



Nouvelle approche de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 17-07-2024 par

Mwarèbère Désiré Pascal PODA (20200890)

**Directeur de mémoire : Dr. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de conférences
CAMES, Enseignant-Chercheur en Génie Electrique et
Energétique à l'institut 2iE**

Co-Directeur de mémoire : Pr. Yao AZOUMAH, DG de KYA-Energy Group

**Maîtres de stage : Fhad TCHANGBEDJI, Chef service électronique à KYA-Energy
Group
Jean-Claude MESSAN, Chef service logiciel et informatique à KYA-
Energy Group**

Structure d'accueil du stage : KYA-Energy Group

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. K. Edem N'TSOUKPOE**

Membres et correcteurs : **Dr. Y. Moussa SORO
Dr. Moussa KADRI**

Promotion [2023/2024]

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A Dieu le père, pour son assistance durant ce parcours.

À mes très chers parents Simplicie PODA & Lucie MEDA, mes sœurs Emma, Léti et Reines, et mes aimables neveux et nièces Liam, Adila, Geoffroy, Noah et Anissa pour leur amour sans condition, leurs encouragements constants et les moments de joie partagés qui ont été mon refuge durant ce voyage académique. Votre soutien a été un pilier sur lequel j'ai pu m'appuyer à chaque étape de ce parcours. Je vous dédie ce travail en signe de ma profonde gratitude et de mon affection éternelle.

A toute la famille NÈBKPAR, pour votre soutien inébranlable et la solidarité qui nous unit. Ce travail est le fruit de notre solidarité et de l'amour que nous partageons.

A mon ami Emmanuel KOKOU et à sa famille pour leur amitié sincère, leur accueil chaleureux et leur soutien tout au long de mon séjour au Togo. Votre hospitalité et votre présence à mes côtés ont été des sources d'inspiration inestimables.

A feu Florent SOME, comme un second père pour moi, ton départ a laissé un vide immense, mais ta présence et tes enseignements continuent de vivre en moi, que ton âme repose en paix et que le seigneur te compte parmi les bénéficiaires du paradis.

À Edgard MEDA, pour son accompagnement indéfectible et son soutien sans faille à chaque étape de mon parcours.

A tous mes amis, mes camarades et mes beaux-frères, pour chaque moment de rire, chaque mot de réconfort, et chaque conseil partagé. Votre amitié a été le phare dans les moments de doute et la célébration dans les instants de joie.

CITATION

**« Quand on veut vraiment quelque chose, tout
l'Univers conspire à réaliser notre souhait »**

Paolo Coelho

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à :

- ❖ L'ensemble du personnel pédagogique et administratif de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), sous la direction éclairée du Professeur El Hadji Bamba DIAW. Votre encadrement et votre formation durant ces trois dernières années ont été fondamentaux dans mon développement académique et professionnel.
- ❖ Dr. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, mon directeur de mémoire, pour sa présence constante, son soutien indéfectible et ses précieuses recommandations. Votre guidance a été un pilier dans l'achèvement de ce travail de recherche.
- ❖ Professeur Yao AZOUMAH, mon co-directeur de mémoire, pour ses analyses critiques et son engagement à veiller à la qualité de mon travail. Votre expertise a grandement enrichi ma réflexion et ma démarche scientifique.
- ❖ Mes maîtres de stage, Fhad TCHANGBEDJI et Jean-Claude MESSAN, pour leur accompagnement exemplaire et leur guidance tout au long de mon parcours au sein de l'équipe. Travailler à vos côtés a été à la fois un honneur et un immense plaisir. Je vous suis particulièrement reconnaissant pour votre disponibilité, vos explications éclairées, et la confiance que vous avez placée en moi.
- ❖ L'ensemble du personnel de KYA-Energy Group dirigé par Professeur Yao AZOUMAH, pour leur accueil chaleureux et pour m'avoir fourni un environnement de stage propice à l'apprentissage et à l'application pratique de mes connaissances
- ❖ À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Votre aide, bien que non mentionnée spécifiquement ici, n'en reste pas moins essentielle et très appréciée.

RESUME

Ce mémoire présente une nouvelle approche pour le dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel, essentiel pour fournir une énergie fiable et durable. Cette approche vise à améliorer l'adoption à grande échelle de ces systèmes en maximisant leur fiabilité technique et leur accessibilité économique.

La méthodologie repose sur une étude d'optimisation technico-économique de ces systèmes. En utilisant des techniques de simulation avancées et des algorithmes d'optimisation robustes, cette approche permet de déterminer avec précision, pour tout besoin énergétique dans n'importe quelle localité, les caractéristiques des composants des systèmes énergétiques hybrides et leur configuration qui offre un faible taux de délestage et un coût minimal de l'énergie. Les paramètres d'optimisation considérés sont :

- Le facteur de qualité de la demande énergétique,
- Le coût actualisé de l'énergie,
- La configuration,
- Le taux de pénétration solaire du système hybride,
- Les facteurs de sécurité du stockage.

Les résultats de simulation obtenus sur des cas spécifiques montrent une sélection rigoureuse pour parvenir au meilleur résultat. La comparaison avec le logiciel HOMER Pro montre que cette approche propose des systèmes hybrides non seulement fiables techniquement, mais également plus accessibles économiquement. Par exemple, dans un des scénarios de dimensionnement d'un système hybride, la nouvelle approche permet de réduire jusqu'à 44% du coût actualisé de l'énergie par rapport aux solutions générées par HOMER Pro.

Ce travail contribue de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine des systèmes hybrides PV/Diesel. Il propose une solution innovante et pratique pour la conception de systèmes énergétiques durables, adaptés à tout type de profil de consommation électrique et à toute localité. Cette recherche offre une perspective prometteuse pour l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides, favorisant ainsi une transition énergétique plus verte et efficace.

Mots Clés :

-
- 1 – Système hybride PV/Diesel
 - 2 – Facteur de qualité de la demande énergétique
 - 3 – Taux de pénétration solaire

4 – Fiabilité technique

5 – Accessibilité économique

ABSTRACT

This thesis presents a new approach for the optimal sizing of hybrid PV/Diesel systems, essential for providing reliable and sustainable energy. This approach aims to enhance the large-scale adoption of these systems by maximizing their technical reliability and economic accessibility.

The methodology is based on a techno-economic optimization study of these systems. By using advanced simulation techniques and robust optimization algorithms, this approach allows for precise determination, for any energy need in any locality, of the component features of hybrid energy systems and their configuration that offers a low rate of load shedding and minimal energy cost. The optimization parameters considered are :

- The quality factor of energy demand,
- The levelized cost of energy,
- The configuration,
- The solar penetration rate of the hybrid system,
- The safety factors of storage.

The simulation results obtained on specific cases show a rigorous selection to achieve the best result. The comparison with HOMER Pro software shows that this approach offers hybrid systems that are not only technically reliable but also more economically accessible. For example, in a hybrid system sizing scenario, our approach allows to reduce up to 44% in the Levelized Cost of Energy compared to the solutions generated by HOMER Pro.

This work significantly contributes to the advancement of knowledge in the field of hybrid PV/Diesel systems. It proposes an innovative and practical solution for the design of sustainable energy systems, suitable for any type of electrical consumption profile and any locality. This research offers a promising perspective for the optimization of hybrid energy systems, thus promoting a greener and more efficient energy transition.

Key words :

1 – PV/Diesel Hybrid System

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

2 – Quality factor of energy demand

3 – Solar penetration rate

4 – Technical reliability

5 – Economic accessibility

LISTE DES ABREVIATIONS

Nomenclature

- α_h : taux de pénétration solaire ;
 α_a : facteur de sécurité du stockage de gestion ;
 α_n : facteur de sécurité du stockage de production ;
 ε_t : l'état du générateur Diesel à l'instant t (marche/arrêt) ;
 γ_{en} : facteur de qualité de la demande énergétique ;
 γ_{prod} : rendement de la production du système solaire photovoltaïque ;
 η_s : rendement de la batterie ;
 η_c : rendement de l'onduleur ;
 η_{red} : rendement du redresseur ;
 δ : taux de charge du générateur Diesel ;
 a : le taux d'actualisation ;
 a' : le taux d'actualisation ajusté pour les coûts périodiques ;
 a_j et b_j : constantes en lien avec le coût d'acquisition du composant ;
 c_f : paramètre de configuration du système hybride ;
 c_0 : coût du litre du Diesel ;
 C_I : le coût d'investissement des composants du système ;
 C_O : le coût d'opération des composants du système ;
 C_M : le coût de maintenance des composants du système ;
 C_R : le coût de remplacement des composants du système ;
 C_D : le coût de démantèlement des composants du système ;
 V_R : la valeur résiduelle des composants du système ;
 d : la durée de vie du projet ;
 D_j : durée de vie du composant ;
DOD : profondeur de décharge ;
 E_a : Besoins énergétiques diurnes (kWh) ;
 E_n : Besoins énergétiques nocturnes (kWh) ;
 E_T : Besoin énergétique journalier total (kWh) ;
 E_{xT} : le productible du champ PV ;
 f_{GD} : consommation horaire en carburant du générateur Diesel ;
 f_0 et f_1 : paramètres de consommation des générateurs Diesel ;

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

i : taux d'inflation ;

I_r : Irradiation ;

LCC : le coût total du système sur la durée de vie du projet ;

$LCOE$: le coût actualisé de l'électricité ;

Load profile : profil de charge de la demande énergétique ;

LPS : Besoin énergétique non satisfait ;

$LPSP_{max}$: Probabilité de délestage admissible

m_{GD} et n_{GD} : constantes liées à la maintenance du générateur Diesel ;

m_{PV} : constante liée à la maintenance du système PV ;

N_j : nombre de composant ;

P_j : puissance du composant ou sa capacité ;

PR : ratio de performance ;

P_{load} : puissance requise par les charges ;

PWD_f : facteur d'actualisation des valeurs résiduelles ;

S_a : capacité du stockage de gestion ;

S_n : capacité du stockage de production ;

S_t : capacité du parc de batterie ;

SOC : état de charge du stockage ;

SOC_{min} : état de charge minimal du stockage ;

SOC_{max} : état de charge maximal du stockage ;

RETCCB : énergie nécessaire pour charger complètement la batterie ;

REASL : énergie restante après l'alimentation des charges ;

T : nombre d'heure dans l'année ;

US_f : le facteur d'actualisation ;

UCR_f : facteur d'annualisation ;

SOMMAIRE

Dédicaces	ii
Citation	iii
Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Liste des abréviations	viii
Sommaire	x
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xiii
<i>I. Introduction</i>	1
1. Contexte et problématique de l'étude	1
2. Objectifs de l'étude	2
3. Présentation de la structure d'accueil	3
<i>II. Etat de l'art sur les système hybrides</i>	5
1. Définition et classification des systèmes hybrides	5
2. Etude sur les configurations des systèmes hybrides	6
<i>III. Etat de l'art sur les méthodes et outils de dimensionnement existantes des systèmes hybrides</i>	12
1. Les méthodes traditionnelles	12
2. Les outils logiciels	15
<i>IV. Présentation de la nouvelle approche de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel</i>	20
1. Description de la nouvelle approche de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel	20
2. Présentation des paramètres spécifiques de la méthode	21
3. Modélisation de l'approche	23

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

V.	<i>Simulation et résultats</i>	29
1.	Présentation des outils et paramètres utilisés pour la simulation	29
2.	Présentation des résultats obtenus	33
VI.	<i>Étude comparative des résultats obtenus avec HOMER Pro</i>	39
1.	Présentation des résultats	39
2.	Identification des tendances significatives	42
VII.	<i>Analyse et Discussion des résultats</i>	48
1.	Interprétation des résultats de la simulation et des comparaisons	48
2.	Implication des résultats pour la conception et l'optimisation des systèmes hybrides PV/Diesel	49
VIII.	<i>Conclusion et perspectives</i>	51
IX.	<i>Recommandations</i>	52
X.	<i>Bibliographie</i>	53
XI.	<i>Annexes</i>	55
	Annexe I : Algorithmes utilisé pour le calcul du LPSP des différentes configurations	56
	Annexe II : Profil de la ressource solaire dans les différentes localités	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Avantages et inconvénients des différentes configurations de systèmes hybrides PV/Diesel	10
Tableau III : Avantages et limites des méthodes traditionnelles.....	13
Tableau III : Caractéristiques de quelques outils logiciel de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel.....	16
Tableau IV : Avantages et limites des outils logiciels de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel.....	18
Tableau V : Formulation du LPS pour chaque configuration	26
Tableau VI : Expression des différents coûts pour tout composant du système	27
Tableau VII : Identité des différentes localités sélectionnées	31
Tableau VIII : Paramètres technico-économiques	32
Tableau IX : Résultats de la simulation de la nouvelle approche	34
Tableau X : Comparaison des résultats obtenus avec la nouvelle approche et ceux obtenus avec Homer Pro	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de KYA-Energy Group.....	4
Figure 2 : Architecture de la configuration série d'un système hybride PV/Diesel, [12]......	8
Figure 3 : Architecture de la configuration parallèle d'un système hybride PV/Diesel, [12]....	9
Figure 4 : Architecture de la configuration commutée d'un système hybride PV/Diesel, [12].	9
Figure 5 : Architecture de la configuration Flexy Energy d'un système hybride PV/Diesel, [12].	10
Figure 6 : Logigramme de la nouvelle approche.....	21
Figure 7 : Détermination du facteur de qualité de la demande énergétique pour trois zones différentes, [19].	22
Figure 8 : Profils de charge utilisés pour la simulation de la méthode	30
Figure 9 : Localités sélectionnées pour la simulation de la méthode.....	31
Figure 10 : Evolution du facteur de qualité, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	36
Figure 11 : Evolution du LCOE, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	37
Figure 12 : Variation du LPSP, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	38
Figure 13 : Comparaison des LCOE, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	44
Figure 14 : Comparaison de la production annuelle, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	45
Figure 15 : Comparaison des générateur Diesel, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	46
Figure 16 : Comparaison des puissances crêtes, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI	46
Figure 17 : Comparaison du stockage, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI ..	47

I. INTRODUCTION

1. Contexte et problématique de l'étude

L'énergie est un pilier essentiel du développement humain et économique. Elle est au cœur de notre vie quotidienne, de nos industries, de nos systèmes de santé et d'éducation. Cependant, l'accès à une énergie fiable et durable reste un défi majeur dans de nombreuses régions du monde. D'où l'importance de l'Objectif de Développement Durable 7 (ODD 7), qui vise à garantir l'accès universel à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable.

Au cours de la dernière décennie, plus d'un milliard de personnes ont bénéficié de ces avancées, améliorant leurs conditions de vie et stimulant le progrès économique et social à l'échelle mondiale [1]. Cependant, l'accès à l'électricité demeure un problème critique à l'échelle mondiale, touchant environ 770 millions de personnes dans le monde, dont 77 % vivent en Afrique subsaharienne [2].

En 2021, le taux d'accès à l'électricité dans cette région était de 50,6% selon les données de l'Agence Internationale des Energies (AIE) [3]. Cette faible accessibilité à l'électricité contribue à des disparités significatives en termes de consommation énergétique par habitant. En effet, la consommation annuelle moyenne d'électricité par personne en Afrique subsaharienne, à l'exception de l'Afrique du Sud, est seulement de 180 kWh, alors qu'elle atteint 13 000 kWh aux États-Unis et 6 500 kWh en Europe [4]. Ces contrastes frappants mettent en lumière non seulement les défis en termes d'accès à l'électricité mais aussi les vastes écarts de consommation énergétique, soulignant ainsi la nécessité d'aborder ces enjeux de manière globale pour parvenir à une équité énergétique.

Toutefois, l'immense potentiel solaire de l'Afrique, caractérisé par un ensoleillement annuel moyen supérieur à 1900 kWh/m² sur 74% du continent, offre une perspective encourageante pour surmonter les défis d'accès à l'électricité qui entravent son développement socio-économique. Cette ressource naturelle encore sous-utilisée est essentielle pour résoudre les problèmes énergétiques du continent [5]. Dans ce contexte, privilégier les énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque, apparaît comme une démarche adaptée et stratégique face aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels. Cependant, il est important de reconnaître que le solaire photovoltaïque présente certaines limites, telles que son intermittence. Pour pallier à ces limitations, l'adoption de Systèmes d'Énergie Hybrides (SEH), combinant énergies renouvelables et générateurs Diesel, se révèle être une solution efficace

pour électrifier les zones rurales non desservies.

Le principal défi dans la mise en œuvre des systèmes hybrides PV/Diesel réside dans le dimensionnement adéquat, qui doit efficacement résoudre le problème de l'intermittence solaire pour assurer une production d'énergie fiable et rentable. Malgré les méthodes et outils existants, l'accessibilité économique de ces systèmes reste difficile à obtenir et demeure une préoccupation pertinente de tous les acteurs.

Face à cette situation, une question centrale émerge : **Quelle approche innovante pourrait améliorer l'accessibilité économique des systèmes hybrides PV/Diesel tout en garantissant leur fiabilité technique ?**

Cette problématique souligne la nécessité d'innover à travers des méthodes techniques et économiques avancées pour le dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel.

Dans cette perspective, l'entreprise KYA-Energy Group souhaite proposer des solutions pour améliorer l'accessibilité économique des systèmes hybrides solaires PV/Diesel tout en garantissant leur fiabilité technique. Cette initiative constitue le cœur de notre étude.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de notre étude est de développer une nouvelle approche de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel. De façon spécifique, il s'agira de :

- Examiner les systèmes hybrides ;
- Concevoir une nouvelle de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel ;
- Evaluer les performances de la nouvelle approche.

Ce mémoire est donc structuré en six principales sections, chacune abordant des aspects clés de la présente étude sur les systèmes hybrides PV/Diesel.

❖ Première section : État de l'art sur les systèmes hybrides

Nous examinerons les différentes typologies et configurations des systèmes hybrides, ainsi que les avantages et les inconvénients des configurations dans le cas des systèmes hybrides PV/Diesel.

❖ Deuxième section : État de l'art sur les méthodes et outils de dimensionnement des systèmes hybrides

D'une part, nous analyserons les méthodes et outils de dimensionnement des systèmes hybrides, et d'autre part, nous identifierons les avantages et les limites des différentes méthodes et outils de dimensionnement.

❖ **Troisième section : Présentation de la nouvelle approche de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel**

Nous décrirons en détail la nouvelle méthode de dimensionnement proposée, tout en expliquant les innovations et les améliorations par rapport aux méthodes existantes.

❖ **Quatrième section : Simulation et résultats de certains cas spécifiques**

Nous mettrons en œuvre la nouvelle approche sur des cas d'étude spécifiques et présenterons ainsi qu'analyserons les résultats des simulations.

❖ **Cinquième section : Étude comparative des résultats obtenus avec HOMER Pro**

Nous comparerons les résultats obtenus avec la nouvelle approche à ceux générés par HOMER Pro, et identifierons les points forts ainsi que les limitations de chaque méthode.

❖ **Sixième section : Analyse et Discussion des résultats**

Nous interpréterons les résultats des simulations et des comparaisons, et discuterons des implications de ces résultats pour la conception et l'optimisation des systèmes hybrides PV/Diesel.

3. Présentation de la structure d'accueil

KYA-Energy Group, fondée en juillet 2015 par le Professeur Yao K. AZOUMAH, est une entreprise togolaise à vocation internationale spécialisée dans les énergies renouvelables (le solaire en particulier), et l'efficacité énergétique. Elle vise à démocratiser l'accès à l'énergie durable. Sa mission est de transformer, de façon innovante, des ressources énergétiques renouvelables pour produire de l'énergie propre, fiable et abordable à tous, tout en respectant ses valeurs que sont : le professionnalisme, la rigueur, l'écoute, l'intégrité, la transparence, l'équité, et l'innovation.

KYA-Energy Group s'organise autour de quatre entités principales : KYA-Energy Industry pour la conception et l'assemblage de produits, KYA-Energy Institute dédié à la formation, KYA-Energy Engineering & Services offrant des services d'ingénierie et d'installation, et KYA-Energy Laboratory, le cœur de la R&D (Recherches et Développement) et de l'innovation technologique.

