

Electrification d'une charge isolée d'agriculture par hybridation énergétique

A. Haffaf^{1*}, F. Lakdja² et D. Ould Abdeslam³

¹ Laboratoire de Génie Electrotechnique, Département d'Electrotechnique
Faculté de Technologies, Université de Saida, 20000 Algérie

² Laboratoire ICEPS, Département d'Electrotechnique
Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 22000 Algérie

³ IRIMAS Laboratory, Haute Alsace University, Mulhouse, France

(reçu le 31 Janvier 2019 - accepté le 20 Mars 2019)

Résumé - L'étude de faisabilité et la conception optimale d'un système énergétique hybride pour fournir de l'énergie électrique à un site éloigné de M'Sila est examinée dans ce papier. Le but de ce document est de concevoir et de simuler un mini-réseau hybride PV/batterie optimal qui fonctionne d'une manière fiable, afin d'assurer une alimentation électrique ininterrompue. En raison de la nature intermittente des ressources renouvelables, un générateur diesel y est ajouté. Afin de réaliser l'étude de faisabilité du système hybride, la conception optimale du système est basée sur un modèle de simulation développé par le logiciel Homer®. Le logiciel est utilisé pour l'évaluation technique, économique et environnementale. Le concept de la probabilité de perte d'énergie (LPSP) est supposé nul (DPSP = 0 % signifie que la charge est toujours satisfaite), avec un coût net actuel total (TNPC) et un coût énergétique (LCOE) minimal. Dans ce contexte, un profil de charge pratique du site est utilisé avec des données météorologiques réelles. Les résultats de l'optimisation catégorisée montrent que, dans le cas d'une consommation de 9.8 kWh/jour, le système hybride PV/DG/Batterie peut être considéré économique dans le cas où le prix du diesel ne fluctue pas. Le système optimal est composé d'un module PV de 3 kW, d'un générateur diesel de 1 kW, d'un convertisseur de 2 kW et de 4 batteries modèle Hoppecke. D'après les résultats obtenues, la configuration est économique avec un coût en capital de 5.656 \$, un coût d'exploitation annuel de 431 \$/an, un coût net actuel de 11.159 \$/an et un coût unitaire d'énergie de 0.244 \$/kWh avec une fraction d'énergie renouvelable de 86 % et une réduction plus de 90.79% dans les émissions.

Abstract - The feasibility study and optimal design of a hybrid energy system to provide electrical power in a remote site at M'Sila site is examined in this paper. The purpose of this work is to design and simulate an optimal PV/battery hybrid mini-grid system for reliable operation. In order to ensure uninterrupted power supply and due to the intermittent nature of renewable resources, a diesel generator is added. In order to carry out the feasibility study of the hybrid system, the optimal design is based on a simulation model developed by Homer software. The software is used for technical, economic and environmental evaluation. The Loss of Power Supply Probability concept is assumed to be zero (LPSP = 0 % means that the load is always satisfied), with minimal total net present cost (TNPC) and cost of energy (LCOE). In this context, a practical site load profile is used with real weather data. The results of the categorized optimization show that, with the consumption of 9.8 kWh/day, the PV/DG/Battery hybrid system can be considered economical in the case where the price of diesel does not fluctuate. The optimal system consists of a 3 kW PV module, 1 kW diesel generator, a converter of 2 kW and 4 batteries type Hoppecke. Based on the results obtained, the configuration is economical with a capital cost of 5.656 \$, an annual operating cost of 431 \$/year, net present cost of 11.159 \$/year and LCOE of 0.244 \$/kWh with a renewable energy fraction of 86% and a reduction of over 90 % in term of emissions.

Mots-clés: Système énergétique hybride - Système PV/Diesel - Faisabilité - Optimisation
- Coûts énergétiques (COE).

* Azzoz28@hotmail.fr

1. INTRODUCTION

Le petit nombre d'habitants et l'éloignement des ressources fossiles et du réseau électrique rendent la fourniture d'électricité aux régions arides un grave problème d'électrifications publiques et privées [1]. Puisque le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement et le prix d'extension du réseau électrique reste prohibitif.

Aujourd'hui, le générateur diesel est la solution technique la plus utilisée pour l'électrification des sites isolés du monde entier. Ceci est dû à leurs fiabilités, disponibles et faciles à manipuler. Néanmoins, les générateurs diesel sont intrinsèquement inefficaces lorsqu'ils sont utilisés avec un facteur de charge faible (en dessous de 40-50 % de leur capacité nominale), ce qui peut aussi raccourcir leur durée de vie. Ainsi les émissions de gaz à effet de serre qui présentent un grand risque sur l'environnement, et leur exploitation entraînent des coûts d'entretien élevés [1, 2].

De plus, l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, les fluctuations imprévisibles des prix du diesel et le problème du réchauffement climatique ont incité de nombreux pays y compris l'Algérie à élaborer de nouvelles politiques énergétiques qui favorisent l'utilisation de sources d'énergie alternatives afin de minimiser l'utilisation des sources d'énergie conventionnelles, ce qui permet de réduire les émissions [3, 4].

Alors différentes technologies d'énergie renouvelable et durable peuvent être adoptées et utilisées pour l'électrification, y compris les systèmes photovoltaïques, diesel ou hybrides (photovoltaïque et diesel). L'intégration de ces sources avec des unités de secours peut produire une énergie plus propre, plus économique et plus fiable pour toutes les conditions de charge que les systèmes à source unique [3].

Les avantages des systèmes hybrides sont nombreux, ils sont particulièrement attrayants pour l'approvisionnement en électricité où le coût du transport du carburant est plus élevé [5, 7]. Il est important de noter qu'une combinaison PV/Batterie/Diesel n'est pas le seul système hybride disponible.

Dans la littérature, plusieurs systèmes hybrides sont décrits [1], tels que les systèmes d'alimentation de générateurs PV/Diesel sans stockage, PV/Batterie/Diesel, PV/Eolienne/Batterie, PV/Eolienne/Batterie/Diesel, PV/Eolienne/Diesel sans stockage, PV/Eolienne/Diesel/Micro turbine hydro-électrique, PV/Eolienne/Cellule de combustible.

En outre, un certain nombre d'études sur les énergies renouvelables hybrides ont été mis en œuvre dans différentes parties du monde. Les résultats de ces études ont montré que les systèmes hybrides ont d'énormes avantages techniques et économiques [8]. Suivant la gamme de puissance des systèmes électriques hybrides (SEH) (**Tableau 1**).

