

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

Djohra SAHEB-KOUSSA*, Maiouf BELHAMEL et Khaled BENFERHAT

*Centre de développement des énergies renouvelables Route de l'observatoire
B.P.62 Bouzaréah, Alger, Algérie.*

* Correspondance, courriel : dkoussa@cder.dz

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 composants 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 meilleures performances.

Mots-clés : *système éolien, système photovoltaïque, générateur diesel, système hybride, système de stockage, la charge, dimensionnement.*

Abstract

Contribution to the theoretical study of the behavior of hybrid system (wind - photovoltaic - diesel) for the production of electricity without interruption.

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 planned 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 which us to reach the best performances.

Keywords : *wind system, photovoltaic system, diesel system, hybrid system, storage system, the load, sizing*

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 d'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 faite 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 source d'énergie (solaire, éolienne et diesel) de production continue de l'énergie électrique. L'autonomie de ce système sera assuré par un système de stockage .Ce système est destiné a alimenté une maison type d'une famille moyenne. Habitée au cours de toute l'année. Sachant que cette maison peut être implantée sur six zones climatiques algériennes.

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. Modélisation mathématique

2-1. Modélisation du gisement solaire

2-1-1. Modèle de reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances globales sur un plan incliné

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

$$G_{inc} = B_{in} + D_i + R_i \quad (1)$$

Avec

B_{in} : irradiation directe sur un plan incliné ; D_i : irradiation diffuse sur un plan incliné ; R_i : irradiation réfléchi sur un plan incliné ;

2-1-1-1. Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances directes sur un plan incliné

$$B_{in} = R_b * (GH - DH) \quad (2)$$

Avec B_{in} , GH , DH et R_b sont respectivement les valeurs horaires des irradiances globale, diffuse et le facteur de forme. Ce dernier est donné par la relation suivante :

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

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

2-1-1-2. Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances diffuses sur un plan incliné

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

$$D_i = DH * (1 + \cos \beta) / 2 \quad (4)$$

Avec β angle d'inclinaison de la surface de captation ;

DH : irradiation diffuse sur un plan horizontal.

2-1-1-3. Reconstitution des moyennes mensuelles des irradiances réfléchies sur un plan incliné

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

$$R_i = (B_n \sinh + DH) * \rho * (1 - \cos \beta) / 2 \quad (5)$$

Avec ρ et B_n sont 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 appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de Weibull est fonction de deux paramètres c et k et s'écrit :

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

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 :

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

Comme exemple nous avons choisis 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 références : 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 proposé par [6-8] :

$$P = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P(v) f(v) dv \quad (8)$$

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 (voir **Figure 1.** et **2.**).

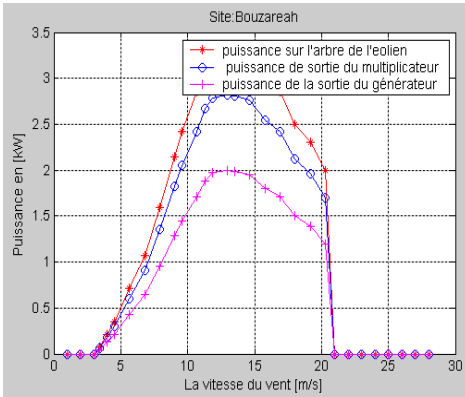


Figure1 : *Caractéristique de l'aérogénérateur Whisper 175*

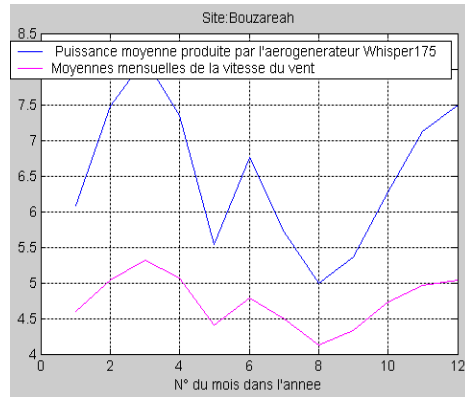


Figure 2 : *Variation mensuelle de la puissance produite et de la vitesse du vent*