L'organigramme de KYA-Energy Group présenté ci-dessous illustre une organisation structurée et performante, affirmant sa position de leader dans le secteur des énergies renouvelables.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

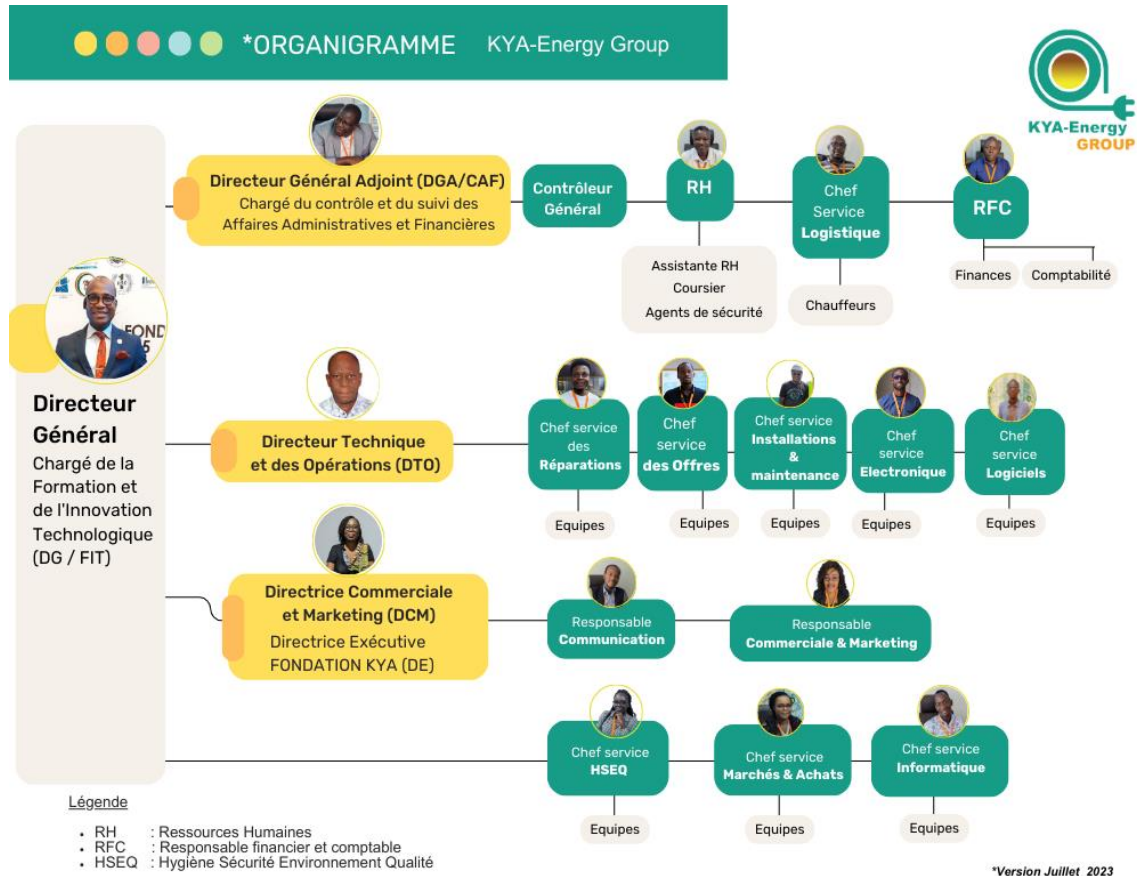


Figure 1 : Organigramme de KYA-Energy Group

II. ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEME HYBRIDES

1. Définition et classification des systèmes hybrides

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables est défini comme un système électrique comprenant plus d'une source d'énergie, dont au moins une est renouvelable [6]. Parmi les systèmes hybrides, les plus répandus sont : le système PV avec batteries et générateur Diesel, le système éolien avec batteries et générateur Diesel, ainsi que le système combinant éolien, PV, batteries et diesel.

Les systèmes hybrides peuvent être classifiés selon différents critères. Les classifications les plus courantes sont basées sur le régime de fonctionnement et la structure du système.

1.1. Classification basée sur le mode opératoire

Les systèmes hybrides peuvent être classés de manière générale en trois catégories selon leur statut de connexion au réseau [7] :

- **Systèmes hybrides connectés au réseau** : Ces systèmes fonctionnent en parallèle avec un réseau électrique public existant. Ils contribuent à satisfaire la demande énergétique globale. Ils sont intégrés au réseau public et peuvent fournir de l'énergie supplémentaire en cas de besoin.
- **Systèmes hybrides autonomes** : Ces systèmes fonctionnent de manière indépendante et sont utilisés dans des zones éloignées du réseau électrique, telles que les refuges de montagne, les villages isolés et bien d'autres milieux défavorables à l'extension du réseau public. Ils doivent répondre aux besoins spécifiques des consommateurs locaux sans dépendre d'une autre source.
- **Systèmes hybrides en micro-réseau** : Ces systèmes se situent entre les systèmes connectés au réseau et les systèmes autonomes. Un micro-réseau est un système énergétique localisé qui peut fonctionner indépendamment ou en conjonction avec le réseau public central. Il intègre souvent plusieurs types de sources d'énergie renouvelable, ainsi que des solutions de stockage d'énergie, et parfois des sources d'énergie conventionnelles. Grâce à leur capacité à fonctionner en tandem avec le réseau ou de manière autonome, les micro-réseaux offrent une résilience accrue en cas de défaillance du réseau principal.

1.2. Classification basée sur la structure du système

La classification basée sur la structure des systèmes hybrides compte essentiellement trois critères [8] :

- **Présence d'une source d'énergie classique** : La présence d'une source conventionnelle, telle qu'un générateur diesel ou une micro turbine à gaz, est un critère de classification. Dans le cas d'un réseau électrique complet, cela pourrait inclure une centrale électrique entière.
- **Présence d'un dispositif de stockage** : L'intégration de dispositifs de stockage, tels que des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène ou des volants d'inertie, permet de satisfaire les besoins en énergie pendant les périodes où les sources primaires renouvelables sont indisponibles.
- **Type de sources d'énergie renouvelables utilisées** : Les systèmes hybrides peuvent inclure des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des convertisseurs d'énergie hydraulique (comme les centrales hydroélectriques ou les systèmes utilisant les vagues), ou une combinaison de ces sources. Le choix des sources dépend du potentiel énergétique disponible à l'endroit de l'installation et des besoins spécifiques des consommateurs.

2. Etude sur les configurations des systèmes hybrides

Les configurations des systèmes hybrides varient en fonction des besoins énergétiques et des ressources disponibles. Trois principaux critères permettent de distinguer les configurations de ces systèmes [8] : le type de bus, le mode de contrôle et le montage électrique des composants. Chaque configuration offre des avantages et des inconvénients spécifiques en fonction des besoins énergétiques et des conditions d'application.

2.1. Configurations selon le type de bus

Les configurations des systèmes hybrides peuvent être classées en fonction du type de bus utilisé pour relier les différents composants du système. Les trois principales configurations sont basées sur les types de bus : courant continu (DC), courant alternatif (AC), et une combinaison des deux (AC/DC).

❖ Configuration à bus DC

Les systèmes hybrides à bus DC centralisent toutes les sources de production sur un bus DC. Les sources de courant alternatif, comme les générateurs Diesel et certaines technologies d'énergie renouvelable, nécessitent des redresseurs pour convertir le courant AC en DC avant de se connecter au bus. Cette configuration permet une gestion centralisée de l'énergie mais peut entraîner d'importantes pertes de conversion.

❖ Configuration à bus AC

Dans les systèmes à bus AC, toutes les sources de production sont connectées à un bus AC. Chaque source peut alimenter la charge indépendamment ou simultanément. Cette configuration est avantageuse pour des charges variables et permet une flexibilité opérationnelle accrue. Cependant, la nécessité de synchroniser les sources peut complexifier le contrôle du système.

❖ **Configuration à bus mixte AC/DC**

Les configurations hybrides AC/DC intègrent des composants AC et DC de part et d'autre d'onduleurs bidirectionnels. Cela permet de connecter des sources AC à un bus DC ou vice versa, bien que cela puisse réduire le rendement global en raison des conversions multiples. Cette configuration est particulièrement utile lorsque les charges AC et DC doivent être alimentées simultanément.

2.2. Configurations selon le mode de contrôle

Suivant le mode de contrôle du système, trois configurations peuvent être envisagées.

❖ **Configuration maître/esclave**

Cette configuration repose sur le contrôle centralisé de la fréquence et de la tension du réseau par une source principale (maître), tandis que les autres sources (esclaves) suivent les paramètres imposés. Ce mode est efficace pour maintenir la stabilité du réseau, particulièrement lorsque plusieurs sources doivent alimenter simultanément une même charge.

❖ **Configuration multi-master**

Dans cette variante, plusieurs sources régulent simultanément la tension et la fréquence du réseau. Cela permet une redondance et une flexibilité accrues, car le système n'est pas dépendant d'une seule source de contrôle.

❖ **Configuration single-master**

Une seule source contrôle la tension et la fréquence, simplifiant ainsi la gestion mais réduisant la redondance. Cette configuration est plus adaptée aux systèmes où une source fiable et dominante est disponible

2.3. Configurations selon le montage électrique des composants

La littérature identifie trois configurations selon le mode de connexion des composants des systèmes hybrides en général qui sont les configurations série, parallèle et commutée. Cependant une configuration additionnelle est prise en compte pour les systèmes hybrides PV/Diesel : la configuration Flexy Energy [9], [10], [11], [12].

❖ **Configuration série**

Dans une configuration série, toute l'énergie produite par les sources est d'abord dirigée vers un

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

bus DC avant d'être convertie en courant alternatif (AC) pour alimenter les charges. Cette méthode centralisée offre un contrôle précis de l'alimentation, mais elle dépend fortement de la capacité de stockage et de la gestion efficace des cycles de charge et décharge des batteries.

Prenons l'exemple des systèmes hybrides PV/Diesel : l'unité de production principale, souvent composée de modules photovoltaïques, fournit initialement l'électricité. L'énergie produite est acheminée vers les charges électriques via un onduleur, tandis que le surplus est utilisé pour recharger les batteries. En complément, lorsqu'une augmentation de la demande est détectée ou en cas de faible production solaire, le générateur Diesel est activé. Ce dernier peut transmettre son énergie soit directement aux charges électriques, après un processus de conversion via un redresseur puis un onduleur, soit simultanément aux charges et aux batteries. Cette architecture, assurant une alimentation continue et fiable, est illustrée par la figure correspondante.

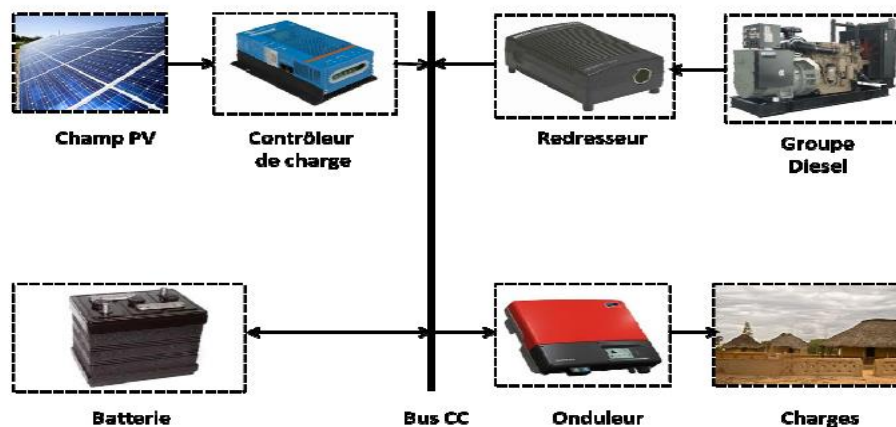


Figure 2 : Architecture de la configuration série d'un système hybride PV/Diesel, [12].

❖ Configuration parallèle

Cette configuration permet à toutes les sources de production de fonctionner simultanément pour alimenter la charge. Cette configuration offre une grande flexibilité et une résilience, permettant d'éteindre certaines unités en cas de faible demande sans compromettre l'alimentation globale.

Dans le cadre des systèmes hybrides PV/Diesel, les modules photovoltaïques et le générateur Diesel peuvent produire de l'énergie simultanément pour alimenter la charge, augmentant ainsi la flexibilité et la capacité de production d'électricité. Cette configuration présente aussi la possibilité de recharger les batteries à travers un onduleur bidirectionnel comme l'illustre la figure 3.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

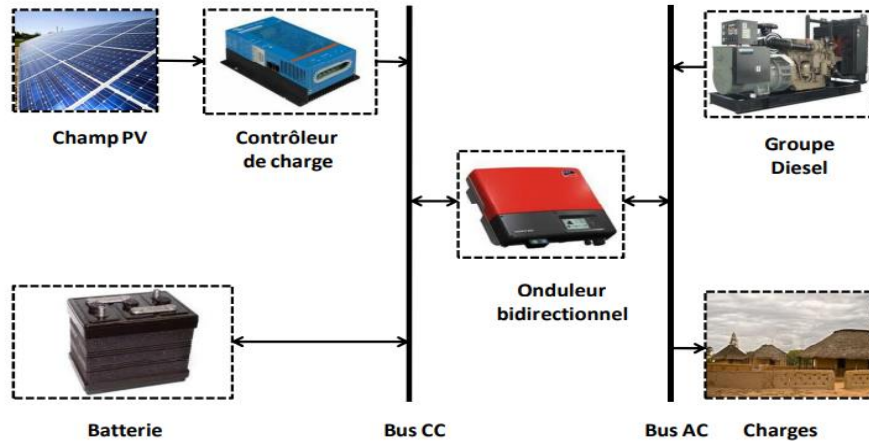


Figure 3 : Architecture de la configuration parallèle d'un système hybride PV/Diesel, [12].

❖ Configuration commutée

Les charges électriques sont alimentées alternativement par les modules photovoltaïques via un onduleur ou par le générateur Diesel, en fonction de leur disponibilité. Un commutateur automatique bascule entre ces sources, assurant une alimentation énergétique continue en fonction de leurs performances respectives.

Dans cette configuration, le générateur Diesel alimente directement les charges électriques sans nécessiter de convertisseurs intermédiaires. De plus, il est en mesure de recharger les batteries via un redresseur tout en fournissant de l'électricité aux charges électriques. L'architecture de cette configuration est illustrée par la figure 4.

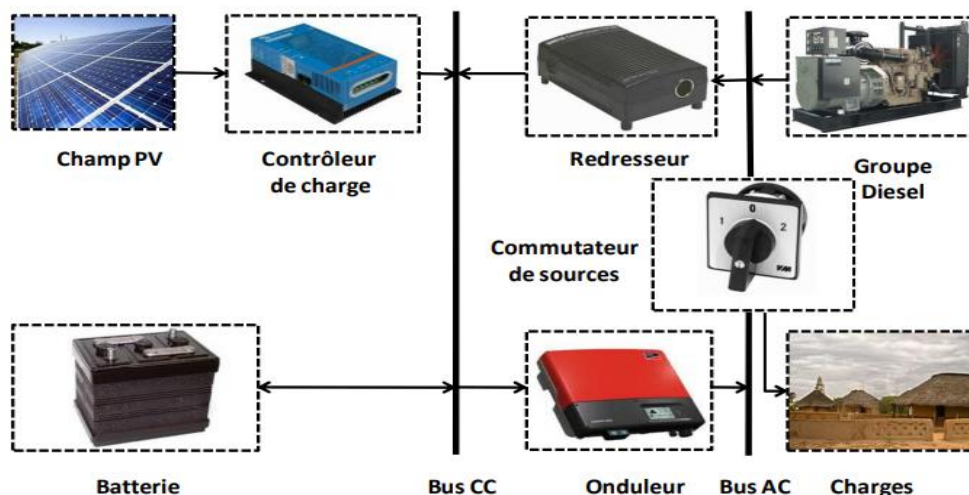


Figure 4 : Architecture de la configuration commutée d'un système hybride PV/Diesel, [12]

❖ Configuration Flexy-Energy

Cette configuration combine plusieurs générateurs Diesel pouvant fonctionner en cascade avec des modules photovoltaïques via un onduleur et une unité de gestion intelligente pour alimenter les charges électriques, classées en charges prioritaires, secondaires et différables. Elle est

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

dépourvue de batteries de stockage pour les charges, utilisant uniquement un stockage de gestion pour compenser les fluctuations de production des modules PV. Pour les besoins énergétiques diurnes, les modules photovoltaïques et les générateurs Diesel alimentent les charges de manière équilibrée. La nuit, les charges sont exclusivement alimentées par les générateurs Diesel. Les travaux de Yao AZOUMAH (2011) [11] et la thèse de YAMEGUEU NGUEWO (2012) [12], qui valident expérimentalement cette configuration, soulignent sa pertinence. La figure 5 illustre l'architecture de cette configuration.

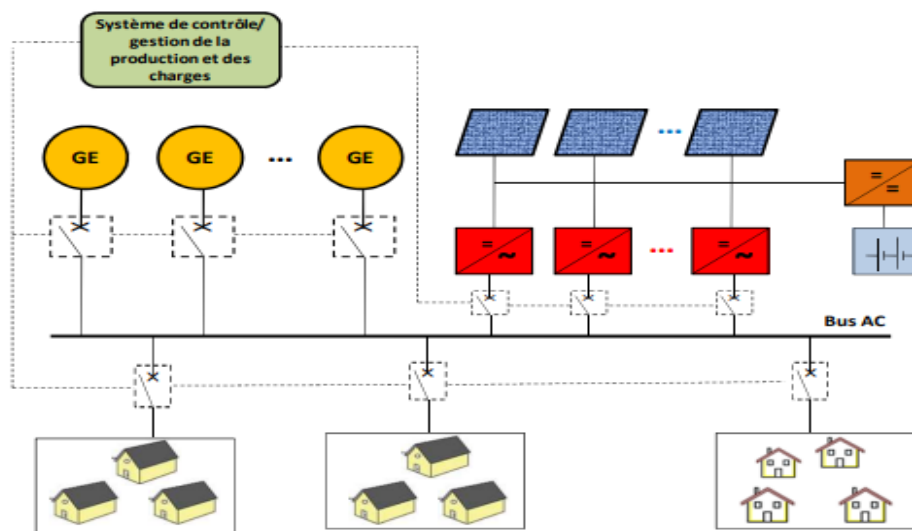


Figure 5 : Architecture de la configuration Flexy Energy d'un système hybride PV/Diesel, [12].

Les avantages et inconvénients des configurations suivant le montage électrique des composants d'un systèmes hybride PV/Diesel sont consignés dans le tableau I.

Tableau I : Avantages et inconvénients des différentes configurations de systèmes hybrides PV/Diesel

Configuration	Avantages	Inconvénients
Série	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation séquentielle efficace, - Contrôle simplifié et basse fréquence de maintenance du générateur Diesel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Espérance de vie réduite des batteries ; - Faible rendement global ; - Arrêt complet du système en cas de détérioration de l'onduleur.
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation simultanée des sources pour une meilleure réponse à la charge ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'un contrôle automatique des sources ; - Déconnexion fréquente en

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance sans interruption de l'alimentation. 	cas de creux de tension.
Commutée	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptabilité dynamique avec optimisation énergétique ; - Répartition flexible de la charge. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité de mise en œuvre, nécessité d'un contrôle sophistiqué ; - Sensibilité aux défaillances du basculement avec interruption lors de la commutation entre sources.
Flexy Energy	<ul style="list-style-type: none"> - Exemption de stockage par batterie - Présence d'une unité de gestion intelligente et efficace de la production et de la consommation d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Expertise nécessaire pour le suivi et le contrôle.

III. ETAT DE L'ART SUR LES METHODES ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENT EXISTANTES DES SYSTEMES HYBRIDES

Un dimensionnement inapproprié des systèmes hybrides PV/Diesel peut conduire soit à une surproduction, augmentant le coût du système, soit à une sous-production, affectant la fiabilité de production électrique. La conception de ces systèmes, cruciale pour une fourniture énergétique adaptée et économiquement viable, peut s'appuyer sur des méthodes traditionnelles ou des logiciels spécialisés [13].

1. Les méthodes traditionnelles

Les méthodes traditionnelles de conception des systèmes hybrides PV/Diesel reposent souvent sur l'expertise des ingénieurs en énergie, qui prennent en compte divers facteurs tels que la demande énergétique, la disponibilité de la ressource solaire, les modèles de consommation et les performances des composants. Ces méthodes peuvent impliquer des calculs manuels et des simulations simplifiées pour estimer les besoins en énergie et dimensionner les composants du système en fonction des conditions locales et des contraintes budgétaires. Elles incluent les méthodes analytiques, itératives, probabilistes, d'intelligence artificielle [13], [14] et hybrides [15].

➤ Méthodes analytiques

Cette approche utilise des modèles mathématiques pour évaluer les systèmes hybrides PV/Diesel, en évaluant leur faisabilité et capacité opérationnelle. Ces modèles s'appuient sur une combinaison de principes physiques, de données empiriques et de paramètres spécifiques au système étudié pour simuler de manière précise et prédire son comportement. L'analyse approfondie des divers indicateurs de performance permet ainsi d'identifier la configuration optimale du système énergétique, en optimisant à la fois l'efficacité et la fiabilité.

➤ Méthodes itératives

Elle utilise des algorithmes récursifs pour déterminer la configuration optimale des systèmes hybrides et répondre aux spécifications de conception. Elle intègre le modèle LPSP (Loss of Power Supply Probability) pour évaluer la fiabilité du système, ainsi que le calcul du coût actualisé de l'énergie (LCOE) et/ou de la valeur actuelle nette (VAN). L'utilisation d'algorithmes récursifs permet de chercher systématiquement la meilleure configuration possible en ajustant progressivement les paramètres du système jusqu'à ce que les spécifications de conception soient satisfaites de manière optimale.

➤ Méthodes probabilistes

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Cette approche utilise des données météorologiques historiques, telles que le rayonnement solaire, pour dimensionner de manière optimale les systèmes énergétiques hybrides. Elle repose sur des lois statistiques et des modèles de probabilité pour évaluer les variations aléatoires des conditions météorologiques et leurs impacts sur la performance du système. En analysant ces fluctuations et en prévoyant les performances à long terme, la méthode probabiliste permet de concevoir des systèmes plus robustes et fiables, capables de gérer les incertitudes et les variations saisonnières.

