Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 137 – 151
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v11i1.64

Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien – photovoltaïque - diesel) de production d'électricité sans interruption

Djohra Saheb – Koussa* et Maiouf Belhamel

Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

(reçu le 20 Janvier 2008 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - *Actuellement, le générateur diesel est la technique la plus utilisée pour l'électrification des sites isolés. Néanmoins, l'accès à ces sites étant généralement long et difficile, les coûts de maintenance et d'approvisionnement en carburant sont très élevés. En conséquence, nous avons envisagé de coupler -au sein d'un système hybride- un générateur diesel avec deux sources d'énergies renouvelables (éolien - photovoltaïque) qui représente alors souvent l'option la plus économique. Cependant, notre étude porte sur l'alimentation d'une habitation, qui peut être située sur différents sites algériens, par le système hybride avec stockage électrochimique. Dans un premier temps, nous nous sommes basés sur la modélisation détaillée des composantes du système, puis sur l'ensemble du système. Ainsi, nous avons appliqué les modèles et dimensionner le système, ce qui nous a permis d'aboutir aux meilleurs performances. Enfin une étude économique a été élaborée afin de comparer les contraintes financières que présente chacun des systèmes étudiés.*

Abstract - *Currently, the diesel generator is the most used technique for the electrification of isolated sites. Nevertheless, access to these sites being generally long and difficult, the costs of maintenance and fuel supply is very high. Consequently, we intended to couple -within a hybrid system- a diesel generator with two renewable sources of energy (wind - photovoltaic) which then represents often the most economic option. However, our study concerns the supply of a house, which can be located on various Algerian sites, by the hybrid system with electrochemical storage. Initially, we based ourselves on the detailed modeling of the components of the system, then on the whole of the system. Thus, we applied the models and sized the system best performances. Finally an economic study was elaborated to compare the financial constraints which presents each of systems study.*

Mots clés: Système éolien - Système photovoltaïque - Générateur diesel - Système hybride - Système de stockage - Charge - Dimensionnement - Etude économique.

1. INTRODUCTION

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer, il aura fallu la produire, en général dans les unités de production d'électricité de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Ce qui représente un lourd fardeau financier pour l'électrification des locaux dans les sites isolés de notre pays. Installer des lignes électriques sur des centaines de kilomètres ne pourra pas résoudre ce problème. Ceci est par le fait de la présence des contraintes dues aux intempéries dont le vent de sable, les gradients de température entre les différentes saisons et celle entre la nuit et le jour pour la saison hivernale. Utilisés le générateur diesel seul coûte trop cher. A cet effet, nous avons pensé à contourner le problème par une autre solution à savoir le système hybride.

Cette méthode de production d'électricité s'avère être rentable dans les régions isolées et ventés. Cependant le travail proposé consiste en une combinaison de trois sources d'énergie (solaire, éolienne et diesel) de production continue de l'énergie électrique. L'autonomie de ce système sera assurée par un système de stockage. Ce système est destiné à alimenter une maison type d'une famille moyenne, et habitée toute l'année. Sachant que cette maison peut être implantée sur six zones climatiques algériennes.

* dkoussa@cder.dz

Ceci nous semble répondre de façon intéressante à nos soucis de développement durable, aussi bien du point de vue environnemental que de celui de la sécurité d'approvisionnement.

2. MODELISATION MATHEMATIQUE

2.1 Modélisation du gisement solaire

2.1.1 Modèle de reconstitution des moyennes mensuelles des irradiations globales sur plan incliné

L'irradiation globale sur un plan incliné [1] est calculée par la relation suivante:

$$Ginc = Bin + Di + Ri \tag{1}$$

où Bin est l'irradiation directe, Di l'irradiation diffuse et Ri l'irradiation réfléchi, sur un plan incliné.

2.1.1.1 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiations directes sur plan incliné

$$Bin = Rb \times (GH - DH) \tag{2}$$

avec Bin, GH, DH et Rb qui sont respectivement les valeurs horaires des irradiations globale, diffuse et le facteur de forme. Ce dernier est donné par la relation suivante:

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\sin(h)} \tag{3}$$

où θ_i et h sont respectivement l'angle d'incidence et la hauteur du soleil.

2.1.1.2 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiations diffuses sur plan incliné

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est donnée par l'équation suivante:

$$Di = DH \times (1 + \cos\beta)/2 \tag{4}$$

avec β l'angle d'inclinaison de la surface de captation, et DH l'irradiation diffuse sur un plan horizontal.

2.1.1.3 Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiations réfléchies sur un plan incliné

L'irradiation réfléchie par le sol et incident sur un plan incliné est donnée par l'équation suivante:

$$Ri = (Bn \sin h + DH) \times \rho \times (1 + \cos\beta)/2 \tag{5}$$

avec ρ et Bn sont respectivement l'albédo du sol et l'irradiation directe sur un plan normal.

2.2 Modélisation du gisement éolien

La distribution de Weibull [2] décrit la distribution en fréquence de la vitesse du vent. Elle s'est avérée approprié pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de Weibull est fonction de deux paramètres c et k et peut s'écrire:

$$F(v) = 1 - \exp\left(\frac{v}{c}\right)^k \tag{6}$$

où c et k sont respectivement le facteur d'échelle en [m/s] et le facteur de forme sans dimension, caractérise l'asymétrie de la distribution.

