8 kW/m^2$ et $t_{amb} = 20^{\circ}C$). Cette température, proche de la température ambiante durant la nuit, augmente fortement avec le rayonnement solaire. Une attention particulière doit donc y être accordée, les températures et le rayonnement solaire étant élevés dans cette région.

Dans le cadre de ce projet, les panneaux photovoltaïques polycristallins « SW 250 - 260 poly » de la marque SolarWorld et de puissance crête de 260 Wc [31] ont été choisis pour réaliser l'étude. Ceux-ci peuvent être fournis par un magasin situé à Kinshasa avec lequel Ingénieurs sans frontières a déjà travaillé dans le passé.

Le tableau 5 reprend les caractéristiques principales des panneaux employés. En particulier, un coût de maintenance évalué en fonction du pourcentage du coût d'investissement initial est fixé [15].

Puissance PV	0.260 kWc
Coût PV	560 US\$
Durée de vie	25 ans
Coût de maintenance	$2.5\% \times 560 = 14 \text{ US\$/an}$ [15]
Rendement STC	15.51 %

Tableau 5 – Caractéristiques des panneaux photovoltaïques

Pour pouvoir stocker l'électricité produite par les panneaux afin de l'utiliser lors de

moments de faible ou non ensoleillement, des batteries sont utilisées. Les batteries choisies sont des batteries de type *Valve Regulated Lead-Acid* (VLRA). Ce sont des batteries étanches, qui ne nécessitent aucun entretien [32], contrairement aux batteries acide-plomb basiques, dites "ouvertes", qui nécessitent en particulier l'ajout régulier d'eau. Elles permettent également des décharges plus profondes. Elles sont donc particulièrement adaptées pour une utilisation dans des sites isolés où la maintenance est difficile et onéreuse, tel que celui étudié dans le cadre de ce travail. Les batteries au lithium-ion ne sont pas considérées ici pour un tel projet, leur coût étant encore trop conséquent.

Les caractéristiques de la batterie utilisée pour réaliser l'étude, la batterie "Ritar DG12-200" [33], sont reprises dans le tableau 6.

Typologie	VLRA
Capacité	200 Ah
Coût d'achat	643 \$
Durée de vie	10 ans
Coût de maintenance	0
Profondeur de décharge	80 %
Rendement	80 % [34]

Tableau 6 – Caractéristiques des batteries

Alors que les panneaux photovoltaïques et les batteries desservent du courant continu, le régime de fonctionnement des équipements et du réseau de l'hôpital est en courant alternatif. L'emploi d'un dispositif permettant de convertir ce courant DC en AC, un onduleur, est donc nécessaire. Ce dernier doit être dimensionné de manière à ce que sa puissance nominale couvre la somme des puissances de tous les équipements que l'on souhaite utiliser en même temps, soit le pic de charge maximal. Une marge de dimensionnement de 20 à 30 % est en général recommandée pour garantir le bon fonctionnement de l'onduleur à une température ambiante supérieure à 25°C [35].

A cela s'ajoute également l'emploi d'un régulateur de charge, qui a pour fonction de gérer la charge et la décharge du parc de batteries. Il permet un transfert optimal d'énergie entre le générateur solaire et la batterie tout en minimisant la profondeur de décharge et en protégeant la batterie de la surcharge, qui provoquerait son vieillissement prématuré. Le régulateur choisi intègre la technique de localisation du point de puissance maximale, *Maximum power point tracking* (MPPT). Ce dispositif permet de rechercher les tensions optimales de fonctionnement des panneaux afin de maximiser la production d'énergie.

L'onduleur et le régulateur considérés ont une durée de vie de 10 ans, un rendement de 95 % [36], un coût de maintenance estimé à 2.5 % du coût d'achat [15] et un coût d'achat de 1.1 US\$/W et 0.4 US\$/W respectivement.

La figure 15 illustre le schéma d'une installation solaire autonome, avec ses différents composants.

Il est toutefois à préciser que certains dispositifs de moindres coûts, mais tout autant indispensables, n'ont pas été présentés et ne sont pas pris en compte dans les calculs, tels que les câblages, les supports pour panneaux et les parafoudres nécessaires dû aux risques récurrents de foudre dans ces régions.

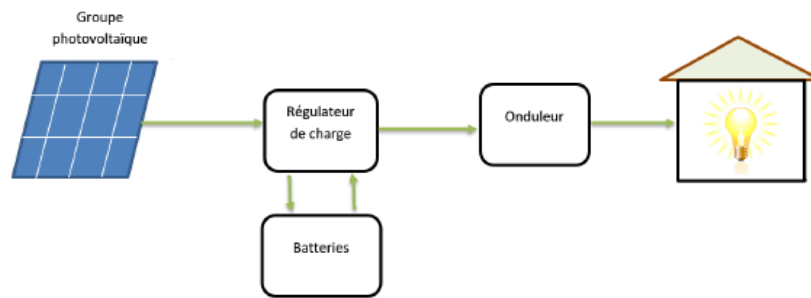


FIGURE 15 – Schéma de la chaîne de conversion d'énergie PV d'une installation autonome

4.3.3 Solution hybride

La dernière solution étudiée, appelée solution hybride, est un système combinant les technologies présentées ci-dessus, à savoir panneaux photovoltaïques, batteries et groupe électrogène. Elle est illustrée à la figure 16.

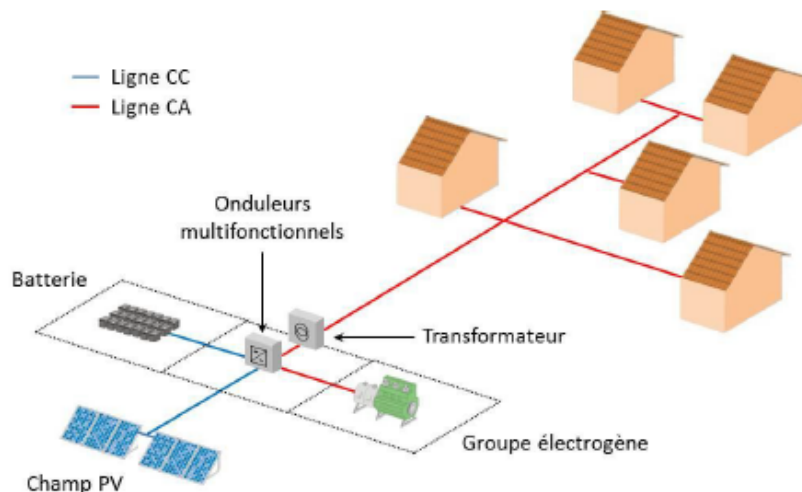


FIGURE 16 – Plan schématique d'un système hybride PV-diesel pour l'électrification rurale [37]

Faisant à la fois appel au générateur électrique et à la production solaire, cette solution a comme principal avantage de permettre de compenser les inconvénients des deux technologies, en particulier l'intermittence du rayonnement solaire et les coûts élevés du carburant.

En effet, les jours de plus faible ensoleillement ou lors d'un pic de charge élevé, l'utilisation du générateur électrique permet d'assurer la charge appelée à 100 %, en réduisant ainsi le nombre de panneaux photovoltaïques et de batteries nécessaires. Par ailleurs, la présence des panneaux par rapport à une solution basée uniquement sur les énergies fossiles permet de diminuer les coûts de carburant et l'impact environnemental, comme il sera étudié après.

Toutefois, disposer d'un système hybride demande l'utilisation d'une entité de contrôle automatique efficace, définissant le basculement optimal entre les sources de production et de stockage en temps réel afin d'assurer la charge à moindre coût.