➤ Méthodes d'intelligence artificielle

Ces méthodes sont utilisées par les chercheurs pour trouver la meilleure taille pour les systèmes hybrides en faisant usage des techniques d'Intelligence Artificielle. Des techniques, comme les algorithmes génétiques, l'optimisation par essais particulaires (PSO) et les réseaux de neurones artificiels (ANN), sont utilisées pour optimiser la performance et la fiabilité en tenant compte de multiples objectifs et contraintes.

➤ Méthodes hybrides

Cette approche combine plusieurs méthodes dans le but de tirer parti de leurs avantages. Elle utilise des modèles mathématiques et des algorithmes d'optimisation pour résoudre des problèmes complexes de dimensionnement tout en assurant une recherche précise et rapide des optimaux globaux et locaux.

Les travaux de recherches de Chouaib Ammari et al. (2022) présentent un résumé des méthodes traditionnelles de dimensionnement avec les composants du système et les fonctions objectives qui montrent une variété de techniques de dimensionnement notamment les techniques d'IA. Les avantages et les limites des méthodes traditionnelles sont consignés respectivement dans le tableau II.

Tableau III : Avantages et limites des méthodes traditionnelles

Méthodes	Avantages	Limites	Réf.
Analytiques	<ul style="list-style-type: none"> - Facilitation d'une estimation initiale précise des besoins en composants. - Aide à évaluer la viabilité économique dès le départ. - Sert de base pour des analyses 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de flexibilité et simplifications excessives pouvant conduire à des omissions de détails critiques. - Inefficacité dans l'intégration de données variées et gestion de l'incertitude. 	[17], [15]

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

	<p>plus détaillées.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permet l'application de méthodes d'optimisation supplémentaires. 	<ul style="list-style-type: none"> - Défi d'adaptation aux environnements dynamiques pour des ajustements en temps réel.
Itératives	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptation précise aux caractéristiques spécifiques du site, incluant l'intégration de la variabilité énergétique. - Évaluation de diverses configurations et technologies pour une exploration approfondie des solutions potentielles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Demande un investissement significatif en temps. - Requier l'accès à des ressources logicielles avancées pour des évaluations précises.
Probabilistes	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion efficace des risques liés aux incertitudes climatiques et de consommation. - Optimisation précise en équilibrant coût, fiabilité et efficacité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité calculatoire élevée. - Forte dépendance aux données historiques. - Limitation de la précision en cas de changements climatiques ou de modèles de consommation évolutifs.
Intelligence artificielle	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité à traiter des problématiques complexes. - Navigation efficace dans des environnements non linéaires et incertains. - Exploration de vastes possibilités pour identifier les configurations les plus efficaces. - Prédiction des performances sous diverses conditions. - Amélioration de la prise de 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une expertise technique élevée pour la mise en œuvre et l'interprétation des résultats. - Exige d'importantes ressources computationnelles, limitant son accessibilité pour certains projets.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

	décision en gérant l'incertitude des données.		
Hybrides	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité et aptitude à aborder des problèmes de conception complexes. - Combinaison efficace de recherche globale et d'optimisation locale pour des solutions précises. - Augmentation de la performance du système grâce à des simulations détaillées et à l'apprentissage automatique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une expertise multidisciplinaire pour une mise en œuvre et une interprétation efficace. - Exigeante en termes de ressources computationnelles, limitant son accessibilité pour certains projets. 	

2. Les outils logiciels

Les logiciels spécialisés sont essentiels pour le dimensionnement, l'optimisation, l'analyse et la simulation de systèmes hybrides. Ils se divisent en trois catégories principales [16]: logiciels d'étude de faisabilité, de dimensionnement, ainsi que de simulation et d'analyse, regroupant près d'une vingtaine d'outils [10], [17] dont quelques-uns sont spécifiques aux systèmes hybrides PV/Diesel : HOMER, Hybrid2, RETScreen, iHOGA, INSEL, TRNSYS, iGRHYSO, HYBRIDS. Quelques-uns sont succinctement décrits ci-dessous :

- ❖ HOMER : développé par le NREL aux USA, est un logiciel avancé pour la conception, l'optimisation, et l'évaluation de systèmes énergétiques hybrides, incluant le PV, l'éolien, l'hydroélectrique, et le diesel. Il facilite l'analyse des coûts, performances, et impacts environnementaux, permettant de choisir des solutions économiques et écologiques en calculant le coût total de cycle de vie et le coût par kWh via des simulations annuelles.
- ❖ iHOGA : Développé par l'Université de Zaragoza et programmé en C++, ce logiciel optimise des configurations énergétiques hybrides, incluant le PV, l'éolien, hydro, les piles à combustible, et plus, via des algorithmes d'optimisation mono et multi-objectifs avec des calculs sur des intervalles horaires.
- ❖ HYBRID2 : développé par l'Université du Massachusetts avec le soutien de l'NREL, est un outil de simulation pour systèmes hybrides utilisant un modèle probabiliste et

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

des techniques statistiques pour prédire les performances des systèmes hybrides à long terme avec des intervalles de 10 minutes à une heure.

- ❖ RETScreen : Développé par CANMET du Canada, ce programme Excel aide à évaluer rapidement la viabilité de projets en énergies propres, en analysant production d'énergie, coûts de cycle de vie et réduction des émissions pour diverses technologies.
- ❖ TRNSYS : Issu des universités de Wisconsin et Colorado, USA, il permet de simuler avec précision les systèmes thermiques et énergétiques, y compris les systèmes hybrides.

Une vue d'ensemble de ces outils logiciels est présentée dans le tableau II. Elle met en évidence leurs caractéristiques : les paramètres d'entrée et de sortie et le type d'évaluation effectué.

Tableau III : Caractéristiques de quelques outils logiciel de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel

Logiciel	Paramètres d'entrées	Paramètres de sorties	Type d'évaluation
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> • Demande énergétique • Données de la ressource solaire • Détails économiques et techniques des composants, • Contraintes du système • Données d'émission de CO₂ • Contrôle du système. 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille optimale des composants • LCOE • NPV • Consommation de carburant • Quantité de CO₂ émise • Production d'électricité, • Excès d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse technico-économique • Evaluation des émissions • Analyse de sensibilité
HYBRID2	<ul style="list-style-type: none"> • Demande énergétique • Données économiques du projet • Détails techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats technico-économiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionnement et optimisation technico-économiques

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

	<p>des composants</p> <ul style="list-style-type: none"> • Données de la ressource solaire 		
RETSCREEN	<ul style="list-style-type: none"> • Demande énergétique • Détails économiques • Détails techniques des composants • Données météorologiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille optimale du système • Détails économiques du système 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse technico-économique • Evaluation de la sensibilité et des risques • Analyse des performances et comparaison des systèmes • Evaluation de portefeuille, • Analyse des économies d'énergie et des émissions de CO2
TRNSYS	<ul style="list-style-type: none"> • Données climatiques • Choix des modèles de sa bibliothèque 	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats de simulation dynamique • Caractéristiques opérationnelles du système • Production d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse technico-économique
iHOGA	<ul style="list-style-type: none"> • Données technico-économiques, • Données météorologiques • Contraintes 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité d'émissions 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse technico-économique

Les outils logiciels, qu'ils soient utilisés pour la gestion, la conception, ou l'analyse, présentent

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

des avantages et des limites qui peuvent considérablement influencer l'efficacité et la réussite d'un projet. Le tableau IV présente les avantages et les limites des outils logiciels.

Tableau IV : Avantages et limites des outils logiciels de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel

Logiciel	Avantages	Inconvénients	Réf.
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> Espace de travail convivial, Résultats de performance de plusieurs composants, Liaison avec MATLAB, Possibilité d'importer les données météorologiques depuis le site web de la NASA. 	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilité de modéliser la stabilité du système en ce qui concerne le contrôle de la tension et de la fréquence Limitation de langage 	[18], [13]
HYBRID2	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'intégrer des charge différables Possibilité d'intégrer un contrôle de supervision 	<ul style="list-style-type: none"> Indisponibilité des simulations dynamiques Temps de simulation excessivement long 	
RETSCREEN	<ul style="list-style-type: none"> Disponible en plusieurs langues Disponibilité d'une base de données des composants du système 	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilité d'importer les séries Non prise en compte d'effet de température Options de visualisation, de recherche et de récupération de données sont limitées 	
TRNSYS	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilité du code source en open-source Personnalisation des simulations dynamiques 	<ul style="list-style-type: none"> Indisponibilité des simulations dynamiques Absence d'optimisation 	
iHOGA	<ul style="list-style-type: none"> Analyse de probabilité Optimisation multi-objectif Simulation sur plusieurs périodes 	<ul style="list-style-type: none"> Charge électrique journalière limitée à 10kWh 	

Bien que les outils logiciels offrent des fonctionnalités avancées et une automatisation précieuse

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

pour le dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel, ils souffrent de limitations notables telles que l'indisponibilité de simulations dynamiques et des restrictions liées à la complexité ainsi qu'au temps nécessaire pour mener les simulations. De même, les méthodes traditionnelles, tout en étant simples, présentent des lacunes en termes de précision et de capacité à gérer l'incertitude.

Pour repousser les limites actuelles du dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel, une nouvelle approche doit intégrer les aspects suivants :

- Une application des principes essentiels de la thermodynamique pour concevoir un système capable de répondre de manière efficace à la demande énergétique, tant en termes de quantité que de qualité.
- Une prise en compte simultanée de diverses configurations des systèmes hybrides PV/Diesel afin de proposer l'optimal.
- L'utilisation des algorithmes améliorés pour une meilleure gestion des risques et des incertitudes, même avec des données limitées ou incohérentes.
- Une prise en compte simultanée de la fiabilité technique et de l'accessibilité économique.
- La capacité à intégrer des données actualisées pour ajuster les performances du système.

En combinant ces améliorations, une avancée significative peut être réalisée dans le domaine du dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel, permettant de répondre plus efficacement aux besoins des utilisateurs et d'optimiser la performance et la fiabilité des systèmes.

IV. PRESENTATION DE LA NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

1. Description de la nouvelle approche de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel

Deux critères principaux caractérisent la nouvelle approche : la fiabilité technique, mesurée à travers la Probabilité de délestage électrique (LPSP), et l'accessibilité économique, évaluée par le coût actualisé de l'énergie (LCOE).

L'originalité de cette approche réside dans la prise en compte simultanée de différentes notions tels que le taux de pénétration solaire (α_h), le facteur de qualité de la demande énergétique (γ_{en}) (qui est une nouvelle notion qualitative), la configuration du système hybride PV/Diesel selon le mode de connexion des composants et la notion de facteur de sécurité du stockage (dans une différenciation de typologie de stockage).

Le taux de pénétration solaire correspond à la part d'énergie de la composante solaire photovoltaïque dans le système hybride. A travers cette notion, la méthode explore différents scénarios de mix énergétique de 0 à 100 % comme valeurs de α_h . Pour chacune des valeurs de taux de pénétration solaire, l'approche explore différentes configurations des systèmes hybrides PV/Diesel (série, commutée et parallèle). Suivant le mode de fonctionnement de ces dernières, l'approche évalue toutes les tailles possibles du système en fonction du profil de la consommation électrique, de localité concernée, d'une plage de puissances de générateur Diesel définie, et des différentes valeurs des facteurs de sécurité du stockage (α_a et α_n), tous ces paramètres sont définis plus loin dans cette section.

L'approche permet d'identifier ensuite les combinaisons pour lesquelles le système est dit techniquement fiables via le LPSP, en retenant celles avec un LPSP inférieur au seuil admissible prédéfini. Finalement, il calcule le LCOE pour chaque configuration retenue avec (LPSP inférieur au LPSP seuil) et sélectionne celle avec le LCOE minimal. Si plusieurs combinaisons affichent un LCOE minimal identique, la préférence est donnée à celle avec la meilleure performance de production (qui est une notion définie plus bas).

Le logigramme ci-dessous offre une illustration claire de la méthode proposée.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

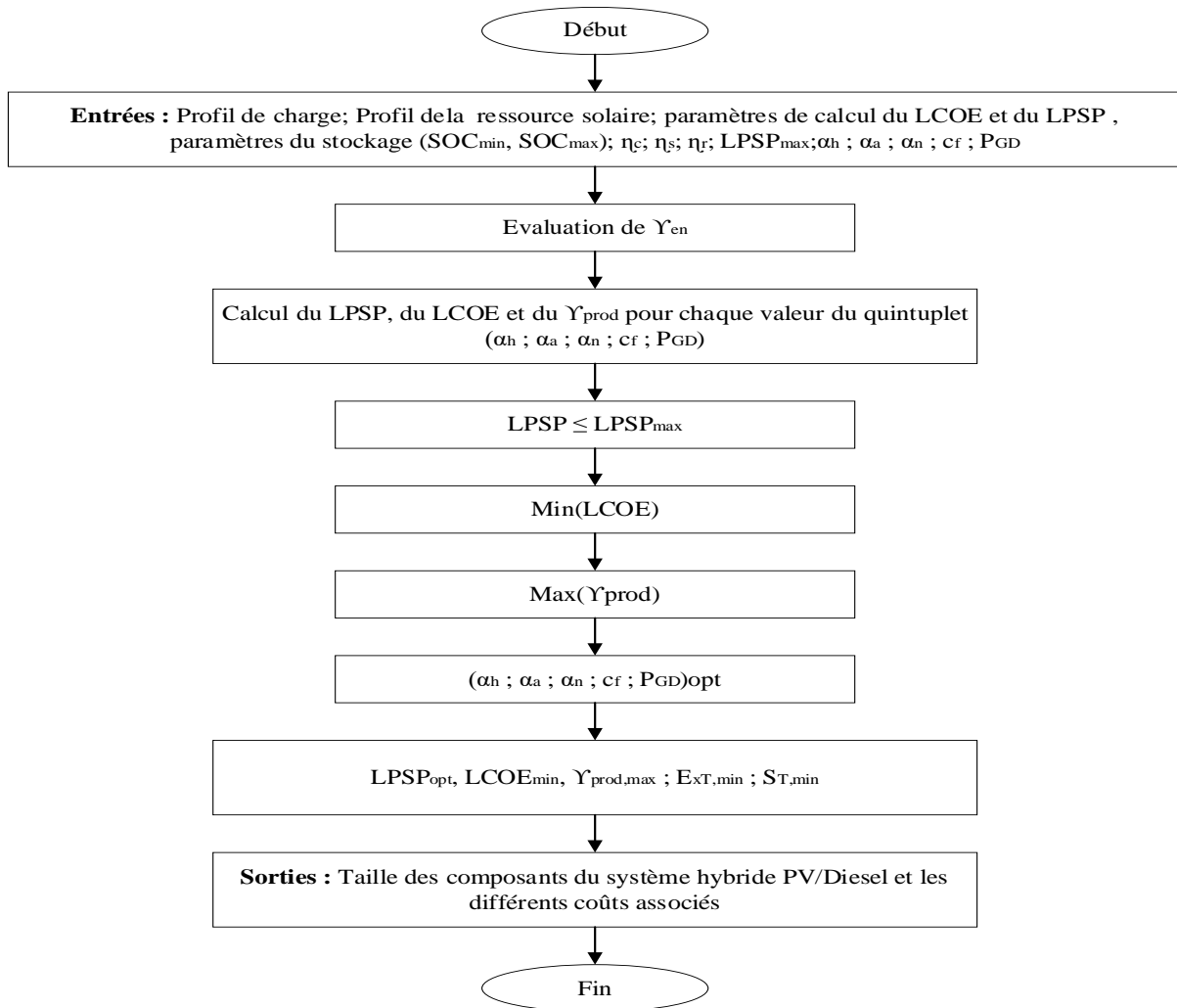


Figure 6 : Logigramme de la nouvelle approche

2. Présentation des paramètres spécifiques de la méthode

Les principaux paramètres de la présente approche regroupent le facteur de qualité de la demande énergétique, le taux de pénétration solaire en énergie, le paramètre de choix de la configuration, les facteurs de sécurité du stockage.

❖ Le facteur de qualité de la demande énergétique

Le facteur de qualité de la demande en énergie (γ_{en}), qui est une nouvelle notion qualitative, se définit ici comme le rapport entre le besoin énergétique favorable (E_a) (qui fait référence au besoin énergétique en phase avec disponibilité de la ressource solaire) et le besoin énergétique total (E_T). Il est donné par la formule :

$$\gamma_{en} = \frac{E_a}{E_T} = \frac{E_a}{E_a + E_n} \quad (1)$$

E_a : le besoin énergétique en phase avec la disponibilité de la ressource solaire ;

E_n : le besoin énergétique en déphase avec la disponibilité de la ressource solaire.

Ce facteur indique l'adéquation entre les besoins énergétiques et la disponibilité temporelle des ressources énergétiques fluctuantes et sa valeur est comprise entre 0 et 1. Un facteur de qualité élevé signifie que la demande en énergie coïncide bien avec la disponibilité des ressources, tandis qu'un facteur de qualité faible indique le contraire. Cette mesure est essentielle pour optimiser le dimensionnement de la composante solaire photovoltaïque du système hybride. Fonction de la ressource solaire, ce facteur diffère selon la localité (ville ou pays) et la situation horaire (nocturne, diurne, à la fois nocturne et diurne) de la demande énergétique. La figure 6 présente l'évaluation du facteur de qualité de trois localités différentes (Nice, Tabelbala et Niamey) pour un même besoin énergétique dont une partie est diurne.

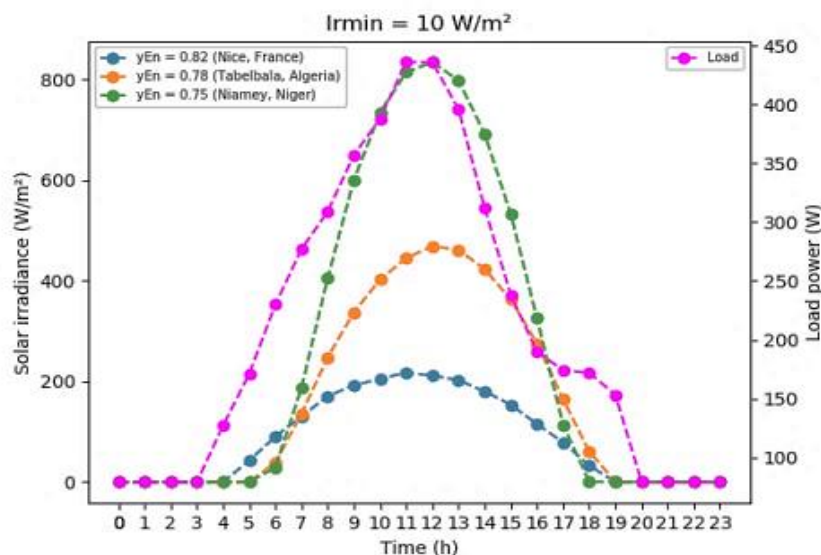


Figure 7 : Détermination du facteur de qualité de la demande énergétique pour trois zones différentes, [19].

❖ Taux de pénétration solaire

Il fait référence à la proportion de l'énergie totale produite par les modules PV par rapport au besoin énergétique total sur une période donnée. Il est considéré dans cette approche comme une variable d'optimisation du système et est compris entre 0 et 100 % avec un incrément de 5%, 0 et 100 % exclus.

❖ Paramètre de choix de la configuration

Ce paramètre guide la sélection de la configuration la plus adaptée pour répondre aux besoins spécifiques et aux objectifs fixés.

❖ **Facteurs de sécurité du stockage (α_a et α_n)**

Ces facteurs sont des variables d'optimisation du système affectées à chaque type de stockage. Ils influent non seulement sur la taille du stockage mais également sur le productible énergétique. Ils varient entre 0 et 1 avec un incrément 0,1.

L'aspect intermittent de l'énergie solaire rend indispensable le recours au stockage par batterie. Cette approche distingue deux types de stockage : le stockage de gestion (S_a) pour lisser la production d'électricité solaire et le stockage de production (S_n) pour répondre aux demandes énergétiques défavorables (E_n). Cette dernière fait référence au besoin énergétique en déphasage avec la disponibilité de la ressource solaire.

Les différents types de stockage sont dimensionnés comme suit :

$$S_a = \frac{\alpha_a}{\eta_c \cdot \eta_s} \cdot E_a \quad (2)$$

$$S_n = \left(\frac{1 + \alpha_n}{\eta_s \cdot \eta_c} \right) \cdot E_n \quad (3)$$

α_a : Facteur de sécurité du stockage de gestion ;

α_n : Facteur de sécurité du stockage de production ;

η_c : Rendement de l'onduleur ;

η_s : Rendement de la batterie.

3. Modélisation de l'approche

Les systèmes hybrides PV/Diesel se composent essentiellement de modules photovoltaïques (PV), de générateurs Diesel, d'un parc de batteries, et de convertisseurs. Pour concevoir efficacement ces systèmes, il est crucial de déterminer avec précision la charge électrique. Cette étape nécessite l'élaboration d'un profil de charge, qui implique l'inventaire et la quantification des appareils électriques qui seront alimentés, lesquels fonctionnent généralement avec du courant alternatif (AC).