Ainsi, en utilisant la définition de $f(v)$, celle-ci s'écrit donc:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{7}$$

Comme exemple, nous avons choisi le site de Bouzaréah dont nous présentons sur le diagramme ci-dessous, la variation annuelle de $f(v)$ pour différents k et c. Les différents k et c utilisés dans cette étude sont disponibles en référence: Adrar, Ghardaïa, Batna, Tamanrasset [3], El Oued [4] et Bouzaréah [5].

2.3 Modélisation du système éolien

Dans notre travail, nous avons utilisé un modèle simplifié basé sur la connaissance de la densité de probabilité de Weibull et qui a donnée preuve de précision. Ce modèle suppose que la puissance moyenne produite par un aérogénérateur est estimée par la relation suivante et proposée par [6-8]:

$$P = \int_{Vin}^{Vout} P(v) f(v) \, dv \tag{8}$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par l'aérogénérateur.

Un programme sous Simulink a été établi. Nous permettons de déterminer la puissance produite par un aérogénérateur donné (Fig. 1. et 2.).

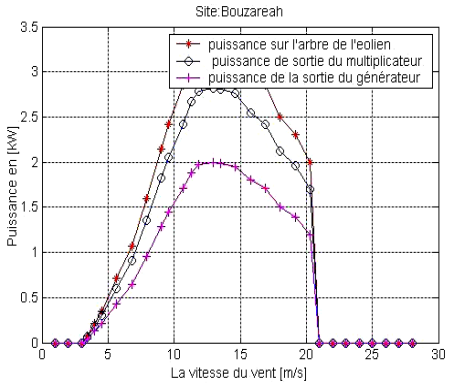

Fig. 1: Caractéristique de l'aérogénérateur Whisper 175

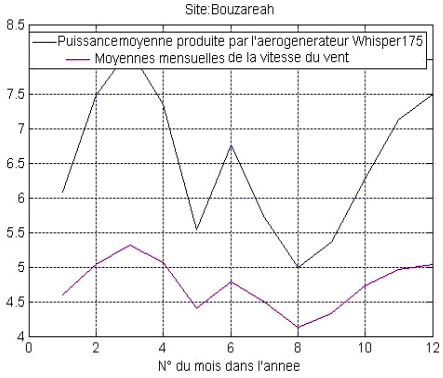

Fig. 2: Variation mensuelle de la puissance produite et de la vitesse du vent

2.4 Modélisation du système photovoltaïque

L'énergie délivrée par un module photovoltaïque est décrite par la caractéristique $I-V$ qui varie de manière à ce que le courant suive une relation de la forme:

$$I = f(V, Es, Tj) \tag{9}$$

Nous souhaitons déterminer la puissance maximale que peut fournir un groupe de panneaux pour un ensoleillement et une température donnés. Ainsi, nous avons utilisé le modèle de Singer [9]. Ce dernier a été établi par un programme sous Simulink, et nous permettons de déterminer les caractéristiques tension/courant à partir desquelles nous pouvons déterminer la puissance maximale que peuvent fournir les groupes de panneaux pour des conditions météo données (Fig. 3).

2.5 Modélisation du système de stockage

2.5.1 Modèle de Copetti de batterie au plomb

Ce modèle [10] est basé sur le schéma électrique de la figure 4. La batterie est alors décrite par seulement deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres: une source de tensions et sa résistance interne.

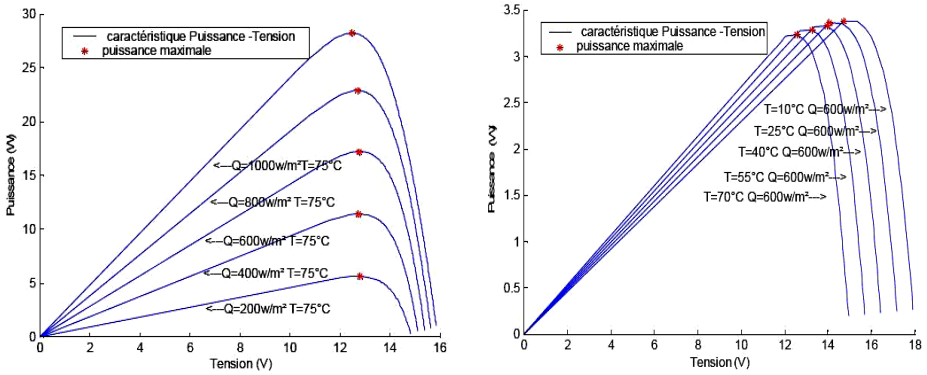

Fig. 3: Caractéristique d'un module photovoltaïque

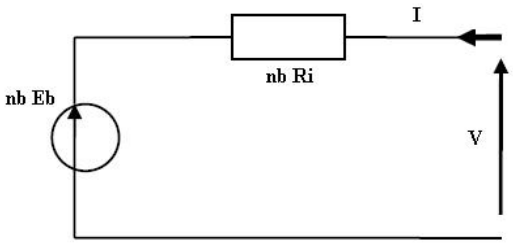

Fig. 4: Schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries

2.5.2 Caractéristiques de décharge et de charge

Les caractéristiques tension – courant d'un élément batterie en cas de décharge et de charge sont données respectivement par les figures ci-dessous:

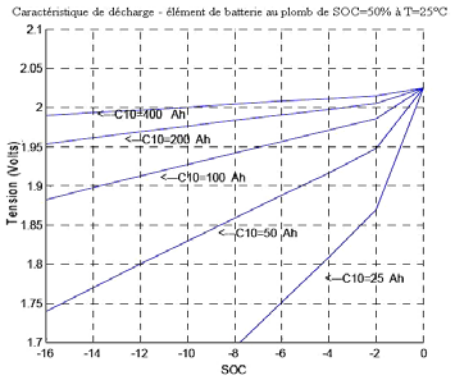

Fig. 5: Caractéristique de décharge

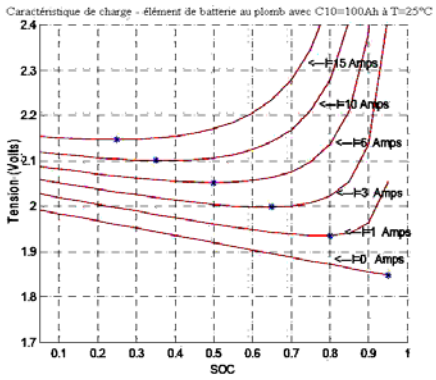

Fig. 6: Caractéristique de charge

3. APPLICATION DES MODELES

3.1 Calcul des charges

3.1.1 Sites d'implantations

Les sites que nous avons choisis devraient appartenir aux différentes zones climatiques algériennes. Dans notre cas, les sites choisis sont les suivants:

- Site de Bouzaréah: sur la zone comprenant le rivage de la mer et une partie du versant Nord des chaînes côtières,
- Site de Batna et El Oued: sur la zone comprenant les Hauts Plateaux situés entre l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien,
- Site Ghardaïa, Adrar, Tamanrasset dans la zone qui comprend le Sahara, au delà de l'Atlas Saharien.

Les coordonnées géographiques de ces sites sont présentées sur le **Tableau 1.**

Tableau 1: Coordonnées géographiques des six sites

Site / Caractéristique	Latitude	Longitude	Altitude
Adrar	27.82°N	00.18°W	263.8 m
Batna	35.55°N	6.18°E	1051.9 m
Bouzaréah	36.80°N	3.20°E	345 m
Tamanrasset	22.78°N	5.52°E	1377.0 m
Ghardaïa	32.40°N	03.80°E	468.4 m
El oued	33.50°N	6.18°E	62 m

3.1.2 Caractéristiques de la maison choisie

Dans cette étude, le choix s'est porté sur une maison type non raccordée au réseau de distribution d'énergie classique et équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Par ailleurs, il a été supposé que l'habitation est occupée en permanence durant toute l'année et que les équipements électroménagers fonctionnent sous une tension standard 220 V - 50 Hz (tension secteur).

Bilan énergétique

Sur le **Tableau 2**, nous présentons l'estimation des besoins énergétiques journaliers en Wh/j.

		Puissance (W)	**Durée utilisation (heures)**	**Consommation journalière (Wh)**
Eclairage	Chambre adultes	11	4	44
	Chambre enfants	22	5	110
	Salle de séjour	22	6	132
	Couloir	22	2	44
	Salle de bain	22	2	44
	Toilette	11	1	11
	Cuisine	11	7	77
Equipements	Réfrigérateur	120	8 (Hi)/12 (Et)	960/1440
	Téléviseur	75	7	525
	Ventilateur	100	4	400
	Divers	100	2	200
Total Ecj				**2547/3027**

3.2 Résultats du dimensionnement

3.2.1 Système photovoltaïque

Nous donnons respectivement sur le **Tableau 3** et le **Tableau 4**, le nombre de modules nécessaires pour notre utilisation, ainsi que le nombre de branches sachant que la tension de fonctionnement est de 48 V.

Tableau 3: Détermination du nombre total des modules

Mois/Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Janvier	28	36	36	56	36	24
Février	24	32	36	64	36	24
Mars	24	28	28	40	28	24
Avril	24	20	24	32	24	20

Mai	20	20	20	28	20	28
Juin	20	20	16	20	16	28
Juillet	20	16	16	16	16	20
Août	24	20	20	20	20	24
Septembre	24	24	20	24	20	32
Octobre	24	28	28	36	28	28
Novembre	24	36	32	52	32	24
Décembre	32	32	40	64	36	24

Tableau 4: Détermination du nombre de branches

Mois/Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Janvier	7	9	9	14	9	6
Février	6	8	9	16	9	6
Mars	6	7	6	10	7	6
Avril	6	5	5	8	6	5
Mai	5	5	6	7	5	7
Juin	5	5	4	5	4	7
Juillet	5	4	3	4	4	5
Août	6	5	4	5	5	6
Septembre	6	6	4	6	5	8
Octobre	6	7	6	9	7	7
Novembre	6	9	8	13	8	6
Décembre	8	8	10	16	9	6

3.2.2 Système éolien

Pour notre application, notre choix a porté sur sept types d'aérogénérateurs. Ainsi, nous présentons sur le **Tableau 5** ci-dessous, le nombre d'aérogénérateurs qui permettent de couvrir la charge choisie.