Ce système de contrôle, pouvant être un dispositif indépendant ou intégré à l'onduleur, alors parfois nommé onduleur multifonctionnel [37], est complexe et se doit d'être réglé de manière appropriée pour une gestion idéale des différents systèmes, une mauvaise gestion pouvant encourir des surplus de production et coûts inutiles.

Connaissant les coûts des installations ainsi que du carburant, le logiciel permet de trouver la combinaison optimale de ces différentes technologies, présentées au tableau 7.

4.3.4 Résumé des solutions obtenues

Le tableau 7 illustre les différentes solutions présentées ci-dessus et dénommées de la manière suivante

1. Solution solaire : panneaux photovoltaïques et batteries
2. Solution groupe électrogène (GE) : groupe électrogène uniquement
3. Solution GE + batteries : groupe électrogène et batteries
4. Solution hybride : groupe électrogène, panneaux photovoltaïques et batterie

En particulier, pour chaque solution sont détaillées la puissance crête installée et la production annuelle des panneaux photovoltaïques, la capacité nominale et l'énergie stockée annuellement par les batteries, la consommation journalière moyenne de carburant et la production annuelle du groupe électrogène. De plus, les pourcentages annuels d'électricité en déficit et d'électricité produite en excès par rapport à la charge appelée, évaluées à chaque pas de temps $t = 1$ h, sont également indiqués.

	Solution 1 Solaire	Solution 2 Groupe électrogène	Solution 3 GE + batteries	Solution 4 Hybride
Panneaux PV				
Puissance nominale [kWc]	23.9	0	0	23.4
Electricité produite [kWh]	33060	0	0	32303
Batteries				
Capacité nominale [kWh]	76.8	0	14.4	38.4
Electricité stockée [kWh]	6643	0	3415	6292
Générateur				
Diesel consommé	0	45.2	27.6	3.71
Electricité produite [kWh]	0	40033	27180	3095
Bilan				
Electricité appelée [kWh]	26070	26070	26070	26070
Electricité en excès [%]	17.7	34.9	0	18.8
Electricité en déficit [%]	6.13	0	0	0

Tableau 7 – Résumé des différentes solutions étudiées et leur production annuelle d'électricité.

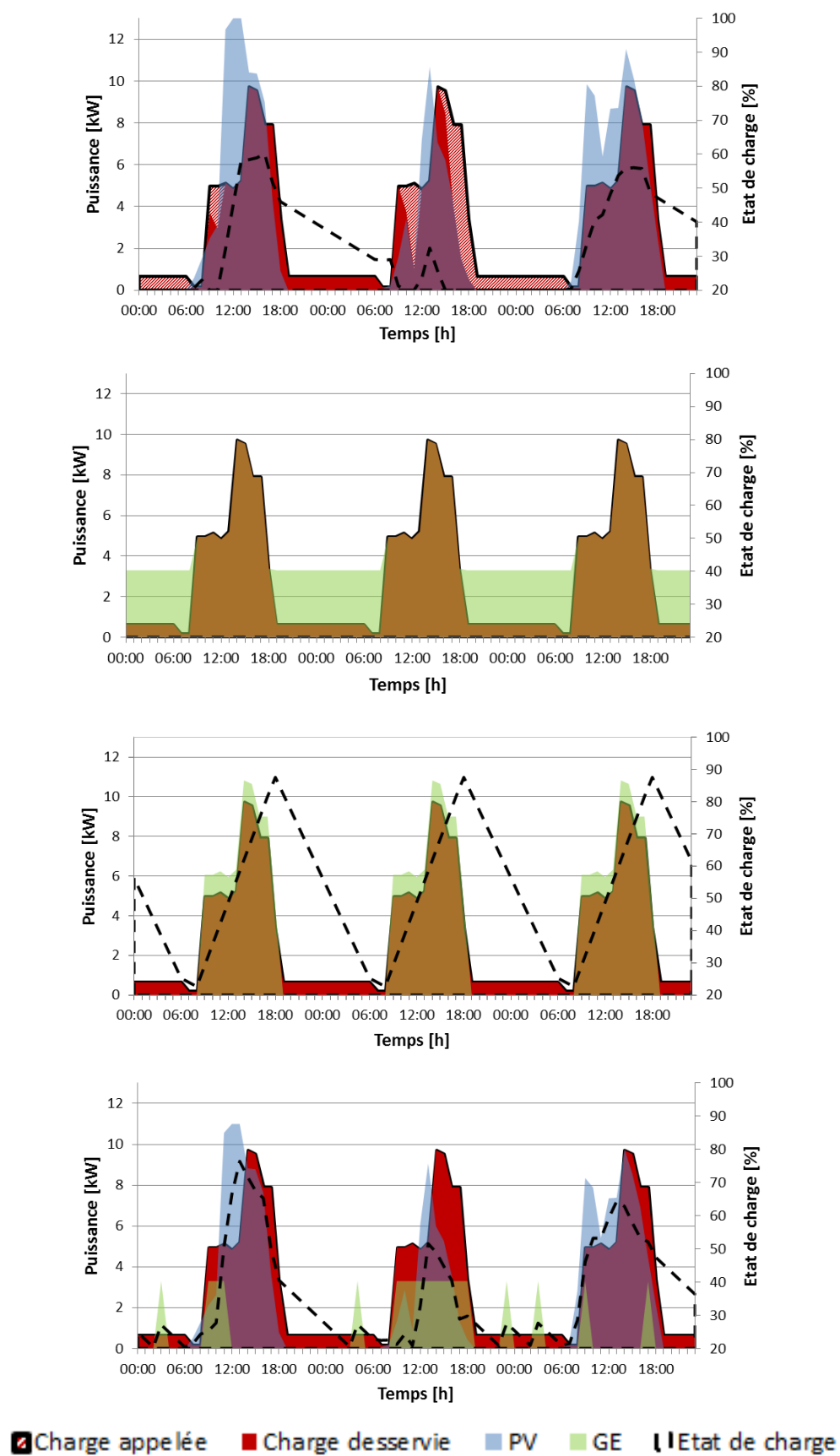


FIGURE 17 – Répartition de la puissance pour les 4 solutions (solution 1 à 4 de haut en bas), sur la période du 3 au 5 juillet

Concernant l'électricité en déficit, seule la solution solaire ne satisfait pas la demande. Comme expliqué précédemment, 10 % de charges non rencontrées ont été admises pour les calculs. Si toutes les charges devaient être satisfaites pour cette solution, la puissance crête et la capacité des batteries devraient être doublées pour remplir la demande, ce qui entraînerait un excès de production annuel de 55 %. Un certain nombre de charges non essentielles ayant été défini (voir annexe 2), il semble raisonnable de se passer de leur fonctionnement afin de diminuer la taille de l'installation.

Le recours au groupe électrogène, nettement plus modulable, permet de desservir la charge à tout moment, ce qui explique l'absence de déficit pour les autres solutions.

L'électricité produite en excès par la solution groupe électrogène est considérable et nettement supérieure aux autres solutions. Ceci s'explique par sa limite minimale de fonctionnement, à 25 % de la puissance nominale, ce qui entraîne des surplus de production massifs. L'ajout de batteries supprime ce problème, stockant l'électricité afin d'éviter tout surplus de production, et diminue ainsi grandement la consommation de carburant.

Les deux autres solutions, ayant recours à des installations photovoltaïques, présentent également un surplus de production. En effet, afin de pouvoir remplir la demande en permanence (sous réserve des 10 %) et en toutes saisons, un surplus de production des panneaux ne pouvant pas être stocké par les batteries a lieu, observé durant les heures de fort ensoleillement.