3.1. Modules Photovoltaïques (PV)

L'évaluation de l'énergie générée par les modules photovoltaïques se base sur des paramètres tels que l'irradiation solaire incidente, la température ambiante, et les caractéristiques qui leur sont propres, comme le courant de court-circuit, la tension maximale, et la tension de circuit ouvert, fournies par le fabricant.

Dans le contexte de cette étude, le générateur PV est modélisé suivant l'approche avancée de dimensionnement des systèmes hors réseau (OFES) [19]. Il est caractérisé par sa puissance crête (P_c) dont l'expression est représentée par l'équation 1.

$$P_c = \frac{E_{xT}}{PR * I_r} \quad (4)$$

E_{xT} : le productible énergétique utile total [Wh]

PR : le ratio de performance

I_r : l'irradiation [W/m^2]

Le productible énergétique utile total (E_{xT}) nécessaire pour satisfaire le besoin énergétique total correspond à la somme des deux types de productible énergétique : le productible énergétique utile favorable (E_{xa}) et le productible énergétique utile défavorable (E_{xn}). Ces derniers sont définis comme la quantité d'énergie à produire pour satisfaire les besoins énergétiques respectivement favorables ou diurne (E_a) et défavorables ou nocturne (E_n). Ils sont obtenus comme suit :

$$E_{xa} = \frac{E_a}{\eta_c} + S_a \quad (5)$$

$$E_{xn} = S_n \quad (6)$$

$$E_{xT} = (E_{xa} + E_{xn}) * \alpha_h \quad (7)$$

3.2. Générateur Diesel

Le générateur Diesel convertit l'énergie chimique du combustible diesel en électricité par combustion, et est apprécié pour sa robustesse et sa fiabilité. Sa puissance nominale (P_{GD}) représente la quantité maximale d'énergie qu'il peut produire de manière continue. Dans cette approche, cette puissance est une variable ajustable, permettant une conception flexible et efficace du système. Cela assure une adaptation précise aux besoins énergétiques, évitant le sous-dimensionnement et le surdimensionnement, tout en optimisant les coûts et l'efficacité énergétique, et en facilitant l'intégration avec les énergies renouvelables pour un système plus résilient et économiquement viable. La consommation horaire du générateur Diesel est obtenue comme suit [10] :

$$f_{GD}(t) = P_{GD} * (f_0 + f_1 * \delta(t)) \quad (8)$$

$\delta(t)$: taux de charge de chaque générateur Diesel à l'instant t ;

P_{GD} : Puissance nominale du générateur Diesel [kW] ;

f_0 et f_1 : paramètres de consommation des générateurs Diesel ;

3.3. Convertisseurs

Dans un système hybride PV/Diesel, les convertisseurs jouent un rôle clé en garantissant la compatibilité entre diverses sources d'énergie ainsi qu'entre les sources et les charges

électriques. Cette méthode identifie deux types de convertisseurs, chacun adapté à des configurations spécifiques pour optimiser l'efficacité du système :

- **L'onduleur** : Essentiel dans toutes les configurations, il transforme le courant continu en courant alternatif pour alimenter les charges, tout en régulant la tension et la fréquence et en protégeant le système contre les anomalies et les surcharges. Sa puissance nominale correspond à la puissance maximale des charges. Cependant, lorsque cette dernière est supérieure à la puissance maximale que peut fournir le champ PV, alors l'expression de puissance de l'onduleur devient :

$$P_{inv} = \text{Max}(P_{load}(t), \eta_c * P_c) \quad (9)$$

η_c : Rendement de l'onduleur ;

$P_{load}(t)$: Puissance des charges électriques à l'instant t.

- **Le redresseur** : Principalement employé dans la configuration série, il joue un rôle crucial en convertissant le courant alternatif (AC) produit par le générateur Diesel en courant continu (DC). Sa puissance (P_{red}) correspond à :

$$P_{red} = \eta_r * P_{GD} \quad (10)$$

η_r : Rendement du redresseur.

3.4. Les batteries

La capacité minimale est déterminée comme suit :

$$C_{bat,min} = \frac{S_t}{V_{bat} * DOD} \quad (11)$$

V_{bat} : Tension du parc de batterie [V] ;

DOD : la profondeur de décharge de la batterie ;

S_t : Energie totale du stockage [kWh] ;

La capacité totale de stockage dépend du taux de pénétration solaire du système hybride. Elle est donc dimensionnée pour garantir que les batteries remplissent efficacement leur rôle en répondant aux besoins énergétiques, selon la proportion de la demande qui doit être couverte par l'énergie solaire. Elle est obtenue comme suit :

$$S_t = (S_a + S_n) * \alpha_h \quad (12)$$

η_s : Rendement du stockage

3.5. Evaluation de la fiabilité technique

La fiabilité technique du système est un indicateur clé de la performance et de la qualité d'un système, reflétant la probabilité que le système accomplisse ses fonctions requises. Dans le cadre de cette méthode, elle se mesure par le biais du taux de délestage électrique du système

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

au cours d'une année avec un pas de temps d'une heure pour chacune des configurations. L'évaluation se fait suivant la simulation d'un algorithme conforme au mode opératoire du système en tenant compte non seulement du profil de charge, des données climatiques et du profil de la ressource solaire de la localité mais aussi des paramètres liés à chaque composant. Les figures de ces diagrammes sont présentées dans l'annexe I. Le taux de délestage est défini par :

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS_{c_f}(t)}{\sum_{t=1}^T E_T(t)} \quad (13)$$

Où LPS_{c_f} correspond au besoin énergétique non satisfait par le système pour une configuration donnée ($c_f \in \{CC, CP, CS\}$), sa formulation est présentée dans le tableau VI.

Tableau V : Formulation du LPS pour chaque configuration

Configuration	Formule du LPS(t)
Commutée (CC)	$LPS_{CC}(t) = \begin{cases} \Delta E_T(t), & \text{si } \Delta E_T(t) > 0 \text{ et } P_{GD} < P_{load}(t) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$
Parallèle (CP)	$LPS_{CP}(t) = \begin{cases} \Delta E_T(t), & \text{si } \Delta E_T(t) - E_{GD} > 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (15)$
Série (CS)	$LPS_{CS}(t) = \begin{cases} \Delta E_T(t), & \text{si } (E_{xt}(t) + \eta_r * E_{GD}) * \eta_c < E_T(t) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$

E_{GD} : Energie maximal que peut produire le générateur Diesel.

$\Delta E_T(t)$ Correspond à l'énergie nécessaire pour couvrir le besoin énergétique et son expression :

$$\Delta E(t) = E_T(t) - \eta_c \cdot E_{xt}(t) - \eta_s \cdot \eta_c \cdot [S_t(t-1) - S_{t,min}] \quad (17)$$

$S_t(t-1)$: Energie disponible dans les batteries ;

$S_{t,min}$: Quantité minimal d'énergie à disposer dans le stockage.

3.6. Evaluation de l'accessibilité économique

L'accessibilité économique constitue un critère essentiel pour évaluer la viabilité économique à long terme du système. Cette évaluation repose sur le calcul du Coût Actualisé de l'Électricité (LCOE), qui intègre l'ensemble des coûts du système projetés sur sa durée de vie et rapportés à l'énergie qu'il produit.

Notre approche intègre une analyse détaillée des coûts, associée à chaque configuration du système. Le LCOE est calculé comme suit [9], [10] :

$$LCOE = \frac{LCC}{US_f(a,i,d)*W} \quad (18)$$

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

Où LCC est le coût total du système sur la durée de vie du projet, US_f est le facteur d'actualisation ; a, i, d sont respectivement le taux d'actualisation, le taux d'inflation et la durée de vie du projet. W représente l'énergie annuelle produite par le système, correspondant à la quantité d'énergie générée par toutes les unités de production du système tout au long de l'année [20].

Le LCC du système hybride PV/Diesel correspond à la somme des différents coûts actualisés moins la valeur résiduelle du système et s'exprime comme suit [9],[12] :

$$LCC = C_I + US_f(a, i, d) * [C_O + C_M] + US_f(a', i, d) * C_R - PWD_f(a, d) * V_R \quad (19)$$

Où C_I, C_O, C_M, C_R et V_R correspondent respectivement aux coûts d'investissement, d'opération, de maintenance, de remplacement et la valeur résiduelle du système.

$US_f(a, i, d), US_f(a', i, d)$ et $PWD_f(a, i, d)$ sont respectivement les facteurs d'actualisation des dépenses courantes, des dépenses non courantes et des valeurs résiduelles. Ils s'expriment respectivement de la manière suivante [12] :

$$US_f(a, i, d) = \frac{\left(\frac{1+i}{1+a}\right) * \left[\left(\frac{1+i}{1+a}\right)^d - 1\right]}{\left(\frac{1+i}{1+a}\right) - 1} \quad (20)$$

$$US_f(a', i, d) = \frac{\left(\frac{1+i}{1+a'}\right) * \left[\left(\frac{1+i}{1+a'}\right)^d - 1\right]}{\left(\frac{1+i}{1+a'}\right) - 1} \quad (21)$$

$$PWD_f(a, d) = \frac{1}{(1+a)^d} \quad (22)$$

a' est le taux d'actualisation ajusté pour les coûts périodiques ;

L'expression des différents coûts est consignée dans le tableau VI.

Tableau VI : Expression des différents coûts pour tout composant du système

Coûts		Formules	Réf.
Coût d'investissement		$C_I = \sum c_{I,j} * P_j = \sum a_j * P_j^{1-b_j} \quad (23)$	
Coût de maintenance	PV	$C_{M,solar} = m_{PV} * \sum c_{I,j} * P_j * UCR_f(a, D_j) \quad (24)$	[9], [10], [12], [19]
	GD	$C_{M,GD} = N_{GD} * (m_{GD} + n_{GD} * P_{GD}) * \sum_{t=1}^T \epsilon_t \quad (25)$	
Coût d'opération	PV	$C_{O,solar} = 0 \quad (26)$	
	GD	$C_{O,GD} = N_{GD} * c_0 * \sum_{t=1}^T (f_{GD}(t) * \epsilon_t) \quad (27)$	
Coût de remplacement		$C_R = \sum c_{I,j} * P_j \quad (28)$	
Valeur résiduelle		$V_R = \sum c_{I,j} * P_j * \frac{D_{r,j}}{D_j} \quad (29)$	

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

UCR_f, D_j et $D_{r,j}$ sont respectivement le facteur d'annualisation, la durée de vie du composant et sa durée de vie restante.

a_j et b_j : constantes en lien avec le coût d'acquisition du composant ;

P_j : puissance du composant ou sa capacité en [kW] ou [kWh] ;

N_j : nombre de composant ;

T : nombre d'heure dans l'année ;

m_{PV} : constante liée à la maintenance du système PV ;

m_{GD} et n_{GD} : constantes respectivement égales à 0,17 euro/h et 0,0072 euro/kWh.

En lien avec l'accessibilité économique, l'évaluation d'un troisième critère qui est l'efficacité du productible, est indispensable pour départager éventuellement des combinaisons présentant le même LCOE minimal. Il est obtenu par :

$$\gamma_{prod} = \frac{\sum_1^T [E_{xT}(t) + E_{GD}(t)]}{\sum_1^T E_T(t)} \quad (30)$$

$E_{GD}(t)$: Energie produite par le générateur Diesel à l'instant t

V. SIMULATION ET RESULTATS

1. Présentation des outils et paramètres utilisés pour la simulation

L'objectif principal des simulations réalisées est de valider la pertinence et l'efficacité du modèle élaboré pour le dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/Diesel. Ces simulations sont essentielles pour démontrer que le modèle peut fidèlement reproduire le comportement de ces systèmes dans diverses conditions opérationnelles et environnementales.

Le matériel de simulation adoptée pour cette étude inclut l'utilisation de plusieurs outils et données.

1.1. Langage de programmation Python

Ce langage a été sélectionné, dans cette étude, pour développer les algorithmes de simulation de systèmes hybrides PV/Diesel en raison de ses multiples atouts : flexibilité et facilité d'utilisation, capacités de calcul intensif, richesse des bibliothèques et interopérabilité. Les différentes algorithmes et formules de calcul ont été fidèlement programmés en langage python.

1.2. Données TMY

Les données TMY (Année Météorologique Type) sont des ensembles de données climatiques essentielles pour les simulations des systèmes énergétiques. Représentant les conditions météorologiques typiques d'un emplacement donné sur une année, elles comprennent des informations horaires sur des variables telles que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, la pression atmosphérique et les précipitations. Elles sont cruciales pour des prévisions précises et une conception optimisée dans les projets énergétiques et climatiques à différentes localisations.

Dans le cadre de cette étude, les données ont été téléchargées sur PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Ainsi, grâce à ces données, nous pouvons simuler de manière réaliste l'efficacité énergétique des panneaux en fonction des variations environnementales spécifiques à chaque site.

1.3. Profils de charge de consommation électrique

Pour la simulation du modèle de système hybride PV/Diesel, l'étude intègre trois profils de charge distincts, chacun présentant une consommation énergétique quotidienne totale de 50 kWh. Ces profils ont été spécifiquement choisis pour représenter une variété de schémas de consommation électrique typiques à différents utilisateurs, offrant ainsi une perspective approfondie sur la performance du système dans divers contextes. Une description détaillée de chaque type de profil de consommation est présentée ci-dessous :

- **Consommation type ménage** : Ce profil simule la consommation quotidienne d'électricité d'un ménage moyen ou d'une petite communauté. Il inclut l'utilisation de l'électricité pour l'éclairage, les appareils électroménagers, le chauffage ou la climatisation, et d'autres besoins domestiques. Le profil est caractérisé par un facteur de qualité quasiment nul reflétant une consommation électrique essentiellement nocturne.
- **Consommation type GSM (stations de base de télécommunication)** : Ce profil représente la consommation électrique des stations de base pour les réseaux de télécommunication. La consommation est relativement constante tout au long de la journée. Le facteur de qualité est généralement de 50%. Ce profil est crucial pour tester la stabilité et la fiabilité du système hybride dans des conditions de charge continue.
- **Consommation type entreprise (PME/PMI)** : Ce profil reflète la consommation électrique typique d'une petite ou moyenne entreprise en zone rurale où la consommation est sensiblement négligeable toute la nuit et à certaines heures de la journée. Ce type de profil dont la consommation est essentiellement diurne, est caractérisé par un facteur de qualité tendant vers 100%.

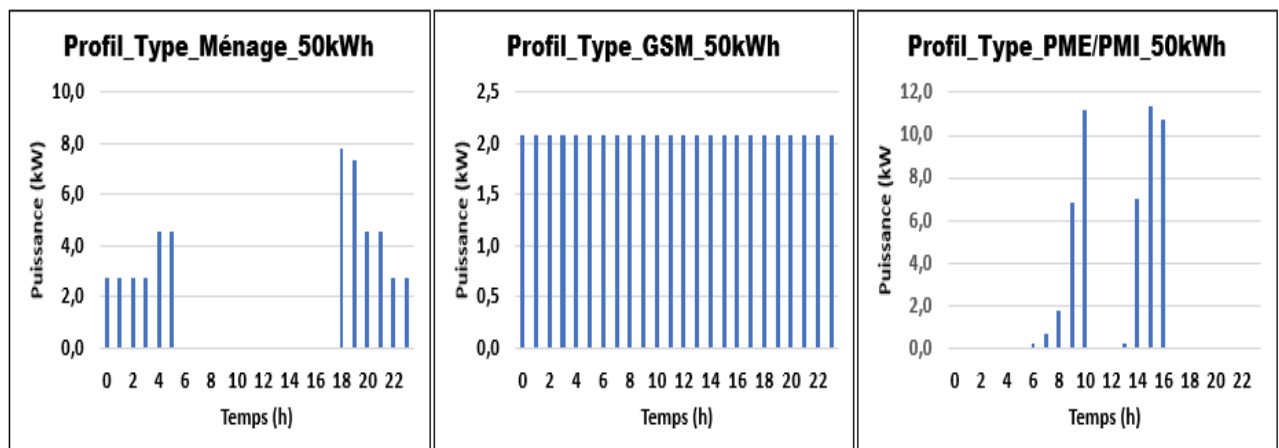


Figure 8 : Profils de charge utilisés pour la simulation de la méthode

Ces différents profils ont été générés spécifiquement pour la simulation de l'approche.

1.4. Localités choisies pour la simulation

Dans le cadre de la simulation, nous avons sélectionné des localités à diverses latitudes et longitudes pour évaluer le système dans une gamme étendue de conditions climatiques. La figure 8 présente les différentes zones sélectionnées (Lomé, P11, P12, P13, P41, P42, P43, P71, P72, P73, P81, P82 et P83).

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

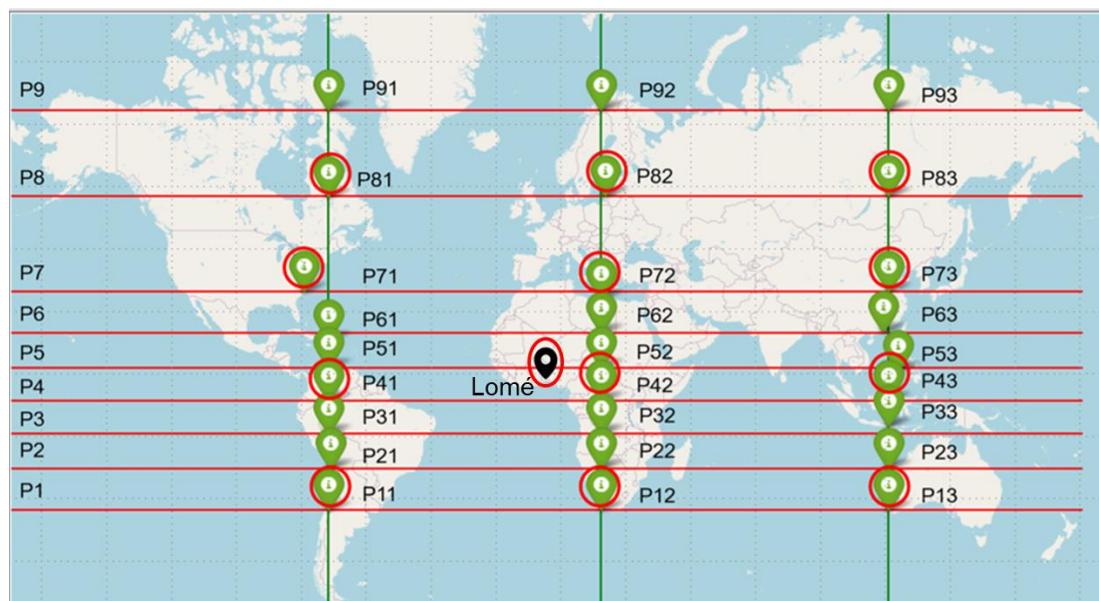


Figure 9 : Localités sélectionnées pour la simulation de la méthode

L'identité de ces localités est présentée dans le tableau VI.

Tableau VII : Identité des différentes localités sélectionnées

ID	Nom (Ville, pays)	Latitude	Longitude
Lomé	Lomé, Togo	6,13	1,23
P11	Mostazal, Chile	-33,98	-70,6862
P12	Langeberg Ward, Afrique du sud	-33,98	20
P13	Australie occidentale, Australie	-33,98	115,5
P41	Vaupés, Colombie	0	-70,6862
P42	Equateur, RDC	0	20
P43	Kelian Luar, Indonésie	0	115,5
P71	North Caroline, United States	33,98	-78,6862
P72	Al Karmah Town, Libya	32	20
P73	Henan, Chine	33,98	115,5
P81	Rivière-Koksoak, Canada	55,84	-70,6862
P82	Vėlaičiai, Lithuania	55,89	21,5
P83	Bachkortostan, Russie	55,89	55,89

Les localités choisies incluent :

- **Zone située à proximité de l'équateur (Latitude 0) :** Il s'agit notamment des localités Lomé, P41, P42 et P43. Elles sont situées près de l'équateur, offrant ainsi

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

un profil solaire avec une intensité d'irradiation élevée et peu de variations saisonnières.

- **Zone à Latitudes moyennes (environ -33,98 et 33,98) :** Cette zone comprenant les localités P11, P12, P13, P71, P72 et P73 répartis dans les hémisphères nord et sud, présente une variété de profils solaires due à des saisons marquées.
- **Zone à hautes latitudes (environ 55,84 à 55,89) :** Elle concerne les localités P81, P82 et P83. Elle est caractérisée par des conditions de faible ensoleillement et de variations saisonnières extrêmes.

Ce choix stratégique assure une évaluation complète du système dans divers contextes climatiques, favorisant une applicabilité mondiale. Cette large sélection de localités permet de vérifier la prise en compte de la notion de facteur de qualité par l'approche élaborée.

1.5. Paramètres technico-économiques

Cette simulation s'appuie sur un ensemble de paramètres technico-économiques rigoureusement définis pour évaluer la performance des systèmes hybrides PV/Diesel. Ces paramètres incluent les détails techniques et économiques du projet et de chaque composant du système. Les paramètres de coût de la composante solaire ont été fournis par l'entreprise KYA-Energy Group sur la base de l'expérience de ses pratiques commerciales. Certains paramètres sont issus de la littérature, notamment les paramètres techniques du générateur Diesel. Ces paramètres sont généralement utilisés pour des générateurs Diesel de taille moyenne.