Tableau 5: Détermination du nombre d'aérogénérateurs

Site Type Aéro.	BWC 1000	Whisper 175	Montana	GEV 5/5	Inclin 6000	BWC Excel	GEV 7/10
Adrar	4	2	1	2	1	1	1
Ghardaïa	17	5	3	10	2	7	4
Bouzaréah	6	2	2	2	1	2	1
Batna	14	4	3	9	2	6	3
El Oued	8	3	2	4	1	3	1
Taman.	42	20	20	44	20	46	46

A partir de ce tableau, nous constatons que tout dépend de la puissance nominale de l'aérogénérateur et de la vitesse du vent du site concerné. Nous remarquons pour les sites où le potentiel éolien est faible, tel que le site de Tamanrasset, le nombre de machine pour couvrir la demande énergétique est très important quelques soient leurs puissances nominales. Pour les sites ayant des vitesses de vent allant de 3 m/s à 4 m/s, tels que Ghardaïa et Batna, nous remarquons que pour les aérogénérateurs de faibles puissances nominales ($Pn < 6$ kW), le nombre de machines pour couvrir la demande énergétique est important. Néanmoins, ce nombre diminue considérablement pour les aérogénérateurs de plus de 6 kW. Concernant les sites de Adrar, Bouzaréah et El oued, qui ont une moyenne de vitesse de vent supérieure à 5 m/s, nous remarquons que la couverture est satisfaite avec un nombre moyen pour les aérogénérateurs de puissance nominale inférieure à 6 kW et pour les aérogénérateurs de puissance nominale supérieur à 6 kW, comme nous l'avons constaté pour GEV 7/10 et INCLIN 6000, une seule unité peut couvrir la demande.

3.2.3 Système de stockage

Pour une autonomie de trois jours, et pour tout sites, le nombre de batterie de stockage pour chaque mois est donné sur le **Tableau 6**.

Tableau 6: Détermination du nombre de batteries

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Nb. bat.	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4

3.2.4 Choix de l'onduleur

Profil de charge (journalier)

La figure 7 donne l'évolution de la puissance appelée journalière. Nous constatons qu'un appel de puissance de l'ordre de 1150 Watts a lieu entre le coucher du soleil et le coucher des membres de la famille. Ainsi, le convertisseur devra donc avoir une puissance nominale d'au moins 1150 Watts. Mais par mesure de sécurité, nous prendrons 30 % de marge supplémentaire et ce convertisseur devra être en mesure de délivrer une puissance supérieure.

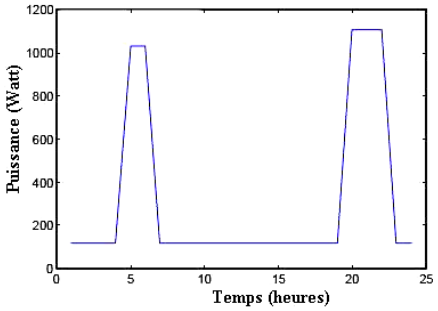

Fig. 7: Evolution de la puissance appelée

3.2.5 Choix du régulateur de charge

Puissance nominale

Sur la figure 7, nous constatons que la puissance maximale que l'onduleur doit délivrer est de l'ordre de 1150 W. Si on considère que le rendement de celui-ci est de 80 %, alors la puissance appelée Pu sera de 1438 W.

$$P_{nrég} = \frac{P_u}{\eta_{rég}} = \frac{1438}{0.95} = 1513 \text{ Watts} \quad (10)$$

avec $P_{nrég}$ et $\eta_{rég}$ sont respectivement la puissance nominale du régulateur et son rendement.

En ce qui concerne la tension nominale du régulateur, elle est conditionnée par la tension de service du convertisseur. Afin de minimiser le courant de consommation, et réduire la capacité de la batterie nous avons opté pour une tension de service de 48 V. De la, la tension nominale du régulateur sera donc de 48 V.

3.2.6 Dimensionnement du câblage

Câble reliant le panneau photovoltaïque au régulateur de charge

Le régulateur de charge choisi, travaillera. Avec trois entrées. Seulement deux (P1 et P2) de ces trois entrées, sont identiques et régulées et la troisième sera de plus petite surface et non régulée servira à assurer le courant de maintien de la batterie. Les résultats obtenus sont donnés dans le **Tableau 7**.

Calcul des sections de câble utilisé

Pour le calcul de la section du câble, la formule suivante a été utilisé:

$$S = \frac{I_{max}}{\Delta U_{max}} \times \rho_c \times l \qquad (11)$$

avec ρ_c résistivité du cuivre égale à $1.8\,10^{-8}\ \Omega/m$. Les résultats des différentes sections des câbles constituant notre système se résume sur le **Tableau 8**.

Tableau 7: Nombre de modules constituant les sous panneaux P1, P2 et P3

Panneaux/Sites	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
P1	3	4	4	7	4	3
P2	3	4	4	7	4	3
P3	2	1	2	2	1	2

Tableau 8: Différentes sections des câbles reliant le bloc du système hybride

Sites / Section (mm²)	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
S1 reliant P1 et P2 au reg.	13	17	17	30	17	13
S2 reliant P3 au régulateur	9	4	9	9	4	9
S3 reliant la bat. au rég.	17	19	22	35	19	17
S4 reliant la bat. à la charge	23	23	23	23	23	23

3.4 Couplage de gestion du système

3.4.1 Description du système couplé et son fonctionnement

Nous présentons sur la figure 8, le diagramme relatif au programme Simulink, du système hybride. Dans ce système, la charge électrique ou utilisation relative aux équipements est alimentée par les batteries à travers un convertisseur. Ces batteries sont chargées par le courant débité par chacun des systèmes, le contrôle de leur charge est assuré par un régulateur de charge.