La figure 17 illustre la répartition de la puissance fournie par les panneaux PV et le groupe électrogène pour chaque solution par rapport à la puissance appelée et desservie, sur la période du 3 au 5 juillet. L'état de charge du parc de batteries est également illustré, qui varie de 20 à 100 %, les batteries choisies admettant une profondeur de décharge maximale de 80 %. La période choisie correspond au mois de plus faible ensoleillement, illustrant ainsi l'électricité en déficit de la solution solaire.

Ces différentes solutions ayant été présentées, il convient à présent d'étudier leurs performances économiques et environnementales, afin de pouvoir les comparer selon les critères prédéfinis.

4.4 Performance économique

Afin de comparer les solutions présentées ci-dessus, un critère prépondérant sera le coût de ces différents projets. Ces différentes solutions présentant des montants très variables quant à leurs coûts d'investissements ou de maintenance, il est important de les comparer sur une base commune. Dans le cadre de projet d'électrification, un indicateur grandement utilisé est le "Levelized cost of Electricity (LCOE)" ou "Coût actualisé de l'électricité".

Le LCOE est souvent pris comme indicateur du prix auquel l'électricité doit être vendue pour atteindre le seuil de rentabilité sur la durée de vie du projet. Il intègre tous les coûts d'un système de production d'électricité sur toute sa durée de vie : coût d'investissement, coût d'opération et maintenance, coût de combustible [38]. Il est calculé comme suit :

$$LCOE = \frac{\text{coût}}{\text{électricité}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (10)$$

avec

- I_t les coûts d'investissement à l'année t [US\$]
- M_t les coûts de maintenance à l'année t [US\$]
- F_t les coûts de carburant à l'année t [US\$]
- E_t la production nette d'électricité à l'année t [kWh]
- r le taux d'actualisation [%]
- n la durée de vie du système [années]

Il peut également être intéressant d'évaluer la valeur du projet, afin d'estimer les financements nécessaires. Un autre indicateur financier pour un projet d'électrification est la valeur actuelle nette (VAN, ou en anglais Net Present Value, NPV), permettant d'évaluer la rentabilité d'un projet d'investissement. La valeur actuelle nette d'un projet est donnée par

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (11)$$

avec $C_t = R_t - M_t - F_t - I_t$ le flux net de trésorerie pour la période t , soit les recettes R_t moins les dépenses.

Un taux d'actualisation de 10 % est conseillé pour des projets de ce type en Afrique subsaharienne [15].

A partir des coûts (achat, maintenance, carburant éventuel) des différents systèmes décrits aux sous-sections précédentes et de leur durée de vie, le LCOE et la VAN sont calculés par le logiciel pour une durée de projet de 25 ans. La durée de vie du projet a été établie sur base de la plus longue durée de vie des installations, soit celle des installations photovoltaïques. En effet, une durée plus courte ne permettrait pas d'évaluer totalement l'amortissement de cette technologie, et en augmenterait son coût.

Ces indicateurs sont repris à la figure 18 et au tableau 8.

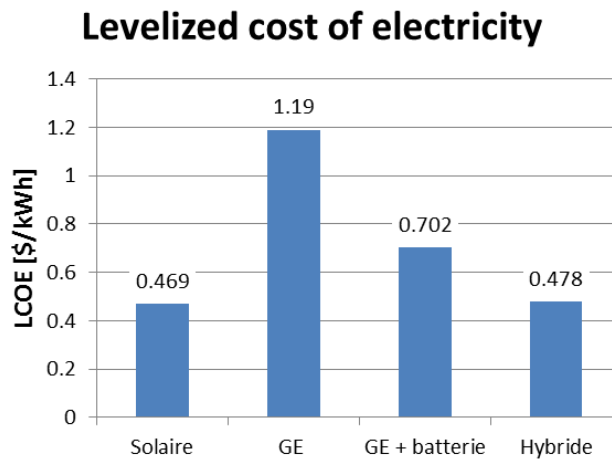


FIGURE 18 – Coût au kWh de l'électricité selon les différentes technologies

	Solaire	Générateur	Générateur + batterie	Hybride
LCOE [US\$/kWh]	0.469	1.19	0.702	0.478
VAN [US\$]	124 211	335 929	198 134	134 722

Tableau 8 – Valeurs des indicateurs financiers des différents systèmes de production d'électricité

4.5 Impact environnemental

Parmi les différents indicateurs permettant d'évaluer les impacts environnementaux sur l'entièreté du cycle de vie d'un produit, le potentiel de réchauffement global est un des plus utilisés. . Exprimé par l'unité "équivalent CO₂", il globalise l'effet de l'ensemble des gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone étant l'un des principaux. Cet indice évalue ainsi l'impact du produit sur le réchauffement climatique.

Pour les quatre systèmes étudiés, la quantité de gaz à effet de serre émise sur l'entièreté du cycle de vie des dispositifs est étudiée et ce, pour une durée de 25 ans, soit la durée du projet.

A partir de données de la littérature, les émissions g de CO₂ équivalent par kilowatt-heure d'électricité produit/stocké sont estimées pour chaque technologie de production/-stockage d'électricité :

Panneaux photovoltaïques Selon Akinyele (2016) [39], pour un ensoleillement de 1923 kWh/m²/an, soit un ensoleillement semblable à celui reçu dans la région de Pawa, $g_{PV} = 0.057$ [kgCO₂eq/kWh] pour des panneaux photovoltaïques polycristallins de rendement nominal de 14%.

Batteries Spanos et al (2015) [34] étudie l'analyse du cycle de vie des batteries *VLRA* et calcule leur potentiel de réchauffement global par kilowatt-heure d'énergie stockée en tenant compte du taux de décharge et non selon la capacité nominale de la batterie. Cette méthode permet de prendre en compte la durée de vie et l'efficacité des batteries. Pour une batterie *VLRA* à faible taux de décharge, comme étudié dans ce travail, le PRG est évalué à $g_{GE} = 0.297$ [kgCO₂eq/kWh].

Groupe électrogène Une valeur $g_{GE} = 0.772$ [kgCO₂eq/kWh] est assumée [19].

Ces valeurs sont ensuite multipliées par le nombre de kilowatt-heures produits de la manière suivante :

$$PRG = g_{PV} * E_{PV} + g_{batt} * E_{batt} + g_{GE} * E_{GE} \quad (12)$$

avec PRG le potentiel de réchauffement global en [kgCO₂eq], g les émissions de GES en [kgCO₂eq/kWh] pour chaque type de technologie et E l'électricité produite en [kWh] par chaque type de technologie.

Dans l'éventualité d'un raccordement au réseau, ces valeurs sont comparées au PRG du mix énergétique en RDC, illustré au tableau 8. Ces valeurs sont toutefois présentées à titre indicatif. En effet, le réseau est actuellement presque exclusivement alimenté par production d'hydro-électricité, très faible émettrice de GES, notamment par l'important barrage d'Inga, ce qui explique le faible PRG obtenu. Toutefois, la production électrique

actuelle de la Société Nationale d'Electricité est très faible par rapport à la population, à une hauteur de 8.2 TWh par an [40] pour une population nationale de 78.7 millions d'habitants [41]. Seul 15 % de la population a accès à l'électricité du réseau, sujet à délestage et coupures de courant [42].