Tableau 1: Classification des SEH par gamme de puissance [18]

Puissance du SHE (kW)	Applications
Faible: < 5	Systèmes autonomes- stations de télécommunication, pompage de l'eau, etc.
Moyenne: 10 - 250	Micro réseaux isolés- Alimentation d'un village isolé,
Grande: > 500	Grands réseaux isolés

Plusieurs études concernant l'électrification par l'application des systèmes photovoltaïque autonomes et hybrides, telles que l'approvisionnement en eau potable et le pompage photovoltaïque [9, 11], l'éclairage public [12], la réfrigération des vaccins [13], les sites de télécommunications mobiles [14, 15], l'électrification des villages isolés [16] et les bâtiments intégrant les systèmes PV [17].

2. METHODE D'OPTIMISATION

Les travaux de recherche actuels sur les systèmes hybrides PV/diesel avec stockage se concentrent sur la détermination du dimensionnement optimal des modules PV, de la capacité des batteries de stockage et de la capacité des générateurs diesel [19].

Toutefois, l'inconvénient des systèmes PV est dû à leur coût d'investissement élevé par rapport à celui des sources d'énergie conventionnelles. C'est pourquoi de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'optimisation des systèmes photovoltaïques, tels que les systèmes hybrides PV/diesel. Le système doit donc être conçu de manière optimale afin de réduire son coût en capital et pour délivrer un kWh de prix minimum et avec faible émission.

Alors, l'objectif du problème d'optimisation est de minimiser le coût du système et de déterminer le dimensionnement optimal du système hybride en fonction de son coût unitaire. Les variables à optimiser compte tenu d'une très faible perte de charge sont: les capacités du générateur PV, générateurs diesel et les batteries de stockage et par conséquent les différents coûts de système.

Le reste du document est structuré comme suit: la section 3 décrit le système hybride et ses composantes, avec le modèle mathématique de chaque élément. La section 4 décrit les critères utilisés pour la simulation et l'optimisation du système, ainsi la procédure d'optimisation proposée. Dans la section 5, l'étude de cas est bien définie, son profil de charge réel avec le gisement solaire disponible, ainsi les inputs de chaque composant: coûts, capacités, etc.... Les résultats et les discussions sont présentés dans la section 6. Enfin, la section 7, c'est la conclusion de ce travail.

3. CONFIGURATION ET MODELISATION DE SYSTEME HYBRIDE

Le système hybride PV/diesel étudié est analysé en utilisant l'outil Homer®. Un système PV autonome se compose d'une source d'énergie renouvelable primaire (énergie solaire), de batteries, générateur diesel et d'un onduleur pour maintenir le flux d'énergie entre les côtés CA et CC. La figure 1 montre un simple schéma du système hybride PV/diesel.

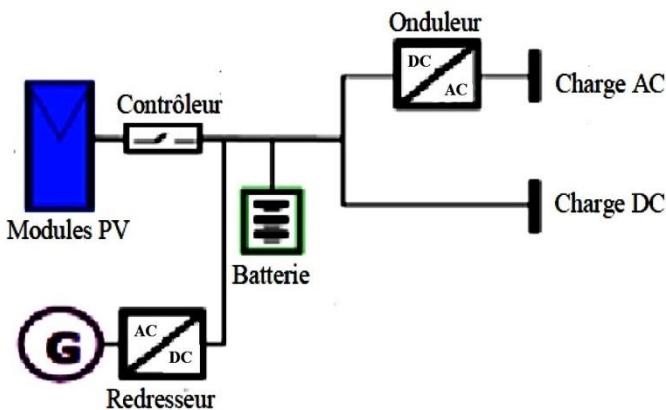


Fig. 1: Schéma typique d'un système hybride PV/Diesel [20]

Puisque les sources d'énergie renouvelables ne fournissent pas une puissance constante, alors leur combinaison complémentaire fournit une production électrique plus

continue et est souvent soutenue par des dispositifs de stockage, tels que des batteries pour accroître la fiabilité du système. Le rôle de chaque élément est discuté comme suite.

Le panneau photovoltaïque est une interconnexion de modules PV qui produit de l'électricité en courant continu (CC) par la conversion du rayonnement solaire global issue de soleil. Dans ce travail, les panneaux ont été modélisés fixes et inclinés vers le sud à un angle égal à la latitude du site.

Pour la simulation, les capacités suivantes (0, 1, 2, 3, et 4 kW) ont été prises en compte. Pour le stockage, les batteries sont utilisées pour stocker l'excédent d'électricité et fournissent cette énergie en cas de besoin. Différents nombres de batterie (0, 1, 2, 3, 4, 6 et 8b) ont été pris en compte dans cette analyse. Un générateur diesel consomme du combustible pour produire de l'électricité et/ou peut-être de la chaleur aussi comme sous-produit.

Une vaste gamme de générateurs sont disponibles (diesel, essence, propane et biocarburant). Dans ce papier, un générateur produisant de l'électricité qui fonctionne au diesel est utilisé. Pour l'analyse nous avons examiné diverses gammes de puissance (0, 1, 2 et 3 kW).

Afin d'assurer la circulation de l'énergie entre les éléments de système, un onduleur convertit l'énergie électrique du courant continu (CC) en courant alternatif (CA) est utilisé. Son efficacité est supposée de 90 % pour toutes les tailles considérées. Des onduleurs de différentes tailles (0, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 8 et 10 kW) ont été pris en compte dans l'analyse du système énergétique hybride.

L'effet de la température ambiante sur les performances de sortie des panneaux solaires sont pris en compte. Pour calculer la puissance des panneaux photovoltaïques, Homer® utilise l'équation suivante [21, 22]:

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \times \left(\overline{G}_T / \overline{G}_{T,STC} \right) \times \left[1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC}) \right] \quad (1)$$

Où, Y_{PV} est la puissance nominale photovoltaïque (kW), c'est-à-dire sa puissance de sortie dans des conditions de tests standards, f_{PV} est le facteur de déclassement du PV, \overline{G}_T est l'épisode de l'irradiation solaire sur les panneaux PV dans le pas de temps courant (kW/m²), $\overline{G}_{T,STC}$ est le rayonnement incident aux conditions de tests standards (1 kW/m²), α_P est le coefficient de puissance (%/°C), T_C est la température des cellules PV (°C) dans le pas de temps courant et $T_{C,STC}$ la température des cellules PV dans des conditions de tests standards (25°C).