Par ailleurs, dans le cas où il n'y a ni énergie solaire ni énergie éolienne et que la durée de la pénurie dépasse la durée d'autonomie du système, ce dernier devrait avoir recours au groupe électrogène. Dans le cas où même ce dernier tombe en panne, la charge sera coupée automatiquement.

Des lectures de l'état du système et des sorties peuvent être prises n'importe où dans les modèles avec des oscilloscopes Simulink qui affichent ou enregistrent les résultats dans les fichiers de données afin de pouvoir les utiliser dans d'autres outils de simulation où d'affichage.

3.4.2 Application aux différents sites choisis et discussion des résultats

Nous donnons sur les figures suivantes, les résultats de simulation obtenus pour un système hybride éolien, photovoltaïque et comme appoint le groupe électrogène.

Nous constatons que, pour les sites d'Adrar, Ghardaïa, Bouzaréah, El Oued et Batna, la charge est complètement couverte, respectivement par 7 modules et 2 aérogénérateurs de 1 kW; 12 modules et 2 aérogénérateurs de 3 kW; 6 modules et 1 aérogénérateur de 1 kW; 18 modules et 1 aérogénérateurs de 1 kW et 9 modules et 2 aérogénérateur de 3kW.

Pour les quelques mois exceptionnels où la couverture de cette charge représente un faible déficit. Ceci sera couvert par le groupe électrogène au lieu d'un ensemble supplémentaire de modules où d'aérogénérateurs dont les prix de revient sont relativement importants.

Pour le site de Tamanrasset, le potentiel éolien étant très faible alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant, ainsi nous proposons que la couverture de la charge sera assurée par 24 modules photovoltaïques. A cette couverture, nous devons associé un groupe électrogène pour pouvoir remédier au déficit représenté par le système photovoltaïque durant les mois de septembre et juin.

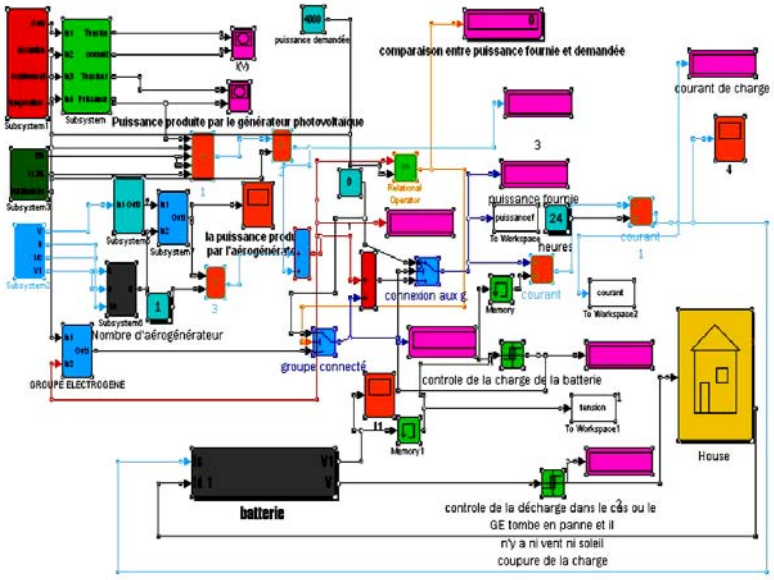

Fig. 8: Modélisation et gestion du système hybride

Par ailleurs, nous constatons que non seulement la charge est largement couverte, mais un surplus de production d'énergie entre les mois de Mars - Juillet, Février - Août, Février - Avril, Janvier - Août, Février - Octobre et Juillet - Août, respectivement pour les sites d'Adrar, Ghardaïa, Bouzaréah, Batna, El Oued et Tamanrasset. Ainsi nous proposons que pour chacun des sites, cette énergie sera exploitée à d'autres fins.

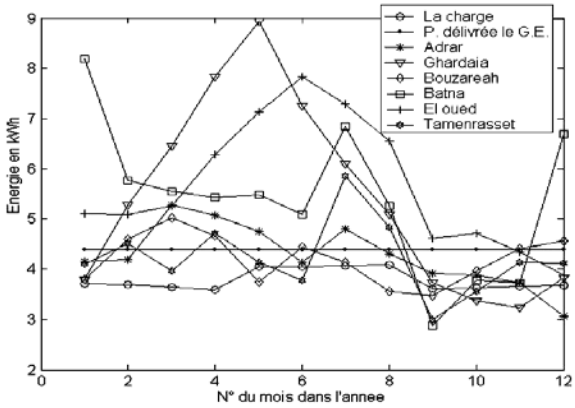

Fig. 9: Distribution de la charge et de la puissance produite par un système hybride

4. ETUDE ECONOMIQUE COMPARATIVE DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS

Toute étude de dimensionnement d'installations photovoltaïques, éoliennes ou hybrides (photovoltaïque, éolienne et diesel) doit être menée de manière à approcher au mieux la solution optimale du compromis: coût - satisfaction du besoin. C'est dans cette optique que nous avons

développé cette étude économique. Elle permet pour un site et des besoins donnés, de comparer entre les trois architectures du système et d'en évaluer les performances.

