



**Fortune Eméline Barkwendé
OUEDRAOGO**

Spécialité Polytech :
Ecologie Industrielle et Territoriale

Spécialité 2iE :
Génie Electrique et Energétique,
Option Energie Renouvelable

Tuteurs :
Nolwenn LE-PIERRES, Polytech
Daniel YAMEGUEU NGUEWO, 2iE

RAPPORT DE STAGE

Formation Ingénieur 5^{ème} Année

***Dimensionnement préliminaire d'une
installation solaire photovoltaïque
pour le siège du COMESA***



BANQUE MONDIALE

Nom de l'organisme d'accueil

Bureau de la Banque Mondiale en ZAMBIE

Sous la direction de :

Patrick Thaddayos Balla,
Senior Energy Specialist, World Bank



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ainsi qu'à Polytech Annecy-Chambéry, pour m'avoir permis de bénéficier d'une formation de qualité dans le cadre de ce double diplôme et pour leur soutien tout au long de mon parcours académique.

Mes sincères remerciements vont en particulier à monsieur Daniel Yamegueu Nguewo et à Madame Nolwenn Le-Pierres, mes enseignants encadrants respectifs à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et à Polytech Annecy Chambéry, pour leur accompagnement tout au long de ce projet de fin d'études.

Je remercie également monsieur Patrick Thaddayos Balla et monsieur Francis Chibwe, pour son suivi, ses orientations et son soutien durant la réalisation du projet.

Je suis particulièrement reconnaissante au Secrétariat Général du COMESA à Lusaka, pour m'avoir accueillie au sein de son institution dans le cadre de ce stage, et pour les ressources et l'environnement propice mis à disposition.

Un grand merci à monsieur Pritchard Mukuka, mon collaborateur tout au long de ce projet, pour ses orientations, ses conseils techniques et son suivi attentif qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
SOMMAIRE	3
LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES FIGURES.....	4
LISTE DES ANNEXES.....	4
INTRODUCTION GENERALE	5
PARTIE A : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET	6
I. Présentation de la structure d'accueil.....	6
II. Présentation du projet.....	7
II.1. Présentation de la zone d'étude.....	7
II.2. Présentation du projet.....	8
II.3. Etat des lieux de l'existant	9
PARTIE B : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	13
I. Méthodologie de conception.....	13
II. Etude technique.....	14
II.1. Evaluation des besoins énergétiques.....	14
II.2. Identification des variations de la consommation d'énergie au cours de l'année.....	16
II.3. Conditions météorologiques et données d'irradiation solaire.....	17
II.4. Dimensionnement à l'aide d'Excel	19
II.5. Résultats du dimensionnement Excel	20
II.6. Résultats du dimensionnement logiciel.....	22
PARTIE C : ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET	24
I. Description du système « <i>Energy as a service</i> ».....	24
I.1. Définition et modèles économiques.....	24
I.2. Cas du Projet du COMESA	25
I.3. Étude de cas : Cas de SolarPipo avec une coopérative laitière en Ouganda.....	26
II. Estimation des coûts du projet	27
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	28
I. Propositions pour l'installation des modules photovoltaïques.....	28
II. Propositions pour renforcer les mesures d'efficacité énergétique	29
CONCLUSION.....	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des Zones et de leurs différents départements	10
Tableau 2 : Liste des appareils électriques se trouvant au siège du COMESA par catégories	11
Tableau 3 : Puissance électrique de la salle serveurs.....	11
Tableau 4 : Données de consommation électrique des bâtiments de COMESA par zone.....	15
Tableau 5 : Puissance électrique et consommation énergétique par zone	15
Tableau 6 : Liste des hypothèses de dimensionnement	19
Tableau 7 : Liste des formules de calcul utilisées.....	20
Tableau 8 : Résultats de dimensionnement du scénario 2	21
Tableau 9 : Budget pour le COMESA SOLAR PROJECT pour chaque scénario	27

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Capacité électrique installée par technologies en 2024.....	8
Figure 2 : Vue du dessus du siège de COMESA avec l'emplacement de chaque zone	10
Figure 3 : Méthodologie de l'étude	13
Figure 4 : Diagramme montrant la consommation énergétique par zone	15
Figure 5 : Diagramme montrant la consommation par type d'appareil.....	16
Figure 6 : Moyenne mensuelle de la consommation énergétique de COMESA (2017 - 2024)	16
Figure 7 : Courbes de la consommation énergétique mensuelle de COMESA (2017 - 2024)	17
Figure 8 : Irradiation solaire moyenne par jour à Lusaka	18
Figure 9: Valeur d'irradiation GTI et GHI à Lusaka.....	19
Figure 10 : Résultat dimensionnement scénario 1	21
Figure 11 : Résultats du dimensionnement selon le scénario 3	22
Figure 12 : Consommation énergétique et Production électrique du champ PV	23
Figure 13 : Modèles économiques pour ESCO.....	24
Figure 14 : Schéma de l'approche ESCO pour le COMESA	26
Figure 15 : Vue du dessus du parking de COMESA	28
Figure 16 : Vue du dessus de l'espace parking au sol	29

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Cartes de l'Afrique montrant les pays membre du COMESA	32
Annexe 2 : Exemple de calcul de la charge électrique d'un bureau.....	32
Annexe 3 : Données consommation énergétique (facture d'électricité) (2017-2024).....	33
Annexe 4 : Moyennes de consommation énergétique, d'irradiation et de production solaire	33
Annexe 5 : Planning et étapes du projet.....	33
Annexe 6 : Résultats calculs Scénario 1	35
Annexe 7: Résultats calculs Scénario 3	36
Annexe 8 : Résultats calcul estimatif des coûts Scénario 1 pour 425 Wc et 750 Wc.....	37
Annexe 9 : Bâtiments du COMESA	38
Annexe 10 : Mouvements du soleil au cours de l'année	38
Annexe 11: Angles optimum d'inclinaison des modules PV ZAMBIE.....	38

INTRODUCTION

L'accès à l'énergie joue un rôle central dans le développement économique, social et technologique d'un pays. Il conditionne la croissance industrielle, améliore la qualité de vie des populations et garantit la continuité de services essentiels tels que la santé, l'éducation et la communication. Cependant, de nombreux pays, notamment en Afrique, continuent de faire face à de profondes inégalités en matière d'accès à une énergie suffisante, fiable et durable. En Afrique subsaharienne, près de 600 millions de personnes vivent encore sans électricité. Cette situation est exacerbée par les effets du changement climatique, en particulier les sécheresses récurrentes, qui compromettent l'exploitation durable des ressources naturelles telles que l'eau.

Face à ces défis, le Groupe de la Banque mondiale a lancé en 2023 l'initiative Mission 300, dont l'objectif est de fournir l'accès à l'électricité à 300 millions de personnes en Afrique subsaharienne d'ici 2030. Cette initiative ambitieuse vise à favoriser une électrification rapide, inclusive et durable sur le continent à travers différents programmes, tel que le programme ASCENT (Accelerating Sustainable and Clean Energy Access Transformation). Le programme soutient l'extension des réseaux électriques prioritairement dans zones périurbaines et rurales, tout en favorisant le déploiement de solutions hors réseau, telles que les systèmes solaires autonomes et les mini-réseaux, destinés aux zones rurales isolées. Par ailleurs, il accompagne les gouvernements dans la mise en œuvre de réformes politiques et le renforcement institutionnel afin d'améliorer la gouvernance du secteur. Le COMESA (Common Market for Eastern and Southern Africa), collabore activement avec la Banque mondiale pour faciliter le déploiement de ce programme dans ses pays membres.

En Zambie, la mise en œuvre du projet ASCENT revêt une importance particulière, dans un contexte où le pays subit fortement les effets du changement climatique, qui impactent directement son secteur énergétique. En 2024, une sécheresse prolongée a provoqué une grave crise énergétique, révélant la vulnérabilité de la Zambie dont plus de 80 % de la production d'électricité repose sur l'hydroélectricité. Cette crise a mis en lumière la dépendance critique du pays aux ressources en eau, soulignant l'urgence de diversifier ses sources d'énergie.

Le projet ASCENT en Zambie s'articule autour de deux volets : le premier vise à améliorer l'accès à l'électricité dans les zones périurbaines et rurales, tandis que le second concerne l'électrification du siège du COMESA à Lusaka. Ce dernier, également touché par la crise énergétique, a sollicité l'appui de la Banque mondiale en Zambie pour l'installation d'un système solaire photovoltaïque afin d'assurer son alimentation électrique. En réponse, la Banque mondiale a accepté d'apporter un appui technique. C'est dans ce cadre que j'ai été chargée, en tant qu'élève ingénieur, en collaboration avec une équipe technique d'apporter une assistance au COMESA. L'objectif principal de mon travail était de réaliser un dimensionnement préliminaire d'un système solaire photovoltaïque autonome pour l'électrification du siège du COMESA. Les résultats de cette étude serviront de base technique pour l'élaboration des documents d'appel d'offres et la sélection du prestataire. Plusieurs scénarios ont été analysés afin d'éclairer les décisions techniques en tenant compte des besoins énergétiques réels et des priorités identifiées.

Le projet repose sur le modèle économique « *Energy as a Service* ». Ce modèle innovant permet à une organisation de bénéficier d'un service énergétique sans investissement initial. Ce projet constituera également projet pilote. En cas de succès, il être reproduit à plus grande échelle pour l'électrification des bâtiments publics en Zambie.

PARTIE A : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET

Cette première partie a pour objectif de poser le cadre général du projet en présentant la structure d'accueil, la zone d'étude ainsi que les caractéristiques du projet envisagé. Elle permet de mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrit l'étude et les motivations du projet.

I. Présentation de la structure d'accueil

Le Groupe de la Banque Mondiale est une institution financière, créée en 1944 à la conférence de Bretton Woods. Il s'agit d'une organisation internationale affiliée à l'ONU. Son objectif principal était au départ d'aider l'Europe à se reconstruire après les destructions consécutives à la seconde guerre mondiale. [1] Ses objectifs ont évolué avec le temps et aujourd'hui il ambitionne, d'ici l'horizon 2030, de mettre fin à l'extrême pauvreté et de promouvoir une prospérité partagée dans tous les pays. Pour ce faire, il vise à réduire à 3% le nombre de personnes vivant avec moins de 1,90 dollar par jour d'ici 2030 et à augmenter les revenus des 40 % les plus pauvres dans chaque pays. Pour cela, il offre des produits financiers tels que des prêts, des dons, et des garanties ainsi que son assistance technique à de nombreux pays en développement à travers le monde. [2]

Le Groupe de Banque Mondiale regroupe 189 pays membres, représentés au Conseil des gouverneurs, qui se réunit chaque année à son siège à Washington, D.C. Il dispose de plus de deux cents bureaux à travers le monde et intervient dans plusieurs secteurs d'activités.[3] Il s'agit de l'agriculture, l'éducation, l'eau et assainissement, l'énergie et les mines, les transports, l'industrie et le commerce, etc. Ces différents secteurs d'intervention sont regroupés en quatre thèmes ou groupes d'intervention. Il s'agit de Population et développement, Prospérité, Infrastructures, Numérique, et deux thèmes transversaux notamment Genre et égalité des sexes et Fragilités, Conflits et violences. [2]

Le Groupe de la Banque mondiale comprend cinq institutions : [2]

- IBRD (International Bank for Reconstruction and Development) : Elle prête de l'argent aux pays à revenus intermédiaires et aux pays à faibles revenus solvables ;
- IDA (International Development Association) : Offre des prêts à faible taux d'intérêt ou sans intérêt aux pays les plus pauvres ;
- IFC (International Finance Corporation) : Se concentre sur le secteur privé, en finançant des investissements, en mobilisant des capitaux et en fournissant des conseils aux entreprises et gouvernements ;
- MIGA (Multilateral Investment Guarantee Agency) : Encourage les investissements directs étrangers en offrant des garanties contre les risques politiques ;
- ICSID (International Centre for Settlement of Investment Disputes) : Propose des mécanismes de conciliation et d'arbitrage pour les litiges d'investissement.

L'IBDR et l'IDA constituent la Banque Mondiale.

II. Présentation du projet

II.1. Présentation de la zone d'étude

a. Le secteur de l'énergie en Zambie

La ZAMBIE est un pays enclavé, situé en plein cœur entre l'Afrique du sud et l'Afrique australe. Elle fait frontière avec la République démocratique du Congo (RDC), la Tanzanie, le Botswana, le Malawi, le Mozambique, la Namibie et l'Angola. Sa capitale est Lusaka. Le pays est doté d'un fort potentiel en énergie renouvelable. En effet, 82% de son électricité provenaient en 2024 de l'hydroélectricité[4], ce qui est possible grâce à l'abondance de ces cours d'eau et à un relief favorable. Elle est également dotée d'un potentiel intéressant pour la production d'énergie solaire, avec une irradiation moyenne annuelle à Lusaka de 5,78 kWh/m²/jour[5]. Mais cette ressource reste encore très peu exploitée. Elle fait pourtant partie des meilleures solutions proposées pour l'électrification du pays.

La Zambie, peuplée de 20.723.965 habitants sur un territoire de 752.614 km², est l'un des pays avec la plus faible densité de population au monde, soit une moyenne de 28 habitants au km² en 2023.[6] L'énergie solaire, permettrait d'électrifier les zones les plus reculées avec des solutions comme les mini-grid et système solaires domestiques (SHS), où amener le réseau national ne serait pas pertinent. C'est à cet effet, qu'elle figure parmi les sources d'énergie prioritaires dans les projets de développement du pays et est pleinement intégrée dans les plans de développement énergétique nationaux, comme l'indique le National Energy Compact.

La Zambie disposait en 2024 d'une capacité électrique installée d'environ 3 868,51 MW, avec une part de 3 342 MW d'énergie renouvelable installée, avec seulement 4,72%[4] provenant de l'énergie solaire. Cependant, la forte dépendance à l'hydroélectricité pose des défis en raison des fluctuations du niveau des eaux, ce qui rend le pays vulnérable aux périodes de sécheresse.