Comme stratégie de fonctionnement, le système est supposé avoir le générateur PV comme source principale avec une batterie de secours, tandis que le générateur diesel sera exploité en temps déficitaire. Le temps déficitaire est défini comme le temps pendant lequel l'énergie instantanée produite par le générateur PV n'est pas suffisante pour couvrir la demande de charge. Le générateur diesel est également capable de charger l'accumulateur en temps déficitaire [23].

4. LOGICIEL D'OPTIMISATION 'HOMER®'

L'outil d'optimisation des systèmes Homer®, outil d'optimisation des systèmes à base d'énergie renouvelable mis au point par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), a été utilisé pour modéliser la faisabilité technique et économique du système hybride [24]. Il effectue des simulations horaires de toutes les combinaisons possibles

de composants saisis et classe les systèmes en fonction de critères définis par l'utilisateur, tels que le coût de l'énergie (COE) ou les coûts en capital (CC). Homer a été largement utilisé comme outil de dimensionnement et d'optimisation [25].

Dans le cadre de cette étude, où le système d'alimentation hybride comprend des génératrices PV, des batteries de stockage, un générateur diesel, Homer® déterminera la meilleure configuration possible pour le système d'alimentation qui peut répondre à la demande de charge sur toute l'année.

L'analyse est basée sur l'estimation du coût d'installation, du coût de remplacement, du coût d'exploitation et d'entretien, et ainsi de suite avec une grande fiabilité pour satisfaire la demande de charge. Le processus d'optimisation se fait après avoir simulé l'ensemble des solutions possibles de configurations de réseaux hybrides.

Le processus de simulation est passé par les deux étapes suivantes:

- Premièrement, il détermine si le système est réalisable (c'est-à-dire techniquement faisable). Dans ce cas Homer considère que le système est faisable, s'il peut adéquatement desservir la charge électrique et satisfaire toutes autres contraintes imposées par l'utilisateur pour la simulation.

- Deuxièmement, il estime le coût du cycle de vie du système, soit le coût total de l'installation et de l'exploitation tout au long de sa durée de vie. L'analyse des coûts du cycle de vie comprend tous les coûts qui surviennent au cours de la durée de vie de système. Homer utilise le coût net actuel (NPC) pour représenter le coût du cycle de vie d'un système.

Le processus d'optimisation consiste à déterminer la valeur optimale d'une variable dite de décision choisie par le concepteur et sur laquelle il a un contrôle optimal et pour laquelle Homer® peut prendre en compte plusieurs valeurs possibles dans son processus d'optimisation. Dans cette étude, les variables de décision comprennent

- La taille du générateur PV;
- La taille du générateur diesel;
- Le nombre des batteries;
- La taille du convertisseur DC/AC.

Dans les études de dimensionnement, la fonction objective est généralement considérée comme une équation de coût. Le coût net actuel total (TNPC), le coût total annualisé (CTA) et le coût localisé de l'énergie (LCOE) sont les méthodes d'évaluation économique les plus courantes. TNPC est la somme du coût net actuel (CNP) de composants [25]. A l'aide du logiciel d'analyse technico-économique Homer®, il est possible de choisir la configuration la plus appropriée du système énergétique hybride qui est basé sur les différents coûts.

4.1 Coût énergétique (COE)

Homer définit le coût d'énergie (COE) comme le coût moyen par kWh d'énergie électrique utile produite par le système. Pour calculer le COE, Homer divise le coût annualisé de production d'électricité (le coût annualisé total moins le coût de la charge thermique) divisé par la charge électrique totale saisie, en utilisant l'équation suivante [26, 27]:

$$\text{COE} = \frac{C_{\text{Ann.tot}} - C_{\text{Th}} \times H_{\text{Th}}}{E_{\text{Prod}}} \quad (2)$$

Où, $C_{Ann.tot}$, Coût total annuel du système [\$/an]; C_{Th} , Coût thermique [\$/kWh]; H_{Th} , Charge totale thermique [kWh/an]; E_{Prod} , Charge électrique totale [kWh/an].

Le deuxième terme dans le numérateur est la part du coût annualisé qui résulte de la charge thermique. Dans les systèmes qui ne se servent pas de charge thermique ($H_{Thermal} = 0$), ce terme sera égal à zéro [26-28].

Avec:

$$C_{Ann.tot} = CRF(i, R_{proj}) \times C_{NPC.tot} \quad (3)$$

Où, $C_{NPC.tot}$, Coût net actuel total [\$]; i , Taux d'intérêt réel annuel [%]; R_{proj} , Durée de vie du projet [an]; $CRF_{i,proj}$, Facteur de recouvrement du capital.

4.2 Coût net actuel total (TNPC)

Le coût du cycle de vie du système est représenté par le coût net actuel (CNP), qui comprend les coûts en capital, de remplacement, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts de carburant pendant leur durée de vie utile, le coût net actuel total (TNPC) est la principale sortie économique d'Homer, c'est la valeur par laquelle il classe toutes les configurations du système dans les résultats d'optimisation et la base à partir de laquelle il calcule le coût total annuel et le coût d'énergie.

Pendant, la configuration du système basée sur le TNPC dépend des variables de sensibilité (c'est-à-dire les contraintes du système, le prix des composants...) choisies par le concepteur. Dans ce contexte, le processus d'optimisation est répété pour chaque sélection de variables de sensibilité. L'équation ci-dessous donne l'équation mathématique du coût actuel net [25, 29]:

$$NPC = \frac{C_{tot}}{CRF(i, n)} \quad (4)$$

Où, C_{tot} , Coût total annuel (\$/an) et n , Durée de vie du projet, considérée comme 20 ans dans la présente étude.

5. ETUDE DE CAS

Un site isolé destiné pour des applications d'agriculture est étudié dans ce travail. Fournir de l'électricité à cette région devient une tâche difficile. En effet, le raccordement de ce site au réseau électrique entraîne des pertes importantes dans des lignes de distribution. Ce qui conduit à préconiser l'utilisation des énergies renouvelables pour faire face à cette contrainte. Il faut donc accroître les sources d'énergie renouvelables en adoptant des schémas de sources d'énergie hybrides pour accroître la fiabilité et la sécurité du système.

Suivant le gisement solaire disponible, l'une des approches d'hybridation les plus prometteuses est la combinaison de panneaux PV avec d'autres ressources. Le système hybride proposé pour cette région est testé en utilisant un profil de charge pratique avec des données météorologiques réelles: Latitude et longitude du lieu (35. 7° de latitude Nord, 4,50° de longitude Est).

Dans ce contexte, le système électrique hybride proposé, destiné à fournir de l'électricité à cette area, est conçu de manière optimale à partir d'une étude Homer®

utilisant un profil pratique de demande du site étudiée ainsi des données météorologiques réelles.