Tableau VIII : Paramètres technico-économiques

Paramètres d'entrée	Valeur
d	20 ans
a	8 %
i	4 %
a_{pv}	143.404 \$/kWc
b_{pv}	0,5547
a_{bat}	274.495 \$/kW
b_{bat}	0,2473
a_{inv}	992.7334 \$/kW
b_{inv}	0,6057
$c_{I,GD}$	1300 \$/kW
$c_{I,red}$	300 \$/kW

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

m_{pv}	2%
C_0	1.26 \$/L
D_{pv}	20 ans
D_{bat}	5 ans
D_{inv}	10 ans
D_{red}	10 ans
$T_{max,GD}$	15000 h
m_{GD}	0.18 \$/h
n_{GD}	0,0077 \$/kWh
f_0	0,084 L/kWh
f_1	0,246 L/kWh
PR	0,7
η_c	0,95
η_s	0,9
η_r	0,9
DOD	80 %
SOC_{min}	20 %
SOC_{max}	100 %
V_{bat}	48 V
$I_{r_{min}}$	10 W/m ²
LPSP_{max}	10%

2. Présentation des résultats obtenus

Les simulations ont été effectuées pour plusieurs localités et en tenant compte de trois différents profils de consommation énergétique. Les résultats fournissent des éclairages précieux sur l'efficacité et la viabilité des systèmes hybrides dans divers contextes géographiques et de demande. Le tableaux IX exposent les résultats optimaux du dimensionnement d'un système PV/Diesel pour chacune des localités sélectionnées et ce, pour chacun des profils. Il est à noter que les paramètres technico-économiques demeurent identiques pour l'ensemble des localités. Les données relatives à la ressource solaire de ces différentes zones ont été utilisées afin de générer le profil de la ressource solaire présenté dans l'annexe II.

Les résultats présentent des systèmes techniquement fiables avec un taux de délestage électrique système de moins de 10% et économiquement accessibles avec un coût abordable pour chaque localité. Le taux de 10% est recommandé comme taux de délestage électrique maximal [21].

Tableau IX : Résultats de la simulation de la nouvelle approche

Profil	Localité	γ_{en}	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	c_f	α_h	α_a	α_n	P_{GD} [kW]	P_c [kWc]	S_t [kWh]	E_{xt} [kWh]	Production énergétique annuelle [kWh]	LCC [\$]
Type Ménage	Lomé	0,00	0,272	0,20	CC	0,95	0	1	4	32,63	125,00	125,00	45632	170916
	P11	0,30	0,158	0,27	CC	0,95	1	1	4	47,31	106,06	121,21	70958	154630
	P12	0,30	0,228	0,65	CC	0,95	1	1	4	33,39	106,06	121,21	48905	153507
	P13	0,30	0,117	0,00	CP	0,95	0,9	0,6	4	64,38	86,74	101,89	84603	136912
	P41	0,00	0,252	0,00	CP	0,65	0	0,9	4	30,60	81,25	81,25	36659	127184
	P42	0,00	0,266	0,14	CC	0,95	0	1	4	35,29	125,00	125,00	46722	171211
	P43	0,16	0,172	0,00	CP	0,95	0,2	0,3	4	41,60	70,51	78,32	49622	117313
	P71	0,30	0,243	2,55	CC	0,95	1	1	4	66,08	106,06	121,21	47887	160127
	P72	0,25	0,261	4,14	CC	0,95	1	1	4	48,51	109,50	121,90	45703	164180
	P73	0,16	0,231	0,28	CC	0,95	1	1	4	74,73	115,23	123,05	52462	166987
	P81	0,34	0,348	8,17	CC	0,95	1	1	4	101,64	103,77	120,75	35776	171652
	P82	0,39	0,281	6,77	CC	0,95	1	1	4	113,53	100,33	120,07	43056	166960
	P83	0,49	0,344	8,75	CC	0,95	1	1	4	88,74	94,60	118,92	34226	162328
Type GSM	Lomé	0,50	0,232	0,36	CP	0,95	1	0,9	1	30,19	90,62	115,63	42167	134625
	P11	0,58	0,139	9,52	CS	0,95	0,2	0	1	24,39	33,33	62,50	36578	69938
	P12	0,54	0,207	0,54	CP	0,95	1	1	1	32,57	91,15	118,23	47591	135581
	P13	0,58	0,100	9,91	CS	0,95	0,1	0	1	37,19	29,69	58,85	48894	67317
	P41	0,50	0,192	8,85	CS	0,95	0,1	0	1	22,36	34,37	59,37	26810	71093
	P42	0,50	0,226	0,23	CP	0,95	1	1	1	33,52	93,75	118,75	44353	138284
	P43	0,50	0,140	9,53	CS	0,95	0,1	0	1	31,54	34,37	59,37	37636	72538
	P71	0,54	0,219	6,04	CP	0,95	1	1	1	64,45	91,15	118,23	46287	139909
	P72	0,58	0,226	7,28	CP	0,95	1	1	1	46,84	88,54	117,71	43395	135314
	P73	0,54	0,202	1,52	CP	0,95	1	1	1	71,80	91,15	118,23	50309	140200
P81	0,63	0,371	0,00	CC	0,95	1	1	2,1	98,64	85,94	117,19	37379	191261	

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Profil	Localité	γ_{en}	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	c_f	α_h	α_a	α_n	P_{GD} [kW]	P_c [kWc]	S_t [kWh]	E_{xt} [kWh]	Production énergétique annuelle [kWh]	LCC [\$]
	P82	0,63	0,249	9,67	CS	0,95	1	1	1	110,81	85,94	117,19	40489	138691
	P83	0,63	0,383	0,00	CC	0,95	1	1	2,1	87,45	85,94	117,19	36343	191646
Type PME/PMI	Lomé	1,00	0,148	5,88	CC	0,95	0,3	0	6	17,95	18,75	68,75	25077	51198
	P11	1,00	0,110	4,08	CC	0,95	0,5	0	7	31,71	31,25	81,25	47576	71957
	P12	1,00	0,149	8,03	CC	0,95	0,4	0,1	7	20,65	25,21	74,97	30248	62170
	P13	1,00	0,090	9,25	CP	0,95	0,9	0	6	67,13	56,25	106,25	88577	109319
	P41	1,00	0,148	1,28	CC	0,95	0,6	0	7	32,95	37,50	87,50	39580	80655
	P42	1,00	0,160	7,23	CC	0,95	0,4	0	7	21,17	25,00	75,00	28067	61843
	P43	1,00	0,119	0,77	CP	0,95	1	1	6	59,79	62,80	112,56	71720	117239
	P71	1,00	0,169	8,08	CC	0,95	0,5	0	7	44,24	31,40	81,16	31845	74299
	P72	1,00	0,168	9,52	CC	0,95	0,4	0	7	29,84	25,00	75,00	27860	64574
	P73	1,00	0,171	8,14	CC	0,95	0,9	0	7,00	64,53	56,25	106,25	45229	106358
	P81	1,00	0,283	9,35	CC	0,95	0,7	0	11,00	78,91	43,75	93,75	28684	111784
	P82	1,00	0,215	9,66	CC	0,95	0,9	0	6,00	100,47	56,25	106,25	36709	108662
	P83	1,00	0,296	9,05	CC	0,95	0,8	0,5	11	74,60	50,21	99,97	29735	121241

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Les figures 9 ; 10 et 11 présentent les variations respectivement du facteur de qualité de la demande énergétique, du LCOE et du LPSP du système optimal en fonction des localités. Ces variations témoignent de la prise en compte effective des réalités climatiques de chaque localité et de la précision de la méthode dans la recherche du système optimal.

Pour le Type Ménage, les valeurs du facteur de qualité de la demande énergétique varient de 0,00 à 0,49. Les valeurs les plus élevées sont observées à P83 ($\gamma_{en} = 0,49$), suivi de P82 ($\gamma_{en} = 0,39$) et P81 ($\gamma_{en} = 0,34$). Lomé, P41 et P42 montrent des valeurs plus basses ($\gamma_{en} = 0,00$), indiquant une moins bonne adéquation entre la demande énergétique pour les ménages et la disponibilité des ressources (voir figure 9-(a)).

Pour le Type GSM, les valeurs de facteur de qualité de la demande énergétique varient de 0,50 à 0,63. Les valeurs les plus élevées sont observées à P81, P82, et P83 ($\gamma_{en} = 0,63$), indiquant une excellente adéquation entre la demande énergétique et la disponibilité des ressources. Lomé et les autres localités montrent des valeurs intermédiaires ($\gamma_{en} = 0,50$ à 0,58) (voir figure 9-(b)). Toutes les localités pour le Type PME/PMI ont un facteur de qualité de la demande énergétique de 1, indiquant une parfaite adéquation entre la demande énergétique et la disponibilité des ressources (voir figure 9-(c)).



Figure 10 : Evolution du facteur de qualité, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

Pour le profil de type Ménage, le LCOE varie de 0,117 \$/kWh à 0,348 \$/kWh. Le LCOE pour Lomé est de 0,272 \$/kWh, légèrement plus élevé que dans les autres localités du même type (les localités présentant le même facteur de qualité). Les localités P11, P12, P13, P71 maintiennent des LCOE autour de 0,230 \$/kWh possiblement en raison d'une similitude climatique. Les localités situées à des latitudes plus élevées, telles que P81, P82, P83, présentent des LCOE légèrement plus élevés, autour de 0,340 \$/kWh, reflétant des conditions climatiques moins favorables (voir figure 10-(a)).

Les LCOE pour le type GSM sont généralement plus bas et uniformes que pour le Type Ménage. Par exemple, P11, P13, P71, P73 affichent des LCOE autour de 0,200 \$/kWh. Lomé et d'autres localités comme P42 et P43 montrent des LCOE légèrement plus élevés, environ 0,230 \$/kWh, possiblement influencés par des conditions locales variables (voir figure 10-(b)). Toutes les localités pour le type PME/PMI bénéficient de LCOE relativement bas, généralement inférieurs à 0,200 \$/kWh, ce qui témoigne d'une forte harmonisation entre la demande énergétique et la disponibilité de la ressource solaire. Les variations des LCOE sont minimales entre les différentes localités, ce qui souligne l'influence du facteur de qualité sur le coût de l'énergie du système (voir figure 10-(c)).

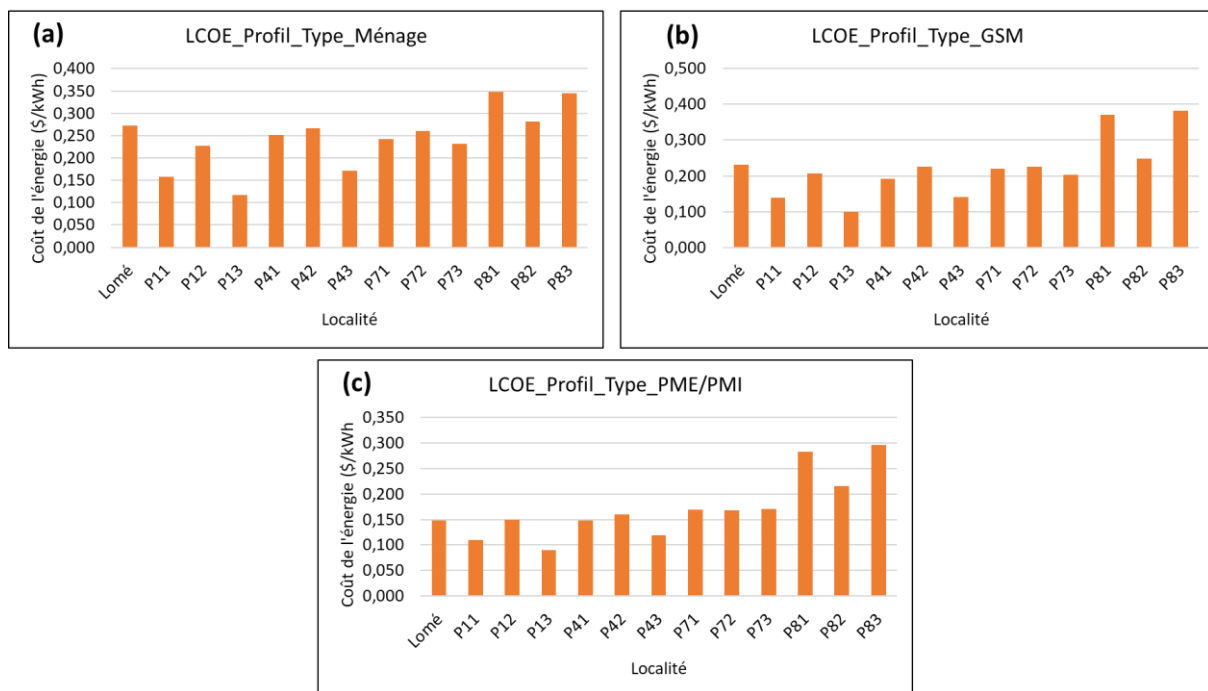


Figure 11 : Evolution du LCOE, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

Pour le profil type Ménage, à Lomé, le taux de délestage électrique est de 0,20 %. Les localités P11, P12, P42, et P73 maintiennent des LPSP de 0,14 % à 0,65 %. Les LPSP plus élevés sont observés dans les localités P71, P72, P81, P82, et P83 (jusqu'à 8,75 %) (voir figure 11-(a)).

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Pour le profil type GSM, le taux de délestage électrique varie significativement. A Lomé, le LPSP est de 0,36 %. P11, P13, P43, et P82 montrent des LPSP allant jusqu'à 9,91 %. Les autres localités comme P12, P41, P42, P71, P72, et P73 présentent des LPSP variés (jusqu'à 7,28 %) (voir figure 11-(b)).

Pour le profil type PME/PMI, le LPSP est de 5,88 % à Lomé. Les localités P41 et P43 affichent des LPSP de 1,28 % et 0,77 % respectivement. P11, P12 et P42 montrent des LPSP entre 4,08 % et 8,03 %. En revanche, P81, P82 et P83 présentent des LPSP plus élevés, allant de 8,08 % à 9,66 %. P13, P71, P72 et P73 montrent des LPSP de 8,08 % à 9,52 % (voir figure 11-(c)).

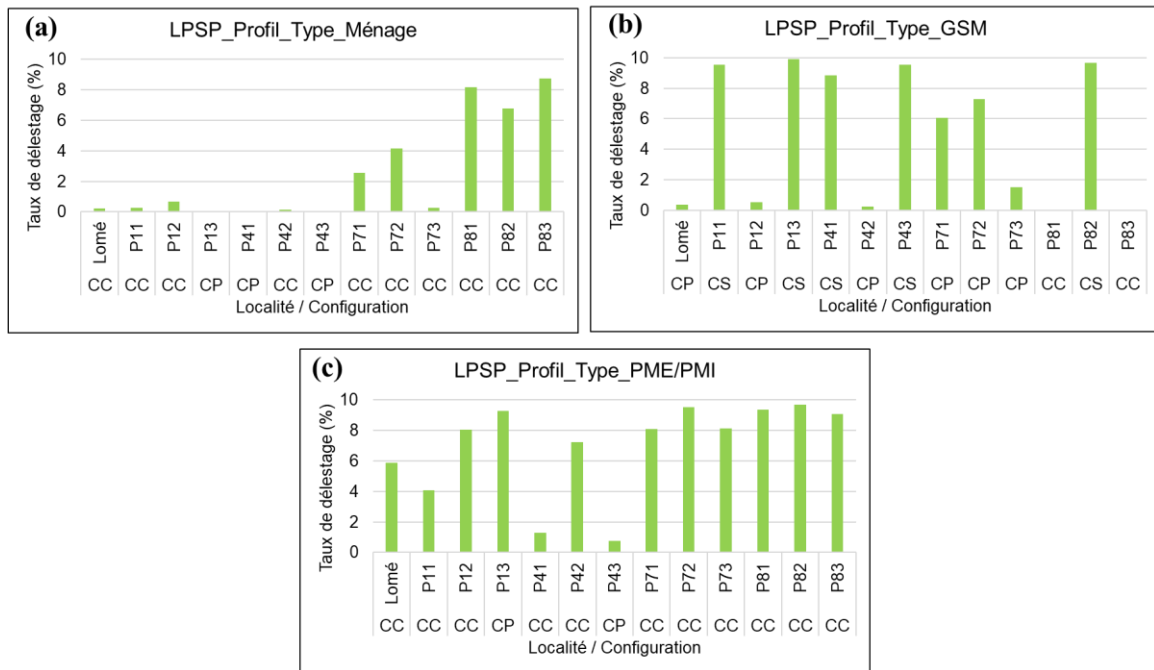


Figure 12 : Variation du LPSP, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

Les configurations en série (CS) tendent à présenter des LPSP plus élevés, indiquant une plus grande probabilité de délestage électrique, surtout pour les profils GSM dans les localités P11 et P13. Les configurations parallèles (CP) montrent généralement des LPSP plus faibles, tandis que les configurations commutées (CC) présentent une variabilité intermédiaire dans les LPSP, adaptées à différents profils de consommation et localités.

VI. ÉTUDE COMPARATIVE DES RESULTATS OBTENUS AVEC HOMER PRO

Dans cette section, nous comparons les résultats obtenus à l'aide de la nouvelle méthode de dimensionnement développé dans cette étude avec ceux générés par le logiciel HOMER Pro. Cette comparaison vise à démontrer la pertinence de la nouvelle approche de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel pour diverses localités et profils de consommation.

HOMER est l'un des logiciels les plus utilisés pour l'optimisation et la simulation des systèmes hybrides. Cependant, il permet de dimensionner qu'une seule configuration de système hybride PV/Diesel à la fois.

1. Présentation des résultats

Les résultats des deux approches sont détaillés dans les tableaux X. Ils comprennent les valeurs du LCOE (coût actualisé de l'énergie) en \$/kWh, les quantités d'énergie annuelle produite en kWh, le taux de délestage électrique, ainsi que les spécifications du générateur Diesel, du système PV (puissance crête), et de la capacité de stockage pour chaque profil et chaque localité.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Tableau X : Comparaison des résultats obtenus avec la nouvelle approche et ceux obtenus avec Homer Pro

Profil	Localité	Nouvelle approche						HOMER PRO					
		LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	Production annuelle [kWh]	P_{GD} [kW]	P_c [kWc]	S_t [kWh]	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	Production annuelle [kWh]	P_{GD} [kW]	P_c [kWc]	S_t [kWh]
Type Ménage	Lomé	0,272	0,20	45632	4	33	125	0,644	0	42123	7,9	28,3	96
	P11	0,158	0,27	70958	4	47	106	0,639	0	42469	7,9	24,4	96
	P12	0,228	0,65	48905	4	33	106	0,639	0	42589	7,9	25,4	96
	P13	0,117	0,00	84603	4	64	87	0,634	0	30556	7,9	15,7	96
	P41	0,252	0,00	36659	4	31	81	0,619	0	64600	7,9	56,7	136
	P42	0,266	0,14	46722	4	35	125	0,616	0	54809	7,9	43,8	136
	P43	0,172	0,00	49622	4	42	71	0,614	0	57400	7,9	46,8	136
	P71	0,243	2,55	47887	4	66	106	0,628	0	68791	7,9	55,8	136
	P72	0,261	4,14	45703	4	49	110	0,635	0	37724	7,9	19,8	96
	P73	0,231	0,28	52462	4	75	115	0,621	0	65008	7,9	55,3	136
	P81	0,348	8,17	35776	4	102	104	0,645	0	77489	7,9	83,1	120
	P82	0,281	6,77	43056	4	114	100	0,649	0	65159	7,9	64,7	116
	P83	0,344	8,75	34226	4	89	95	0,607	0	94887	7,9	95,6	116
Type GSM	Lomé	0,232	0,36	42167	1	30,2	91	0,320	0	48148	2,1	37,1	72
	P11	0,139	9,52	36578	1	24,4	33	0,317	0	49694	2,1	32,4	72
	P12	0,207	0,54	47591	1	32,6	91	0,316	0	49028	2,1	33,3	72
	P13	0,100	9,91	48894	1	37,2	30	0,306	0	39850	2,1	24,9	72
	P41	0,192	8,85	26810	1	22,4	34	0,327	0	54572	2,1	47,8	72
	P42	0,226	0,23	44353	1	33,5	94	0,323	0	54650	2,1	43,8	72
	P43	0,140	9,53	37636	1	31,5	34	0,322	0	53914	2,1	43,9	72
	P71	0,219	6,04	46287	1	64,5	91	0,331	0	59372	2,1	48,1	72
	P72	0,226	7,28	43395	1	46,8	89	0,311	0	46895	2,1	28,5	72
	P73	0,202	1,52	50309	1	71,8	91	0,331	0	54736	2,1	46,6	72

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Profil	Localité	Nouvelle approche						HOMER PRO					
		LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	Production annuelle [kWh]	P_{GD} [kW]	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	LCOE [\$/kWh]	LPSP [%]	P_c [kWc]	S_t [kWh]
	P81	0,371	0,00	37379	2,1	98,6	86	0,371	0	55596	2,1	58	60
	P82	0,249	9,67	40489	1	110,8	86	0,370	0	64702	2,1	63,7	60
	P83	0,383	0,00	36343	2,1	87,4	86	0,361	0	52087	2,1	51	64
Type PME/PMI	Lomé	0,148	5,88	25077	6	17,9	18,8	0,275	0	163506	12	126	4
	P11	0,110	4,08	47576	7	31,7	31,3	0,238	0	168779	12	111	4
	P12	0,149	8,03	30248	7	20,7	25,2	0,239	0	141385	12	96,2	4
	P13	0,090	9,25	88577	6	67,1	56,3	0,23	0	132026	12	82,6	4
	P41	0,148	1,28	39580	7	33,0	37,5	0,309	0	153808	12	137	4
	P42	0,160	7,23	28067	7	21,2	25,0	0,289	0	165416	12	132	4
	P43	0,119	0,77	71720	6	59,8	62,8	0,271	0	141215	12	115	4
	P71	0,169	8,08	31845	7	44,2	31,4	0,289	0	131852	12	106	4
	P72	0,168	9,52	27860	7	29,8	25,0	0,22	0	115357	12	70,2	4
	P73	0,171	8,14	45229	7	64,5	56,3	0,293	0	155558	12	133	4
	P81	0,283	9,35	28684	11	78,9	43,8	0,425	0	73425	12	77,5	44
	P82	0,215	9,66	36709	6	100,5	56,3	0,398	0	105233	12	105	24
P83	0,296	9,05	29735	11	74,6	50,2	0,361	0	93469	12	93,4	32	

2. Identification des tendances significatives et comparaison

➤ La fiabilité technique

Pour le profil de type ménage, la nouvelle approche et Homer Pro montrent des différences notables dans les taux de délestage LPSP. À Lomé, la nouvelle approche présente un LPSP de 0,2 %, tandis que Homer Pro n'a aucun délestage (LPSP de 0 %). Cette tendance se retrouve dans d'autres profils comme P11 et P12, où la nouvelle approche affiche des LPSP de 0,27 % et 0,65 % respectivement, contre un LPSP de 0 % pour Homer Pro. Toutefois, dans certains cas comme P13 et P41, la nouvelle approche parvient également à éliminer le délestage, tout comme Homer Pro.