4.1 Taille des trois systèmes

Pour chacun des sites étudiés, il est donné la taille des systèmes de production renouvelables et du système de stockage (**Tableau 9**).

Tableau 9: **T**aille des générateurs et du système de stockage pour chacun des systèmes

Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Taille du générateur PV (Wc)	1530	1836	1836	3264	1836	1428
Taille du générateur éolien (W)	4000	15000	6000	12000	9000	0
Taille du système hybride						
PV	357	621	204	459	948	1224
Eolien	2000	6000	3000	6000	3000	0
Taille stockage (Ah)	525	525	525	525	525	525

4.2 Production annuelle

Le tableau suivant donne la production d'électricité générée par les trois systèmes sur une année, pour chacun des sites étudiés.

Tableau 10: Production annuelle des trois systèmes

Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Production (kWh/an)						
Générateur PV	2102	2456	2645	3823	2503	2134
Générateur Eolien	2368	3327	2661	2964	3207	0
Système Hybride	1636	2074	1583	1918	2148	1909

4.3 Consommation annuelle

Il est donné sur le tableau suivant, la consommation annuelle pour chacun des sites étudiés.

Tableau 11: Consommation annuelle de chaque site

Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Consommation annuelle (kWh/an)	1420	1413	1412	1406	1408	1409

Remarque

La valeur 0 a été attribuée pour la taille et la production annuelle éolienne relative au site de Tamanrasset, et ceci par le fait que les données dont nous disposons indiquent que le potentiel éolien sur ce site n'est pas important. Ainsi, il ne sera pas suffisant pour les applications éoliennes.

4.4 Prix de quelques moyens de productions (en kDA) [11, 12]

Tableau 12: Coût des divers équipements

Moyens	**Module**	**Aéro. 1 kW**	**Aéro. 3 kW**	**Groupe électrogène**	**Batterie**
Prix (kDA)	34.326	155.663	360.406	272.000	73.70

4.5 Prix total installé [11, 12]

Sur la figure 10, nous présentons le prix total installé de chacun des trois systèmes, à savoir: - le système photovoltaïque, - le système éolien, - le système hybride.

Nous constatons que le système éolien (aérogénérateurs) représente l'investissement le plus élevé relativement au système hybride et au système photovoltaïque. Par ailleurs, le système photovoltaïque représente la solution économique la meilleure pour l'ensemble des sites à l'exception du site de Batna, cette solution semble plus coûteuse par le fait que ce site représente un potentiel énergétique solaire très modéré durant la période hivernale.

Par contre, la solution photovoltaïque représente un déficit durant la période hivernale pour la majorité des sites choisis. Ainsi, l'utilisation d'un système hybride peut remédier à la lacune vu que notre principe pour le paramètre d'optimisation n'est pas le coût de production, mais plutôt celui du service rendu.

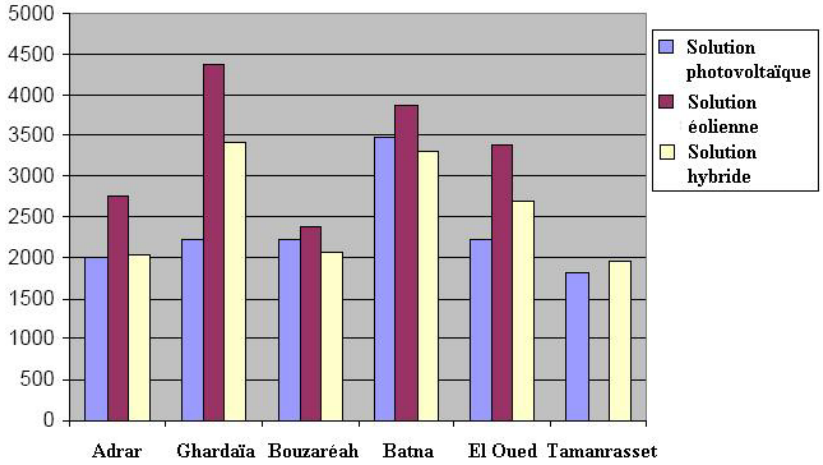

Fig. 10: Présentation du prix total installé (kDA) pour chacun des systèmes

4.6 Amortissements annuels (kDA)

Nous donnons ci-après l'amortissement annuel en kDA pour chacune des solutions, divers sites et divers durée de vie et taux d'intérêts. Ainsi, nous constatons d'une part, que plus la durée de vie est importante plus l'amortissements annuels diminue que se soit pour l'installation en hors batteries ou pour les batteries. Alors que pour des taux d'intérêts plus élevés, l'amortissement annuel augmente, ceci étant tout simplement lié au prix de revient de l'installation, de la fluctuation des prix de chacun des composants du système.

