

OPTIMISATION DYNAMIQUE EN TEMPS REEL D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIENNE/PV/BATTERIES CONNECTE AU RESEAU

DYNAMIC OPTIMIZATION IN REAL TIME OF A HYBRID SYSTEM WIND TURBINE/PV/BATTERY CONNECTED TO THE NETWORK

MOSTEFA BENMEDDOUR

Laboratoire de Génie Electrique Biskra « LGEB »
Département de Génie Electrique, Faculté des Sciences et de la Technologie
Université de Biskra
m.benmeddour@univ-biskra.dz

RESUME

Le but de cette étude est le contrôle optimal et l'optimisation dynamique d'un micro réseau vert hybride (éolien-solaire) destiné à fournir de l'énergie électrique pour des fins d'usage domestique et de pompage d'eau pour irrigation. Le modèle d'optimisation proposé, consiste à gérer le fonctionnement du micro réseau de façon viable et efficace pour satisfaire la demande à tout moment de la journée. Ce système peut fonctionner de manière autonome ou connecté au réseau de distribution. Le modèle s'applique aux cas d'études de type agricole situés dans la région de **Biskra du Sud-est de l'Algérie**. Le contrôleur principal disponible au niveau du micro réseau résolve l'algorithme pour chaque intervalle de temps et transmet les signaux de commande au système de gestion de l'énergie qui gère les composants du micro réseau. Le contrôle du flux énergétique est formulé comme un problème d'optimisation multiobjectif avec certaines contraintes. Les résultats de simulation, obtenues, prouvent l'efficacité du modèle et confirment le profit de l'investissement pour alimenter tout site agricole au grand sud de l'Algérie dont les sources d'énergies renouvelables sont favorables.

MOTS CLES: Systèmes renouvelables hybrides, gestion de l'énergie, optimisation multi objectifs.

ABSTRACT

This paper aims to optimally control and optimize the operation of a sustainable hybrid microgrid (wind-solar) intended to provide electrical power for the purposes of domestic use and pumping water for irrigation. The proposed optimization model aims to ensure an efficient and viable operation of the microgrid to meet the demand during the time horizon. This system can operate as a standalone system or connected to the electric distribution network. The model has been tested through case studies located in the region of Biskra (South East of Algeria). The master controller available in the microgrid level resolves the algorithm and sends control signals as well set points to the energy management system that is in charge of managing the sub-systems of the microgrid. The control of the energy flow is formulated as a multiobjective constrained optimization problem with constraints. The obtained results, presented, prove the effectiveness of the model and confirm the profitability of the investment for any agricultural site in the big south of Algeria whose renewable energy sources are favourable.

KEYWORDS: Renewable hybrid systems, energy management, multiobjective optimization.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو التحكم الأمثل و الحصول على امثل نظام ديناميكي لشبكة هجينة ونظيفة (رياح/شمسية) لتوفير الطاقة الكهربائية الضرورية لغرض الاستخدام المنزلي وضح مياه الري. النموذج الأمثل المقترح، يتمثل في تسيير تشغيل الشبكة الصغيرة بشكل عملي وفعال لتلبية الطلب الكهربائي خلال اليوم. يمكن ان يشتغل هذا النظام كنظام مستقل او متصل بشبكة التوزيع الكهربائي العامة. هذا النموذج يمكن تطبيقه في أمثلة زراعية واقعة في منطقة بسكرة (جنوب شرق الجزائر). تقوم وحدة التحكم الرئيسية المتوفرة على مستوى الشبكة بحل الخوارزمية في كل مجال زمني وترسل إشارات التحكم إلى نظام تسيير الطاقة الذي يدير كل مكونات الشبكة. التحكم في تدفق الطاقة يتمثل بأقصى تمثيل وفق بعض القيود.

نتائج المحاكاة المتحصل عليها تثبت فعالية النموذج وتؤكد فوائد الإستثمار في التطبيقات الفلاحية في أي مكان من الجنوب الجزائري الكبير بشرط توفر مصادر ملائمة للطاقات المتجددة.

1 INTRODUCTION

La demande croissante de l'énergie, les inévitables prévisions d'épuisement des ressources d'énergies fossiles, les effets climatiques inquiétants causés par la croissance des gaz à effet de serre (**GES**) sur la planète incitent les gouvernements à intégrer les sources d'énergie renouvelables (**SER**) à leurs politiques énergétiques en brisant leur dépendance des énergies fossiles, origines du dioxyde de carbone (**CO₂**) dans l'atmosphère et ce, pour produire de l'électricité propre et réduire ainsi l'émission des GES.

Pour éviter les troubles du réseau de distribution externe (**RDE**) et profiter des SER on peut renforcer l'existant, déjà relié au réseau, par des SER décentralisés ou remplacer la production classique par des SER disponibles, qui sont devenues rentables. Pour réduire le coût des investissements on utilisera des systèmes de production par énergies renouvelables hybrides (**SERH**) avec système de stockage par batteries (**SSBt**) adéquat connectés au réseau. Les systèmes SERH se présentent sous forme de microréseaux intelligents verts (**MRIV**) (**Smart Microgrid**) qui à échelles réduites sont admis comme option technologique de production de l'électricité propre [1]. L'importance de ces énergies a fait que les méthodes d'intégration des sources photovoltaïques (SEPV) et éoliennes (**SEEO**) dans les systèmes de production hybrides présentent un intérêt très croissant. La nouvelle structure des réseaux, la production d'électricité décentralisée par des SER reliées directement au réseau constituent l'essentiel des thématiques de recherche liées aux MRIV. On note que ces sources n'infectent ni l'air ni l'eau ni la terre, ne détruisent aucune bâtisse et laissent zéro déchets solides toxiques. Les MRIV nécessitent des systèmes de commande intelligents pour leur gestion. Dans la littérature, les SER individuelles, combinées avec un groupe électrogène (**GE**), sont les plus utilisées [1, 2, 3] dans les systèmes hybrides, isolés ou raccordé au réseau, destinés à alimenter les charges de faible ou moyenne puissance. Le moyen de justifier le financement élevé, en amplifiant l'apport effectif des SER pour assurer l'énergie demandée, consiste à éliminer le GE afin de réduire le coût global du système. La combinaison des sources SER, comme sources hybrides avec d'autres sources non renouvelables, est formellement fiable et stable. Mais, les changements brutaux du climat affectent la fiabilité du système. L'insertion du stockage par batteries et/ou la connexion au réseau RDE sont très sollicitées pour ajuster les irrégularités de ses sources.