Pour le profil de type GSM, les différences sont plus marquées. À Lomé, la nouvelle approche a un LPSP de 0,36 %, alors que Homer Pro n'en a pas (LPSP de 0 %). Dans le profil P11, la nouvelle approche présente un LPSP élevé de 9,52 %, contre 0 % pour Homer Pro. Des scénarios similaires se répètent pour les profils P12 et P13, où la nouvelle approche affiche des LPSP de 0,54 % et 9,91 % respectivement, contre un LPSP de 0 % pour Homer Pro.

Pour le profil de type PME/PMI, la nouvelle approche montre généralement des LPSP plus élevés comparés à Homer Pro. Par exemple, à Lomé, le LPSP de la nouvelle approche est de 5,88 %, tandis que Homer Pro ne présente aucun délestage (LPSP de 0 %). Dans les profils P11 et P12, la nouvelle approche affiche des LPSP de 4,08 % et 8,03 % respectivement, contre 0 % pour Homer Pro. Les profils P13 et P41 montrent des LPSP de 9,25 % et 1,28 % avec la nouvelle approche, tandis que Homer Pro maintient un LPSP de 0 % dans ces cas également.

Les résultats mettent en évidence des différences notables entre la nouvelle approche et Homer Pro, avec des taux de délestage LPSP atteignant jusqu'à 9,91 %. Malgré ces variations, les deux méthodologies permettent de concevoir des systèmes techniquement fiables.

➤ L'accessibilité économique via le LCOE

L'analyse comparative du LCOE entre la nouvelle approche et les résultats obtenus par Homer Pro permet d'identifier plusieurs tendances et différences clés pour les différents types de profils de consommation.

Pour le profil type ménage, la nouvelle approche montre systématiquement des LCOE inférieurs à ceux obtenus par Homer Pro. De plus, la production annuelle d'énergie est généralement plus élevée avec la nouvelle approche. Pour la localité de Lomé, la nouvelle approche présente un LCOE de 0,272 \$/kWh avec une production annuelle de 45 632 kWh. En comparaison, Homer Pro affiche un LCOE de 0,644 \$/kWh pour une production annuelle de 42 123 kWh. Ainsi, la nouvelle approche offre un LCOE de près de 60 % inférieur à celui de

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Homer Pro, tout en fournissant une production légèrement plus élevée. De plus, pour les localités P11 à P83, le LCOE de la nouvelle approche varie de 0,117 à 0,348 \$/kWh, tandis que celui de Homer Pro se situe entre 0,607 et 0,649 \$/kWh. La nouvelle approche présente donc des LCOE significativement plus bas, souvent de l'ordre de 50 % ou plus par rapport à Homer Pro. Quant à la production annuelle d'énergie, elle est généralement supérieure dans la nouvelle approche, avec des valeurs dépassant parfois les 80 000 kWh.

Comme pour les ménages, la nouvelle approche propose des LCOE inférieurs pour le profil type GSM. La production annuelle d'énergie est souvent légèrement inférieure à celle de Homer Pro, mais le LCOE reste plus avantageux. En effet, pour la localité de Lomé, la nouvelle approche présente un LCOE de 0,232 \$/kWh avec une production annuelle de 42 167 kWh. En comparaison, Homer Pro affiche un LCOE de 0,320 \$/kWh pour une production annuelle de 48 148 kWh. Le LCOE de la nouvelle approche est environ 28 % inférieur à celui de Homer Pro, bien que la production soit légèrement inférieure. Pour les douze autres localités, le LCOE varie de 0,100 à 0,371 \$/kWh pour la nouvelle approche, contre 0,306 à 0,331 \$/kWh pour Homer Pro. La nouvelle approche reste avantageuse, offrant des LCOE plus bas, malgré quelques cas où la production annuelle est inférieure à celle de Homer Pro.

Pour le profil type PME/PMI, la nouvelle approche présente des LCOE largement inférieurs à ceux de Homer Pro pour les PME/PMI. Cependant, la production annuelle d'énergie est significativement plus faible dans la nouvelle approche par rapport à Homer Pro. Pour le cas de Lomé, la nouvelle approche présente un LCOE de 0,148 \$/kWh avec une production annuelle de 25 077 kWh. En comparaison, Homer Pro affiche un LCOE de 0,275 \$/kWh pour une production annuelle de 163 506 kWh. Le LCOE est environ 46 % inférieur dans la nouvelle approche, mais la production est bien moindre. Quant au cas des localités de P11 à P83, le LCOE varie de 0,090 à 0,296 \$/kWh pour la nouvelle approche, contre 0,22 à 0,425 \$/kWh pour Homer Pro. La nouvelle approche offre des LCOE bien plus bas, mais souvent avec une production annuelle d'énergie plus faible.

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

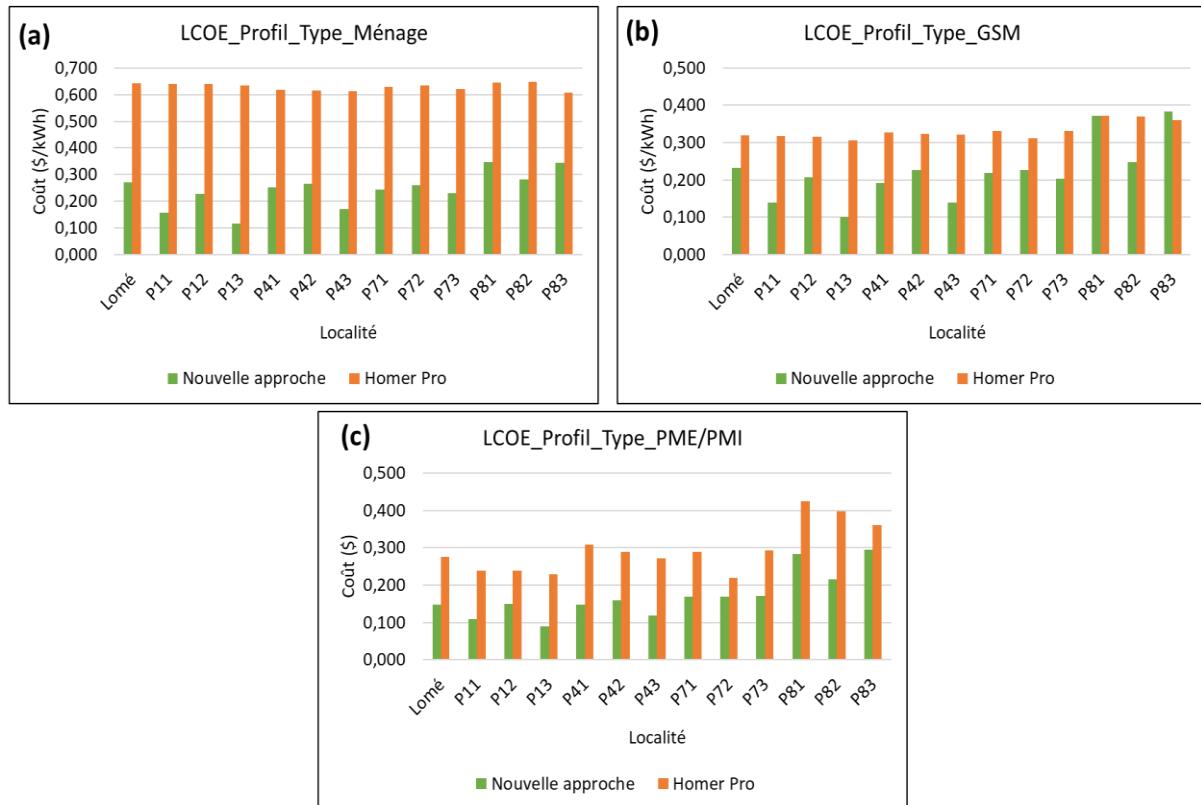


Figure 13 : Comparaison des LCOE, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

➤ **Production annuelle**

Pour le type ménage, les productions annuelles varient significativement entre la nouvelle approche et Homer Pro. Par exemple, pour le profil P13, le système proposé par la nouvelle approche produit 84603 kWh alors que celui proposé par Homer Pro produit seulement 30556 kWh. Les profils P41, P71, P81, et P83 montrent des différences marquées où Homer Pro produit significativement plus que la nouvelle approche.

La production annuelle pour le type GSM montre une certaine cohérence entre les deux approches, bien que des différences notables existent. Par exemple, pour le profil P41, la nouvelle approche produit 26810 kWh tandis qu'Homer Pro produit 54572 kWh. Certains profils comme P11, P12, et P71 montrent des valeurs relativement proches entre les deux approches.

Pour le type PME/PMI, les différences sont drastiques. Par exemple, le profil P83 montre une production de 29735 kWh avec la nouvelle approche contre 93469 kWh avec Homer Pro. En général, Homer Pro tend à montrer des productions beaucoup plus élevées que la nouvelle approche pour la majorité des profils, notamment pour les profils P11, P41, P42, et P43.

L'analyse comparative montre des écarts significatifs entre la nouvelle approche et Homer Pro, surtout pour les types PME/PMI et ménages. Ces différences peuvent être attribuées aux

méthodologies et aux paramètres utilisés dans chaque approche.

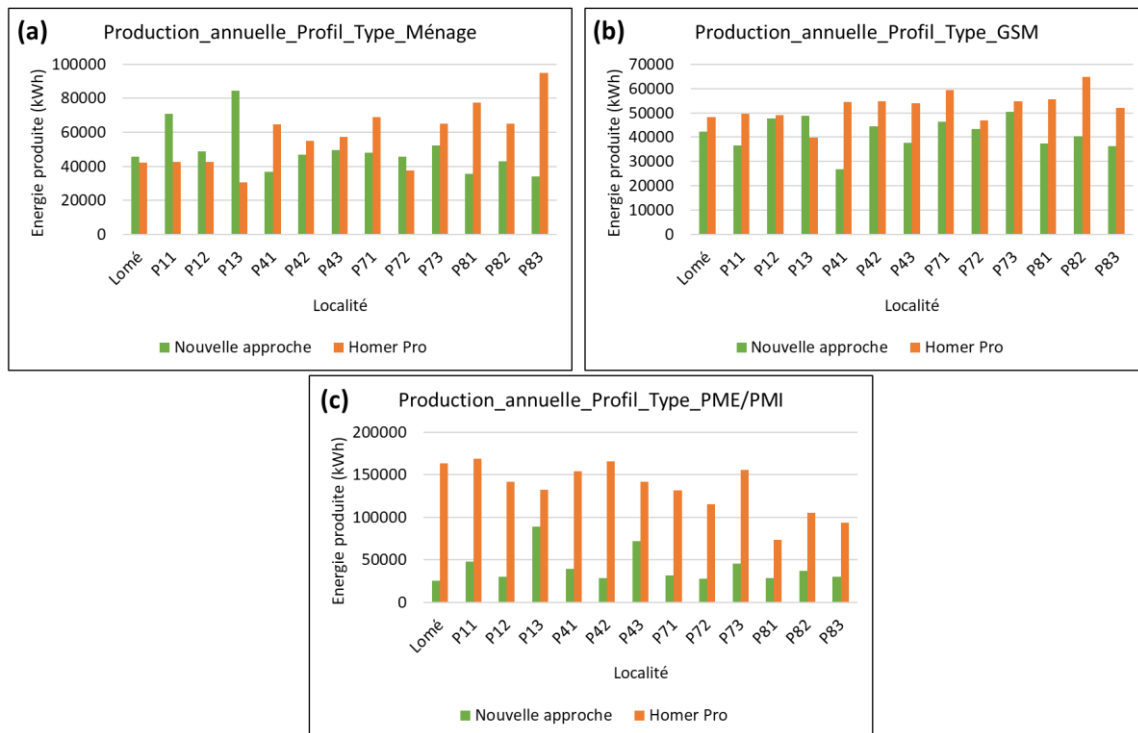


Figure 14 : Comparaison de la production annuelle, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

➤ **Taille des composants**

- **Générateur Diesel**

Pour le profil type ménage, la nouvelle approche utilise une puissance de 4 kW uniformément pour tous les profils, tandis que Homer Pro utilise une puissance de 7,9 kW, ce qui est presque le double.

Pour le profil type GSM, La nouvelle approche utilise 1 kW pour la plupart des profils, sauf quelques exceptions, tandis que Homer Pro utilise 2,1 kW pour tous les profils.

Pour le profil type PME/PMI, la nouvelle approche utilise des puissances de générateur plus faibles (par exemple, 6 kW pour Lomé) comparé à Homer Pro (12 kW pour la plupart des profils). La figure 14 présente les tailles de générateur Diesel proposées par les deux approches.

- **Puissance crête du champ**

Pour le profil type ménage, la nouvelle approche tend à utiliser des valeurs plus élevées pour certains profils (par exemple, P83 avec 89 kWc) comparé à Homer Pro (95,6 kWc).

Pour le profil type GSM, les valeurs varient considérablement entre les deux approches, avec la nouvelle approche tendant à utiliser des valeurs plus élevées pour certains profils (par exemple, P83 avec 87,4 kWc) par rapport à Homer Pro (51 kWc).

Pour le profil type PME/PMI, La nouvelle approche a tendance à utiliser des valeurs de

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

puissance crête plus basses pour certains profils (par exemple, P82 avec 100,5 kWc) par rapport à Homer Pro (105 kWc).

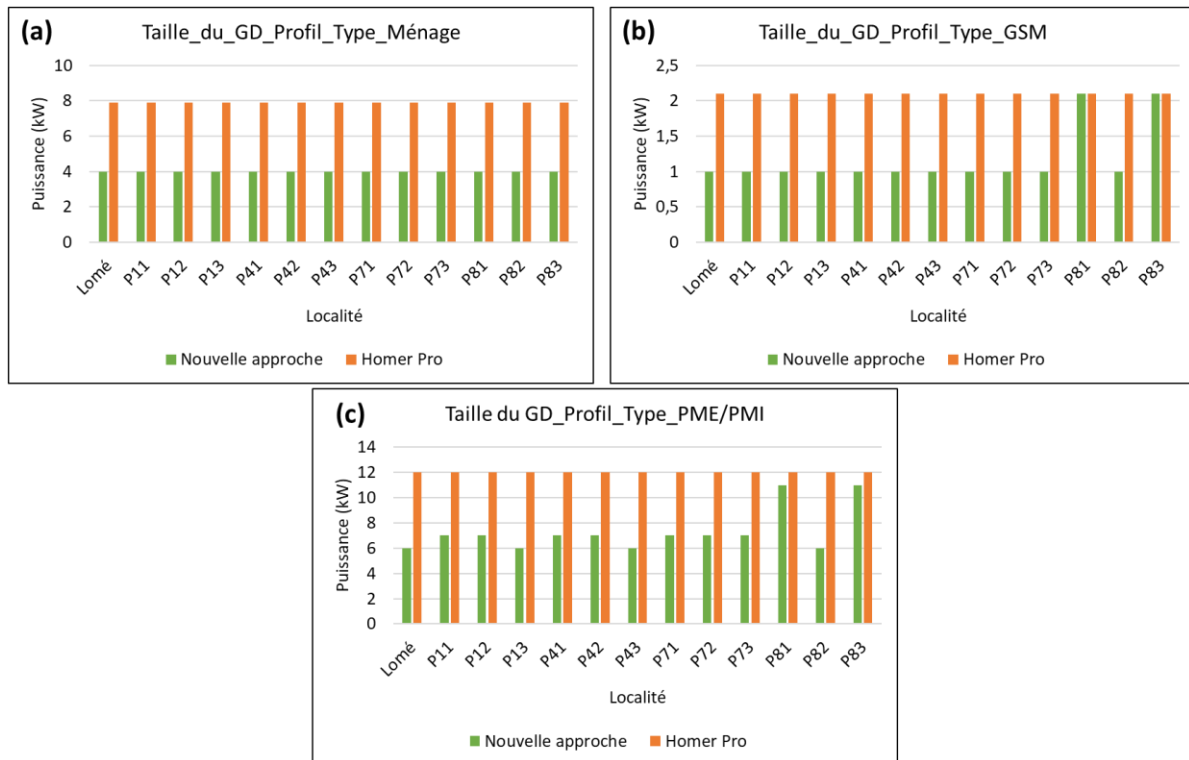


Figure 15 : Comparaison des générateur Diesel, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

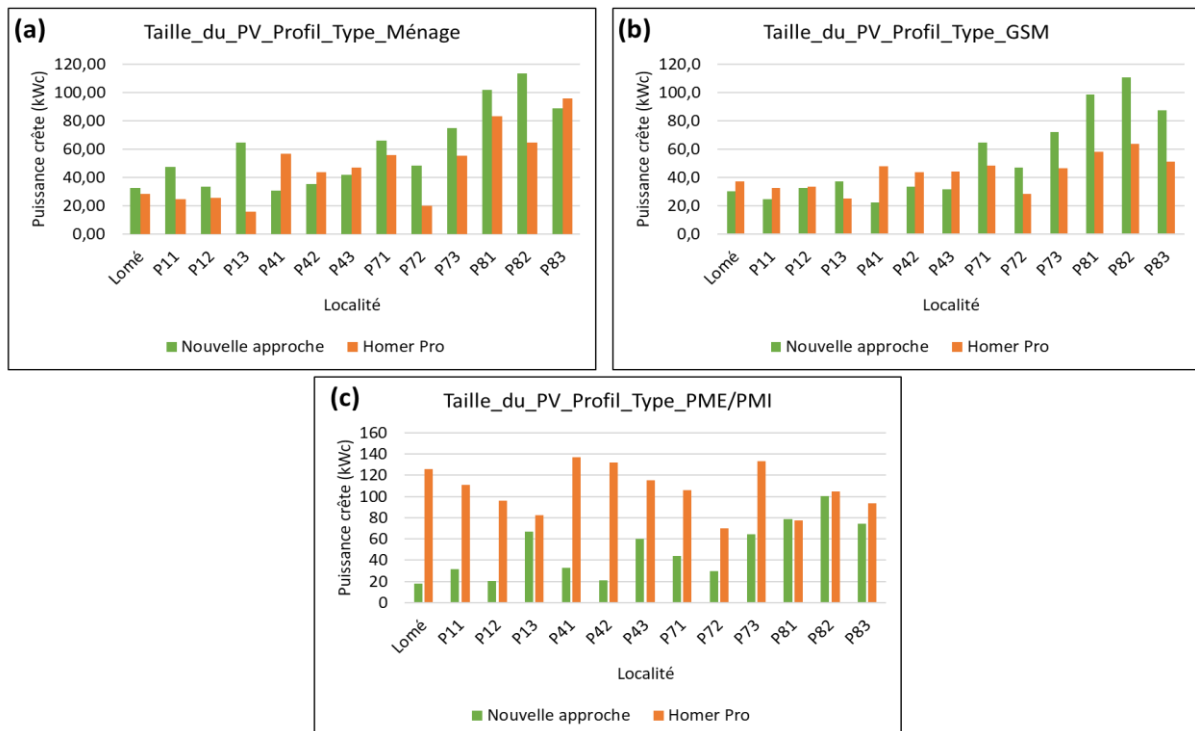


Figure 16 : Comparaison des puissances crêtes, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

- **Stockage**

Pour le profil type ménage, les valeurs de stockage varient, avec la nouvelle approche utilisant souvent des capacités de stockage plus élevées (par exemple, P82 avec 100 kWh) par rapport à Homer Pro (116 kWh).