Tableau 13: Amortissements annuels pour les trois systèmes hors batterie

Amortissements annuels (kDA) pour la solution solaire hors batterie

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	211	157	131	240	179	149	241	179	149	403	299	249	241	179	149	194	144	120
10%	265	214	191	302	244	218	302	244	218	506	409	365	302	244	218	244	197	176
15%	324	278	260	370	317	297	370	317	297	619	532	497	370	318	297	299	256	240

Amortissements annuels (kDA) pour la solution éolienne hors batterie

Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	El Oued	Tamanrasset
Taux	Durée de vie de l'installation					

Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	309	230	192	517	384	320	260	194	161	453	337	280	389	289	241	0	0	0
10%	388	314	281	650	525	469	327	264	236	569	460	411	489	395	353	0	0	0
15%	475	408	381	795	683	638	401	344	321	697	598	559	599	514	480	0	0	0

Amortissements annuels (kDA) pour la solution hybride hors batterie

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	214	159	133	396	294	245	221	164	137	379	282	235	302	225	187	206	153	127
10%	269	217	194	498	402	359	278	224	200	477	385	344	380	307	274	259	209	187
15%	330	283	264	609	523	488	340	292	272	584	501	468	465	399	373	317	272	254

Tableau 14: Amortissements annuels des batteries

Amortissements annuels des batteries (kDA) pour la solution solaire, éolienne et hybride pour chacun des sites			
	Durée de vie de l'installation		
Taux d'intérêt	10 ans	15 ans	20 ans
5%	47	35	29
10%	59	48	43
15%	73	63	58

4.7 Coût total annuel

Pour ce qui est du coût total annuel, les mêmes remarques cités pour l'amortissement annuel restent valables. Ce coût est justement lié à l'amortissement de l'installation.

Tableau 15: Coût total annuel pour les trois systèmes

Coût total annuel (kDA) pour la solution solaire

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	318	252	220	354	281	245	354	281	245	554	439	383	355	281	245	297	236	205
10%	384	322	294	428	359	328	428	359	328	670	561	512	429	359	328	360	301	275
15%	457	401	378	510	447	422	510	447	422	797	698	659	510	447	422	428	375	354

Coût total annuel (kDA) pour la solution éolienne

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	439	348	303	695	551	480	380	301	262	617	488	426	538	426	372	0	0	0
10%	531	445	406	840	704	643	459	384	351	745	624	570	650	545	497	0	0	0
15%	632	554	523	1000	877	827	546	479	452	887	777	734	773	678	640	0	0	0

Coût total annuel (kDA) pour la solution hybride

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	323	255	223	546	433	378	331	262	228	526	417	364	431	341	298	312	247	216
10%	390	327	298	660	553	505	400	335	306	636	533	486	521	436	399	378	316	289
15%	464	407	384	786	689	650	476	417	394	756	663	626	620	543	513	449	394	372

4.8 Coût du kWh (DA/kWh)

Sur le tableau ci-dessous, nous donnons: - le prix du kWh photovoltaïque; - le prix du kWh éolien; - le prix du kWh hybride.

Les prix portés sur ce document et relatifs à une installation d'alimentation en électricité d'une maison individuelle, semblent très élevés par rapport à une installation conventionnelle. Ainsi, dans cet ordre de grandeurs, il sera très loin d'être compétitif au système conventionnel. Mais ceci est du à notre sens aux raisons suivantes:

- à nos jours, nous ne disposons pas de technologie d'acquisitions des équipements, qui coûte excessivement chère. Ce qui conduit à un prix d'investissement initial très élevé, y compris le transport.

- le problème d'inflation dans notre pays a fait que le prix de chacun des équipements reste élevé.

- le faible rendement des différents équipements conduit à une quantité considérable de chacun des équipements de conversion qu'il soit éolien ou photovoltaïque.

Par contre, il s'agit d'une énergie propre et gratuite, chose dont ne dispose pas l'énergie conventionnelle. Par ailleurs, d'un point de vue comparatif, nous constatons que d'après ces résultats que la solution photovoltaïque l'emporte sur les deux systèmes. Ceci est nettement plus apparent pour le système hybride. Pour ce qui est du système éolien, cette différence s'explique par le fait que ceci est lié directement à la disponibilité des deux potentiels solaire et éolien, dont le potentiel solaire est plus abondant sur tous les sites algériens, ce qui réduit considérablement les dimensions du système photovoltaïque, et d'autre part, tout en incluant le prix d'un aérogénérateur et la relation liant sa puissance - espace occupé et les contraintes de fonctionnement.

Par ailleurs, nous constatons que le système photovoltaïque représente une solution plus compétitive que le système hybride pour les sites de Adrar, Ghardaïa, El Oued et Tamanrasset. Ceci s'explique que le potentiel solaire est très abondant sur ces sites durant la quasi totalité de l'année. Ainsi installer quelques éoliennes en plus pour combler le manque d'un mois ou deux de l'année, ne fait qu'augmenter le prix du kWh de l'installation hybride.

D'autre part, pour le site de Batna et Bouzaréah, c'est le système hybride qui l'emporte, par le fait que le potentiel d'énergie solaire est très faible sur ces deux sites en période hivernale.

Ce qui conduit au recours du système hybride, qui pourra combler cette lacune en remplaçant une partie du système photovoltaïque par quelques éoliennes dont le potentiel est suffisant pour couvrir ces déficits.