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:

$$I=f(V, E_s, T_j) \tag{9}$$

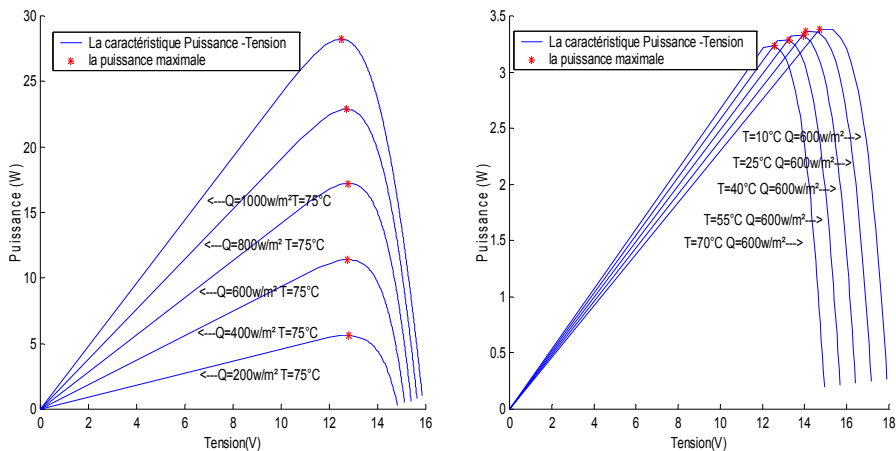


Figure 3 : *Caractéristique d'un panneau photovoltaïque*

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 , 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.

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 sources de tensions et sa résistance interne.

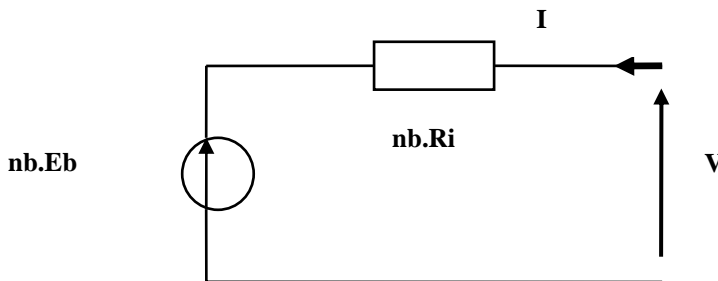


Figure 4 : Schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries.

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 :

la caractéristique de décharge d'un élément de batterie au plomb de de SOC=50% a T=25° C

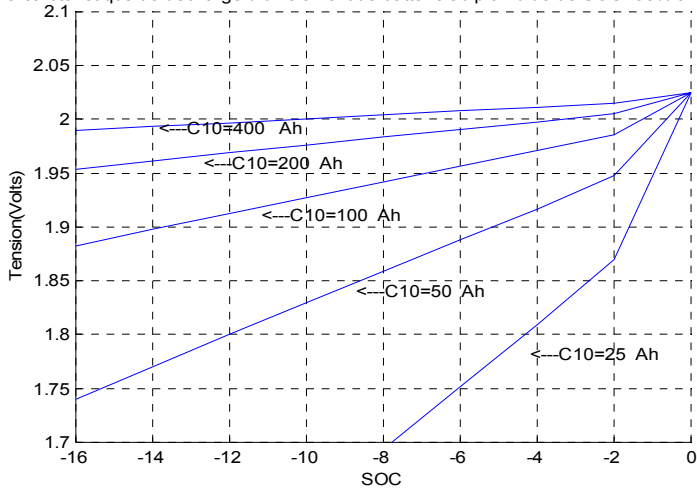


Figure 5 : Caractéristique de décharge

la caractéristique de charge d'un élément de batterie de plomb avec C10=100Ah a T=25° C

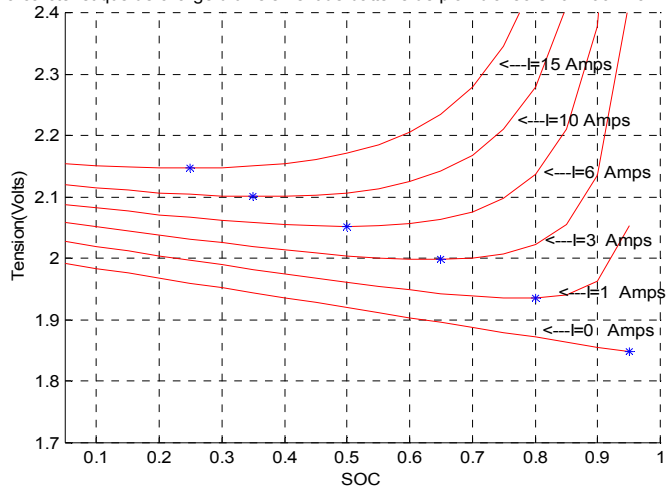


Figure 6 : Caractéristique de charge

3. Application des modèles

3-1. Calcul des charges

3-1-1. Les sites d'implantations :

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

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

Les différentes coordonnées géographiques des sites choisis pour notre étude sont présentées sur le **Tableau 1** ci dessous :

Tableau 1 : Coordonnées géographiques des six sites choisis

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

3-1-2. Caractéristiques de la maison choisie

Dans notre étude nous avons choisi une maison type non raccordé au réseau de distribution d'énergie classique et équipée de l'ensemble des appareils permettant de fournir le confort aux occupants. Par ailleurs dans notre cas nous supposons que l'habitation sera occupée en permanence durant toute l'année et que Les équipements domestiques fonctionnent sous une tension standard 220V-50Hz (tension secteur).