Dans le cadre de sa transition énergétique, le gouvernement zambien s'est fixé un objectif ambitieux : atteindre 600 MW de capacité solaire et éolienne d'ici 2030. Pour encourager les investissements, plusieurs mesures incitatives ont été mises en place, notamment des exonérations fiscales et des réglementations favorisant l'injection d'énergie renouvelable dans le réseau électrique (Net Metering). Ces réformes visent à rendre le marché plus attractif pour les entreprises étrangères spécialisées dans les énergies propres, notamment les acteurs européens et allemands. [7]

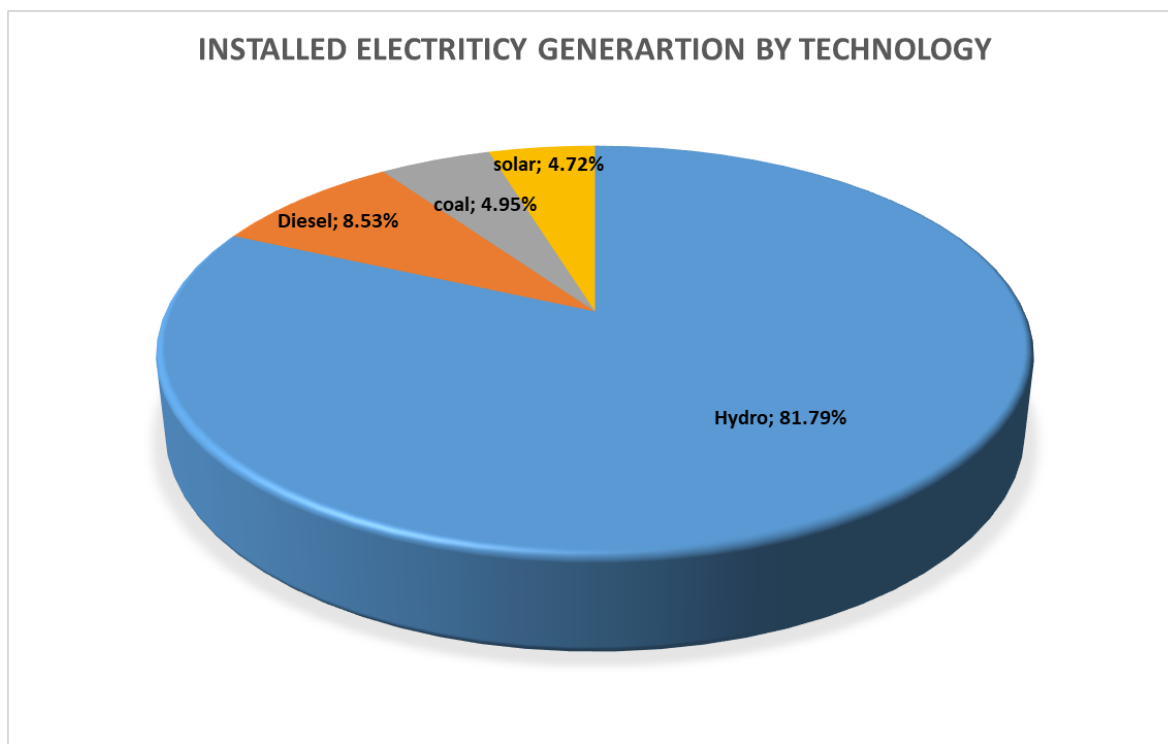


Figure 1: Capacité électrique installée par technologies en 2024

b. Présentation du COMESA

Le Common Market for Eastern and Southern Africa (COMESA) regroupe 21 États africains (Annexe 1) engagés à favoriser l'intégration régionale à travers le commerce et le développement des ressources naturelles et humaines pour le bénéfice de toutes les populations de la région. Il a été créé en 1994 et son siège se trouve à Lusaka, en ZAMBIE. [8]

II.2. Présentation du projet

La Zambie a été confrontée à de graves défis énergétiques au cours de l'année 2024. La Zambia Electricity Supply Corporation Limited (ZESCO), la compagnie nationale de production et de distribution d'électricité, fournisseur majeur d'électricité sur tout le territoire, n'était plus en mesure de satisfaire sa clientèle. En effet, 82% de la production d'électricité du pays vient de l'hydroélectricité et une sécheresse prolongée sur ces deux dernières années (2023 et 2024) a fortement réduit le niveau des réservoirs d'eau, principalement celui du barrage de Kariba situé sur le bassin du fleuve Zambèze. Ce dernier représente à lui seul plus de la moitié de la capacité électrique installée du pays, soit un total d'un peu plus de 2000 MW[4] (contre 3868,51 MW au total pour le pays). Depuis mars 2024, l'approvisionnement en électricité est limité sur tout le territoire, et les coupures d'électricité pouvaient aller jusqu'à 23 heures par jour. Cette crise a souligné l'urgence pour la Zambie de mettre en place des solutions énergétiques diversifiées et durables. La capacité énergétique disponible était passée de 3811 MW en 2023 à 1019 MW en août 2024[7].

Le siège du COMESA a été fortement touché par cette crise énergétique. L'institution a été ainsi obligée d'avoir recours à diverses solutions classiques telles que l'utilisation d'un générateur électrique. Cette solution bien qu'efficace, ne saurait lui permettre de tenir sur le long terme, car elle impliquerait des coûts financiers importants. Par exemple, sur la période de Mars à Mai 2024, l'institution a dépensé au total \$14,397.88 en fuel. En revanche, contrairement aux deux années précédentes, 2025 a été marquée par une saison pluvieuse très favorable (novembre 2024 à mars 2025). Elle a ainsi permis la remontée du niveau des eaux et la fourniture d'électricité est passée à

environ 5 heures par jour. Cependant, selon les experts, il faudrait encore une à deux saisons de pluie identique pour que le niveau des eaux remonte à la normale. Afin de pallier à une éventuelle crise future, cet épisode de sécheresse faisant suite à celui de 2018, le COMESA a décidé de faire recours à une solution durable, efficace et respectueuse de l'environnement.

C'est dans ce cadre qu'un projet solaire, en cours de développement au siège du COMESA à Lusaka, à travers le projet ASCENT de la Banque mondiale a été identifié pour contribuer à un approvisionnement énergétique stable. L'objectif de ce projet est de démontrer la fiabilité du modèle économique de « *Energy as a Service* », qui pourrait être répliqué à d'autres bâtiments publics. Cette approche permet de fournir de l'énergie solaire sans coûts initiaux ni frais d'entretien. COMESA conclurait un contrat de service énergétique avec une entreprise privée appropriée. L'entreprise sera responsable de l'investissement, de l'exploitation et de la maintenance du système pendant dix (10) ans, en garantissant des performances définies (disponibilité de l'énergie, entretien du système, rapidité d'intervention, etc.). À la fin du contrat, l'équipement restera la propriété du prestataire, qui en assurera le démantèlement. Le COMESA paiera les services comme une facture d'électricité classique.

Le projet poursuit plusieurs autres objectifs :

- démontrer la viabilité du modèle « *Energy as a service* » ;
- réduire la dépendance au réseau électrique et améliorer la fiabilité énergétique du COMESA ;
- réduire les émissions de gaz à effet de serre en favorisant les énergies propres ;
- créer un modèle répliquable pour l'installation de l'énergie solaire dans les bâtiments publics des États membres du COMESA.

Pour réaliser ces objectifs, un planning a été élaboré listant les différentes étapes à suivre pour une meilleure réalisation de ce projet (Annexe 5).

L'objectif de ce travail est de faire un dimensionnement préliminaire pour un système solaire autonome pour le siège du COMESA. Ce travail servira de base pour la rédaction du dossier d'appel d'offre et pour le choix de l'entreprise. Dans le cadre de ce travail, trois scénarii seront étudiés afin d'offrir une vision globale et de permettre une meilleure prise de décision. Le premier scénario considère l'ensemble des charges de tout le COMESA. Le deuxième se concentre uniquement sur les zones prioritaires. Enfin, le troisième scénario inclut toutes les charges relatives à l'ensemble des zones, à l'exception de la climatisation.

II.3. Etat des lieux de l'existant

a. Sources d'énergies

Le bâtiment du siège du COMESA dispose d'un poste de transformation dédié de ZESCO, 11/0,4 kV, pour l'ensemble du site. Ce poste est alimenté par le poste de transformation 33/11 kV de Kafue Road. Le site est équipé d'un compteur global avec mesure de la puissance maximale appelée.

Le siège de COMESA dispose également d'un ancien groupe électrogène diesel de marque Caterpillar, fonctionnant depuis 1992. Il servait d'alimentation de secours et peut alimenter l'ensemble de la charge électrique du site. Il a servi d'alimentation électrique principale pendant la période de sécheresse. Ce générateur ancien est bruyant et polluant car il dégage une fumée dense, avec des effets néfastes sur l'environnement et la santé du personnel. Il a une capacité de 1000 kVA (800 kW), 400 V, triphasé. Il a été remplacé récemment par un nouveau générateur de la marque SDMO, d'une capacité de 650 kVA, fonctionnant également en mode secours.

b. Infrastructure de base

Le siège du COMESA (ou Secrétariat du COMESA) à Lusaka, est un bâtiment âgé d'environ trente (30) ans qui couvre une superficie d'environ 18.000 m². Ce bâtiment abritait initialement une banque commerciale appelée Meridian BIAO, avant d'être convertie en siège du COMESA. La propriété comprend plusieurs blocs de bâtiments interconnectés de trois étages, un parking à niveau de trois étages également et une cantine de plain-pied.

Le siège de COMESA est divisé en différentes zones (de A à H), abritant divers départements, comme illustré dans le Tableau 1. Les zones A, B et C ont été identifiées par COMESA comme prioritaires, en particulier la Zone C, identifiée comme hautement importante et sensible, car elle accueille le département informatique et la salle des serveurs. Les bâtiments sont occupés à des fins de bureaux de 8h du matin à 17h le soir, du lundi au jeudi, et de 8h à 13h le vendredi.

Tableau 1 : Liste des Zones et de leurs différents départements

Zones	Départements
A	Conference room, Bank Hall, reception, statistics unit
B	Public Relation, Assistant Secretary General, Secretary General
C	IT, Servers room, COMESA Business Council 1, Finance
D	Gender, Arabic translation, legal affairs
E	Registry, conference, audit, infrastructure, COMESA Business Council 2
F	Estate management, procurement, Human Resource, industry, dreads, store, library, finance
G	Madison General, Transport
H	Documentation center, Restaurant, water pumping

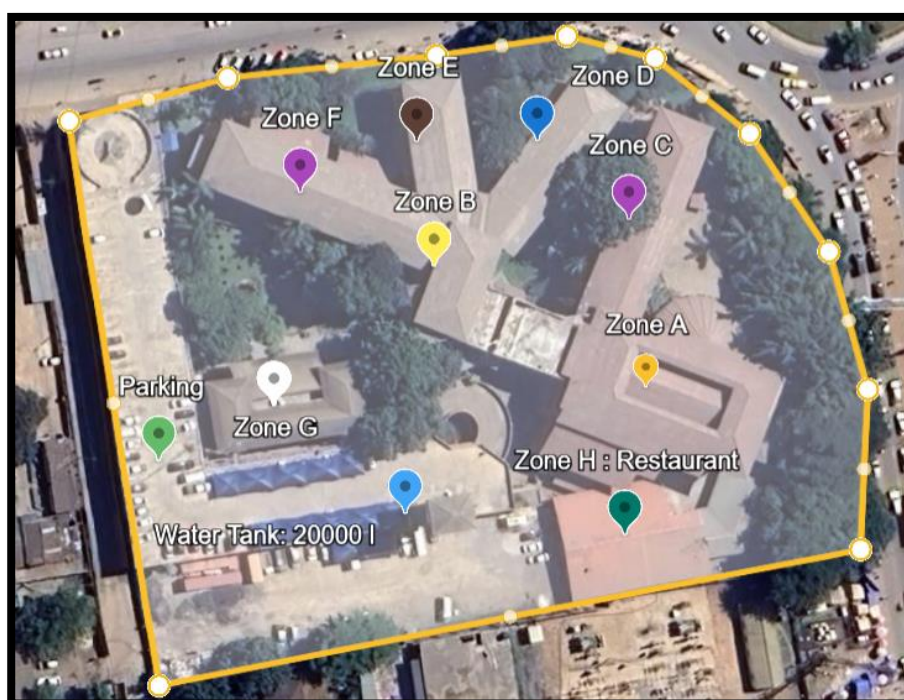


Figure 2 : Vue du dessus du siège de COMESA avec l'emplacement de chaque zone

c. *Etat des équipements et installations*

Les équipements électriques recensés au sein du siège du COMESA peuvent être regroupés en trois grandes catégories, comme illustré dans Tableau 2 ci-dessous. À cela s'ajoutent quatre pompes : deux pompes immergées, dont une en veille, ainsi que deux surpresseurs, également avec une pompe en veille. Le site comprend également une salle serveur.

Il est important de souligner qu'au cours des différentes visites effectuées sur le site, nous avons pu observer de manière concrète la charge électrique en fonctionnement. Il a notamment été constaté que certains équipements, tels que les luminaires et les climatiseurs, sont anciens et donc peu efficaces sur le plan énergétique. Ces appareils présentent une consommation électrique relativement élevée, ce qui contribue à alourdir la demande énergétique globale du bâtiment.

Tableau 2 : Liste des appareils électriques se trouvant au siège du COMESA par catégories

Groupes	Catégories	Appareils	Puissance (W)	Quantité
1	Equipement de travail	Ordinateurs portables	65	132
		Ordinateurs de bureaux	300	122
		Lampes	36/18	1009/62
		Imprimantes	1500/720	36/26
		Scanneurs	1600	8
		Broyeur de papier	920	2
		Projecteurs	273	16
		Télévision	100	18
2	Chauffage et Refroidissement	Climatisation	1095/3540	140/6
		Chauffage électrique	1500	9
		Réfrigérateur	200	27
		Bonbonne d'eau	500	30
		Sèche main électrique	1500	14
3	Appareils de cuisine	Bouilloire électrique,	2000	25
		Micro-onde	1100	22

- ***Salle serveurs***

La salle serveurs représente une charge sensible et un système a été dimensionné uniquement pour cette charge. Elle a une puissance totale réelle de **35,23 kW**.