Tableau 16: Coût du kWh pour les trois systèmes

Prix du kWh photovoltaïque (DA/kWh)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	146	115	100	193	151	132	129	101	88	140	110	95	137	107	93	97	76	66
10%	178	148	135	234	195	178	157	131	119	170	142	129	166	139	126	119	99	90
15%	212	186	175	279	244	230	188	164	155	204	178	168	199	174	164	142	123	116

Prix du kWh éolien (DA/kWh)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	181	142	123	204	161	140	138	108	94	203	160	139	163	128	111	X	X	X
10%	219	183	166	248	207	188	168	140	127	246	206	187	198	165	150	X	X	X
15%	262	229	216	296	259	244	200	175	165	294	257	243	236	207	195	X	X	X

Prix du kWh hybride (DA/kWh)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Int.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	192	151	132	258	203	177	204	161	140	269	212	184	196	154	134	159	125	108
10%	234	195	178	313	261	238	248	207	188	326	272	248	238	198	181	193	161	147
15%	279	244	230	374	327	308	300	259	244	389	341	321	284	248	234	231	202	190

4.9 Coût total actualisé

En ce qui concerne le coût total actualisé, les mêmes remarques constatées précédemment pour le prix total installé restent valables.

Tableau 17: Coût total actualisé pour les trois systèmes

Coût total actualisé photovoltaïque (kDA)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Act.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	2457	2617	2741	2739	2917	3056	2741	2919	3057	4281	4559	4776	2741	2919	3057	2300	2449	2565
10%	2364	2451	2505	2560	2732	2793	2636	2733	2794	4118	4270	4365	2636	2733	2794	2212	2294	2345
15%	2296	2345	2370	2560	2615	2642	2561	2616	2643	4000	4086	4129	2561	2616	2643	2149	2195	2218

Coût total actualisé éolien (kDA)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Act.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	3394	3615	3787	5372	5721	5993	2934	3125	3273	4765	5075	5315	4157	4427	4637	0	0	0
10%	3265	3386	3461	5167	5358	5477	2822	2926	2991	4583	4753	4858	3998	4146	4238	0	0	0
15%	3172	3240	3274	5020	5128	5182	2741	2800	2830	4452	4548	4596	3884	3967	4009	0	0	0

Coût total actualisé hybride (kDA)

Site	Adrar			Ghardaïa			Bouzaréah			Batna			El Oued			Tamanrasset		
	Durée de vie de l'installation																	
Taux Act.	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans	10 ans	15 ans	20 ans
5%	2494	2656	2782	4222	4496	4710	2557	2723	2853	4066	4330	4535	3332	3548	3717	2415	2573	2695
10%	2399	2488	2543	4061	4211	4305	2460	2550	2607	3910	4055	4145	3205	3323	3397	2323	2409	2463
15%	2331	2381	2406	3945	4030	4072	2389	2441	2466	3799	3880	3921	3113	3180	3213	2257	2306	2330

5. CONCLUSION

Le travail présenté dans cet article concerne les systèmes de production d'électricité pour un fonctionnement autonome. Ces dispositifs semblent amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement.

Notre travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système hybride moyennant le logiciel Simulink. Le programme de Matlab/Simulik, nous a permis de représenter le système sous forme de diagramme blocs. L'exemple de simulation a été appliqué aux six sites algériens où les données météorologiques et radiométriques (rayonnement, vitesse du vent, température ambiante et durée d'insolation) sont disponibles.

D'après l'analyse effectuée sur les résultats obtenus, la combinaison des deux sources d'énergies relie à un système d'appoint (groupe électrogène) engendre un profit énergétique considérable (présence quotidienne de l'alimentation).

REFERENCES

[1] M. Koussa, '*Détermination du Gisement Solaire Alger – Bouzaréah*', Thèse de Magister, Alger, Mars 1990.

[2] R. Hammouche, '*Atlas Vent de l'Algérie*', Office National de la Météorologie,

[3] Document de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, '*Programme de Traçage de la Distribution de Weibull*', Copyright, 1997 - 2003.

[4] N. Kasbadji-Merzouk and M. Merzouk, '*Useful Power Density of Wind Machine in Algeria*', Proceedings of IMEC-2004, International Mechanical Engineering Conference, Kuwait, December 5 - 8, 2004.

[5] H. Daou-Nedjari, '*Evaluation Mensuelle de la Densité de Puissance du Site de Bouzaréah'*, Fiche Technique de Bouzaréah, Rapport Interne, Juillet 2002.

[6] A. Sadoud et A. Chergui, '*Etude et Développement d'un Régulateur de Charge de Puissance Destiné à une Mini Centrale Photovoltaïque*', Projet de Fin d'Etudes, USTHB, 1991.

[7] J.A. Duffie et W.A. Beckmann, '*Solar Energy Thermal Process*', Wiley, New York, 1974.

[8] B. Bourgesm, '*Improuvement in Solar Déclinaison Computation*', Solar Energy, Vol. 35, N°4, pp. 367 – 369, 1985.

[9] S. Singer, B. Rozenshtein and S. Surazi, '*Characterization of PV Array Output Using a Small Number of Measured Parameters*', Solar Energy, Vol. 32, N°5, pp. 603 – 607, 1984.

[10] O. Gergaud, '*Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé à un Accumulateur*', Thèse de Doctorat, Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 9 Décembre 2002.

[11] Document, '*Le Catalogue des Outils Solaires*', Edition N°26, pp. 1 - 25, Sept 2001.

[12] Document, '*Le Convertisseur Universel de Devises*', 1145 Nicholson Rd, Suite 20, Newmarket Ontario, L3Y 9C3, Canada.

[13] D. Saheb-Koussa, '*Contribution à l'Etude Théorique du Comportement d'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque - Diesel) de Production d'Electricité sans Interruption*', Mémoire de Magister, Blida, 28 Septembre 2005.