La conception du système de propulsion hybride dépend de certaines variables de sensibilité importantes pour optimiser le coût du système et la taille des composants. Par conséquent, avant de concevoir le modèle du système, il faut évaluer des paramètres comme l'irradiation solaire, l'emplacement et la demande d'énergie.

5.1 Profil de charge

Le profil de charge quotidien moyen de cas étudié pour une année complète est illustrée par la figure 2. La consommation journalière est estimée à 9.8 kWh/jour et un pic de 2.1 kW.

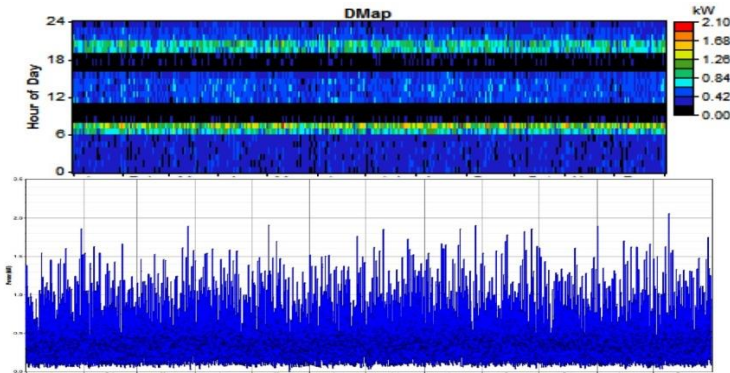


Fig. 2: Profil de charge quotidien moyen pour une année complète

5.2 Donnée solaire du site

La taille et la performance du système hybride PV/GD dépendent fortement de l'énergie solaire disponible. Par conséquent, l'étude de système destiné à installer (énergie solaire dans ce cas) doit être réalisée pour que le système soit bien optimiser avec un fonctionnement efficace [23].

Le rayonnement solaire est bien réparti avec un rayonnement moyen de 5.43 kWh/m²/jour et un ensoleillement quotidien moyen de plusieurs heures sur le site. L'indice de clarté et la moyenne du rayonnement solaire sont obtenus par la NASA et PVGIS [30, 31], comme illustré à la figure 3. Ces données servent d'entrée au logiciel car elles définissent la capacité opérationnelle des panneaux photovoltaïques tout au long de l'année.

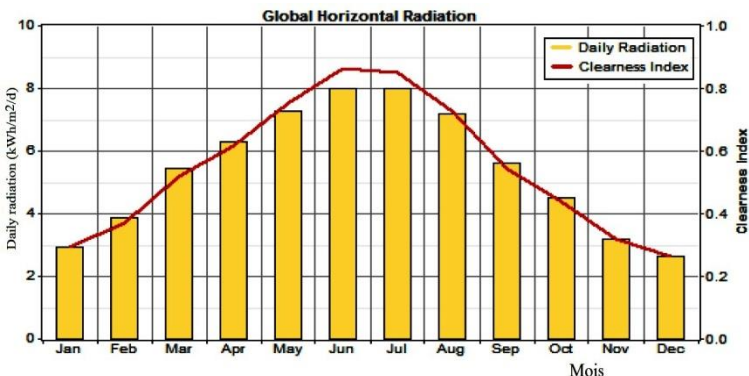


Fig. 3: Rayonnement solaire et l'indice de clarté mensuels

L'effet de la température ambiante sur les performances de sortie des panneaux solaires sont pris en compte. La température moyenne journalière (°C) du site est présentée à la figure 4.

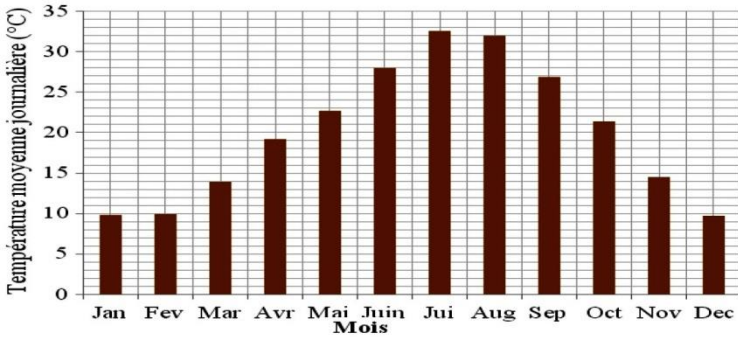


Fig. 4: Température moyenne journalière du site

5.3 Données d'entrée Homer

Le modèle hybride proposé tel qu'il est mis en œuvre dans l'outil de simulation Homer® est illustré à la figure 5.

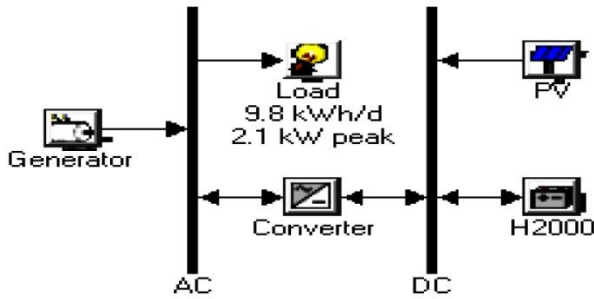


Fig. 5: Schéma global du système hybride étudié sous Homer®

Les données d'entrée Homer® sont données par le **Tableau 2**. Les types de coût pris en compte sont le coût de remplacement, le coût du combustible, les coûts de récupération, les coûts d'exploitation et les coûts en capital.

Le **Tableau 2** résume les détails techniques et économiques des composants du système hybride proposé. Le coût (non subventionné) du diesel est fixé à une valeur de 0.7 \$/l [27, 32].

Tableau 2: Coûts des éléments du système hybride

Options	Coût en capital	Coût de remplacement	Coût du O&M
PV	1176 \$/kW	1176 \$	0 \$/an
Batterie	276 \$/kW	276 \$	20 \$/an
Convertisseur	342 \$/kW	342 \$	0.050 \$/h.kW
Générateur diesel	546 \$/kW	546 \$	7 \$/an

6. RESULTATS D'OPTIMISATION

La consommation électrique annuelle doit être couverte par le réseau hybride avec un taux de 100 %. La durée de vie du projet est de 25 ans. Comme contraintes du modèle, le déficit annuel proposé est de 0 %.

La configuration optimale est trouvée après avoir effectué plusieurs simulations avec un rayonnement solaire de 5.43 kWh/m²/jour et un indice de clarté annuel moyen de 0.542, et en considérant différentes capacités PV, GD, batterie et convertisseur.