Pour le profil type GSM, la nouvelle approche utilise souvent des capacités de stockage plus élevées pour certains profils (par exemple, P42 avec 94 kWh) par rapport à Homer Pro (72 kWh).

Pour le profil type PME/PMI, les valeurs de stockage varient, avec la nouvelle approche utilisant souvent des capacités de stockage plus élevées pour certains profils (par exemple, P82 avec 56,3 kWh) par rapport à Homer Pro.

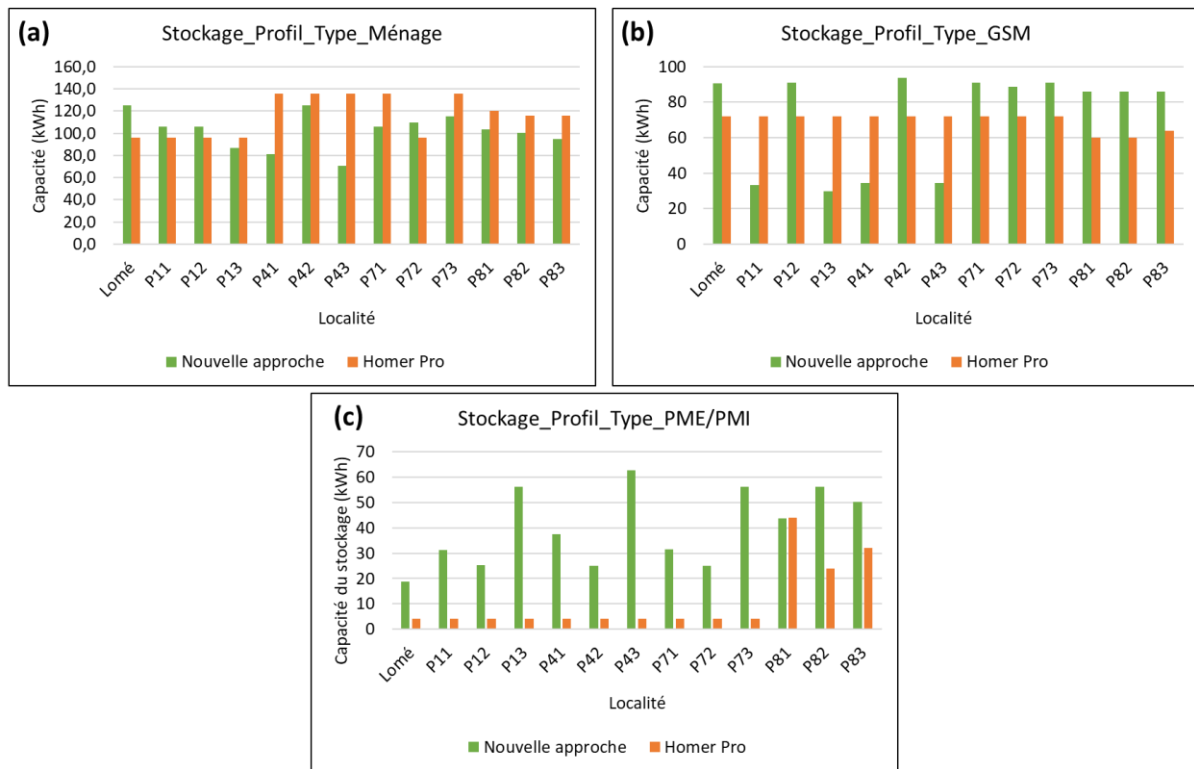


Figure 17 : Comparaison du stockage, (a) type ménage, (b) type GSM, (c) type PME/PMI

La nouvelle approche se concentre sur l'optimisation technico-économique, en explorant diverses tailles de générateurs Diesel. Homer Pro, en revanche, privilégie des générateurs de plus grande capacité et des puissances crête plus basses, ce qui pourrait indiquer une approche plus conservatrice mais potentiellement plus coûteuse.

VII. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

1. Interprétation des résultats de la simulation et des comparaisons

1.1. Résultats de la simulation

Ces résultats fournissent un aperçu des variations de coût de l'énergie pour différents profils de consommateurs dans la localité de Lomé, en mettant en évidence les facteurs de qualité de la demande énergétique et les implications sur le LCOE.

À la lumière de ces résultats :

- La localité P13 émerge comme celui offrant le LCOE le plus bas parmi les deux catégories de consommateurs (ménages et GSM), suggérant ainsi une option plus économique en termes de coût de l'énergie. Ces performances exceptionnelles peuvent s'expliquer par des conditions climatiques favorables, favorisant la production de la composante solaire, avec un fort ensoleillement et peu de nuages, et une localisation géographique à une latitude de $-33,98$, offrant un équilibre optimal entre les jours et les nuits tout au long de l'année.
- Les localités présentant un facteur de qualité (γ_{en}) de 0,30 semblent généralement afficher des LCOE plus bas que ceux avec un γ_{en} de 0,00 ou 0,50, ce qui pourrait indiquer une demande énergétique potentiellement plus stable.
- Une tendance semble se dessiner où les profils avec un γ_{en} de 0,16 montrent des LCOE relativement bas, bien que cette observation ne soit pas uniforme pour tous les profils.
- Les localités avec un γ_{en} compris entre 0,34 et 0,49 présentent des LCOE plus élevés, suggérant peut-être une demande énergétique plus complexe ou sujette à des fluctuations.

La configuration optimale varie suivant les différents profils de consommation et les localités, ce qui démontre l'efficacité de la méthode dans la sélection des configurations les plus appropriées. La configuration commutée se présente comme meilleure pour le profil type Ménage dans la plupart des localités.

Ces données soulignent l'importance de prendre en compte à la fois le facteur de qualité de la demande énergétique et la configuration du système pour obtenir des coûts d'énergie optimaux pour différents profils.

La configuration optimale varie suivant les différents profils de consommation et les localités, ce qui démontre l'efficacité de la méthode dans la sélection des configurations les plus

appropriées.

1.2. Résultats de la comparaison

Les résultats de simulation montrent que la nouvelle approche offre des avantages économiques et opérationnels notables par rapport à Homer Pro. Les principales améliorations incluent un LCOE plus bas, une meilleure production d'énergie pour les ménages, une puissance du générateur Diesel réduite, une puissance crête PV optimisée pour les ménages, et une capacité de stockage accrue. Ces avantages rendent les systèmes énergétiques plus abordables et plus durables, bien que des optimisations supplémentaires soient nécessaires pour maximiser la satisfaction de la demande énergétique pour les profils type GSM et PME/PMI.

2. Implication des résultats pour la conception et l'optimisation des systèmes hybrides PV/Diesel

Les résultats de la simulation la nouvelle approche et des comparaisons avec Homer Pro pour les systèmes hybrides PV/Diesel ont plusieurs implications importantes pour la conception et l'optimisation de ces systèmes :

- **Optimisation économique** : La nouvelle approche démontre une réduction significative du LCOE par rapport à Homer Pro. Cela indique que l'utilisation de cette méthode dans la conception des systèmes hybrides PV/Diesel peut conduire à une meilleure accessibilité économique.
- **Optimisation technique** : La nouvelle approche présente avec précision le taux de délestage engendré par le système proposé. Cette approche permet d'optimiser l'efficacité opérationnelle, de réduire les coûts et d'améliorer la satisfaction des consommateurs, ce qui en fait un outil précieux pour les planificateurs et les opérateurs de systèmes énergétiques.
- **Maximisation de la production d'énergie** : Les résultats montrent que la nouvelle approche tend à augmenter la production d'énergie pour les profils de consommation nocturne (type ménage), ce qui peut être attribué à une meilleure utilisation des capacités photovoltaïques tant pour la recharge du parc de batterie que pour l'alimentation directe des charges électriques.
- **Réduction de la dépendance au Diesel** : La nouvelle approche propose généralement une puissance de générateur Diesel plus faible par rapport à Homer Pro. Cela suggère une plus grande reliance sur des sources d'énergie renouvelables, réduisant ainsi les émissions de carbone et les coûts opérationnels liés à l'utilisation

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

des générateurs Diesel. Les concepteurs de systèmes hybrides PV/Diesel peuvent donc envisager d'adopter cette approche pour une transition plus efficace vers des solutions énergétiques durables.

- **Optimisation de la puissance crête et de la taille du stockage :** La nouvelle approche utilise souvent des puissances crête plus élevées et des tailles de stockage plus grandes, offrant ainsi une plus grande flexibilité pour gérer les fluctuations de production et de demande d'énergie. Cela peut contribuer à une meilleure stabilité énergétique et à une réduction de la nécessité de solliciter régulièrement la production des générateurs Diesel, tout en maximisant l'utilisation des sources renouvelables.

VIII. CONCLUSION

En conclusion, ce travail a présenté une approche novatrice de dimensionnement des systèmes hybrides PV/Diesel, visant à améliorer leur accessibilité économique et leur fiabilité technique. Dans cette optique, diverses configurations de systèmes hybrides ont été étudiées, ainsi que les méthodes et outils existants de dimensionnement.

Nos travaux ont constitué à mettre en évidence les avantages et les limites des configurations de systèmes hybrides PV/diesel, ainsi que des méthodes traditionnelles de dimensionnement et outils logiciels pour ensuite proposer une nouvelle méthode de dimensionnement, intégrant des notions clés tels que le facteur de qualité de la demande énergétique, le paramètre de configuration de système, le taux de pénétration solaire et les facteurs de sécurité du stockage. En mettant en œuvre cette nouvelle approche sur des cas d'étude spécifiques, nous avons pu démontrer son efficacité à travers des simulations et des analyses approfondies. De plus, nous avons comparé les résultats obtenus avec la nouvelle méthode à ceux générés par un outil de dimensionnement conventionnel, Homer Pro, afin de mettre en lumière les avantages de cette approche. Cette dernière se révèle être plus pertinente pour la conception des systèmes hybrides PV/Diesel.

IX. RECOMMANDATIONS & PERSPECTIVES

En perspectives, plusieurs pistes de recherche et de développement peuvent être envisagées pour approfondir et étendre l'impact de la nouvelle méthode de dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel :

- **Analyse de sensibilité des coûts des composants** : Une étude approfondie sur l'impact des coûts des composants, tels que les panneaux solaires, les batteries et les générateurs diesel, sur la performance et la rentabilité des systèmes hybrides. Cela permettrait de mieux comprendre les facteurs économiques qui influent sur les facteurs de dimensionnement tels que le taux de pénétration solaire, les facteurs de sécurité du stockage, le LCOE.
- **Implémentation dans un outil logiciel dédié** : Le développement d'un outil logiciel spécialisé basé sur la nouvelle méthode de dimensionnement permettrait aux utilisateurs de bénéficier d'une interface conviviale et d'automatiser le processus de conception des systèmes hybrides PV/diesel. Cela faciliterait l'adoption et l'utilisation de la méthode par les ingénieurs et les planificateurs énergétiques.
- **Intégration de critères de durabilité et d'impact environnemental** : Élargir la méthodologie pour inclure des critères de durabilité et d'impact environnemental dans le dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel. Cela pourrait impliquer une optimisation en fonction des émissions de carbone et de l'empreinte écologique.
- **Conception et mise en œuvre d'un banc d'essai expérimental** : Développer un banc d'essai expérimental pour simuler et évaluer les performances des systèmes hybrides PV/diesel dans des conditions contrôlées. Cela permettra de valider l'approche dans le cadre d'une thèse.

En explorant ces perspectives, il serait possible de consolider et d'améliorer encore la méthode de dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie dans divers contextes.

X. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Banque mondiale, AIE, et IRENA, « Global Tracking Framework 2017 - Progress Toward Sustainable Energy », World Bank, 2017. Consulté le : 26 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/global-tracking-framework-2017>
- [2] V. Zapata, A. Dagnachew, O. Edelenbosch, et D. van Vuuren, « Global pathways to achieve universal electricity access in 2030 », Copernicus Meetings, EGU23-17364, févr. 2023. doi: 10.5194/egusphere-egu23-17364.
- [3] Banque mondiale, « World Bank Open Data », World Bank Open Data. Consulté le : 5 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://data.worldbank.org>
- [4] A. D. Bank, « Éclairer l’Afrique et l’alimenter en énergie - Le “New Deal” pour l’énergie en Afrique », Banque africaine de développement - Faire la différence. Consulté le : 3 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.afdb.org/fr/the-high-5/light-up-and-power-africa-%E2%80%93-a-new-deal-on-energy-for-africa>
- [5] E. Ogunniyi and C. Pienaar, « Paradox of Africa’s Renewable Energy Potentials and Quest towards Powering Africa », *2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Abuja, Nigeria, 2019, pp. 556-562, doi: 10.1109/PowerAfrica.2019.8928927.
- [6] V. Lazarov, G. Notton, Z. Zarkov, et I. Bochev, « Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources – Types, Structures, Trends for Research and Development », présenté à Proc of Intl Conf, sept. 2005.
- [7] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, et M. Jaszczur, « A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications », *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101621, déc. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101621.
- [8] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d’énergie renouvelables », phdthesis, Université Pascal Paoli, 2011. Consulté le : 9 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00653412>
- [9] G. A. Koucoï, « Gestion d’énergie dans les systemes hybrides pv/diesel pour zones isolees et rurales : optimisation et experimentation », Institut International D’ingenierie De L’eau Et De L’environnement, 2017.
- [10] D. B. Tsuanyo, « Approches technico-économiques d’optimisation des systèmes énergétiques décentralisés : cas des systèmes hybrides PV/Diesel ».
- [11] Y. Azoumah, « Le concept flexy-energy : une solution durable pour l’indépendance énergétique des zones rurales et peri-urbaines en Afrique subsaharienne », *Liaison énergie francophonie*, n° 87, p. 27-31, 2011.
- [12] D. Yamegueu Nguewo, « Experimentation et optimisation d’un prototype de centrale hybride solaire PV/Diesel sans batteries de stockage : validation du concept « Flexy Energy » », Université De Perpignan, 2012.
- [13] C. Ammari, D. Belatrache, B. Touhami, et S. Makhloufi, « Sizing, optimization, control and energy management of hybrid renewable energy system—A review », *Energy and Built Environment*, vol. 3, n° 4, p. 399-411, oct. 2022, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.04.002.
- [14] Nyong-Basseyy B. Etim, « Critical Investigation of Sizing Methods for Renewable Energy Systems Microgrid. », *East African journal of engineering*, vol. 5, n° 1, p. 102-112, mai 2022, doi: 10.37284/eaje.5.1.647.
- [15] N. Lazaar, « Optimisation des alimentations électriques des Data Centers », phdthesis, Normandie Université ; Université Moulay Ismaïl (Meknès, Maroc), 2021. Consulté le :

NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES
HYBRIDES PV/DIESEL

- 18 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-03176623>
- [16] A. Kébé, « Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal », Université Paris Sud, Paris XI, 2013.
- [17] S. Sinha et S. S. Chandel, « Review of software tools for hybrid renewable energy systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, p. 192-205, avr. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.035.
- [18] O. O. Babayomi *et al.*, « A review of renewable off-grid mini-grids in Sub-Saharan Africa », *Front. Energy Res.*, vol. 10, janv. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2022.1089025.
- [19] Y. K. Azoumah, A. K. Tossa, et J.-C. K. Messan, « Renewable Energy Sizing method for off-grid fluctuating energy systems ».
- [20] Godfred Tay et al, « Optimal sizing and techno-economic analysis of a hybrid solar PV/wind/diesel generator system », p. 8; 9, doi: 10.1088/1755-1315/1042/1/012014.
- [21] S. Silvestre, « Review of System Design and Sizing Tools », in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, Elsevier, 2018, p. 715-734. doi: 10.1016/B978-0-12-809921-6.00018-5.

XI. ANNEXES

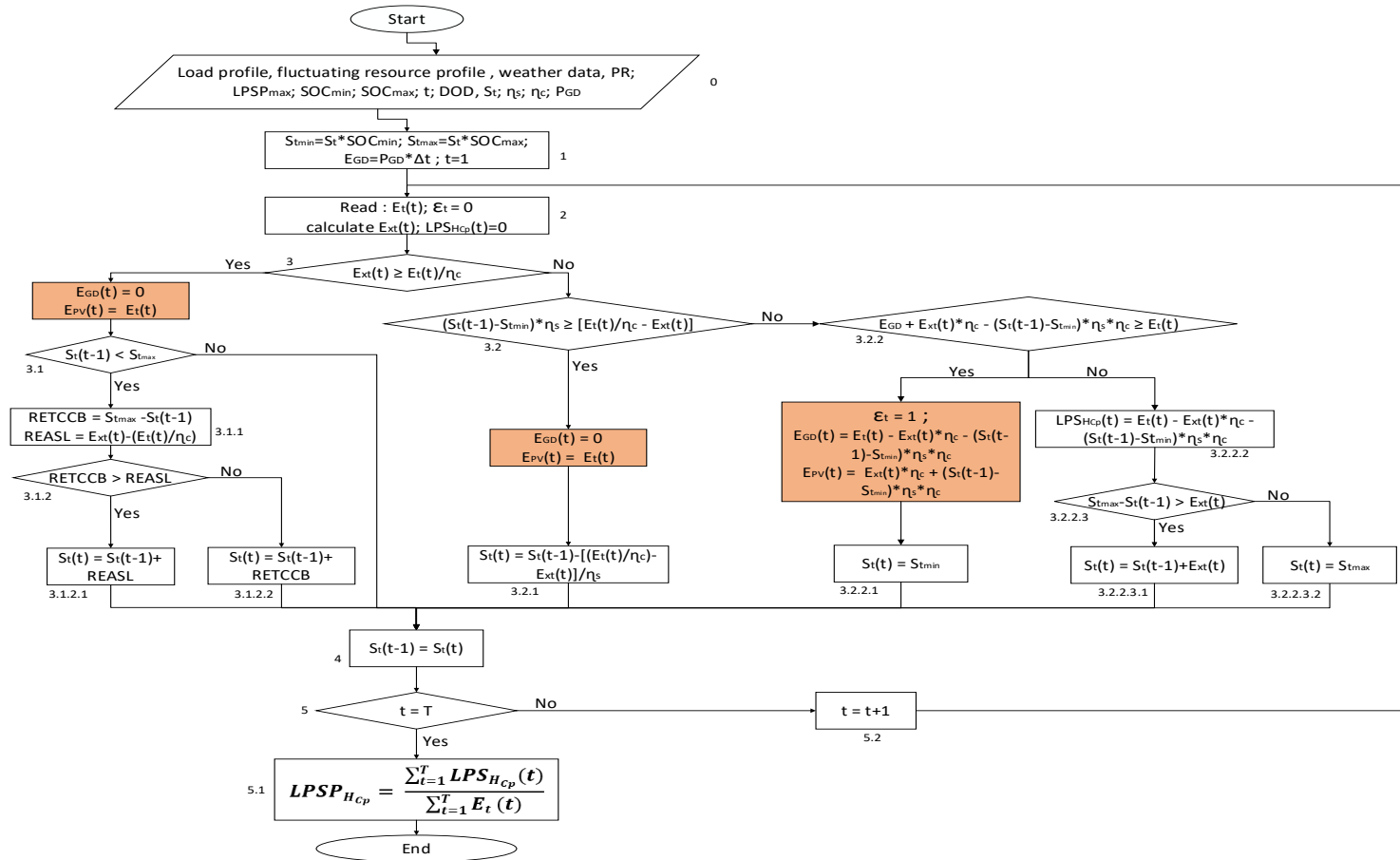
Sommaire des annexes

Annexe I : Algorithmes utilisé pour le calcul du LPSP des différentes configurations..... 56

Annexe II : Profil de la ressource solaire dans les différentes localités 62

Annexe I : Algorithmes utilisé pour le calcul du LPSP des différentes configurations

➤ Configuration parallèle



RETCCB : Energie nécessaire pour charger complètement les batteries ;

REASL : Reste de l'énergie après alimentation des charges.