3-1-2-1. Bilan énergétique

Sur le **Tableau 2** nous présentons l'estimation des besoins énergétique journalier en Wh/j.

Tableau 2 : l'estimation des besoins énergétiques journalier

		Puissance (W)	Durée d'utilisation (heures)	Consommation journalière (Wh)
Eclairage	Chambre d'adultes	11	4	44
	Chambre d'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 (hiver)/12 (été)	960/1440
	Téléviseur	75	7	525
	Ventilateur	100	4	400
	Divers	100	2	200
Total Ecj				2547/3027

3-2. Résultat 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 charge ainsi que le nombre de branches sachant que la tension nominale choisie est de 48V.

Tableau 3 : Détermination du nombre total des modules

Mois/Sites	Adrar	Ghardaia	Bouzareah	Batna	El oued	Tamenrasset
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 branche

Mois/Sites	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 d'aérogénérateur	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
Tamanrasset	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 quel que soit leurs puissances nominales. Pour les sites ayant des vitesses de vent allant de 3m/s à 4 m/s, tel que Ghardaïa et Batna, nous remarquons que pour les aérogénérateurs de faibles puissances nominales ($P_n < 6kW$), le nombre de machine 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 5m/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 6kW, comme nous l'avons constaté pour GEV7/10 et INCLIN 6000, une seule unité peut couvrir la demande.

3-2-3. Système de stockage

Pour une autonomie de trois jours, pour tous les sites choisis, le nombre de batterie de stockage pour chacun des mois est donné sur le **tableau 6** ci-dessous :

Tableau 6 : Détermination du nombre de batterie

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S.	O	N.	D.
Nombre de batterie	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.

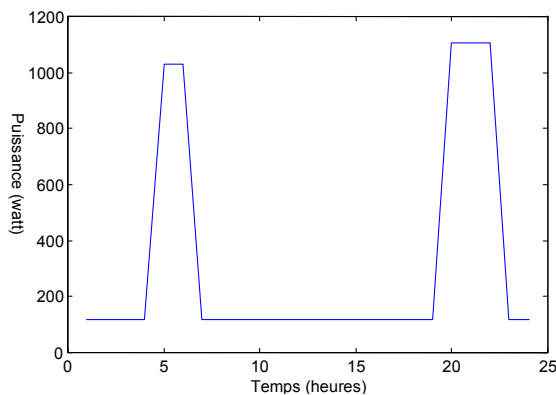


Figure 7 : Evolution de la puissance appelée

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.

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 1150W. Si on considère que le rendement de celui-ci est de 80%, alors la puissance appelée P_u sera de 1438W.

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

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 48V. De la, la tension nominale du régulateur sera donc de 48V.

3-2-6. Dimensionnement du câblage :

3-2-6-a. 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** ci-dessous:

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

Panneaux/Sites	Adrar	Ghardaia	Bouzareah	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

3-2-6-b. Calcul des sections de câble utilisé

Pour le calcul de la Section de câble nous avons utilisé la formule suivante :

$$S = \frac{I_{\max}}{\Delta U_{\max}} \times \rho_c \times l \tag{11}$$

Avec ρ_c résistivité du cuivre égale a $1.8 \cdot 10^{-8} \Omega/m$.

Les résultats des différentes sections des câbles constituant notre système se résume sur le **Tableau 8** ci dessous:

Tableau 8: Différentes sections des câbles constituant le système hybride

Section (mm ²)/Sites	Adrar	Ghardaia	Bouzareah	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

3-3. Couplage et gestion du système

3-3-1. 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 relative aux équipements est alimentée par les batteries à travers un convertisseur. Ces batteries sont chargées par le courant débiteur 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 pénurie dépasse la durée d'autonomie du système, Ce dernier aura 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.