6.1 Analyse économique

En fonction du coût net actuel total (TNPC), Homer® affiche une liste de configurations triées, TNPC est un facteur qui peut être utilisé pour comparer différentes configurations suivant la valeur de TNPC. Le choix final est déterminé par la plus faible valeur.

Tableau 3: Résultats d'optimisation du modèle hybride PV/diesel

	PV (kW)	Label (kW)	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE \$/kW...	Ren. Frac.	Diesel (L)	Label (hrs)
	3	1	4	2	\$ 5,656	431	\$ 11,159	0.244	0.86	261	839
	8		9	2	\$ 12,574	332	\$ 16,813	0.367	1.00		
		1	5	1	\$ 2,063	1,476	\$ 20,932	0.458	0.00	1,466	4.4...
	3	2		1	\$ 4,553	2,214	\$ 32,856	0.718	0.55	1,898	5.9...
		2			\$ 684	3,238	\$ 42,075	0.919	0.00	2,833	8.7...

Dans le processus d'optimisation, Homer® simule chaque configuration du système. Le **Tableau 3** présente la simulation Homer® pour un prix du diesel de 0.7 \$/l. Le tableau montre que le résultat optimal (meilleur) est obtenu lorsque le système est composé des modules PV de 3 kW, 1 générateur diesel, 4 batteries et un onduleur de 2 kW.

Cette configuration devrait alimenter le site en électricité et lui permettre de répondre à sa demande en continu tout au long de l'année. Le non optimal système est obtenu lorsque le système est composé de 2 générateurs diesel seulement.

Le coût initial, le NPC et le coût de l'électricité pour ce système (optimal) est de 5.656 \$, 11.59 \$ et 0.244 \$/kWh, respectivement. Les résultats de la simulation montre également le montant du second système (deux générateurs diesel seulement) avec un coût initial, le NPC, et le coût de l'électricité de 648 \$, 42.074 \$ et 0.919 \$/kWh, respectivement.

L'optimisation du système hybride PV/diesel basée sur Homer® en utilisant le TNPC est résumé au **Tableau 4**. Le coût net actuel total (TNPC) de chaque composant du système, incluant principalement les panneaux photovoltaïques, générateur diesel, les batteries et le convertisseur avec un capital de remplacement, les coûts d'opérations de maintenance et de récupération.

Tableau 4: Coûts actuels nets du système hybride

Composants	Capital (\$/an)	Remplacement (\$/an)	O&M (\$/an)	Récupération (\$/an)	Totale (\$/an)
PV	3.528	1.100	0	-617	4.012
GD	342	121	536	-48	3.284
Batterie	1.104	914	1.023	-167	2.874
Convertisseur	682	285	77	-53	990
Système global	5.656	2.419	1.636	-884	11.159

Le **Tableau 5** résume le coût annuel du système hybride par composants, ainsi que le coût global par an (\$/an) de chaque élément.

Tableau 5: Coûts annuels du système hybride

Composants	Capital (\$/an)	Remplacement (\$/an)	O&M (\$/an)	Récupération (\$/an)	Totale (\$/an)
PV	276	86	0	-48	314
GD	27	9	42	-4	257
Batterie	86	71	80	-13	225
Convertisseur	53	22	6	-4	77
Système global	442	189	128	-69	873

6.2 Analyse technique

Cette section décrit l'analyse des résultats de simulation et la production d'énergie par le générateur diesel et de panneaux photovoltaïques, les fractions d'énergie renouvelable et non renouvelable, ainsi que le rendement de batteries et du convertisseur.

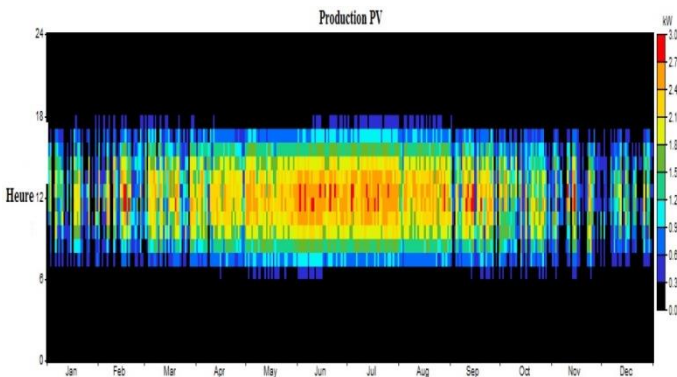
Tableau 6: Consommation et production annuelle d'énergie du système hybride

Options	Production (kWh/an)	Fraction (%)
Photovoltaïque	4.755	86
Générateur Diesel	774	14
Totale	5.530	100
Charge	Consommation (kWh/an)	Fraction (%)
Charge primaire	3.580	100

Pour les fractions, vu le potentiel renouvelable du site, on remarque que 86 % de la production énergétique du site est produit par le générateur photovoltaïque. Cette fraction est très satisfaisante, donc c'est encourageant à l'utilisation de ce type de ressources dans cette région.

Le reste, 14 % est assuré par la source d'énergie conventionnelle (diesel). La production totale est estimée à 5.530 kWh/an, délivrée par la production annuelle d'énergie photovoltaïque de 4.755 kWh/an et 774 kWh/an du générateur diesel. La consommation annuelle d'électricité est de 3.580 kWh/an.

L'électricité excédentaire est de 1.138 kWh/an, soit environ 20.6 % de la production totale d'énergie. La figure 6 représente la puissance de sortie de générateur photovoltaïque au cours d'une année complète.

**Fig. 6:** Fonctionnement annuel du générateur photovoltaïque

Dans cette figure et selon l'échelle à droite, la couleur noir représente les périodes de l'arrêt du générateur PV. La couleur bleu pour les périodes à très faible production et le jaune pour celles à forte production, alors que la couleur rouge montre les deux pics

durant les mois de l'été à -peu près- dans les heures 12h à 13h. Tandis que la couleur verte représente la production moyenne.

D'après la figure 6, la production d'énergie solaire est en grande quantité pour les mois Juin, Juillet et Août. Le potentiel renouvelable solaire peut satisfaire la consommation dans ces périodes par le générateur solaire avec le système de stockage, avec une très faible contribution du générateur diesel.

Le fonctionnement au cours d'une année complète du GD est représenté dans la figure 7.