Tableau 3 : Puissance électrique de la salle serveurs

Désignation	Nombre	Puissance (W)	Puissance totale (W)
Climatisation (AC)	4	8500	34000
SERVERS	4	200	800
LIGHTS	12	36	432
Total (W)			35232

- ***Pompage d'eau***

Une autre charge importante est liée au pompage d'eau. L'institution consomme par jour **20000 litres** d'eau, provenant d'un forage. Pour ce faire les pompes citées ci-dessous sont utilisées. Les pompes immergées ont une puissance de 3 kW et les surpresseurs 4 kW. Cette consommation est principalement due au nombre de personnel et de visiteurs présents dans le bâtiment, ce qui entraîne une utilisation fréquente des toilettes et autres installations nécessitant de l'eau. De plus, la cantine requiert une quantité importante d'eau pour la cuisson et la vaisselle. Les espaces paysagers autour du bâtiment sont régulièrement irrigués, ce qui accroît davantage la demande en eau. Les activités quotidiennes de nettoyage et d'entretien, incluant le lavage des sols et des sanitaires, représentent également une part considérable de l'eau utilisée. Enfin, certains systèmes de plomberie du bâtiment sont obsolètes et peuvent présenter des fuites, entraînant ainsi des pertes supplémentaires d'eau.

En résumé, cette première partie a permis d'introduire les éléments clés du projet, d'identifier la zone d'implémentation, de décrire les spécificités du site et de dresser l'état des lieux de l'existant. Ces informations sont indispensables pour orienter les choix techniques et économiques qui ont été développés dans les parties suivantes.

PARTIE B : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Cette partie expose les résultats de dimensionnement technique du système photovoltaïque. Elle présente également la méthodologie suivie, les différentes hypothèses utilisées ainsi que l'évaluation des besoins énergétiques et l'analyse des conditions climatiques.

I. Méthodologie de conception

Pour mener à bien le dimensionnement du système solaire pour le siège du COMESA, plusieurs étapes ont été suivies. Elles comprennent les points suivants :

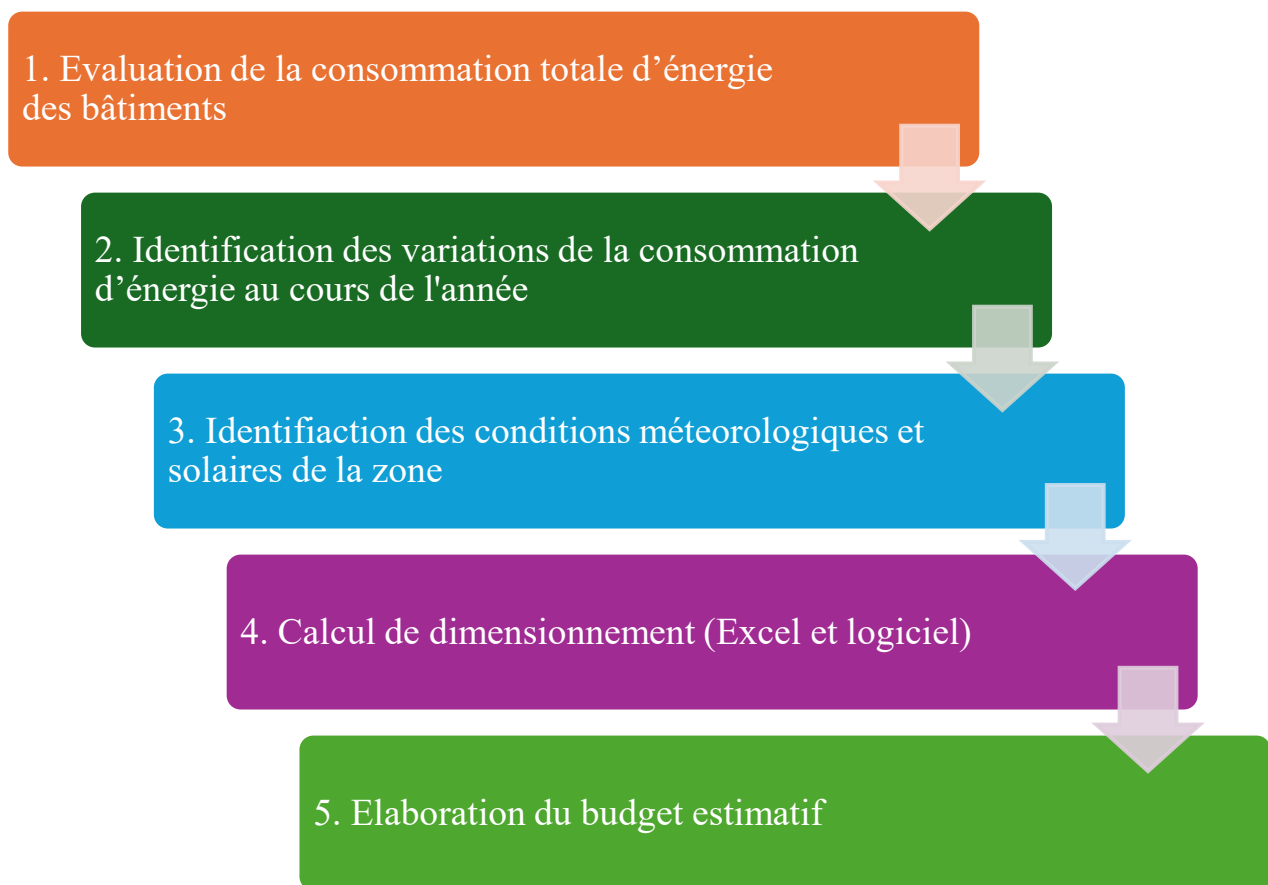


Figure 3 : Méthodologie de l'étude

Un audit énergétique avait été prévu, mais n'a pu être fait, faute de temps. En effet, afin d'avoir le matériel nécessaire à cet audit, une lettre devait être adressée par le COMESA au ministère de l'Energie. En raison de délais imprévus, la lettre n'a malheureusement pas pu être envoyée dans les temps initialement prévus.

II. Etude technique

Afin de mener à bien ce travail de dimensionnement, une collecte rigoureuse de données a été réalisée en amont. Des questionnaires ont été élaborés et envoyés au COMESA, et les factures d'électricité collectées ont permis d'analyser les tendances et les schémas de consommation mensuelle sur une période de sept ans. Le processus de collecte de données a pris en compte les étapes suivantes :

- **Visites du site** : Plusieurs visites ont été effectuées afin de bien appréhender la zone d'étude, d'en comprendre le fonctionnement, d'identifier les différents équipements présents, d'évaluer leur état de fonctionnement, ainsi que de formuler les questionnaires nécessaires à la collecte de données.
- **Questionnaires clients** : Les données de consommation d'énergie ont été recueillies pour chaque zone. Il s'agit du nombre de chaque type d'appareil, ainsi que son temps d'utilisation quotidien.
- **Factures d'électricité** : Une analyse de la consommation d'électricité sur sept années consécutives (2017-2024) a permis d'établir un profil énergétique moyen du bâtiment.
- **Évaluation de l'irradiation solaire** : Les données sur les ressources solaires ont été obtenues à partir de l'étude ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) en partenariat avec Solargis, évaluant le potentiel solaire de la Zambie.
- **Chiffrage du système photovoltaïque solaire** : Le coût du système solaire a été estimé en utilisant les standards de l'industrie, en conformité avec les normes techniques en vigueur en Zambie.

II.1. Evaluation des besoins énergétiques

Le tableau 4 ci-dessous montre la charge totale calculée pour le bâtiment du COMESA, qui s'élève à **372 kW**, avec une consommation énergétique de **1 720 kWh par jour**, cinq jours par semaine. La consommation énergétique a été évaluée en appliquant des valeurs de coefficient d'utilisation, coefficient de simultanéité ainsi qu'un coefficient d'extension. Le **coefficient d'utilisation** permet d'estimer la part de puissance réellement consommée par rapport à la puissance installée, et le **coefficient de simultanéité** tient compte du fait que les équipements ne fonctionnent pas tous en même temps. Ces deux coefficients varient en fonction de la nature de chaque type de charge. En revanche, le **coefficient d'extension**, appliqué sur la charge totale, permet d'anticiper une éventuelle augmentation future des besoins énergétiques du site. L'Annexe 2 illustre, à titre d'exemple, le cas du calcul de la charge électrique d'un des bureaux (Cas du bureau des statistiques)

Tableau 4 : Données de consommation électrique des bâtiments de COMESA par zone

ZONES	Puissance (kW)	Energie (kWh)
ZONE A	52,80	160,77
ZONE B	40,37	171,99
ZONE C	17,80	84,58
SERVEURS	27,59	237,12
ZONE D	34,01	160,95
ZONE E	46,49	216,47
ZONE F	109,55	527,15
ZONE G	12,67	55,03
ZONE H	26,04	98,52
Pompage	4,37	6,55
Total	371,69	1719,12

- **Consommation énergétique par zone**

Le Tableau 5 ci-dessous, nous permet de voir les valeurs de puissance et d'énergie nécessaires pour chaque zone.

Tableau 5 : Puissance électrique et consommation énergétique par zone

	SCENARIO 1	SCENARIO 2	SCENARIO 3
Puissance (kW)	371,69	138,56	183,74
Energie (kWh)	1719,12	654,46	820,72

La Figure 4 ci-dessous montre la consommation d'énergie par zone. La zone F a la plus forte consommation, suivie de la zone A. Cela s'explique par le fait que la zone F a la particularité d'abriter un plus grand nombre de services. Les serveurs à eux seuls représentent 7% du besoin énergétique de COMESA. Le pompage quant à lui ne représente que 1 %.

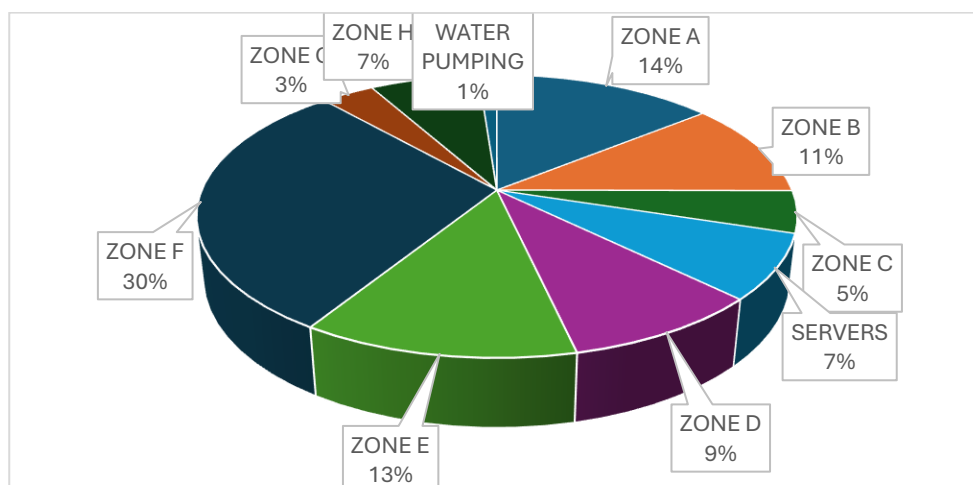


Figure 4 : Diagramme montrant la consommation énergétique par zone

Lorsque la puissance est désagrégée par équipement (Figure 5), la plus grande part de la consommation provient de la climatisation, qui représente 43 % de la consommation énergétique totale. Ce pourcentage élevé s'explique par le fait que chaque bureau du siège du COMESA est équipé d'au moins deux climatiseurs individuels. À cela s'ajoute l'ancienneté du bâtiment et de certains appareils, du manque d'isolation, ainsi que de l'absence de pratiques en matière d'efficacité énergétique de la part des employés. Les pompes ne représentent que **0,45 %** de la consommation totale d'énergie.

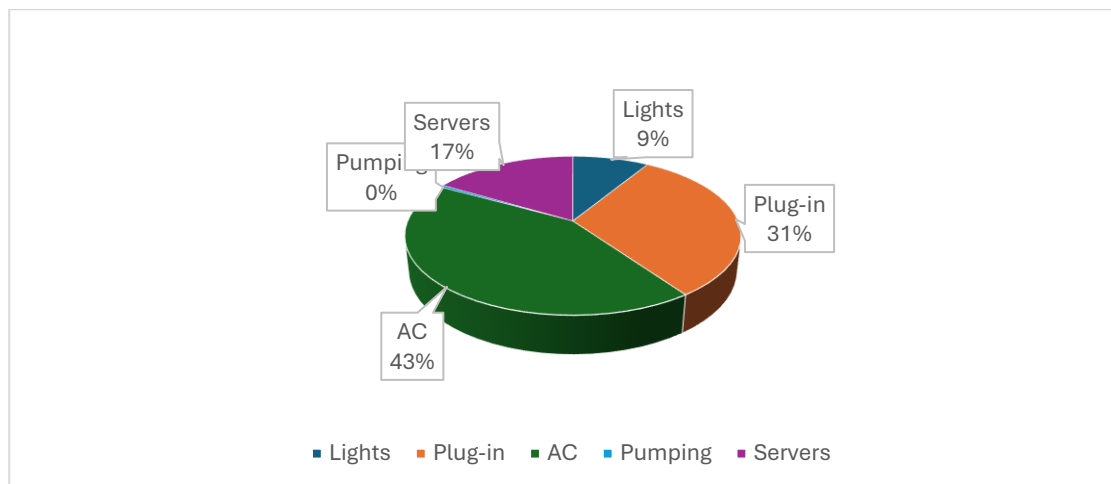


Figure 5 : Diagramme montrant la consommation par type d'appareil

II.2. Identification des variations de la consommation d'énergie au cours de l'année

La Figure 6 ci-dessous, montre le profil de consommation des bâtiments de COMESA. Elle a été obtenue en faisant une moyenne mensuelle de chaque mois au cours des sept dernières années (2017 à 2024).