Technologie	Pourcentage [%]	PRG [gCO ₂ eq/kWh]
Hydro-électricité	99.89	4
Centrales thermiques	0.11	762
Total	100.00	4.83

Tableau 9 – Emissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie du mix énergétique du réseau. (Sources : [43],[40])

L'électrification de zones rurales du pays passerait donc par une augmentation de la production d'électricité, actuellement insuffisante pour desservir tout le pays, et donc par un recours à d'autres sources de production d'électricité, émettant d'avantage de GES.

Les différentes valeurs obtenues pour chaque solution sont illustrées à la figure 19.

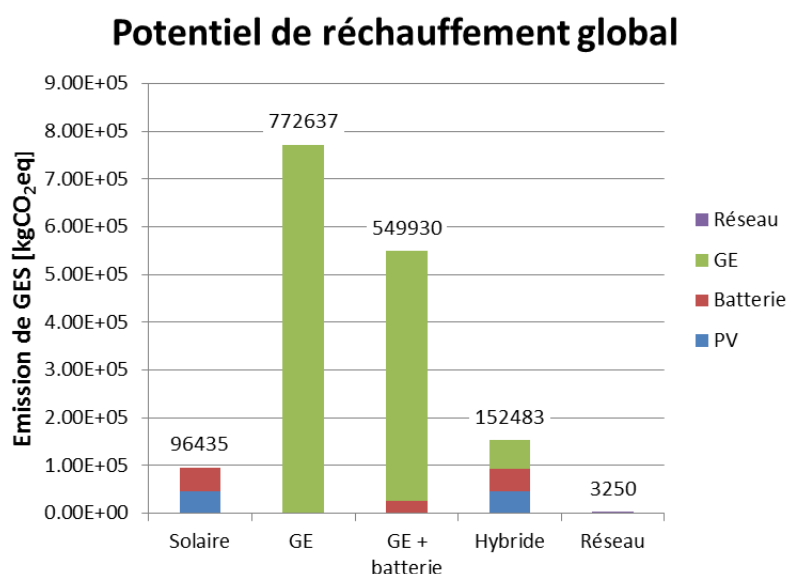


FIGURE 19 – Potentiel de réchauffement global des différentes solutions sur toute la durée du projet.

Alors que l'impact environnemental de l'utilisation de batteries n'est pas négligeable par rapport à l'impact des panneaux photovoltaïques, les émissions de GES de la solution solaire restent nettement inférieures à celle de la solution groupe électrogène, de l'ordre de 8 fois plus faibles.

La solution hybride permet de diminuer la quantité d'énergie stockée dans les batteries en ayant recours au groupe électrogène. Le générateur électrique étant un gros émetteur, le potentiel de réchauffement global s'en retrouve sensiblement augmenté, d'environ 50 %.

L'ajout de batteries à la solution groupe électrogène permet de stocker une partie de l'électricité produite en évitant tout excès de production. Cela diminue les émissions de

30 %.

Mis à part l'étude des émissions de GES, l'analyse des polluants atmosphériques émis sur place lors de l'utilisation des différentes technologies permet d'évaluer les effets sur la santé humaine des populations locales.

Parmi les technologies étudiées, seul le générateur électrique est source de pollution lors de son utilisation. Les émissions de NO_x , SO_2 et particules fines sont étudiées ici, pour leurs impacts connus sur la santé décrits plus en détails à la section 3.7. Les émissions par kWh d'électricité produit sont évaluées à 12.3 g/kWh pour les émissions de NO_x , 1.55 g/kWh pour les émissions de SO_2 et 0.5 g/kWh pour les émissions de particules fines [19].

Les oxydes d'azote émis par les différentes options durant l'entièreté du projet sont illustrés à la figure 20.

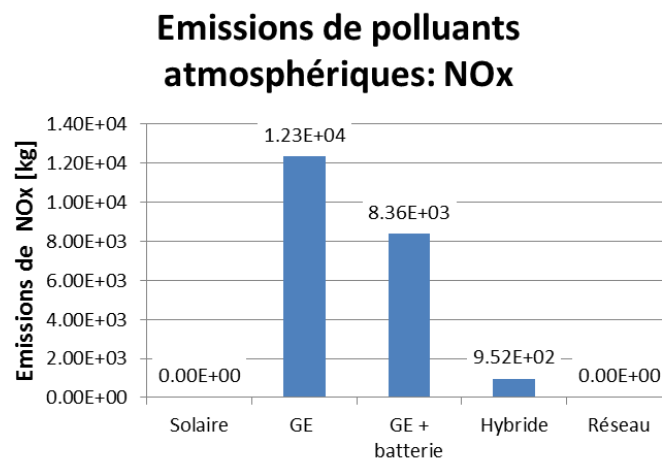


FIGURE 20 – Quantité d'oxydes d'azote émis par les différentes solutions lors de l'utilisation, sur toute la durée du projet.

Les émissions étudiées ici sont donc directement proportionnelles au taux d'utilisation du générateur et donc particulièrement conséquentes pour les solutions "GE" et "GE + batterie". Les mêmes observations sont réalisées pour les émissions de SO_2 et de particules fines. Le groupe électrogène est dès lors considérablement polluant, entraînant des possibles effets nocifs sur la santé des utilisateurs.

D'autres indicateurs environnementaux, tels que l'énergie grise nécessaire, la consommation en eau ou encore l'épuisement des ressources pourraient également être étudiés afin d'analyser la performance environnementale des différentes solutions. Toutefois, cette étude s'est limitée aux impacts présentés ci-dessus.

4.6 Analyse et discussion des résultats

Les sous-sections précédentes nous ont permis d'analyser différentes solutions d'un point de vue technique, économique et environnemental pour l'électrification d'un hôpital à Pawa, dans le nord est du RD Congo. Sur base des différentes technologies et des critères établis dans la section 3, la solution la plus adaptée est ainsi déterminée.

4.6.1 Performance économique

La solution la plus avantageuse économiquement est la solution solaire, employant uniquement des panneaux photovoltaïques et des batteries. Elle est suivie de près par la solution hybride, possédant un LCOE de 2 % plus élevé. Se passer de production solaire entraîne une flagrante augmentation des prix, passant de la solution hybride ayant un coût de 0.5 US\$/kWh à 0.7 US\$/kWh et 1.19 US \$/kWh pour les solutions "GE+batteries" et "GE uniquement", respectivement. Cela s'explique par les coûts élevés et la grande consommation de carburant du générateur électrique.

Une marge d'erreur est toutefois à prendre en compte lors de l'analyse des résultats. La plupart des coûts pris en compte dans les calculs sont basés sur les coûts de matériel disponible à Kinshasa ou de données venant de la littérature. Ces coûts peuvent être soumis au changement suivant le lieu d'achat, la quantité et la qualité du matériel acheté,...

De plus, les coûts de transport et de main d'oeuvre pour l'installation des différents dispositifs n'ont pas été considérés dans les calculs. Leur prise en compte induirait probablement des différences relatives entre les différentes solutions. En effet, le transport de matériel est plus conséquent et la main d'oeuvre plus coûteuse pour des installations photovoltaïques que dans le cas d'un groupe électrogène. A l'inverse, le prix du carburant considéré est celui à la pompe et n'inclut pas son transport depuis Isiro, le lieu d'approvisionnement, à l'hôpital de Pawa.