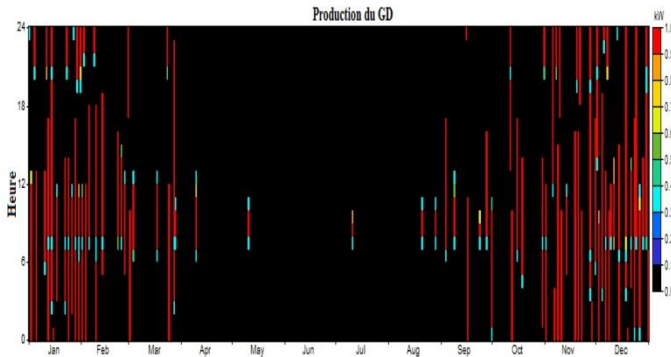


Fig. 7: Fonctionnement annuel du générateur diesel

Pour les mois où il y a une faible irradiation solaire pour les mois de Janvier, Février, Novembre et Décembre. La grande contribution est assurée par le générateur diesel puisque les puissances journalières solaires sont faiblement délivrées. Cela indique que le générateur diesel ne fonctionnerait que pour alimenter la charge quand lors de l'absence du système PV et le stockage, donc le GD est utilisé pour combler le manque en électricité.

Les résultats de simulation montrent que la production d'électricité du générateur est de 774 kWh/an et son facteur de capacité est de 8.84 % avec 839 heures/an le nombre total d'heures d'opération. Le rendement moyen du générateur électrique est de 30.2 % avec une puissance électrique moyenne de 0.923 kW.

La DG a fonctionné pendant 839 h avec 64 fois de démarrage par an et une consommation de carburant de 261 l/an de diesel, la consommation spécifique de diesel est 0.337 l/kWh.

6.3 Comparaison de la production électrique de PV et GD

Homer® aussi montre la puissance moyenne mensuelle de chaque générateur. La figure 8 représente une illustration de fonctionnement entre la production annuelle du générateur PV et du générateur diesel, cela permet de clarifier la stratégie de contrôle (déficit annuel de 0 %) et le suivi de consommation en fonction de la courbe de la charge du site et des données météorologiques.

La couleur noir indique la production d'électricité par le générateur et la couleur jaune indique la production d'électricité par les panneaux PV. A partir des résultats obtenus par l'optimiseur énergétique Homer®, la sortie moyenne de générateur photovoltaïque est de 13.0 kWh/j avec 4380 heures/an de fonctionnement. La sortie moyenne de générateur diesel est estimée à 0.923 kW avec une grande pénétration dans les mois Janvier, Novembre et Décembre.

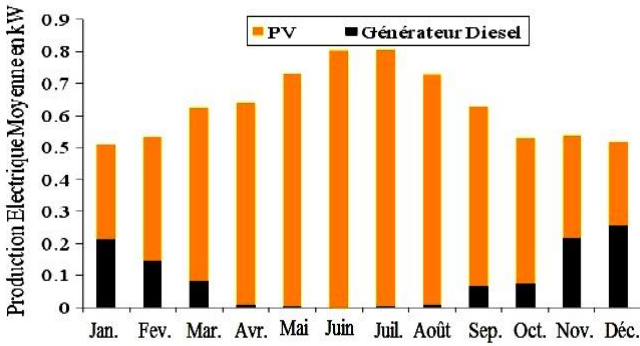


Fig. 8: Production mensuelle moyenne d'électricité par le générateur et les panneaux photovoltaïques

6.4 Performance de batterie

Les batteries sont utilisées pour stocker l'excédent d'électricité et fournissent cette énergie en cas de pénurie. Le coût d'investissement initial de batterie Hoppecke avec 6.804 kWh est de 276 \$. L'état de charge minimum est fixé à 30 % avec une tension de 2 V.

La figure 9 montre l'état de charge de la batterie en un an. Le débit annuel des batteries est de 2.372 kWh/an avec une durée de vie de 2.558 kWh/an. Comme le niveau minimum de charge est fixé à 30 %, sa capacité nominale utilisable est donc de 11.2 kWh.

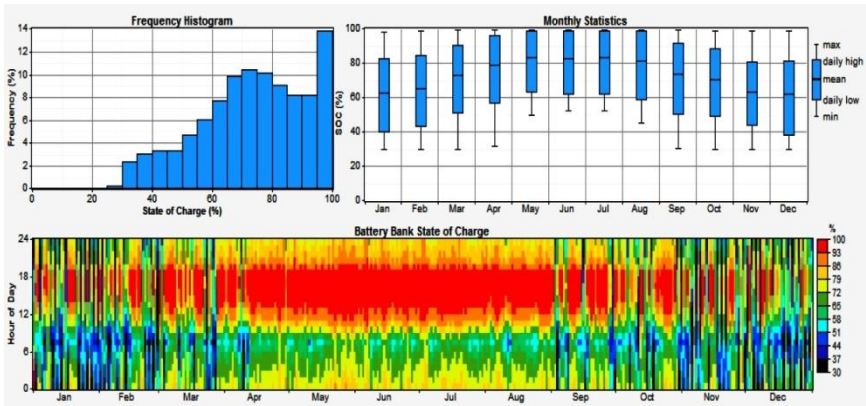


Fig. 9: Etat de charge de la batterie en un an

La figure 10 représente la sortie de l'onduleur en un an. La puissance moyenne de l'onduleur est de 2 kW et la puissance maximale de la sortie est de 1.78 kW. Les heures totales de fonctionnement de l'onduleur et du redresseur sont respectivement de 8.027 heures/an et 728 heures/an, avec le facteur de capacité de 18.7 % et de 2.3 % avec 364 kW des pertes.

Enfin, la figure 11 montre la puissance de sortie des panneaux PV en un an avec la consommation et l'excès annuelle d'électricité.