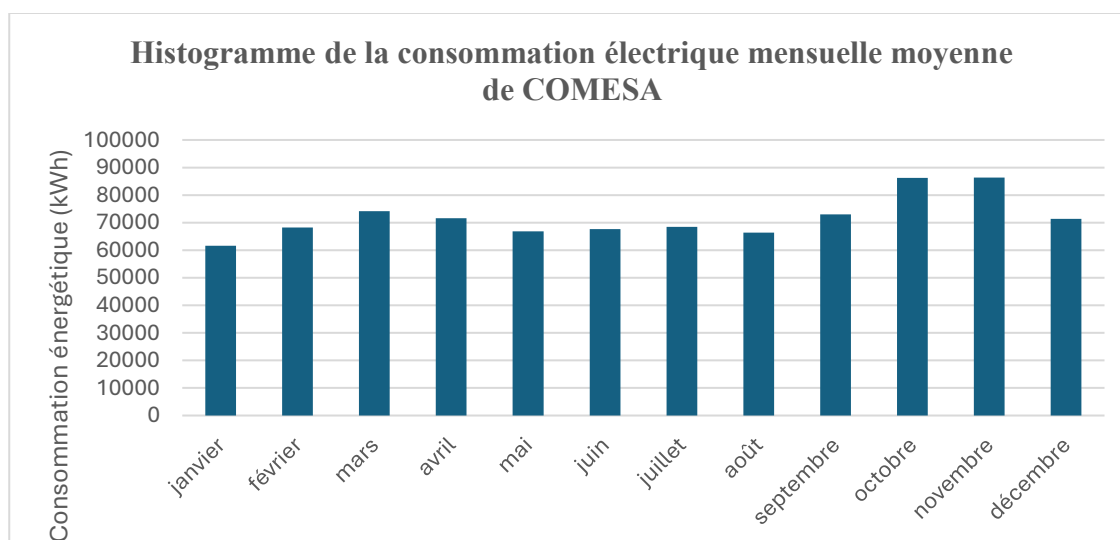


Figure 6 : Moyenne mensuelle de la consommation énergétique de COMESA (2017 - 2024)

Les données de consommation des sept dernières années nous ont permis d'avoir les courbes de consommation suivantes :

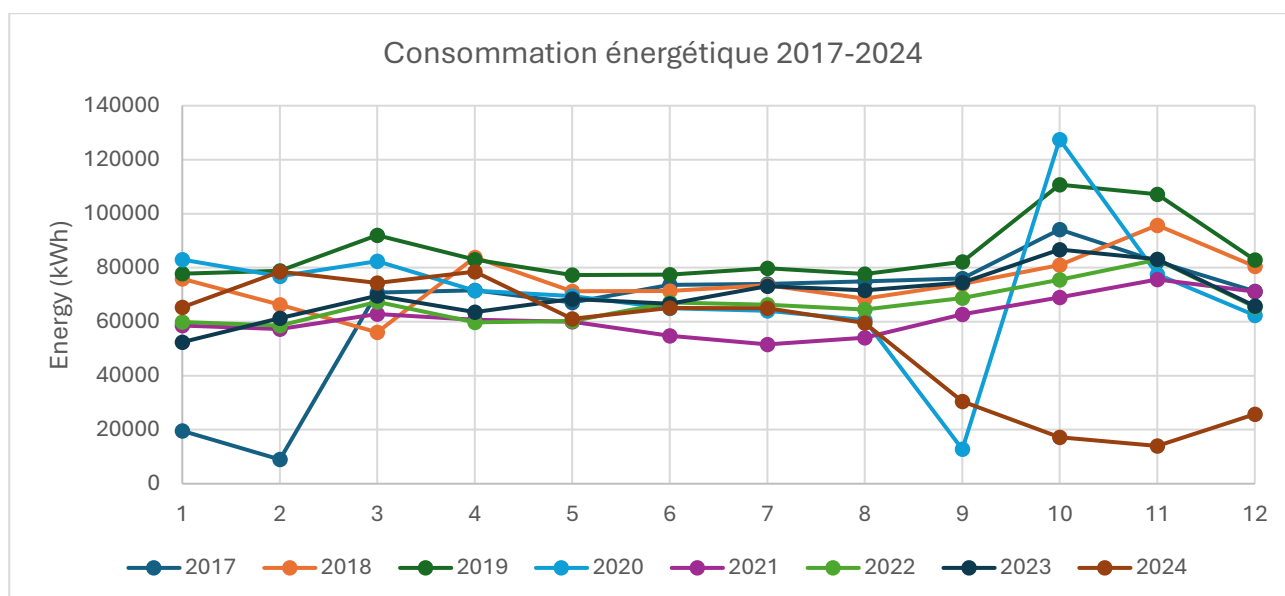


Figure 7 : Courbes de la consommation énergétique mensuelle de COMESA (2017 - 2024)

Le graphique ci-dessus montre que la consommation électrique est globalement stable au fil du temps, avec quelques variations notables au cours de certains mois. Deux pics importants de consommation apparaissent : l'un en mars, et le second, plus marqué, entre octobre et novembre. Entre avril et août, la consommation reste relativement constante et suit une tendance presque linéaire.

On remarque aussi des cas particuliers : en 2017, les mois de janvier et février affichent une très faible consommation, sans explication claire. En mars 2018, une légère baisse est observée, probablement liée à une période de sécheresse ayant entraîné des coupures d'électricité. En septembre 2020, la consommation chute fortement avant de remonter brusquement en octobre, ce qui pourrait être dû aux restrictions liées à la pandémie de COVID-19. Enfin, entre septembre et décembre 2024, la consommation diminue nettement en raison de coupures d'électricité causées par la sécheresse et la baisse du niveau des barrages et des cours d'eau.

Dans l'ensemble, la consommation suit le même profil d'une année à l'autre, hormis ces quelques mois particuliers. Cependant, contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la consommation n'est pas en hausse continue d'une année à une autre. Il serait donc plus compliqué pour l'entreprise de se projeter en raison des variations imprévues et des événements externes qui influencent la consommation.

II.3. Conditions météorologiques et données d'irradiation solaire

a. Données d'irradiations solaires à Lusaka

La Figure 8 présente les données moyennes d'irradiation solaire à Lusaka, issues d'une étude réalisée par l'ESMAP sur le potentiel solaire en Zambie. L'irradiation utilisée ici est le GHI (Global Horizontal Irradiation), qui mesure l'irradiation solaire totale sur une surface plane. qui est généralement utilisé pour les dimensionnements préliminaires des systèmes photovoltaïques. GTI (Global Tilted Irradiation), c'est-à-dire l'irradiation solaire totale reçue sur une surface inclinée, prend en compte l'inclinaison des panneaux solaires, serait plus adapté, mais suppose une inclinaison idéale des panneaux,

L'inclinaison des panneaux est un paramètre important. Lorsqu'ils sont bien orientés, les modules peuvent capter un maximum d'énergie tout au long de l'année. De plus, elle facilite le nettoyage

naturel des panneaux, en aidant la poussière, les débris et l'eau de pluie à s'évacuer facilement et offre une flexibilité pour l'installation. Dans l'hémisphère sud, les panneaux doivent être orientés vers le nord pour optimiser la production solaire. L'inclinaison des panneaux se fait suivant la latitude des lieux. La Zambie est située à environ 13° de latitude sud, l'angle d'inclinaison recommandé varie généralement entre **13° et 23°**[5], en fonction des objectifs annuels de production, avec un optimum à **19°** pour Lusaka.

Le dimensionnement a été fait en partant de la situation la plus défavorable. Cela correspond à l'irradiation la plus faible, qui est celle enregistrée en janvier, avec une valeur de 4,72 kWh/m²/jour[5].

La température moyenne annuelle à Lusaka est de 20,2°C.

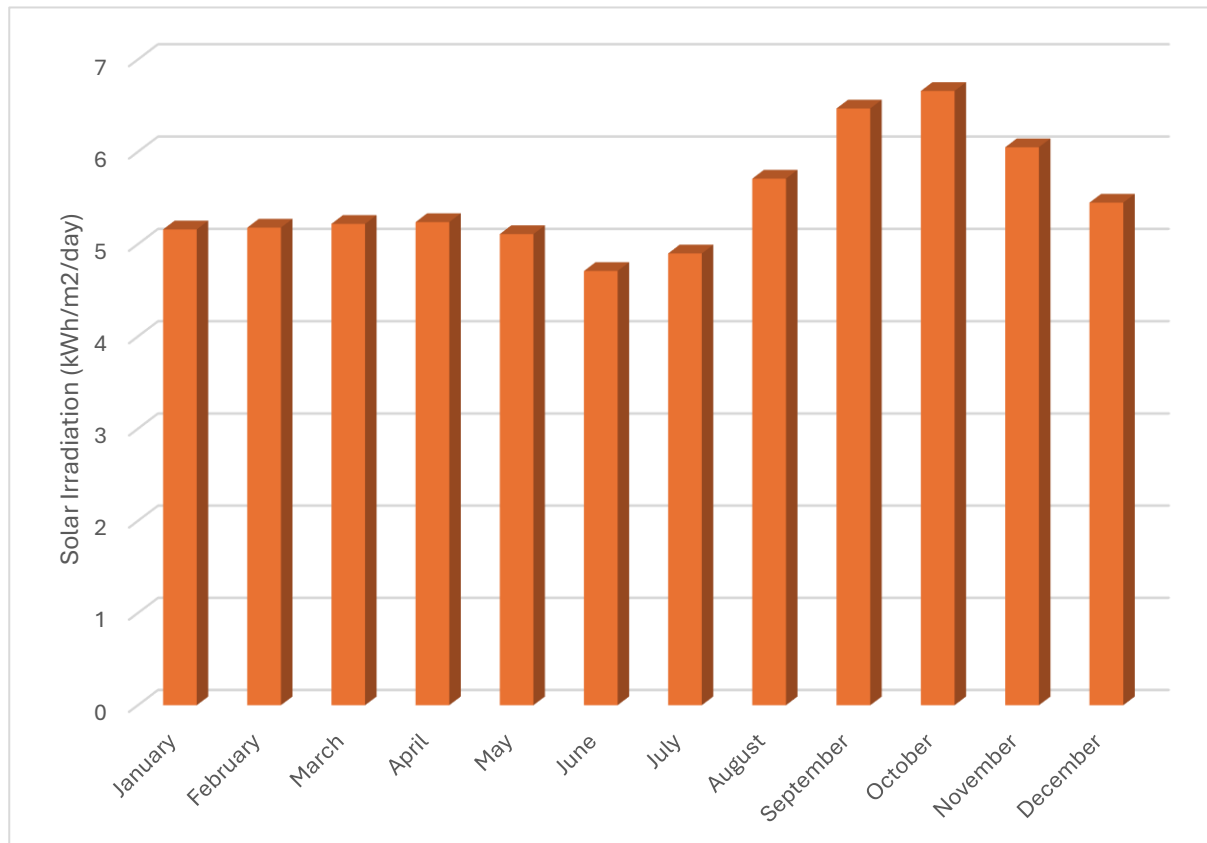


Figure 8 : Irradiation solaire moyenne par jour à Lusaka

La Figure 9 ci-dessous ne permet de voir la différence entre les valeurs d'irradiation globale horizontales (GHI) et le GTI. Cette différence s'explique par le mouvement de déplacement du soleil au cours d'une année (Annexe 10).

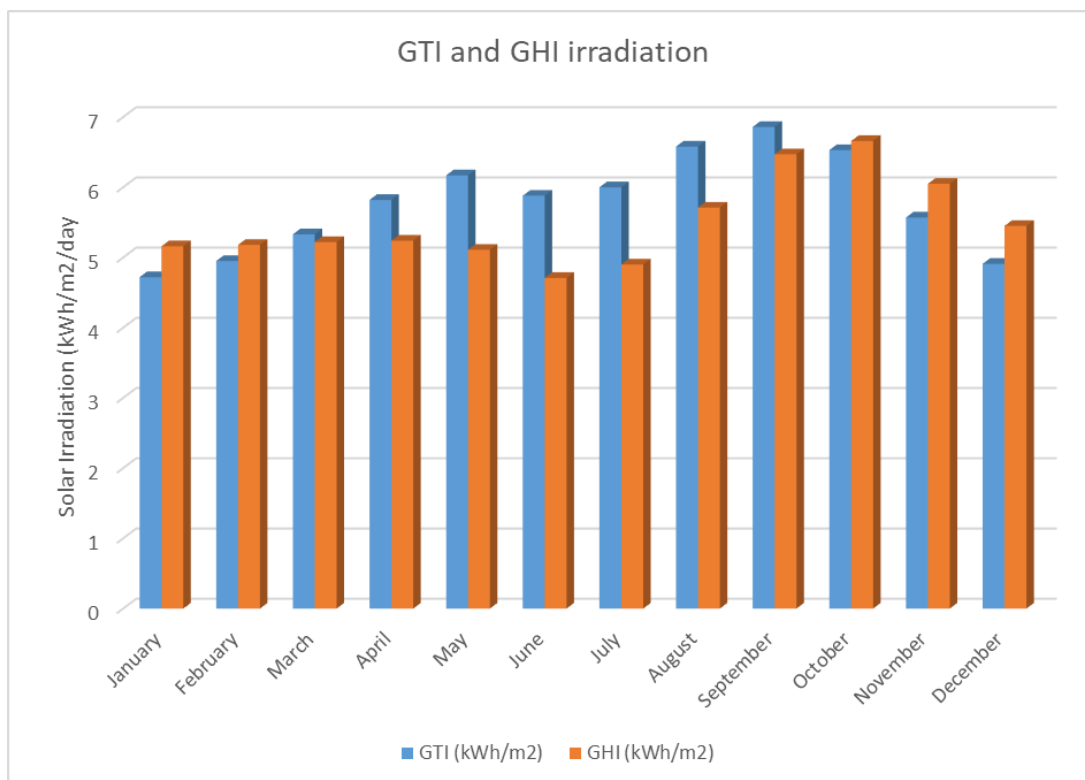


Figure 9: Valeur d'irradiation GTI et GHI à Lusaka

II.4. Dimensionnement à l'aide d'Excel

a. Hypothèses techniques

Le Tableau 6 ci-dessous présente les différentes hypothèses techniques utilisées lors du dimensionnement. Le choix a été fait d'utiliser deux types de panneaux solaires, ceux de 425 Wc et ceux de 750 Wc, afin de réaliser une comparaison sur le plan économique et la surface nécessaire.