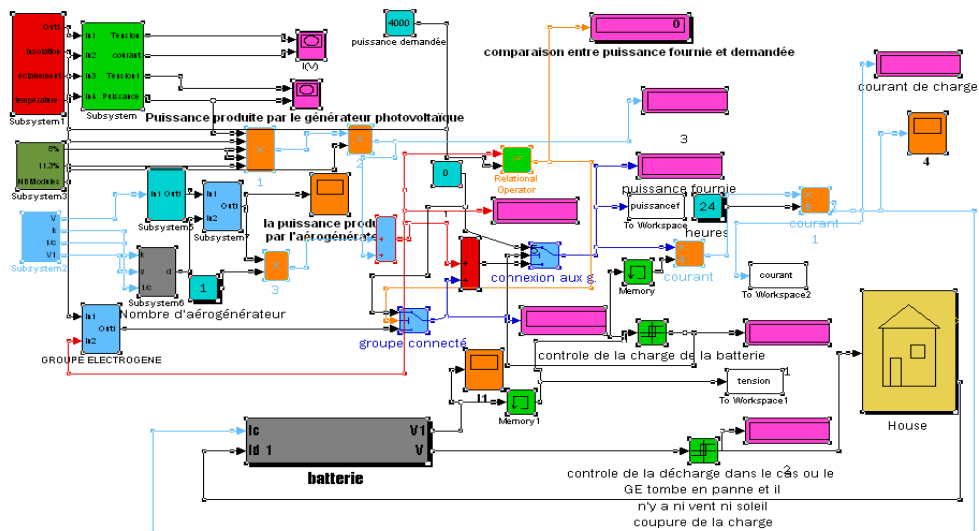


Figure 8 : Modélisation et gestion du système hybride

3-3-2. Application aux différents sites choisis et discussion des résultats

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

Nous constatons que pour les sites de Adrar, Ghardaïa, Bouzaréah, El oued et Batna la charge est complètement couverte respectivement par 7 modules et 2 aérogénérateurs de 1kW, 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 important.

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 associer un groupe électrogène pour pouvoir remédier au déficit représenté par le système photovoltaïque durant les mois de septembre et juin.

Par ailleurs, nous constatons que non seulement la charge est largement couverte mais un surplus de production d'énergie entre les mois de mars et juillet, février et août, février et avril, janvier et août, février et octobre et juillet et 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 exploité dans d'autre fin.

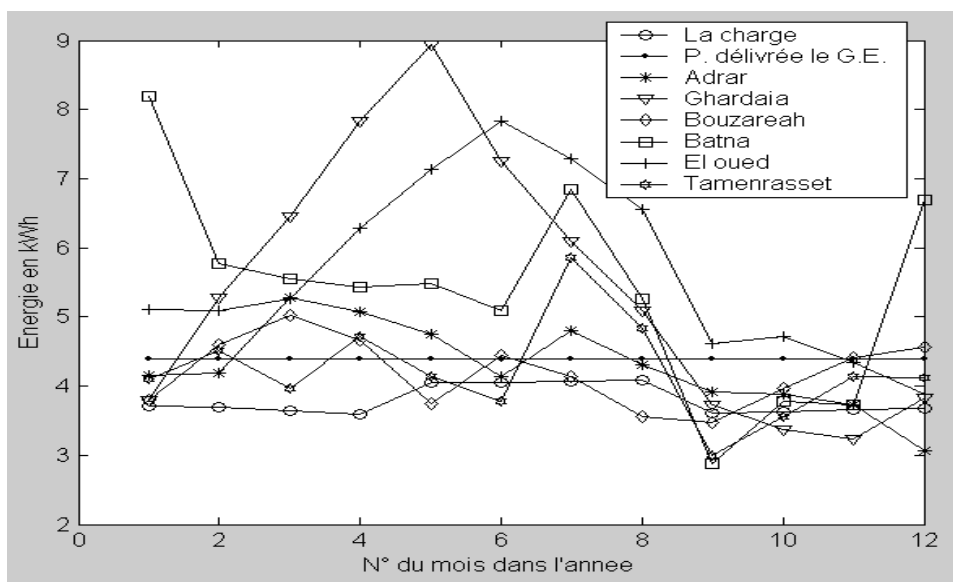


Figure 9 : *Distribution de la charge et de la puissance produite par un système hybride*

4. Conclusion

Le travail présenté dans cet article concerne les systèmes de production d'électricité d'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. (MATLAB) qui nous a permis de représenter le système sous forme de diagramme en blocs. L'exemple de simulation a été appliqué à six sites algériens où les données météorologiques (rayonnement, vitesse du vent, la température ambiante et la durée d'insolation) sont disponibles.

D'après l'analyse faites sur les résultats, 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).

Références

- [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] - Association danoise de l'industrie éolienne, "Programme de traçage de la distribution de Weibull", Copyright (1997-2003).
- [4] - N.Kesbadji-Merzouk. and M.Merzouk, "useful power density of wind machine in Algeria", Proceedings of IMEC 2004, International mechanical engineering Conference. (December 5-8 2004), Kuwait.
- [5] - H.Daou-Nedjar, "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'études, (1991).
- [7] - J.A.Duffie et W.A.Beckman, Solar Energy thermal process, Willier, New York (1974).
- [8] - Bernard Bourgesm, "Improvement in solar declinaison computation", *Solar Energy*, Volume (35), N°4, (1985)., 367- 369.
- [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, (1984), 603-607, .
- [10] - O.Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur". Thèse de DOCTORAT, Antenne de Bretagne de l'école normale supérieure de cachan, (9 décembre 2002).