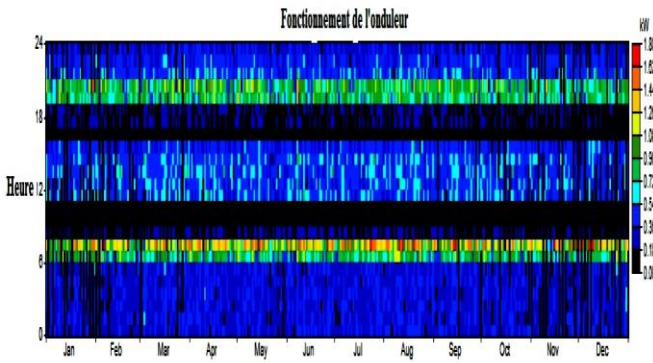


Fig. 10: Rendement de l'onduleur en un an

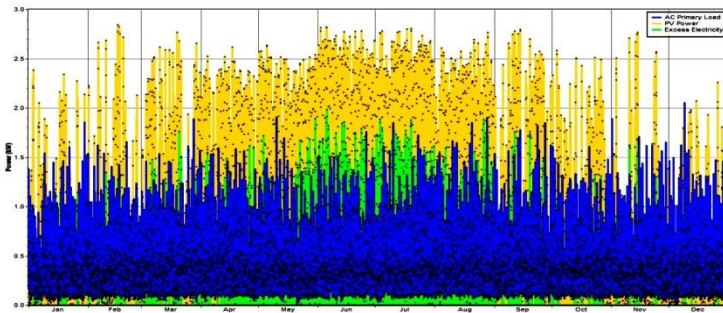


Fig. 11: Excès annuel d'électricité suivant la demande et la production PV

A partir de la figure 11, l'excès annuel en électricité est estimé à 1.138 kWh/an, soit environ 20.6 % de la production énergétique totale. Dans ce cas, l'excès peut être utilisé pour couvrir les besoins en énergie lors de l'extension et l'augmentation de consommation.

6.5 Analyse de sensibilité (variation de prix de diesel)

Etant donné que les performances du modèle varient en fonction des critères (variables de décision) et de la conception du système, alors il est très utile de tenir compte d'une analyse de sensibilité pour la prise de décision et d'élaborer d'autres recommandations du système hybride, notamment pour assuré un faible prix du kilowattheure.

La conception hybride est simulée à l'aide de variables de sensibilité telles que le rayonnement solaire global, la température et le prix de diesel. Après cela, les sorties telles que NPC, COE et RF du système changent en conséquence.

La figure 12 représente la simulation Homer® pour un prix du diesel de 0.7 \$/l, 0.8 \$/l et 0.9 \$/l.

D'après cette simulation, le coût de l'électricité se trouve respectivement à 0.241 \$/kWh, 0.251 \$/kWh et 0.258 \$/kWh. La faible fluctuation du prix de diesel se traduit par une augmentation du coût de kWh.

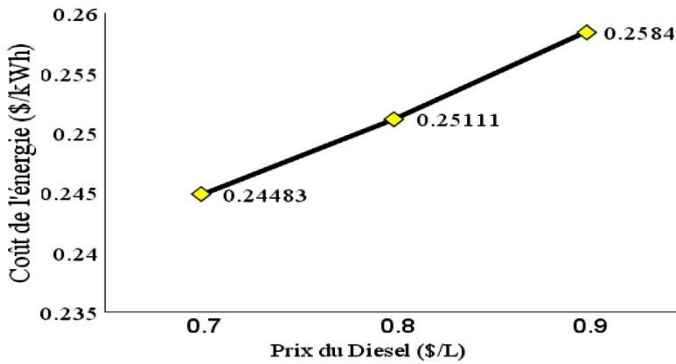


Fig. 12: Variation de coût de l'énergie selon le prix de carburant

6.6 Emission de CO₂ et environnement

Le système hybride solaire-diesel réduit considérablement les émissions dues à l'utilisation de la technologie des énergies renouvelables. Il diminue la consommation de combustibles fossiles. Il s'agit donc d'un système de production d'énergie plus respectueux de l'environnement. Le **Tableau 9** présente les émissions annuelles du système électrique hybride.

Tableau 9: Emissions annuelles du système hybride

Polluants	Symbole	Emissions (kg/an)	GD seul
Dioxyde de carbone	CO ₂	687	7.461
Monoxyde de carbone	CO	1.69	18.4
Hydrocarbures non brûlés	UHC	0.188	2.04
Particules	PM	0.128	1.39
Dioxyde sulfurique	SO ₂	1.38	15
Oxydes de nitrogène	NO _x	15.1	164

Il ressort clairement de ce tableau que pour le cas d'utilisation de générateur diesel seul, les émissions annuelles de gaz à effet de serre 7661.83 kg/an est très important par rapport au système hybride PV/diesel/batterie avec 705.486 kg/an.

Les résultats de la simulation montrent l'intérêt environnemental de l'hybridation des ressources pour la production d'énergie électrique. Ce qui représente ici une réduction annuel dans les émissions estimé à 6956.344 kg/an, plus de 90.79 % en pourcentage.

7. CONCLUSION

La présente étude a pour but d'étudier la pertinence d'un système de production d'électricité hybride photovoltaïque/diesel/batterie par simulation et modélisation mathématique pour alimenter en électricité un site rurale isolé destiné pour des applications de l'agriculture à M'Sila.

L'étude de faisabilité technico-économique et environnementale visant à trouver la configuration optimale d'un système hybride renouvelable pour répondre à la demande. A l'aide du modèle informatique du logiciel Homer®, nous avons déterminé que le système le plus économique pour une charge quotidienne de 9.8 kWh est composé de modules PV de 3 kW, 4 batteries (2.000 Ah et 2 V), un onduleur de 2 kW et 1 générateur diesel.

Le coût initial total, le coût net actuel et le coût de l'électricité produite à partir du système sont de 5.656 \$, 11.159 \$US et 0.244 \$/kWh, respectivement.

Le deuxième choix, c'est lorsque nous utilisons un générateur seul, avec un coût initial, un coût net actuel et un coût de l'électricité produite de 684 \$, 3.238 \$ et 0.919 \$/kWh, respectivement, alors le système devient plus coûteux. Donc la combinaison PV/Diesel conduit à une réduction de la taille du générateur photovoltaïque et de la capacité de stockage, réduisant ainsi le coût total de l'investissement.