Tableau 6 : Liste des hypothèses de dimensionnement

Paramètres	Valeur	Unité
Rendement du champ PV (η_{PV})	85 %	-
Rendement batterie (η_{bat})	85 %	-
Irradiation solaire (H_i)	4,72	kWh/m²/jour
Tension du système (V_{syst})	48	V
Profondeur de décharge maximale (DOD_max)	0,8	-
Panneau 425 Wc	1,91	m²
Panneau 750 Wc	3,01	m²
Capacité des batteries (batteries 24V)	200	Ah
Autonomie batteries (Jr aut)	1	jour

b. Formules et étapes de dimensionnement utilisées

Les formules ci-dessous ont été utilisées pour effectuer le dimensionnement du système pour chaque scénario.

Tableau 7 : Liste des formules de calcul utilisées

Paramètres	Formules
1. Puissance minimale du champ solaire	$P_{c\ min} = \frac{B_j}{RP \times H_i} \text{ avec } RP = \eta_{PV} \times \eta_{bat}$
2. Capacité minimale des batteries	$C_{bat\ min} = \frac{B_j \times J_{r\ aut}}{V_{syst} \times \eta_{bat} \times DOD_{max}}$
3. Nombre de batteries en série	$Nbat_s = \frac{V_{syst}}{\text{Tension nominale batterie}} \rightarrow Nbat_s = \frac{48}{24} = 2$
4. Nombre de batteries en parallèle	$Nbat_p = \frac{C_{bat\ min}}{\text{Capacité nominale batterie}}$
5. Nombre total de batteries	$Nbat_{tot} = Nbat_s \times Nbat_p$
6. Puissance du régulateur MPPT	$P_{rég} = P_{c\ min} \times 1,2$
7. Les ratios de vérification	<p>Le degré de décharge quotidienne Ddq</p> $Ddq = \frac{B_j}{C_{bat} \times \eta_{bat} \times V_{banc_bat}} < \frac{DOD_{max}}{J_{r\ aut}}$ <p>Aptitude du champ PV à couvrir les besoins journaliers</p> $R = \frac{P_c \times \eta_{bat} \times H_i \times \eta_{PV}}{B_j} > 1$
8. Dimensionnement de l'onduleur	$S_2 = 2 \times S_1 \quad S_1 = \frac{P_{cmin}}{\cos \phi}$ <p>Le facteur de puissance est pris égale à 0,94. Cette valeur a été obtenue avec les factures d'électricités.</p>

II.5. Résultats du dimensionnement Excel

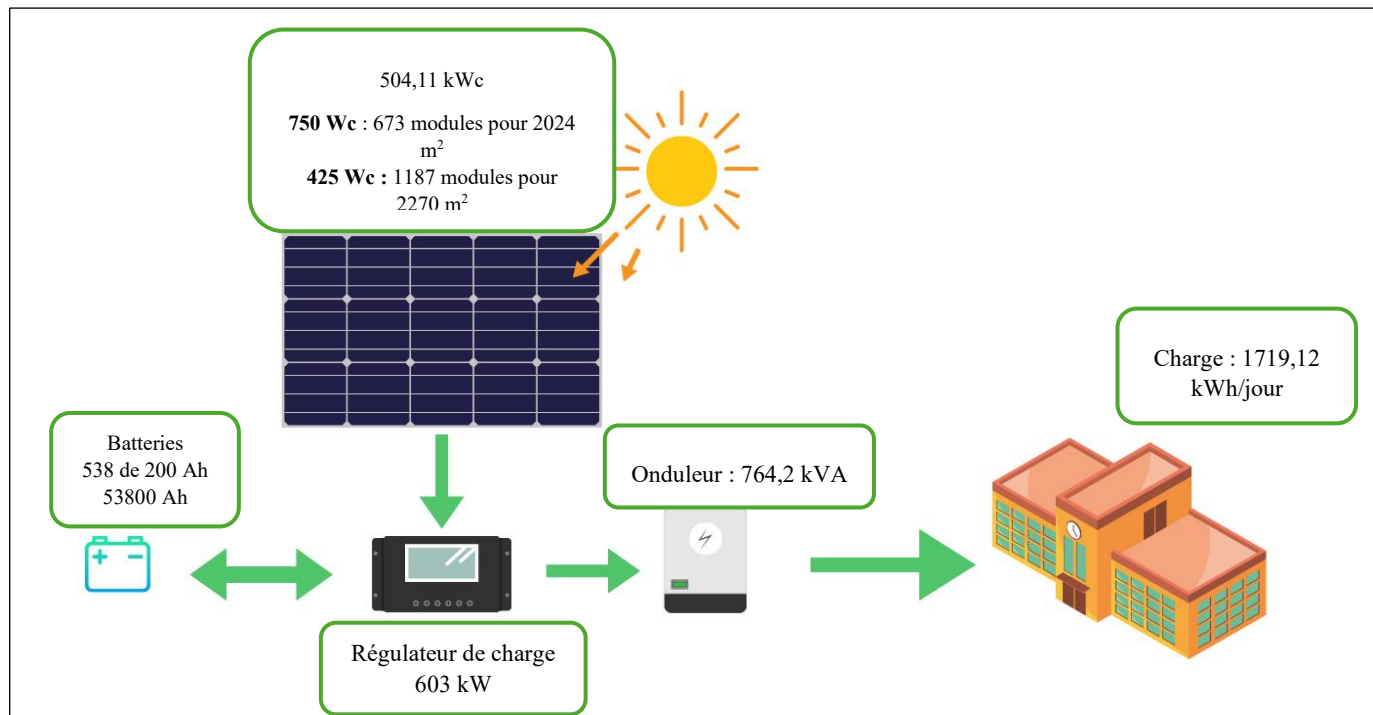
Les calculs ont été réalisés pour chaque zone, pour tous les trois scénarii envisagés. Les résultats présentés ci-dessous représentent la synthèse pour l'ensemble des zones à chaque scénario. Cette option a pour objectif de proposer un champ solaire dédié à chaque bâtiment, de manière indépendante, afin de garantir une autonomie énergétique, de faciliter la gestion ainsi que la

maintenance. Les détails spécifiques à chaque zone se trouvent en Annexe 6 et Annexe 7, et les calculs détaillés figurent dans la feuille Excel jointe.

- **Scénario 1 : Toutes les charges de tous les bâtiments**

Avec le scénario 1 ci-dessous illustré, toutes les charges sont alimentées par l'énergie solaire.

Figure 10 : Résultat dimensionnement scénario 1



- **Scénario 2 : Zones prioritaires**

Dans le scénario 2, le système solaire ne prend en compte que les zones qui ont été jugées prioritaires c'est-à-dire A, B et C, ainsi que la salle des serveurs.

Tableau 8 : Résultats de dimensionnement du scénario 2

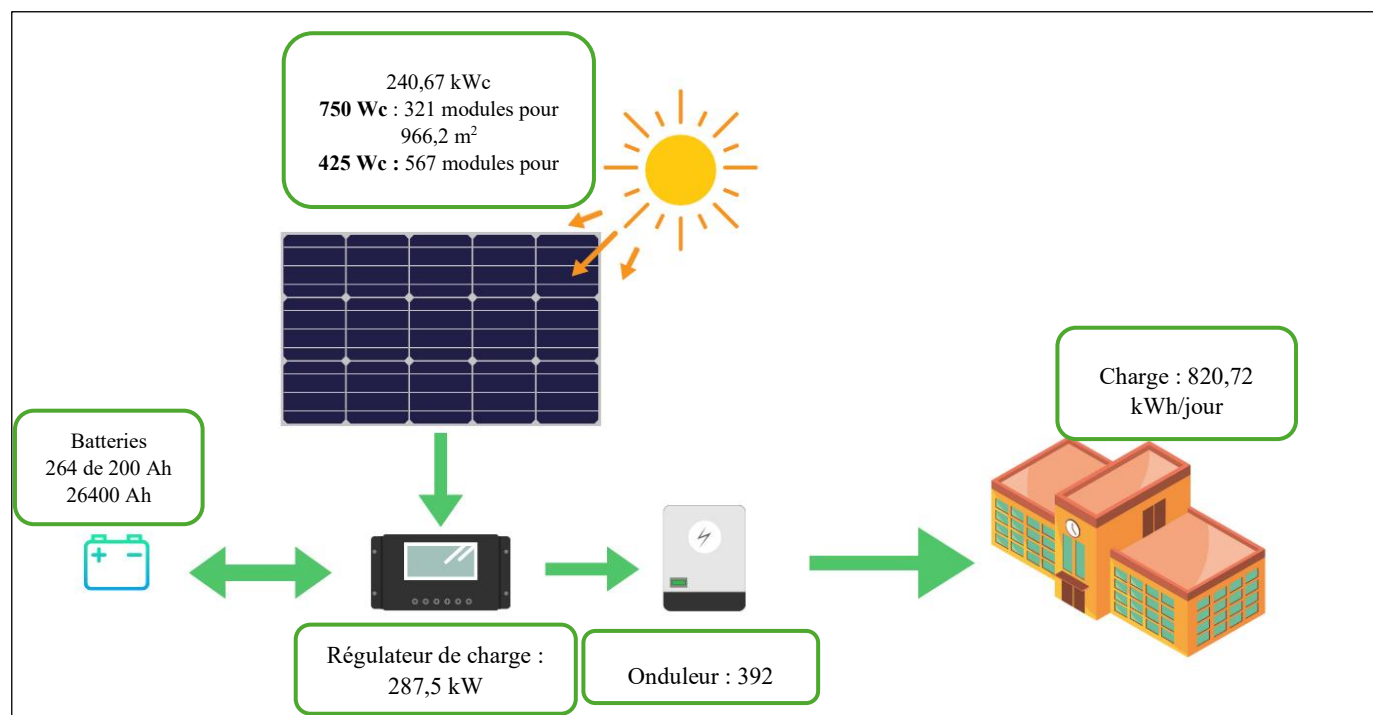
	ZONE A	ZONE B	ZONE C	SERVERS	Total
Champ PV					
Energy needed (kWh)	160,8	172	84,6	237,1	654,5
Pc min (kWc)	47,1	50,4	24,8	69,5	191,9
Npanels (425 Wc)	111	119	58	164	452
Area needed (m2)	212,3	227,1	111,7	313,1	864,1
Npanels (750 Wc)	63	67	33	93	256
Area needed (m²)	189,3	202,5	99,6	279,1	770,5
Batteries					
Nbat_tot	50	54	26	74	204
Cbat (Ah)	5000	5400	2600	7400	20400
Surface bat (m2)	5,9	6,3	3,1	8,7	24

Charge Controller					
Power needed (kW)	47,1	50,4	24,8	69,5	191,9
Power arrow (kW)	56,6	60,5	28,5	83,4	229,1
Inverter					
Tot charges power (kW)	52,8	40,4	17,8	27,6	138,6
S invert (kVA)	112,6	86,1	38,0	58,8	295,5

- **Scénario 3 : Charges prioritaires**

Le scénario 3 couvre uniquement les charges essentielles pour toutes les zones, comprenant le pompage de l'eau, la salle des serveurs, ainsi que toutes les autres charges à l'exception de la climatisation. Comme illustré dans la Figure 5, la climatisation à elle seule consomme 43% de l'énergie totale du siège du COMESA, alors même qu'elle ne représente pas une charge essentielle au fonctionnement des services.

Figure 11 : Résultats du dimensionnement selon le scénario 3



II.6. Résultats du dimensionnement logiciel

Afin de valider les résultats obtenus avec les calculs réalisés sur Excel, une simulation a été effectuée à l'aide du logiciel Archelios. Cette simulation, a permis d'estimer la production annuelle du site. La simulation porte uniquement sur le scénario 1 (avec les modules de 425 Wc), qui est le plus énergivore. Le ratio de performance pour la première année est estimé à 83 %, avec un ratio moyen sur 20 ans de 80 %. Il est également important de noter que la puissance utilisée correspond à la puissance crête minimale calculée pour le site. Elle n'est donc pas encore optimisée et pourra être ajustée lors de la configuration finale du système, notamment en fonction du câblage des modules (série et parallèle) ou du modèle choisi par l'entreprise.

Pour cette simulation, les hypothèses et les résultats obtenus à partir des calculs Excel ont été repris, notamment la puissance crête minimale du site. Le logiciel Archelios a ainsi permis d'estimer la production annuelle du système à partir de ces données, sur une durée de vingt (20) ans. Les résultats obtenus ont servi à tracer la courbe orange représentée sur la Figure 12 ci-dessous, illustrant la production mensuelle estimée du site (pour sa première année de fonctionnement). Il est probable que le logiciel utilise l'irradiation globale horizontale (GHI) pour ses calculs. Les données de production du site sur les vingt (20) prochaines années serviront à l'analyse de la viabilité économique du projet.