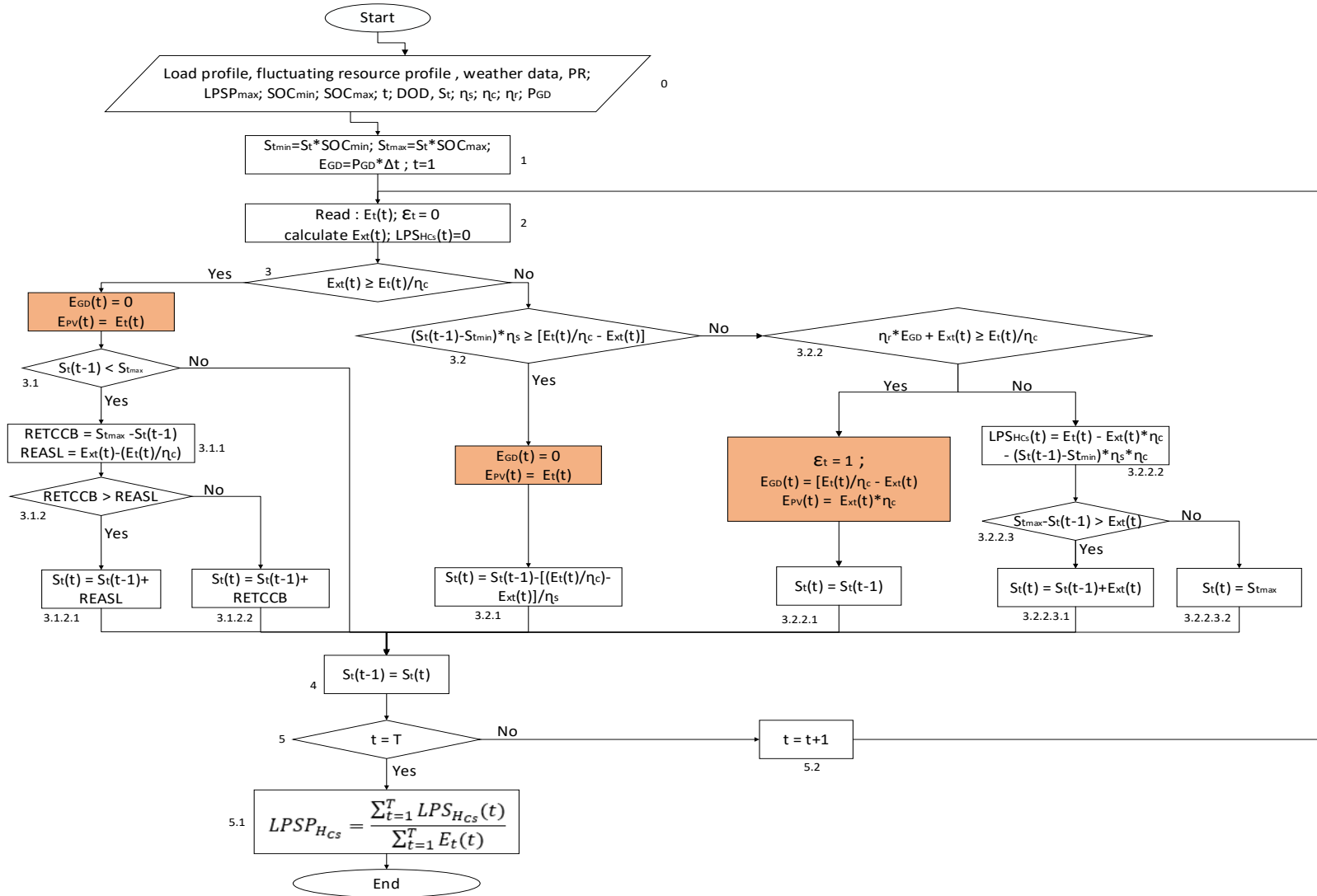
NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Description du diagramme :

Après avoir défini les paramètres d'entrée (étape 0) et initialisé les variables (étape 1), la simulation débute avec la lecture de la demande énergétique à l'instant t , le calcul de la production d'énergie des modules PV et l'initialisation du LSP de l'instant t (étape 2). Ensuite, l'énergie produite est comparée à la demande énergétique (étape 3). Si elle est supérieure à la demande, le surplus d'énergie peut être stocké après vérification du niveau de stockage (étape 3 à étape 3.1.2.2). Cependant, si la demande est supérieure à l'énergie produite, le stockage est sollicité en appui, et l'on procède à la comparaison de la demande avec la combinaison de l'énergie produite et celle stockée (étape 3.2). Si la demande est inférieure à ce cumul d'énergie, le stockage se décharge (étape 3.2.1). Si la demande est supérieure au cumul d'énergie, le système associe le générateur diesel.

La puissance demandée est ensuite comparée à la puissance maximale que le système est capable de fournir (étape 3.2.2). Si elle excède cette puissance, le générateur Diesel est maintenu à l'arrêt, et le déficit d'énergie est considérée satisfaisable (étape 3.2.2.2). Dans le cas contraire, la demande énergétique est satisfaite. L'étape suivante est la mise à jour du niveau du stockage (étape 4), puis la vérification du temps de la simulation (étape 5). Tant que la dernière heure de la simulation n'est pas atteinte, le processus se poursuit avec l'heure suivante (étape 5.2). Une fois la dernière heure atteinte, l'étape final est le calcul du taux de délestage (étape 5.1), en faisant le rapport du besoin total considéré comme non satisfait sur le besoin total à satisfaire pendant la durée de la simulation, soit 8760 heures.

➤ Configuration série



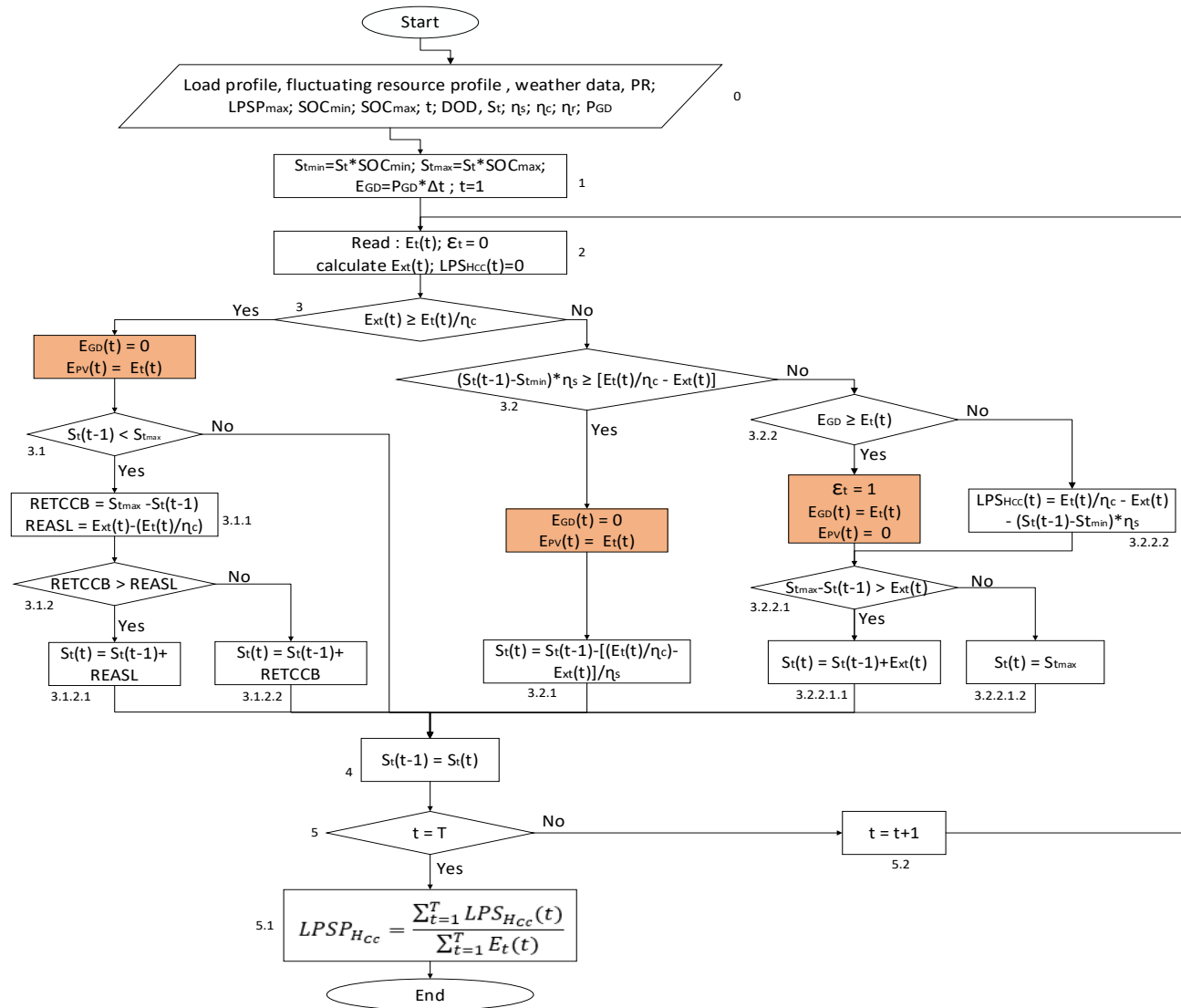
NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

Description du diagramme :

Après avoir défini les paramètres d'entrée (étape 0) et initialisé les variables (étape 1), la simulation débute avec la lecture de la demande énergétique à l'instant t , le calcul de la production d'énergie des modules PV et l'initialisation du LSP de l'instant t (étape 2). Ensuite, l'énergie produite est comparée à la demande énergétique (étape 3). Si elle est supérieure à la demande, le surplus d'énergie peut être stocké après vérification du niveau de stockage (étape 3 à étape 3.1.2.2). Cependant, si la demande est supérieure à l'énergie produite, le stockage est sollicité en appui, et l'on procède à la comparaison de la demande avec la combinaison de l'énergie produite et celle stockée (étape 3.2). Si la demande est inférieure à ce cumul d'énergie, le stockage se décharge (étape 3.2.1). Si la demande est supérieure au cumul d'énergie, le générateur Diesel est sollicité.

La puissance demandée est ensuite comparée à la somme du productible et de la puissance maximale que le générateur Diesel est capable de fournir en tenant compte du rendement du redresseur (étape 3.2.2). Si elle excède cette somme, ce générateur Diesel est maintenu à l'arrêt (étape 3.2.2.2), et le déficit d'énergie est considéré insatisfaisable (étape 3.2.2.2). Cependant, si cette puissance est inférieure ou égale au cumul d'énergie, la demande énergétique est satisfaite. L'étape suivante est la mise à jour du niveau du stockage (étape 4), puis la vérification du temps de la simulation (étape 5). Tant que la dernière heure de la simulation n'est pas atteinte, le processus se poursuit avec l'heure suivante (étape 5.2). Une fois la dernière heure atteinte, l'étape finale est le calcul du taux de délestage (étape 5.1), en faisant le rapport du besoin total considéré comme non satisfait sur le besoin total à satisfaire pendant la durée de la simulation, soit 8760 heures.

➤ Configuration commutée



NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL

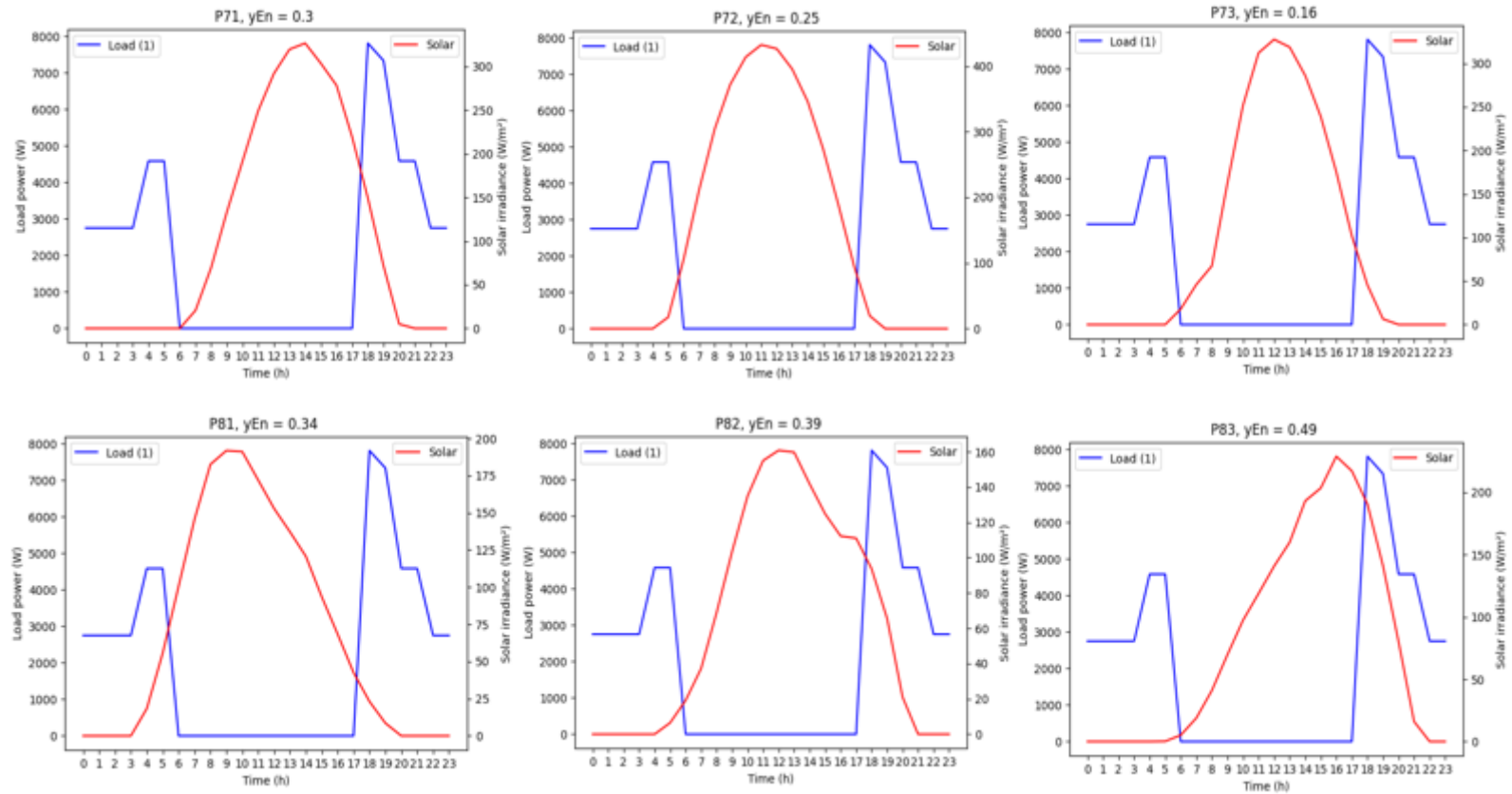
Description du diagramme :

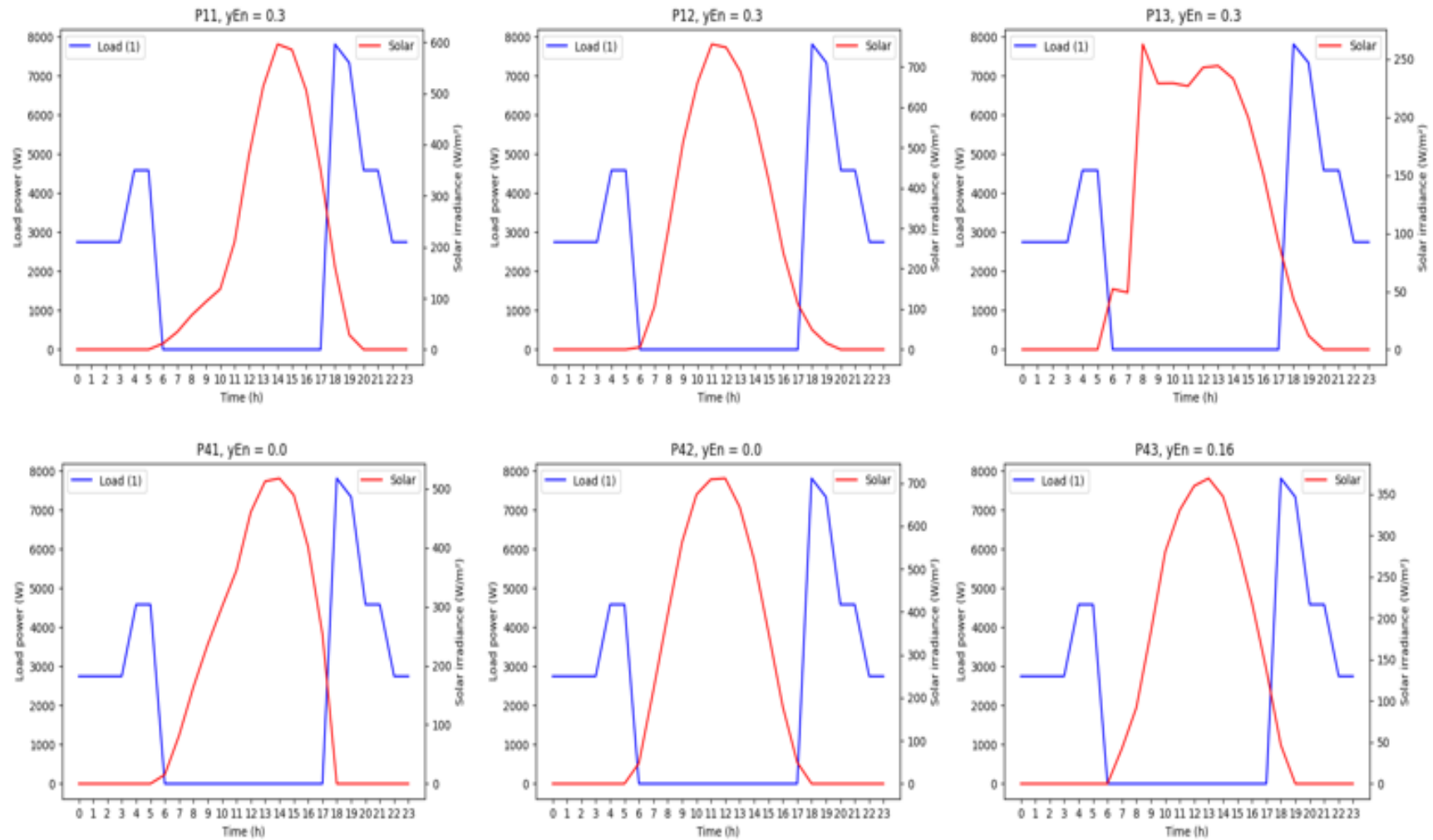
Après avoir défini les paramètres d'entrée (étape 0) et initialisé les variables (étape 1), la simulation débute avec la lecture de la demande énergétique à l'instant t , le calcul de la production d'énergie des modules PV et l'initialisation du LSP de l'instant t (étape 2). Ensuite, l'énergie produite est comparée à la demande énergétique (étape 3). Si elle est supérieure à la demande, le surplus d'énergie peut être stocké après vérification du niveau de stockage (étape 3 à étape 3.1.2.2). Cependant, si la demande est supérieure à l'énergie produite, le stockage est sollicité en appui, et l'on procède à la comparaison de la demande avec la combinaison de l'énergie produite et celle stockée (étape 3.2). Si la demande est inférieure à ce cumul d'énergie, le stockage se décharge (étape 3.2.1). Si la demande est supérieure au cumul d'énergie, le système bascule sur le générateur diesel.

La puissance demandée est ensuite comparée à la puissance maximale que le groupe est capable de fournir (étape 3.2.2). Si elle excède la capacité du générateur diesel, ce dernier ne peut pas fonctionner (étape 3.2.2.2), et le déficit d'énergie est considérée insatisfaisable (étape 3.2.2.2). Cependant, si cette puissance est inférieure ou égale à la puissance du générateur diesel, la demande énergétique est satisfaite. L'étape suivante est la mise à jour du niveau du stockage (étape 4), puis la vérification du temps de la simulation (étape 5). Tant que la dernière heure de la simulation n'est pas atteinte, le processus se poursuit avec l'heure suivante (étape 5.2). Une fois la dernière heure atteinte, l'étape final est le calcul du taux de délestage (étape 5.1), en faisant le rapport du besoin total considéré comme non satisfait sur le besoin total à satisfaire pendant la durée de la simulation, soit 8760 heures.

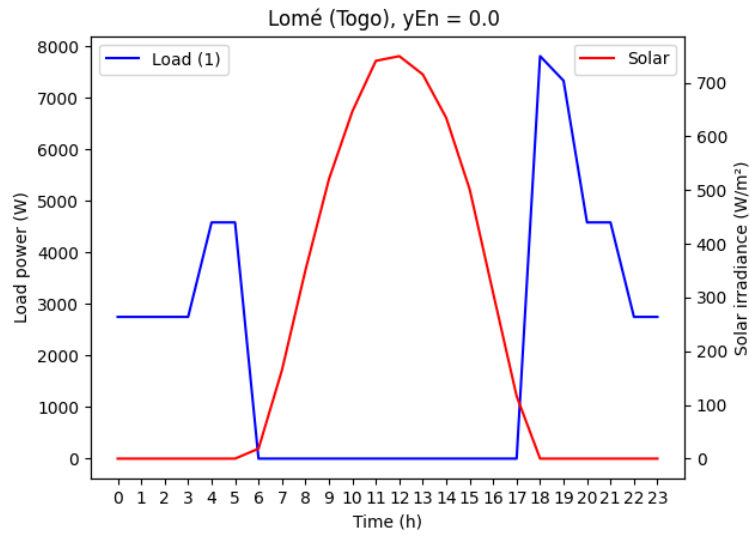
Annexe II : Profil de la ressource solaire dans les différentes localités

Les courbes de couleur de rouge représentent le profil journalier de l'ensoleillement dans la localité indiqué ; celles de couleur bleu représente le profil de charge journalier.





NOUVELLE APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT OPTIMAL DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL



Ces profils montrent la variation de l'irradiance solaire sur une surface donnée de chacune des localité tout au long d'une journée. Ils permettent donc de qualifier le besoin énergétique en fonction des horaires de disponibilité de la ressource.