REFERENCES

- [1] A. Khelif, A. Talha, M. Belhamel and A. Hadj Arab, '*Feasibility Study of Hybrid Diesel-PV Power Plants in the Southern of Algeria: Case Study on AFRA Power Plant*', *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, N°1, pp. 546 - 553, 2012 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.053>
- [2] S. Boumechta et A. Kaabeche, '*Optimisation du Dimensionnement d'un Système Hybride Eolien/Diesel*', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 18, N°3, pp. 439 - 456, 2015.
- [3] A.S. Aziz, M.F.N. Bin Tajuddin and M.R. Bin Adzman, '*Feasibility Analysis of PV/Wind/Battery Hybrid Power Generation: A Case Study*', *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 8, N°2, pp. 661 - 671, 2018.
- [4] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M.S. Ismail and M. Moghavvemi, '*Energy Management Strategies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Review*', *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 62, pp. 821 - 835, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>
- [5] O. Kebour, A. Hadj Arab, A. Hamid and K. Abdeladim, '*Contribution to the Analysis of a Stand-alone Photovoltaic System in a Desert Environment*', *Solar Energy*, Vol. 151, pp. 68 - 81, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.009>
- [6] A. Baharuddin, S. Kamaruzzaman, M. Syuhaimi Ab Rahman, M. Yusof Othman, A. Zaharim and A. Mahir Razalil, '*Hybrid Photovoltaic Diesel System in a Cable car Resort Facility*', *European Journal of Scientific Research*, Vol. 26, pp. 13 - 19, 2009.
- [7] H. Jacobus, B. Lin, D.H. Jimmy, R. Ansumana, A.P. Malanoski and D. Stenger, '*Evaluating the Impact of Adding Energy Storage on the Performance of a Hybrid Power System*', *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, N°7, pp. 2604 - 2610, 2011.
- [8] E.M. Nfah, and J.M. Ngundam, '*Modelling of Wind/Diesel/Battery Hybrid Power Systems for far North Cameroon*', *Energy Conversion and Management*, Vol. 9, N°8, pp. 1295 - 1301, 2004.
- [9] A.K. Daud, and M.M. Mahmoud, '*Solar Powered Induction Motor-driven Water Pump Operating on a Desert Well, Simulation and Field Tests*', *Renewable Energy*, Vol. 30, N°5, pp. 701 - 714, 2005.
- [10] Y. Kabalci, E. Kabalci, R. Canbaz, and A. Calpbini, '*Design and Implementation of a Solar Plant and Irrigation System with Remote Monitoring and Remote Control Infrastructures*', *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 506 - 517, 2016.
- [11] A. Djoudi-Gherbi, A. Hadj Arab and H. Salhi, '*Improvement and validation of PV Motor-pump Model for PV Pumping System Performance Analysis*', *Solar Energy*, Vol. 142, pp. 310 - 320, 2017.

- [12] J. Lagorse, D. Paire, and A. Miraoui, '*Sizing Optimization of a Standalone Street Lighting System Powered by a Hybrid System using Fuel Cell, PV and Battery*', *Renewable Energy*, Vol. 34, N°3, pp. 683 - 691, 2009.
- [13] B.A Dawoud, '*Hybrid solar-assisted adsorption cooling unit for vaccine storage*', *Renewable Energy*, Vol. 32, N°6, pp. 947 - 964, 2007.
- [14] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, A.S.N. Huda, and K. Sanusi, '*Techno-economic Analysis of Hybrid PV–diesel–Battery and PV–wind–diesel–battery Power Systems for Mobile BTS: the way Forward for Rural Development*', *Energy Science & Engineering*, Vol. 3, N°4, pp. 271 - 285, 2015.
- [15] P. Nema, R.K. Nema, and S. Rangnekar, '*PV-Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System for GSM/CDMA type Mobile Telephony base Station*', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 1, N°2, pp. 359 - 366, 2010.
- [16] S. Bhattacharyya, '*Rural Electrification through Decentralised Off-grid Systems in Developing Countries*', London, Springer, 2012.
- [17] S. Kamali, '*Feasibility Analysis of Standalone Photovoltaic Electrification System in A Residential Building in Cyprus*', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp. 1279 - 1284, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.018>
- [18] I. Vechiu, '*Modélisation et Analyse de L'intégration des Energies Renouvelables dans un Réseau Autonome*', Thèse de Doctorat, Université du Havre. Décembre, 2005
- [19] A. Larsson, '*Voltage and Frequency Variation in Autonomous Grids a Comparison of Two Different Wind-Diesel Systems*', *European 1996, Proceedings*, Paper 2C, pp. 317 - 320, 1996.
- [20] C. Protogeropoulos, S. Tselepis, and A. Neris, '*Research Issues on Stand-alone PV/Hybrid Systems: State-of-art and Future Technology Perspectives for the Integration of μ grid Topologies on Local Island Grids*', *IEEE*, pp. 2277 - 2282, 2006.
- [21] L. Olatomiwa, '*Optimal Configuration Assessments of Hybrid Renewable Power Supply for Rural Healthcare Facilities*', *Energy Reports*", Vol. 2, pp. 141-146, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2016.06.001>
- [22] B.F. Ronad, and S.H. Jangamshetti, '*Optimal Cost Analysis of Wind-solar Hybrid System Powered AC and DC Irrigation Pumps using Homer*', 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Palermo, Italy, pp. 1038 - 1042, 22-25 November 2015. Doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418568
- [23] T. Khatib, and A. Mohamed, '*High Efficient Standalone Photovoltaic Power System*', Lap Lambert, Germany, 2010.
- [24] A. Al-Karaghoul, L.L. Kazmerski, '*Optimization and Life-Cycle Cost of Health Clinic PV System for a Rural Area in Southern Iraq using HOMER Software*', *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 710 – 714, 2010. doi:10.1016/j.solener.2010.01.024
- [25] A.S. Aziz, and S.A. Khudhier, '*Optimal Planning and Design of an Environmentally Friendly Hybrid Energy System for Rural Electrification in Iraq*', *American Journal of Applied Sciences* Vol. 14, N°1, pp. 157 - 165, 2017.
Doi: 10.3844/ajassp.2017.157.165

- [26] A. Larsson, 'Voltage and Frequency Variation in Autonomous Grids a Comparison of Two Different Wind-Diesel Systems', Vol. , pp. 317-320,1996.
- [27] M. Dekkiche, 'Modélisation Et Simulation D'un Systeme Hybride Autonome (Pv /Eolienne/Diesel) Pour Alimenter un Site Isolé à Chlef, Algérie', Thèse de Doctorat, Décembre 2017.
- [28] M. Beccali, S. Brunone, M. Cellura, and V. Franzitta, 'Energy, Economic and Environmental Analysis on RET-Hydrogen Systems in Residential Buildings', Renewable Energy, Vol. 33, pp. 366 - 382, 2008.
Doi: 10.1016/j.renene.2007.03.013
- [29] J. Vishnupriyan, and P.S. Manoharan, 'Demand Side Management Approach to Rural Electrification of Different Climate Zones in Indian State of Tamil Nadu', Energy, Vol. 183, N°19, pp. 799 - 815, 2017.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.140>
- [30] Photovoltaic Geographical Information System, 'PVGIS', [Accessed 15/10/2018] (<http://re.jcr.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>)
- [31] NASA Surface Meteorology And Solar Energy; 2004.
Available: (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)
- [32] CDER article, 'Fuel Prices in Algeria is One of the Cheapest in the World', 2013.
Available from: <http://portail.cder.dz/spip.php?article3597>.