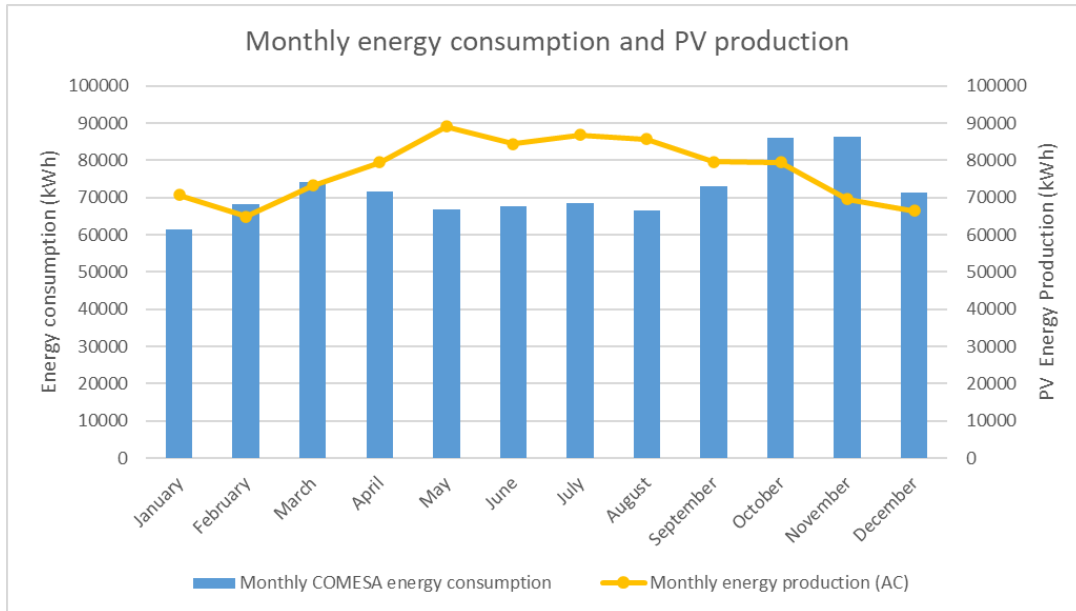


Figure 12 : Consommation énergétique et Production électrique du champ PV

Cette partie a permis de déterminer les caractéristiques techniques du système photovoltaïque adapté aux besoins énergétiques du site. Les résultats obtenus via Excel et ARCHELIOS confirment la capacité du champ à couvrir les besoins du site. Ils fournissent aussi des bases solides pour l'analyse économique présentée dans la partie suivante.

PARTIE C : ANALYSE ECONOMIQUE DU PROJET

La troisième partie vise à évaluer la viabilité économique du projet à travers l'étude du modèle « Energy as a Service » et l'estimation des coûts. Elle met en lumière les mécanismes financiers qui peuvent soutenir la mise en œuvre durable du système proposé.

I. Description du système « *Energy as a service* »

I.1. Définition et modèles économiques

Les Energy Service Companies (ESCO) sont des entreprises qui proposent des services intégrés pour la mise en œuvre et le financement de projet d'efficacité énergétique. Elles peuvent aussi offrir des services liés à la production et à la distribution d'énergie. Leurs prestations incluent les audits énergétiques, la conception technique, l'ingénierie, l'approvisionnement en équipements, la construction, l'installation, la mise en service, la mesure et vérification des économies d'énergie et de coûts, l'exploitation et la maintenance, ainsi que la gestion des installations. Le client, ou site utilisateur de l'énergie, peut payer les services de l'ESCO en retour de plusieurs manières. L'une des plus répandue est le paiement en fonction des économies réalisées sur sa facture énergétique, les détails dépendent de l'entente entre les deux parties. La Figure 13, présente deux modèles financiers pour ESCO.[9]

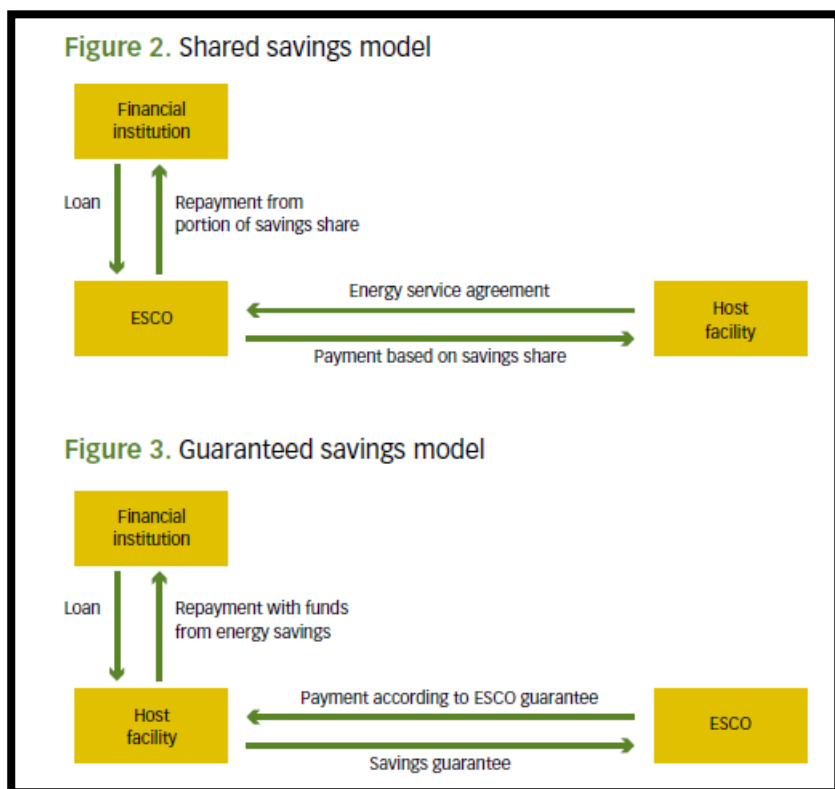


Figure 13 : Modèles économiques pour ESCO

Pour celles qui proposent des services de production/distribution d'énergie, le paiement se fait généralement sur la base d'un tarif fixé entre les deux parties au départ. Plusieurs projets autour des

ESCO se sont développés dans le monde, plus particulièrement aux États-Unis et en Europe où les modèles économiques les plus couramment utilisés sont ceux des économies partagées et des économies garanties. Les tentatives de reproduction des modèles occidentaux dans les pays en développement se sont souvent soldées par des échecs. Les donateurs et consultants ont souvent survendu les ESCOs, suscitant des attentes irréalistes sur leurs capacités et la vitesse de leur développement. Car en effet, un des défis majeurs pour les marchés ESCO dans les pays émergents réside dans la faible solidité financière des entreprises existantes ou nouvelles, ce qui limite leur accès au financement commercial à transférer ensuite aux clients. Parmi les obstacles figurent : (i) la faiblesse des actifs et des bilans financiers ; (ii) la perception par les banques commerciales selon laquelle les projets ESCO sont trop risqués ; (iii) l'inexpérience des prêteurs et leur manque de capacité technique pour évaluer correctement ces projets. [9]

I.2. Cas du Projet du COMESA

Dans le cadre du projet du COMESA d'installation d'un système photovoltaïque autonome, l'objectif visé en plus de la fourniture d'électricité sans interruption, est de démontrer un modèle économique évolutif et reproductible pour la fourniture d'énergie aux bâtiments publics, en mettant l'accent sur l'intégration des énergies renouvelables, l'efficacité des coûts et la durabilité. Le COMESA conclura éventuellement un contrat d'achat d'électricité d'une durée de dix ans avec l'entreprise privée sélectionnée pour fournir le service énergétique requis. L'entreprise privée mobilisera les investissements nécessaires et conservera la propriété des infrastructures. Le COMESA ne paiera que pour le service énergétique fourni. A la fin du contrat, l'entreprise se chargera du démantèlement du matériel, sauf si une entente est signée avec le COMESA pour la poursuite du projet avec ou sans elle.

Le prestataire sélectionné sera aussi chargé de garantir le respect d'indicateurs clés de performance pendant toute la durée du contrat. Ces indicateurs pourront inclure, par exemple : l'énergie disponible chaque jour pour alimenter les charges, le taux de disponibilité du système PV sur une période donnée, le délai d'intervention pour les opérations de maintenance, ou encore la profondeur maximale de décharge des batteries.

Il est important de souligner qu'il existe pour l'entreprise choisie la possibilité de vente de l'énergie au réseau national. Cela pourrait être fait les week-ends par exemple, lorsque le personnel sera au repos. Elle représenterait un gain économique important pour l'entreprise. Une autre possibilité serait de surdimensionner le système afin d'avoir un surplus constant à revendre au réseau. Le projet ne propose pas de cadre strict et laisse ainsi la liberté aux entreprises intéressées de proposer une solution économique intéressante pour les deux parties, en s'appuyant sur les éléments présentés plus haut.

En résumé, on aura :

- La signature d'un contrat de Service Énergétique entre le fournisseur de services et le Secrétariat du COMESA. Le COMESA ne paie que pour l'énergie utilisée. Le fournisseur de services (ESCO) est responsable du financement initial ;
- Une solution solaire est déployée par l'ESCO, et le Secrétariat du COMESA commence à utiliser l'énergie sous forme de service ;
- Une tierce partie (contrôle technique) vérifie que l'énergie est bien fournie et consommée, y compris grâce à des technologies de surveillance à distance.

- Le vérificateur indépendant envoie une confirmation au Secrétariat du COMESA indiquant que la fourniture a été faite conformément aux prévisions et que les étapes de paiement ont été respectées.

La Figure 14 ci-dessous permet d'illustrer le modèle que propose COMESA pour ce projet.

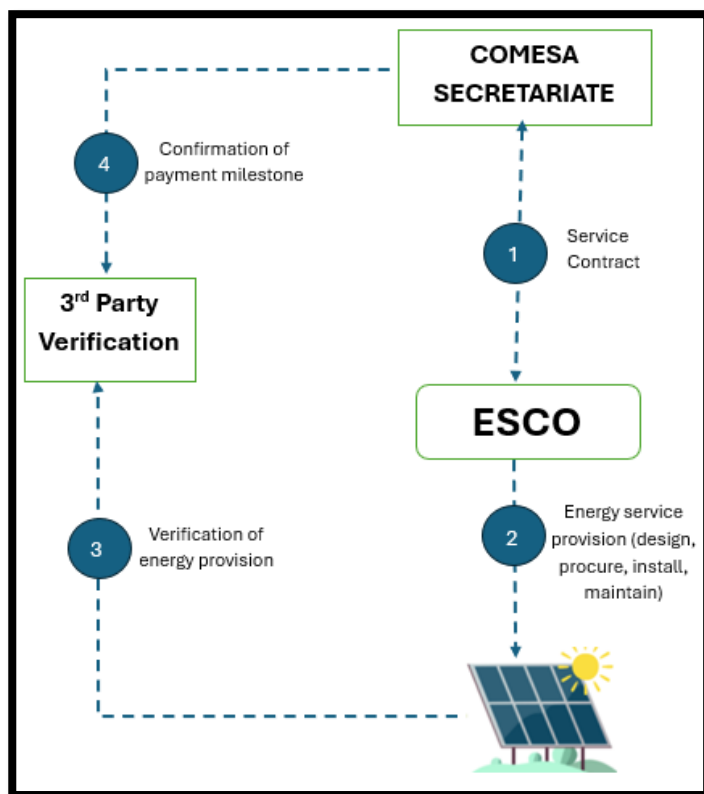


Figure 14 : Schéma de l'approche ESCO pour le COMESA

I.3. Étude de cas : Cas de SolarPipo avec une coopérative laitière en Ouganda

SolarPipo est une entreprise néerlandaise spécialisée dans l'installation de systèmes solaires pour des usages productifs comme le pompage de l'eau ou la conservation du lait. Elle travaille notamment avec des coopératives en Ouganda. L'un de ses projets a été réalisé avec la coopérative Bweramule, qui regroupe 163 agriculteurs membres et plus de 380 autres producteurs de lait de la région. Jusqu'à une date récente, cette coopérative utilisait un générateur diesel pour faire fonctionner son centre de collecte de lait, ce qui était coûteux et polluant. Pour améliorer la situation, SolarPipo a obtenu 57 500 euros grâce à une plateforme d'investissement durable. Avec ce financement, l'entreprise a installé une centrale solaire de 11,88 kW avec un système de batteries. Voici comment fonctionne le projet :[10]

- SolarPipo reste propriétaire du système solaire pendant 5 ans ;
- pendant cette période, l'entreprise s'occupe aussi de l'entretien ;
- la coopérative rembourse le prêt sur 5 ans avec des paiements mensuels, à un taux d'intérêt de 7%, après 3 mois de délai de différé avant le premier paiement.

SolarPipo a fait sa demande de fond sur la plateforme GoParity en juin 2021. Elle a réussi à rembourser tous ses investisseurs en septembre 2022. Ce projet a permis à la coopérative de faire des

économies sur le long terme (elle achetait 30.000 l de diesel chaque année), et d'optimiser sa production, car malheureusement 20% - 40% de la production de lait est perdue en Ouganda en raison de soucis de conservation.[11] Une alimentation électrique continue, efficace et garantie, permettra aux producteurs locaux d'augmenter leurs revenus.

II. Estimation des coûts du projet

Après le dimensionnement, un budget estimatif a été élaboré. Il est important de noter qu'il s'agit uniquement d'une estimation visant à donner au COMESA une idée générale de l'engagement financier. Ce budget ne prend pas en compte des éléments importants tels que les coûts de main-d'œuvre pour l'installation, ou encore le coût des câbles.

Il ressort clairement que le premier scénario est le plus coûteux, avec un montant légèrement supérieur à un demi-million de dollars, tandis que le deuxième scénario est le plus abordable. Il sera plus facile d'attirer des entreprises intéressées par l'investissement dans les scénarios 2 et 3, car l'enjeu principal de ce projet réside dans l'investissement. En effet, les taux d'intérêt bancaires pour les projets énergétiques en Zambie sont souvent astronomiques, atteignant parfois jusqu'à 30%. C'est pourquoi, il était prévu de lancer d'abord une manifestation d'intérêt (Expression of Interest (EOI)), afin d'identifier les entreprises qui étaient susceptibles d'investir dans ce type de projet et de connaître leurs exigences. Cela aurait permis de mieux structurer et calibrer l'appel d'offres. Malheureusement, en raison du manque de temps et de problèmes de communication, le COMESA procédera directement à un appel d'offres.