De même, les durées de vie des équipements peuvent diminuer dans le cas d'une mauvaise utilisation ou maintenance. En particulier, les batteries acide-plomb pour application solaire admettent une diminution de rendement de 15 à 20 % pour chaque tranche de 5°C supérieure à la températures standard (25°C) [37]. Il est donc important que les batteries soient bien aérées et protégées afin d'éviter une surchauffe. Par ailleurs, le logiciel utilisé ne permet pas de modéliser la diminution de rendement des panneaux photovoltaïques au fil des années. Selon les données du constructeur [31], ce dernier garantit une diminution linéaire de performance maximale de 0.7 % par an durant une période de 25 ans. Après 25 ans, les panneaux fonctionneraient donc au minimum à 83.89 % de la performance initiale.

Une évaluation plus précise de ces différentes remarques nécessite une étude plus approfondie.

Dans les calculs, l'hypothèse d'un coût fixe de carburant sur toute la durée de vie du projet a été considérée. L'évolution du prix du diesel sur les 25 prochaines années constitue une grande source d'incertitude. Bien qu'une augmentation de celui-ci dans les années à venir pourrait être supposée, cela reste difficile à prévoir, comme l'illustre la figure 21 pour la période de 1996 à 2016.

Une diminution importante des prix des modules photovoltaïques a été observée ces dernières années et cette tendance semble se poursuivre. Des coûts inférieurs à ceux présentés dans ce rapport pourraient donc être d'usage lors de la réalisation de ce projet. Il est cependant à noter que les composants d'un système photovoltaïque en dehors du module (batterie, onduleur, contrôleur de charge,...), dénommés en anglais *Balance of system* (BOS), constituent une part non négligeable des coûts de l'installation et sont très significatifs.

Suite à ces nombreuses hypothèses et incertitudes sur lesquelles reposent les indica-

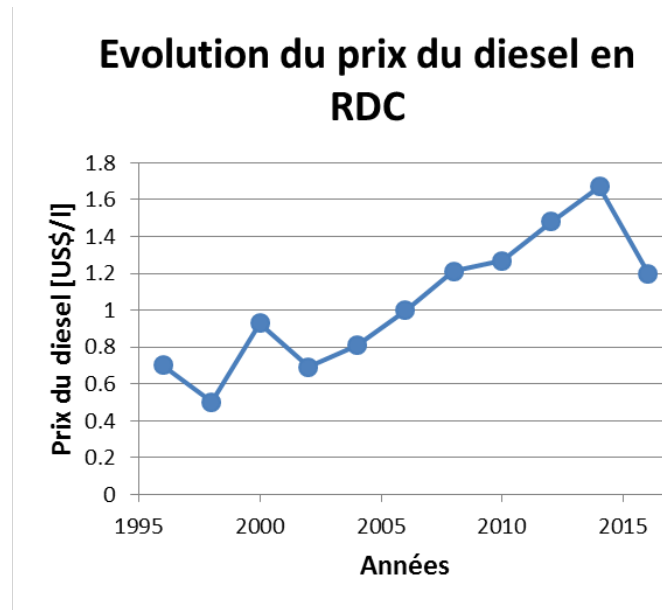


FIGURE 21 – Evolution du prix à la pompe du diesel en RDC [US\$/l] [44]

teurs économiques, les LCOE et VAN obtenus dans ce travail constituent uniquement une première estimation et ne peuvent représenter avec précision les coûts réels du projet d'électrification [45]. Malgré ces nombreuses inconnues, les solutions solaires et hybrides semblent toutefois rester les plus avantageuses en comparaison aux deux solutions basées uniquement sur la production d'électricité fossile, étant donné leur grande différence de coût.

4.6.2 Performance environnementale

L'analyse des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des différentes solutions met en évidence le faible impact de la solution solaire par rapport aux autres solutions. Alors que les modules photovoltaïques et les batteries sont uniquement émettrices de GES lors de leur fabrication, le générateur émet lors de toute sa phase d'utilisation. Il est néanmoins à noter que l'empreinte carbone des dispositifs, évaluée à partir de données venant de la littérature, repose sur de nombreuses hypothèses, comme l'ensoleillement reçu par les modules solaires, l'utilisation des batteries (taux de décharge lent ou rapide), une mauvaise utilisation des batteries menant à leur dégradation et raccourcissement de leur durée de vie,...

De plus, alors que la fabrication des différentes technologies requiert de l'énergie, l'impact environnemental dépend notamment en grande partie du mix électrique du pays dans lequel ils sont produits [46]. A titre d'exemple, l'extraction et la purification du silicium, phases les plus énergivores dans le cycle de vie d'un panneau photovoltaïque [46], réalisées à partir d'énergie grise verte et propre auront une empreinte nettement moindre sur l'ACV des panneaux que pour ceux produits à partir d'énergie fossile.

Lors de la phase d'utilisation des différentes solutions proposées, seules les solutions comportant un groupe électrogène sont émettrices de polluants atmosphériques. Les technologies solaires ont à l'inverse peu d'influence sur l'environnement local. Solutions sta-

tiques, silencieuses et présentant peu d'impact visuel, elles sont en outre très bien perçues par les populations de manière générale.

La solution solaire reste donc à favoriser d'un point de vue environnemental.

4.6.3 Technologie adaptée

Toutes deux matures technologiquement, la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou d'un générateur électrique sont des solutions déjà grandement utilisées pour l'électrification rurale en Afrique subsaharienne. Elles comportent néanmoins toutes deux des inconvénients.

Le générateur nécessite une opération et maintenance régulière et la difficulté d'approvisionnement en carburant rend son utilisation compliquée. Parallèlement, la technologie photovoltaïque est une technologie complexe qui, alors qu'elle ne nécessite en théorie aucun entretien, est laborieuse voire impossible à réparer sur place lors d'un éventuel problème technique.

L'emploi d'une solution hybride, combinant ces deux sources d'énergie, entraîne une complexité technique nouvelle [37], dans une région où les compétences requises sont limitées ou absentes. De plus, le recours à une solution hybride est nettement moins limitant au niveau de la consommation d'électricité qu'une installation solaire, grâce à la présence du générateur électrique. L'électricité appelant l'électricité, cela risque d'entraîner facilement une hausse de la consommation en carburant et par conséquent une hausse des coûts. Dans un contexte où les coûts sont limités et où la consommation d'électricité doit être gérée avec attention, la solution hybride semble donc peu adaptée en pratique.

4.6.4 Choix de la solution optimale

D'après cette analyse, la solution optimale d'un point de vue à la fois technique, économique et environnemental est de loin la solution solaire. Elle réunit en effet tous les critères établis par rapport aux trois autres solutions : elle comporte les plus faibles coûts, a un plus faible impact environnemental et est mieux adaptée techniquement. Un générateur d'appoint et de secours reste toutefois indispensable, afin d'assurer la charge en cas de problème technique éventuel ou en cas de besoin supplémentaire indispensable.

Pour obtenir des résultats plus précis et pertinents, une analyse de sensibilité devrait être réalisée afin d'étudier l'influence de la variabilité des données d'entrée sur les résultats. En particulier, le prix du diesel ainsi que le rayonnement incident sont des paramètres susceptibles d'évoluer sur la durée du projet et d'avoir un impact majeur sur les résultats. Cependant, étant donné les grandes différences de coûts, d'impact environnemental et de la praticité d'utilisation, la solution solaire semblerait tout de même rester la plus favorable.

4.6.5 Optimisation

Outre le choix de la solution optimale pour répondre à la charge définie, il est ingénieux d'étudier l'optimisation éventuelle du système et des équipements électriques, afin de répondre aux besoins tout en diminuant les impacts.