Tableau 9 : Budget pour le COMESA SOLAR PROJECT pour chaque scénario

		SCENARIO 1	SCENARIO 2	SCENARIO 3
425 Wc	TOTAL (ZMW)	16277800	6389422	9651291
	TOTAL (USD)	581350	228194	344689
750 Wc	TOTAL (ZMW)	16279341	6388862	9650030
	TOTAL (USD)	581405	228174	344644

L'analyse économique a montré que le recours au modèle « *Energy as a Service* » représente une solution intéressante et adaptée au contexte du projet. L'estimation des coûts permet d'envisager une mise en œuvre progressive et rentable, en s'inspirant de cas concrets comme celui de SolarPipo.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Se fondant sur les analyses techniques et économiques, cette section présente les recommandations pour la mise en œuvre du projet ainsi que les perspectives d'évolution envisageables pour assurer sa durabilité. Les recommandations proposées visent à faciliter la concrétisation du projet tout en assurant sa pérennité. À long terme, l'adaptation du modèle à d'autres sites similaires et l'intégration d'innovations technologiques permettront d'amplifier l'impact du projet sur le développement énergétique local.

I. Propositions pour l'installation des modules photovoltaïques

Les calculs ont été réalisés pour chaque zone et dans les différents scénarios envisagés. Idéalement, les modules photovoltaïques doivent être installés sur les toitures de chaque bâtiment. Cela permettra une utilisation optimale de l'espace. Cependant, compte tenu de l'âge des bâtisses (plus de 30 ans), il sera nécessaire d'évaluer au préalable l'intégrité structurelle des toitures avant toute installation. Il serait ainsi plus prudent d'explorer d'autres alternatives. La deuxième option envisageable serait l'espace parking, plus particulièrement le troisième et dernier niveau d'environ 1500 m². L'installation des modules se ferait en structure de type ombrière, elle permettra ainsi de fournir de l'ombre aux véhicules stationnant au troisième niveau. Toutefois, cela impliquerait un investissement supplémentaire lié à la construction d'une structure métallique, dont les coûts doivent être pris en compte dans le budget du projet.

La Figure 15 montre une vue du dessus du parking de COMESA qui se présente en forme de L.

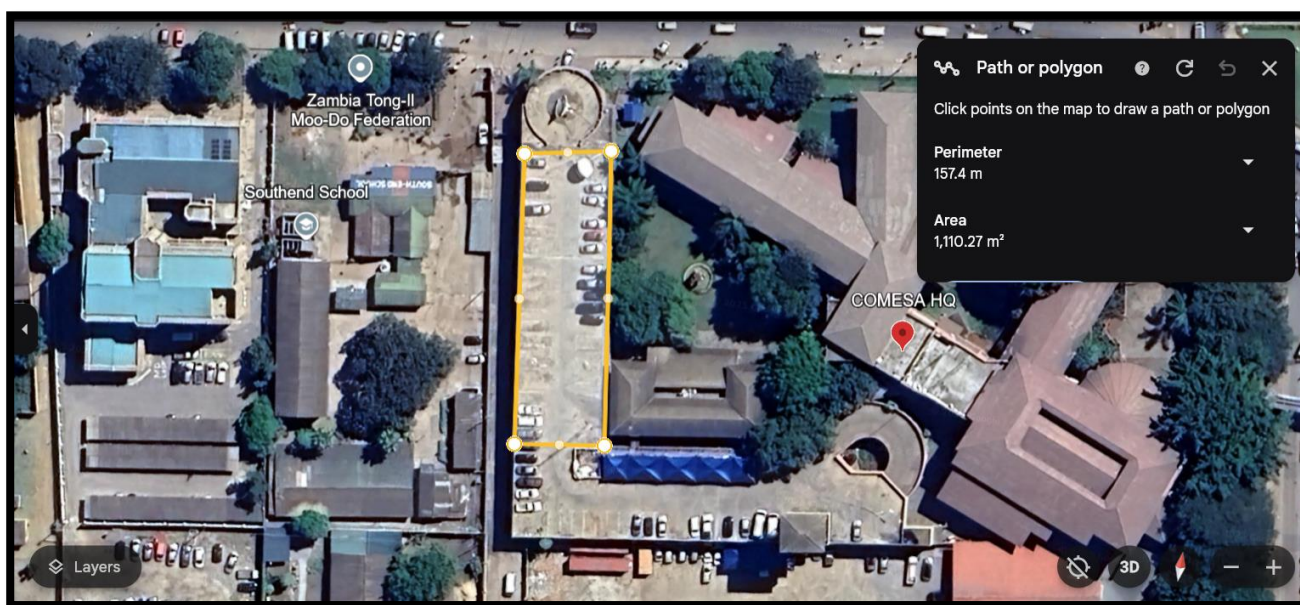


Figure 15 : Vue du dessus du parking de COMESA

Il existe aussi un espace parking au sol d'environ 1400 m², proche du restaurant qui pourrait être exploité de la même manière. Bien qu'intéressant, il pourrait se poser le problème d'ombrage pour cet emplacement. On peut le voir sur la Figure 16 ci-dessous.

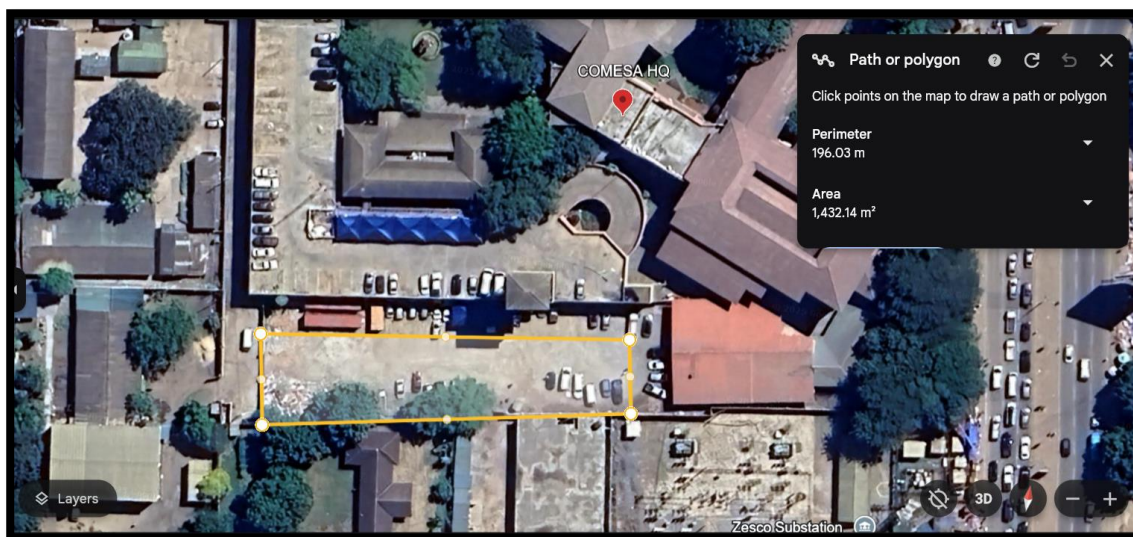


Figure 16 : Vue du dessus de l'espace parking au sol

II. Propositions pour renforcer les mesures d'efficacité énergétique

Il serait plus judicieux de débiter le projet avec le scénario 2. En effet, ce dernier est moins exigeant en termes d'investissement initial. Il est un peu plus de deux fois moins coûteux que le premier. Ce choix permettrait de "tâter le terrain", de capitaliser sur l'expérience acquise, et d'envisager par la suite une extension progressive à plus grande échelle. L'objectif initial du COMESA était de pouvoir alimenter toutes ces charges au solaire. Cela offrirait aussi une meilleure maîtrise des paramètres techniques et économiques du projet. Cependant, le client a opté pour le scénario 1 modifié, qui prévoit la prise en charge des zones prioritaires (A, B et C) par le COMESA, tandis que l'entreprise assurera l'électrification de l'ensemble des autres zones.

Par ailleurs, il paraît essentiel d'intégrer des mesures d'efficacité énergétique afin de réduire la consommation du bâtiment, qui permettrait d'optimiser la taille du système photovoltaïque et d'en réduire le coût. À ce titre, plusieurs actions simples mais efficaces peuvent être mises en œuvre. Elles s'appuient sur des constats effectués lors des visites sur sites. Il s'agit notamment de :

- Action de sensibilisation du personnel sur certaines mesures d'efficacité énergétique. Il s'agit notamment de mesures simples telles que :
 - ❖ maintenir les portes et fenêtres fermées pour limiter les échanges thermiques lorsque la climatisation est en marche ;
 - ❖ éteindre les climatiseurs et les lampes lorsqu'il n'y a plus personne dans un bureau.
- Remplacer les lampes fluorescentes de 36 W et 18 W par des lampes LED de 6/10 W, qui consomment jusqu'à 80 % d'énergie en moins pour une luminosité équivalente ;
- Réduire le nombre de lampes par bureau ou espace ;
- Utiliser les bouteilles de gaz butane au lieu des plaques de cuisson pour le restaurant.

CONCLUSION

Ce travail a permis de réaliser un dimensionnement préliminaire d'un système solaire photovoltaïque autonome pour le siège du COMESA en Zambie. Il pourra ainsi permettre de couvrir les **372 kW** nécessaires à son fonctionnement. L'objectif visé par ce projet est de répondre aux défis énergétiques auxquelles la Zambie fait face en proposant une solution innovante pour le financement de projet d'électrification. Ce projet sert de modèle pilote, et son succès assurera la poursuite de son application aux services publics et institutions.

La première partie du rapport présente le contexte du projet, ainsi que le contexte énergétique de la Zambie, un pays largement dépendant de l'hydroélectricité et confronté à des épisodes sécheresses. Cette situation met en évidence la nécessité urgente de diversifier les sources d'énergie, notamment par l'intégration de solutions solaires, afin de renforcer la résilience énergétique du pays.

La deuxième partie du rapport détaille les résultats du dimensionnement technique du système photovoltaïque, en étudiant trois scénarii différents. Le premier scénario prend en compte l'ensemble des charges énergétiques du COMESA, le deuxième se concentre sur les zones prioritaires, et le troisième est similaire au premier mais en excluant les charges liées à la climatisation. Les résultats montrent pour ces trois scénarios, la taille du système ainsi que de ses composants essentiels, y compris la surface nécessaire pour l'installation des modules et des batteries. Il faudra, **504,1 kWc et 53.800 Ah** pour le scénario 1, **192 kWc et 20400 Ah** pour le scénario 2 et **241 kWc et 26.400 Ah** pour le dernier scénario. Les résultats ont aussi permis d'estimer les coûts d'investissement pour chaque scénario. En dollars des Etats-Unis les coûts s'élèvent, pour les modules de 425 Wc, pour les scénarii 1, 2 et 3 à 581,350 USD, 228,194 USD et 344,689 USD respectivement. Concernant les modules de 750 Wc, cela correspond à 581,405 USD, 228,174 USD et 344,689 USD, respectivement.

La troisième partie du rapport a abordé les aspects économiques du modèle choisi, *Energy as a Service*. Ce modèle permet au COMESA d'obtenir un système énergétique autonome sans avoir à réunir les fonds nécessaires à l'investissement initial, avec les taux d'intérêt pour les emprunts bancaires pouvant aller jusqu'à 30%. Ce modèle économique ouvre la voie à des projets similaires dans le pays.

Le scénario 2 apparaît après étude comme l'option la plus pertinente pour initier le projet, en raison de son coût réduit et de la possibilité d'extension. Des mesures d'efficacité énergétique simples mais impactantes permettraient d'optimiser la taille du système photovoltaïque afin d'assurer une meilleure maîtrise des paramètres techniques et économiques.

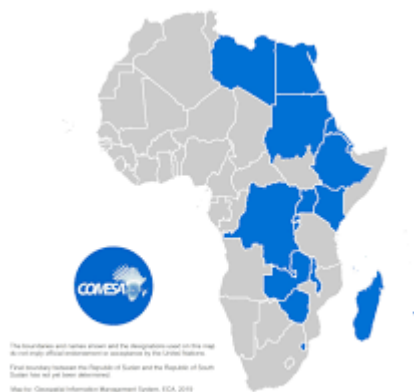
En somme, le modèle *Energy as a Service* constitue une solution viable et innovante pour l'électrification de zones ayant un accès limité à l'énergie ou nécessitant une fourniture d'électricité continue. Ce projet démontre qu'il est possible briser la barrière financière pour la promotion des énergies durables et viable à travers le continent. Bien qu'intéressant, ce modèle ne supprime pas entièrement la problématique du financement des énergies renouvelables. Il devient alors essentiel, pour le développement de ce modèle, de réfléchir aux moyens de garantir aux entreprises qui pourraient être intéressées des financements à des taux d'intérêt raisonnables. Des approches telles que le financement participatif, à l'image de l'initiative SolarPipo, ou encore les systèmes de garanties bancaires, constituent des pistes intéressantes à explorer.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « History ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.worldbank.org/en/archive/history>
- [2] « Who We Are ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.worldbank.org/ext/en/who-we-are>
- [3] « World Bank | Definition, History, Organization, & Facts | Britannica ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.britannica.com/topic/World-Bank>
- [4] R. Muyovwe, « 2024 ANNUAL STATISTICAL BULLETIN ».
- [5] « Solargis_Solar_Resource_Atlas_Zambia_128-09-2019_WBG-ESMAP-1.pdf ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.moe.gov.zm/wp-content/uploads/2022/06/Solargis_Solar_Resource_Atlas_Zambia_128-09-2019_WBG-ESMAP-1.pdf
- [6] « National-Energy-Access-Survey-NEAS.pdf ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.moe.gov.zm/wp-content/uploads/2024/12/National-Energy-Access-Survey-NEAS.pdf>
- [7] « M300-AES-Compact-Zambia.pdf ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/54ece4387e7fd4bde8f1b29f55aa579d-0010012025/original/M300-AES-Compact-Zambia.pdf>
- [8] « Common Market for Eastern and Southern Africa (COMESA) ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.comesa.int/>
- [9] K. Hofer, D. Limaye, et J. Singh, *Fostering the Development of ESCO Markets for Energy Efficiency*. World Bank, Washington, DC, 2016. doi: 10.1596/23949.
- [10] « giz2024-en-WE4F-east-africa-ESCO-model-report.pdf ». Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.giz.de/en/downloads/giz2024-en-WE4F-east-africa-ESCO-model-report.pdf>
- [11] « Solar Buyende Cooperative », Goparity. Consulté le: 24 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://goparity.com/project/solar-buyende-cooperative-158>

ANNEXES

Annexe 1 : Cartes de l'Afrique montrant les pays membre du COMESA



Annexe 2 : Exemple de calcul de la charge électrique d'un bureau

Devices	Number of Units	Power Rating (W)	Total power	Load Factor	Diversity Factor	Demand (W)	time	Energy (Wh)
	Statistics Unit							
Air conditioning	8	1095	8760	0.8	0.8	5606.4	6	33638.4
AC 2	0	3540	0	0.8	0.8	0	0	0
Laptops	10	65	650	0.8	0.6	312	6	1872
Desktop Computers	6	300	1800	0.8	0.6	864	6	5184
Indoor lighting	95	36	3420	1	0.6	2052	6	12312
Security lights or lights (2)	7	18	126	1	1	126	10	1260
Video Projectors	1	273	273	0.8	0.4	87.36	4	349.44
Speaker	1	92	92	0.8	0.4	29.44	4	117.76
big printer	2	1500	3000	0.8	0.3	720	1	720
small Printers	1	720	720	0.8	0.3	172.8	1	172.8
Fridges	1	200	200	0.8	0.8	128	8	1024
Water dispenser	2	500	1000	0.8	0.8	640	8	5120
Kettle	1	2000	2000	0.8	0.6	960	1	960
Microwaves	1	1100	1100	0.8	0.6	528	1	528
Heaters	4	1500	6000	0.8	0.1	480	3	1440
Scanner	0	1600	0	0.8	0.3	0	1	0
Shredder	0	920	0	0.8	0.4	0	0.5	0
Projector lights	0	240	0	0.8	0.1	0	0.5	0
Blower (toilette)	0	1500	0	0.8	0.2	0	1	0
total						12706		64698.4

Annexe 3 : Données consommation énergétique (facture d'électricité) (2017-2024)

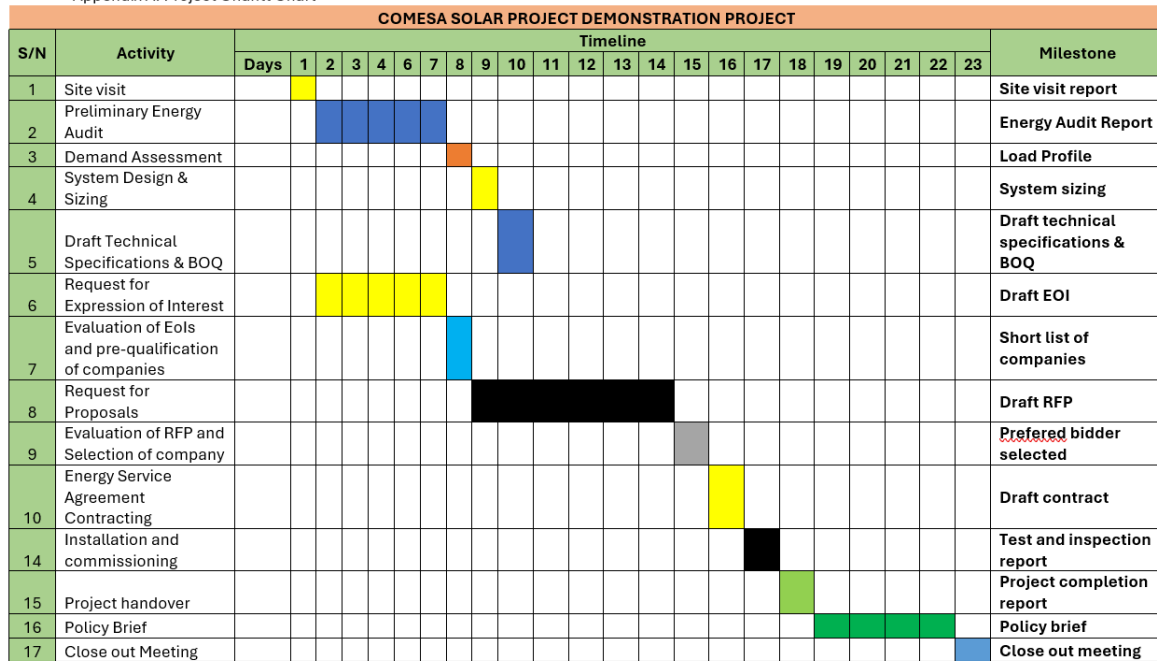
Mois	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Moyenne
January	19622	75899	77755	83008	58572	59925	52441	65357.33	61572.4163
February	-	66256	78805	76892	57284	58569	61270	78527	68229
March	70834	-	91990	82411	62793	67325	69665	74304	74188.8571
April	71639	83819	83023	71472	60686	59741	63534	78527	71555.125
May	67092	71227	77279	69479	60016	60298	68449	61080	66865
June	73686	71403	77397	64929	54791	67103	66634	65050	67624.125
July	73949	73579	79841	63985	51597	66315	73130	64988	68423
August	74965	68509	77612	60546	54063	64489	71581	59537	66412.75
September	75978	73951	82186	-	62684	68771	74472	-	73007
October	94136	81038	110744	-	69015	75513	86718	-	86194
November	82239	95730	107145	77518	75641	82961	83099	-	86333.2857
December	71269	80459	82932	62396	71183	65458	65790	-	71355.2857

Annexe 4 : Moyennes de consommation énergétique, d'irradiation et de production solaire

Average monthly energy consumption (kWh)	Solar irradiation_GTI (kWh/m ² /day)	Monthly AC production (kwh)
61572.4163	4.72	70757.8885
68229	4.95	64979.0141
74188.8571	5.33	73305.5241
71555.125	5.82	79450.1391
66865	6.17	89056.4695
67624.125	5.88	84437.906
68423	6	86857.6814
66412.75	6.58	85725.4029
73007	6.86	79658.86
86194	6.53	79527.44
86333.2857	5.57	69534.3058
71355.2857	4.91	66506.506
	5.78	

Annexe 5 : Planning et étapes du projet

Appendix A: Project Gantt Chart



Annexe 6 : Résultats calculs Scenario 1

	ZONE A	ZONE B	ZONE C	SERVERS	ZONE D	ZONE E	ZONE F	ZONE G	ZONE H	PUMPING
Energy needed (kWh)	160.77	171.99	84.58	237.12	160.95	216.47	527.15	55.03	98.52	6.55
Pc_min (kWc)	47.14	50.43	24.80	69.53	47.20	63.48	154.58	16.14	28.89	1.92
Cbat_min (Ah)	4925.52	5269.29	2591.36	7264.71	4930.95	6631.97	16150.38	1686.00	3018.42	200.64
Npanels (425 Wc)	110.93	118.67	58.36	163.61	111.05	149.36	363.72	37.97	67.98	4.52
Aera needed (m2)	212.26	227.08	111.67	313.07	212.49	285.80	695.99	72.66	130.08	8.65
Npanels (750 Wc)	62.86	67.25	33.07	92.71	62.93	84.64	206.11	21.52	38.52	2.56
Aarea needed (m2)	189.27	202.47	99.57	279.15	189.47	254.84	620.59	64.79	115.98	7.71
Batteries										
Nbats	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Nbatp	25	27	13	37	25	34	81	9	16	2
Nbat_tot	50	54	26	74	50	68	162	18	32	4
Cbat (Ah)	5000	5400	2600	7400	5000	6800	16200	1800	3200	400
Surface bat (m2)	5.88	6.35	3.06	8.70	5.88	7.99	19.04	2.12	3.76	0.47
Charge Controller										
Power needed (kW)	47.14	50.43	24.80	69.53	47.20	63.48	154.58	16.14	28.89	1.92
Power_arrow (kW)	56.57	60.52	29.76	83.44	56.63	76.17	185.50	19.36	34.67	2.30
Inverter										
Tot_charges Power (kW)	52.80	40.37	17.80	27.59	34.01	46.49	109.55	12.67	12.67	4.37
S_invert (kVA)	112.61	86.11	37.97	58.84	72.54	99.14	233.65	27.01	27.01	9.31
Performance Ratio										
Ddq	0.79	0.78	0.80	0.79	0.79	0.78	0.80	0.75	0.75	0.40
Ddqmax/Jr	0.8									
R_425	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
R_750	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Annexe 7: Résultats calculs Scenario 3

	ZONE A	ZONE B	ZONE C	SERVERS	ZONE D	ZONE E	ZONE F	ZONE G	ZONE H	PUMPING
Energy needed (kWh)	76.87	58.36	31.42	237.12	47.45	66.64	215.72	20.63	59.94	6.55
Pc_min (kWc)	22.54	17.11	9.21	69.53	13.91	19.54	63.26	6.05	17.58	1.92
Cbat_min (Ah)	2355.19	1788.09	962.76	7264.71	1453.70	2041.79	6609.17	632.06	1836.53	200.64
Npanels (425 Wc)	53.04	40.27	21.68	163.61	32.74	45.98	148.84	14.23	41.36	4.52
Aera needed (m2)	101.49	77.06	41.49	313.07	62.65	87.99	284.82	27.24	79.14	8.65
Npanels (750 Wc)	30.06	22.82	12.29	92.71	18.55	26.06	84.34	8.07	23.44	2.56
Aarea needed (m2)	90.50	68.71	36.99	279.15	55.86	78.46	253.96	24.29	70.57	7.71
Batteries										
Nbats	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Nbatp	12	9	5	37	8	11	34	4	10	2
Nbat_tot	24	18	10	74	16	22	68	8	20	4
Cbat (Ah)	2400	1800	1000	7400	1600	2200	6800	800	2000	400
Surface bat (m2)	2.82	2.12	1.18	8.70	1.88	2.59	7.99	0.94	2.35	0.47
Charge Controller										
Power needed (kW)	22.54	17.11	9.21	69.53	13.91	19.54	63.26	6.05	17.58	1.92
Power_arrow_ (kW)	27.05	20.54	11.06	83.44	16.70	23.45	75.91	7.26	21.09	2.30
Inverter										
Tot_charges_power (kW)	16.08	19.41	8.09	27.59	12.86	19.74	53.91	6.35	15.34	4.37
S_invert (kVA)	34.29	41.40	17.25	58.84	27.43	42.11	114.98	13.54	32.71	9.31
Performance Ratio										
Ddq	0.79	0.79	0.77	0.79	0.73	0.74	0.78	0.63	0.73	0.40
Ddqmax/Jr	0.8									
R_425	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
R_750	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Annexe 8 : Résultats calcul estimatif des coûts Scénario 1 pour 425 Wc et 750 Wc

• *Pour 425 Wc*

ITEMS	REFERENCE	QUANTITY	UNIT	UNIT PRICE ZMW	TOTAL AMOUNT ZMW	TOTAL AMOUNT USD
PV MODULES						
PV 425 Wp Solar modules		1187.00	pcs	2381	2826800	100957
Batteries						
Batteries		538.00	pcs	17000	9146000	326643
Inverters						
Hybrid charge controller 150 kW		2.00	pcs	615000	1230000	43929
Hybrid charge controller 300 Kw		1.00	pcs	1230000	1230000	43929
Hybrid charge controller 100 Kw		3.00	pcs	410000	1230000	43929
Hybrid charge controller 50 Kw		2.00	pcs	205000	410000	14643
Hybrid charge controller 30 Kw		1.00	pcs	123000	123000	4393
Hybrid charge controller 20 Kw		1.00	pcs	82000	82000	2929
TOTAL ZMW		16277800				581350

• *Pour 750 Wc*

cc	REFERENCE	QUANTITY	UNIT	UNIT PRICE ZMW	TOTAL AMOUNT ZMW	TOTAL AMOUNT USD
PV MODULES						
PV 750 Wp Solar modules		673.00	pcs	4203	2828341	101012
Batteries						
Batteries		538.00	pcs	17000	9146000	326643
Inverters						
Hybrid charge controller 150 kW		2.00	pcs	615000	1230000	43929
Hybrid charge controller 300 Kw		1.00	pcs	1230000	1230000	43929
Hybrid charge controller 100 Kw		3.00	pcs	410000	1230000	43929
Hybrid charge controller 50 Kw		2.00	pcs	205000	410000	14643
Hybrid charge controller 30 Kw		1.00	pcs	123000	123000	4393
Hybrid charge controller 20 Kw		1.00	pcs	82000	82000	2929
TOTAL ZMW		16279341				581405

Annexe 9 : Bâtiments du COMESA

Les image 1, 2 et 3 montrent différentes façades de certains bâtiments du COMESA (A, G et F respectueusement).



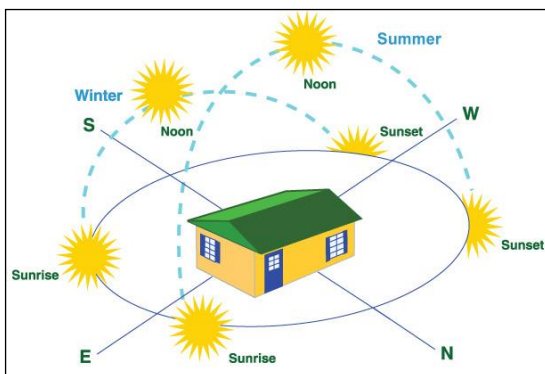
Image 1

Image 2



Image 3

Annexe 10 : Mouvements du soleil au cours de l'année



Annexe 11: Angles optimum d'inclinaison des modules PV ZAMBIE