L'efficacité énergétique des équipements est un point majeur dans cette démarche. L'utilisation d'appareils électriques basse consommation engendrerait de grandes économies d'énergie et serait l'idéal. Certains appareils listés dans l'annexe 2 sont encore à pourvoir et il s'agirait d'examiner si ceux choisis sont bien basse consommation. Concernant les équipements déjà sur place, certains sont vétustes et investir dans leur remplacement pourrait mener à des économies sur la durée du projet. Ceci demande une étude approfondie et détaillée des coûts d'achat des différents équipements et de l'économie d'électricité que cela pourrait générer.

L'éclairage est un autre point influent dans la consommation d'énergie. Il représente à lui seul 10 % de la consommation totale. Certaines salles, telles que le service pédiatrique et les salles d'hospitalisation, sont de grandes salles essentiellement pourvues de lits pour les patients et qui n'ont comme appareils électriques que des lampes. Une solution envisagée serait de pourvoir ces salles d'installations indépendantes de type "Solar home system" (figure 22), comportant uniquement une ou plusieurs lampes avec batterie reliées directement à un panneau solaire. Ceci permettrait d'économiser une partie des coûts de câblage et de diversifier les réseaux électriques, indispensable pour pouvoir faire face à tout éventuel problème technique et d'éviter la coupure totale d'électricité de l'hôpital tout entier. En l'absence de données plus précises concernant le besoin réel en éclairage sur place et les coûts de câblage n'ayant pas été pris en compte dans ce travail, cette solution n'a pu être envisagée en profondeur.

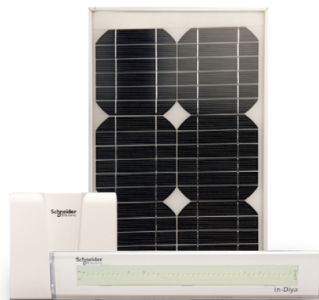


FIGURE 22 – Solar Home Lighting System [47]

Il est à noter que l'optimisation passe aussi par une sensibilisation à l'utilisation économe d'appareils très énergivores. Le climatiseur par exemple, bien que indispensable dans le bloc opératoire pour affronter les chaleurs insoutenables lors d'opérations, devrait être utilisé intelligemment, allumé avant et éteint après chaque opération. Cela permettrait de diminuer grandement la consommation d'électricité.

5 Conclusion

Alors qu'un accès à une énergie propre pour tous fait partie des objectifs de développement durable des Nations Unies pour l'horizon 2030, la population rurale d'Afrique subsaharienne ayant accès à l'électricité reste une minorité. Isolée et dispersée, il est en effet peu rentable d'étendre le réseau électrique national jusque ces régions. L'emploi de solutions de production d'électricité décentralisée autonomes devient alors indispensable dans ce contexte pour garantir un accès à une énergie moderne.

De nombreuses technologies différentes existent pour produire de l'électricité de manière indépendante. En particulier, les plus matures et fiables à l'heure actuelle sont : le photovoltaïque, l'hydro-électricité, l'éolien, la méthanisation, la gazéification et le groupe électrogène. Bien que matures et de bon fonctionnement, de nombreux échec de projets d'électrification mis en place ont toutefois pu être observés, les solutions n'étant pas toujours appropriées au contexte rural subsaharien. Une attention particulière est portée ici sur l'adaptabilité technique des différentes technologies de production d'électricité aux conditions locales ainsi que sur leur coût et impact environnemental.

L'objet de ce travail est de trouver la meilleure option d'électrification décentralisée pour l'hôpital général de référence de Pawa, village situé dans le nord-est de la République Démocratique du Congo. Alors que le succès d'un projet d'électrification est multi-critère et dépend de nombreux paramètres, l'étude a été ici limitée aux aspects techniques, économiques et environnementaux.

Après une description des différentes technologies existantes d'après une revue de la littérature et retours d'expériences, un classement de celles-ci selon les trois critères a été réalisé. Alors que la micro-hydroélectricité et le petit éolien sont des options bon marché et de faible impact environnemental, elles ne sont pas toujours préférées pour des projets d'électrification. Efficace et constant, l'hydro-électricité exige une bonne connaissance des lieux et la présence d'un cours d'eau de débit suffisant à proximité. L'éolien est quant à lui très intermittent et des mesures sur place de la vitesse du vent et un vent suffisant sont indispensables avant d'entamer tout projet. La biomasse, bon marché également, est une bonne option en théorie. Permettant de valoriser les déchets organiques et créant des revenus locaux, elle est néanmoins peu adaptée à l'heure actuelle entraînant régulièrement des problèmes de gestion logistique pour assurer un approvisionnement constant. Le groupe électrogène, solution souvent préférée pour ses faibles coûts d'investissement, a un coût de revient au kilowatt-heure élevé dû au coût du carburant. Très polluant, son approvisionnement en carburant présente également certaines difficultés pour ces régions isolées. Enfin, le solaire photovoltaïque est la solution la plus adaptée à l'heure actuelle. Ne nécessitant quasiment pas de maintenance, elle a également peu d'impact sur l'environnement local. Ses coûts élevés d'investissement représentent tout de même un frein pour les populations locales, bien que amenés à diminuer les prochaines années. Il nécessite également une certaine quantité d'énergie grise pour sa conception et sa gestion en fin de vie n'est pas toujours assurée.

Pour réaliser l'électrification de l'hôpital de Pawa, l'éolien, l'hydroélectricité et la biomasse n'ont pas été considérés. Aucune mesure sur la vitesse du vent n'est disponible, il n'y a pas de cours d'eau à proximité et un travail de sensibilisation préalable de la population serait indispensable pour une production à base de biomasse. Une production à partir d'un groupe électrogène ou de panneaux photovoltaïques a alors été étudiée. De

plus, une solution hybride combinant les deux systèmes a été étudiée également. Le logiciel HOMER utilisé a permis de trouver la combinaison optimale pour la solution hybride connaissant les coûts des différents équipement.

La source d'énergie solaire étant intermittente, l'emploi de batteries est indispensable pour garantir la demande à tout moment. Par ailleurs, le rendement du générateur électrique diminue avec sa puissance et il est donc intéressant de le faire fonctionner à puissance élevée et stocker son surplus dans des batteries. Le LCOE des solutions obtenues est respectivement de 0,469 US\$/kWh, 0,478 US\$/kWh, 0,702 US\$/kWh et 1,19 US\$/kWh pour la solution solaire, l'hybride, le groupe électrogène avec batterie et le groupe électrogène seul. Le pouvoir de réchauffement global des solutions obtenues sur la durée du projet est quant à lui respectivement de 96 435 kgCO₂eq, 152 483 kgCO₂eq, 549 930 kgCO₂eq et 772 637 kgCO₂eq. Durant l'utilisation, seules les deux solutions faisant appel au générateur électrique émettent des polluants atmosphériques. D'un point de vue technique, alors que les panneaux photovoltaïques ne demandent pratiquement aucune maintenance, le groupe électrogène requiert un approvisionnement régulier en carburant, qui représente des difficultés dans cette région reculée et peu accessible.

D'après ces différentes observations, la solution optimale d'un point de vue à la fois technique, économique et environnemental pour l'électrification de l'hôpital de Pawa parmi celles étudiées est de loin la solution avec panneaux photovoltaïques.

Bien que préférables en comparaison avec les autres options, les panneaux photovoltaïques possèdent également leurs limites. Ils exigent des capitaux significatifs, peu accessibles pour une population possédant peu de moyens. De plus, la technologie est complexe et ne peut être fabriquée ni réparée sur place lors d'éventuelle panne. Alors qu'elle reste la plus simple à appliquer dans les conditions actuelles, elle n'est donc tout de même pas idéale.

Par ailleurs, l'emploi d'une technologie de production d'électricité appropriée ne garantit pas pour autant la réussite d'un projet d'électrification. De nombreux autres critères sont également essentiels pour son succès et le problème principal reste souvent l'exploitation et la maintenance, en raison du manque de main d'oeuvre qualifiée. Selon l'Agence internationale de l'énergie (2013) [37], "les principales causes de défaillance sont le faible niveau de compétences et d'information des utilisateurs, les augmentations imprévues de la demande, les recettes insuffisantes, l'indisponibilité d'un service après-vente et, enfin, des régimes de propriété et de gestion inadaptés". La sensibilisation à un usage responsable de l'énergie et la formation des usagers sont donc des points indispensables.

Références

- [1] Programme des Nations Unies pour le développement, “Objectifs de développement | UNDP.” <http://www.undp.org/content/undp/fr/home/sustainable-development-goals.html> [consulté le 31/05/2018].
- [2] B. Duhamel, “L’électrification rurale de l’Afrique subsaharienne,” *Encyclopédie de l’énergie*, pp. 1–17, 2017.
- [3] Banque_mondiale, “Accès à l’électricité (% de la population) | Data.” <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EG.ELC.ACCS.ZS> [consulté le 30/05/2018], 2014.
- [4] S. Quoilin, “Analyse et enjeux d’un projet d’électrification rurale par microcentrale solaire au Lesotho,” 2010.
- [5] R. Kempener, O. Lavagne, D. Saygin, J. Skeer, S. Vinci, and D. Gielen, “Off-Grid Renewable Energy Systems : Status and Methodological Issues,” *Irena*, p. 29, 2015.
- [6] M. S. Orosz, S. Quoilin, and H. Hemond, “Technologies for heating, cooling and powering rural health facilities in sub-Saharan Africa,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy*, vol. 227, no. 7, pp. 717–726, 2013.
- [7] Banque_mondiale, “Densité de la population (personnes par kilomètre carré de superficie des terres) | Data.” <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EN.POP.DNST> [consulté le 30/05/2018], 2016.
- [8] Ingénieurs sans frontières Belgique, “MISSION ACCOMPLIE ! Il était un fois, une bidonville nommé Sindi.” <https://www.isf-iai.be/il-etait-un-fois-un-bidonville-nomme-sindi/> [consulté le 30/05/2018], 2017.
- [9] M. M. Rahman, J. V. Paatero, and R. Lahdelma, “Evaluation of choices for sustainable rural electrification in developing countries : A multicriteria approach,” *Energy Policy*, vol. 59, pp. 589–599, 2013.
- [10] S. Bhattacharyya, *Rural electrification through decentralised off-grid systems in developing countries*. 2013.
- [11] European Commission Joint Research Center, “JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).” <http://re.jrc.ec.europa.eu/> [consulté le 07/05/2018].
- [12] Senegal énergies, “Les petites éoliennes en Afrique.” <http://www.senegal-energies.com/sources-d-energies/energies-renouvelables/eolien/52-petite-eolienne> [consulté le 13/05/2018].
- [13] M. Greger, “Valorisation de la biomasse (énergétique),” *Université de Liège*, 2017.
- [14] Build a Biogas Plant - natural and renewable, “Floating Drum Biogas.” <http://www.build-a-biogas-plant.com/floating-drum-biogas/> [consulté le 13/05/2018].
- [15] S. Baurzhan and G. P. Jenkins, “Off-grid solar PV : Is it an affordable or appropriate solution for rural electrification in Sub-Saharan African countries?,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1405–1418, 2016.
- [16] RECP - Programme de coopération Afrique-UE dans le domaine des énergies renouvelables, “Guide Pratique de la Politique des Mini-Réseaux,” 2014.

- [17] A. Léonard, "Pollution atmosphérique - gestion des effluents gazeux," *Université de Liège*, p. 198, 2017.
- [18] Connaissance des énergies, "Gaz à effet de serre : qu'est-ce que l' "équivalent CO2" ?." <https://www.connaissancedesenergies.org/gaz-effet-de-serre-quest-ce-que-l-equivalent-co2-170807> [consulté le 20/05/2018], 2016.
- [19] A. Zomers, "Rural Electrification," *Perspective*, p. 322, 2001.
- [20] Memisa, "Memisa - Together for health." <https://www.memisa.be/> [consulté le 08/05/2018].
- [21] CHC, "Partenariat avec l'hôpital de Pawa (Mémisa)." <http://www.chc.be/A-propos-du-CHC/Dons-et-soutiens/Partenariat-avec-l-hopital-de-Pawa.aspx> [consulté le 08/05/2018].
- [22] Ecole de Pawa asbl Enfants du Congo, "Où est Pawa ?." <https://ecoledepawa.wordpress.com/ou-est-pawa/> [consulté le 08/05/2018].
- [23] J.-m. Hauglustaine, "ENVTO867 - Environmental performance of buildings," *University of Liège*, 2018.
- [24] HOMER Energy, "HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids." <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> [consulté le 12/05/2018].
- [25] Worldpowerfaqs, "Quelle est la durée de vie de mon groupe électrogène ?." <https://www.worldpowerfaqs.com/fr/categories/generating-set-requirements/43-what-is-the-lifespan-of-my-generating-set> [consulté le 19/05/2018], 2015.
- [26] APERe_asbl, "Systèmes de conversion." <http://www.apere.org/fr/systèmes-de-conversion-0> [consulté le 19/05/2018].
- [27] Olympian, "Datasheet Diesel Generator Set GEP18-2."
- [28] HOMER Energy, "HOMER Pro 3.11 User manual." <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/index.html> [consulté le 12/05/2018], 2017.
- [29] Multiquip, "Générateur 60 Hz dca150USJ3can (Moteur Diesel) - Manuel d'utilisation," 2013.
- [30] Atmospheric science data center - NASA, "Surface meteorology and Solar Energy." <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> [consulté le 12/05/2018].
- [31] SolarWorld, "SW 250 -260 poly," 2015.
- [32] Victron Energy, "Gel & Agm Batteries," pp. 10–13.
- [33] Ritar, "Datasheet Battery DG12-200."
- [34] C. Spanos, D. E. Turney, and V. Fthenakis, "Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 478–494, 2015.
- [35] GuidEnR PHOTOVOLTAÏQUE, "Dimensionnement de l'onduleur photovoltaïque autonome." <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaïque-autonome-1/dimensionnement-onduleur-photovoltaïque-autonome.php> [consulté le 24/05/2018].

- [36] Victron Energy, “Convertisseur / chargeur Quattro - Fiche technique,”
- [37] International Energy Agency - Photovoltaic power systems programme, *Mini-réseaux hybrides PV-diesel pour l'électrification rurale*. 2013.
- [38] D. Ernst, “Electrical Energy Systems,” *University of Liège*, 2017.
- [39] D. O. Akinyele, *Techno-economic and life-cycle impact analysis of solar photovoltaic microgrid systems for off-grid communities*. PhD thesis, 2016.
- [40] Société Nationale d'Electricité, “Chiffres clés : production.” <http://www.snel.cd/stats/chiffres.php> [consulté le 08/05/2018], 2013.
- [41] Banque_mondiale, “Congo, République démocratique du | Données.” <https://donnees.banquemondiale.org/pays/CD> [consulté le 23/05/2018], 2016.
- [42] SE4All Africa Hub, “Democratic Republic of Congo - Country Data.” <https://www.se4all-africa.org/seforall-in-africa/country-data/democratic-republic-of-congo/> [consulté le 23/05/2018], 2018.
- [43] O. Edenhofer, R. Pichs Madruga, and Y. Sokona, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*, vol. 6. 2012.
- [44] Banque_mondiale, “Données : Prix à la pompe de l'essence diesel (US\$ par litre).” <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/EP.PMP.DESL.CD?end=2016&start=1991&view=chart> [consulté le 25/05/2018], 2018.
- [45] Connaissance des énergies, “LCOE : définition, coûts pris en compte, taux d'actualisation.” <https://www.connaissancedesenergies.org/quest-ce-que-le-lcoe-160509> [consulté le 27/05/2018], 2016.
- [46] T. l'ingénieur, “Quels métaux pour les panneaux solaires ?” <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/metaux-panneaux-solaires-51384/> [consulté le 27/05/2018], 2018.
- [47] Hotpoint.co.ke, “Solar Home Lighting System 2 Lamps ES-AEH-SHS.” https://hotpoint.co.ke/catalogue/solar-home-lighting-system-2-lamps-es-ae-shs_875/ [consulté le 27/05/2018].

6 Annexes

Annexe 1 : Plan de l'hôpital

L'hôpital, implanté sur un carré d'une superficie d'un hectare, possède actuellement trois réseaux électriques indépendants, tous trois en mauvais état :

- Un ancien réseau électrique hors service avec des installations encore en place (non démantelées) mais qui sont déconnectées de leur groupe électrogène. Ce groupe électrogène n'est plus utilisé par l'hôpital actuellement.
- Un réseau électrique illustré en bleu sur le plan de la figure 23 lié à un nouveau groupe électrogène
- Un réseau complémentaire de panneaux photovoltaïques illustré en rouge sur le plan de la figure 23

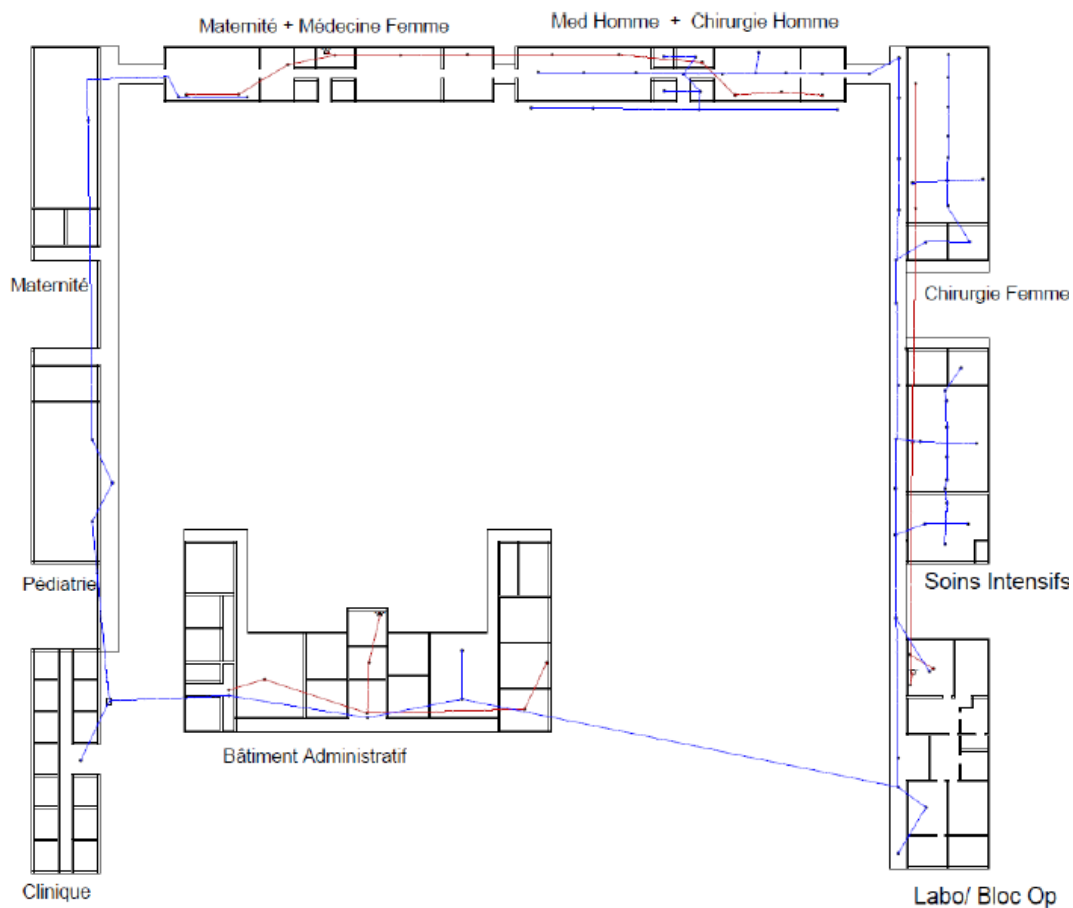


FIGURE 23 – Plan de l'HGR de Pawa et de ses réseaux électriques

Annexe 2 : Liste des équipements électriques

Tableau 10 – Inventaire des équipements électriques et leurs consommations

Priorité : 1 Charge critique

2 Charge essentielle

3 Charge non critique

Equipement	Nombre	Puissance [W]	Période de fonct.	Durée de fonct. [h/jour]	Energie consommée [Wh/jour]	Priorité
Laboratoire						
Microscope	1	90	8h à 18h	3	270	2
Centrifugeuse	1	286	8h à 18h	2	572	2
Réfrigérateur	1	120	24h/24	24	2880	1
Point lumineux		33	8h à 18h	10	330	2
Bloc opératoire						
Lampe scialytique	1	100	8h à 14h	2	200	1
Aspirateur électrique	1	220	8h à 14h	1	220	1
Bistouri électrique	1	60	8h à 14h	1	60	1
Climatiseur	1	2500	8h à 18h		25000	3
Oxygénateur	1	590	8h à 18h	5	2950	1
Point lumineux		14.5	8h à 14h	6	87	1
Salle de stérilisation						
Autoclave électrique	1	4500	13h à 17h	4	18000	1
Point lumineux		4	13h à 17h	4	16	1
Imagerie médicale						
Echographe	1	77	12h à 14h	2	154	2
Point lumineux		6	12h à 14h	2	12	2
Salle d'urgence						
Oxygénateur	1	590	8h à 18h	5	2950	1
Aspirateur	1	220	8h à 18h	1	220	1
Point lumineux		6	24h/24	24	144	1
Hospitalisation chirurgie						
Point lumineux		101.5	18h à 6h	12	1218	3
Hospitalisation médecine interne						
Point lumineux		38.5	18h à 6h	12	462	3
Maternité/salle d'accouchement						
Aspirateur	1	220	24h/24	2	440	1
Lampe scialytique	1	100	24h/24	2	200	1
Ventilateur	1	60	24h/24	2	120	3
Point lumineux		101.5	18h à 6h	12	1218	3
Pédiatrie						
Point lumineux		135	18h à 6h	12	1620	3
Clinique						

Bâtiment adminitratif

Ordinateur	2	630	8h à 15h	7	8820	2
Imprimante	1	1100	8h à 15h	1	1100	3
Ventilateur	3	60	10h à 15h	5	900	3
Point lumineux (consultation externe)		38.5	18h à 6h	12	462	3
Point lumineux (phar- macie)		64	18h à 6h	12	768	3
Point lumineux (ser- vice administratif)		48.5	8h à 15h	7	339.5	3
Total					71732.5	