La plus part des travaux de recherche ont été réalisés en prenant comme système d'appoint, un GE ou un autres procédés dont le fonctionnement est lié à la nature des besoins [4]. Un système d'appoint, tel que le GE, réduit la capacité de stockage utile et le coût mais il présente comme inconvénients l'approvisionnement continu en carburant, l'assistance, la pollution et le bruit.

Plusieurs méthodes d'optimisation sont exposées dans la littérature. Pour des applications résidentielles et/ou agricoles, avec des configurations en DC ou en AC, certains travaux de recherche utilisent ces techniques d'optimisation pour concevoir et contrôler les sources SER sous forme de microréseaux intelligents isolés ou reliés au réseau. Parmi ces méthodes on cite : la conception multiobjectif [2, 5, 6], l'utilisation des Algorithmes Génétiques et la probabilité de perte d'énergie (en anglais LPSP) [7, 8], et l'intelligence artificielle [9] etc.

Dans certains pays en voie de développement, les besoins en eaux d'irrigation et potable sont très forts alors qu'en parallèle ils disposent d'une forte disponibilité en radiation solaire et en sites ventés. Le pompage de l'eau, à une certaine échelle, est l'une des applications les plus intéressantes des énergies solaire et éolienne. En effet, plusieurs chercheurs tentent de mettre au point des systèmes viables pour assurer les besoins en eau domestique et pour l'irrigation éolienne [10, 11] et solaire [12, 13] individuelles. Ces applications libèrent certainement l'agriculteur des problèmes liés au carburant ou/et à l'existence du réseau facilement accessible.

Les atlas développés [14, 15] montrent que les potentiels éoliens et solaires, au Nord-Sud de l'Algérie, sont favorables à l'installation de tels systèmes. Sur le plan agricole, le faible taux de pluviométrie et le manque d'infrastructures adéquates pour une gestion efficace de ces eaux exposent les terres cultivables aux actions des agents d'érosion.

Les systèmes hybrides SERH représentent des sources vertes et fiables pour des régions lointaines. On distingue une croissance régulière des applications de ces systèmes et par conséquent la résolution des problèmes d'optimisation de ces systèmes est devenue une nécessité et les méthodes d'optimisation multiobjectif sont aujourd'hui les approches les plus adoptées pour remédier à ce problème.

Ce travail propose un modèle adéquat et détermine un algorithme d'optimisation par la fonction multiobjectif pour gérer l'énergie produite, de façon autonome par des SER intégrées à un système hybride avec les objectifs suivants : maximiser l'utilisation des SER disponibles, se dispenser du groupe électrogène et exploiter le rendement nominal des équipements tout en veillant sur la fiabilité du système. L'étude cible les installations hybrides qui tirent leur puissance électrique des sources SEPV et SEEO en mode de fonctionnement autonome voire même quand elles sont reliées au réseau. Il s'agit donc de contrôler d'optimiser en temps réel l'énergie produite par ces sources pour assurer la demande en électricité nécessaire à alimenter des unités d'habitation et de pompage d'eau pour l'usage domestique et pour l'irrigation de terres agricoles. La gestion de la production se fait avec un minimum de fluctuations de la charge, un niveau de charge maximale dans le système de stockage de l'énergie et un maximum de volume d'eau

pompée dans un réservoir collectif. La technique d'optimisation multiobjectif est mise en évidence et est définie à partir des paramètres de gestion de cette application.

2 DESCRIPTION DU PROJET

Le microréseau proposé exploite les sources renouvelables, SEPV et SEEO, avec des batteries de stockage SSBt et est connecté au réseau afin de permettre l'évacuation de l'énergie produite en dehors des périodes d'appoint de production.

L'excès de production peut être partiellement stocké dans le SSBt ou/et évacué dans le réseau et à toute défaillance ou instabilité pouvant survenir sur le réseau, le microréseau peut être isolé et est capable de fonctionner en mode autonome.

Dans ce travail, un modèle unitaire du système hybride intégré, basé sur une combinaison de procédés de production/conversion de l'énergie renouvelable (PV, éolien, pompage) sera présenté. Le modèle inclura un problème d'optimisation dynamique en temps réel pour le contrôle et la gestion du flux de l'énergie. La technique

développée permet au système d'atteindre une efficacité meilleure par un programme qui maximise la balance entre la production et la demande à faible coût possible. Le système et son contrôle basé sur la fonction multiobjectif seront simulés sous le logiciel d'optimisation « Lingo » (www.lindosystems.org) en exploitant la base de données de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire de la région et de démontrer l'efficacité des lois de contrôle utilisées pour gérer la production de l'énergie électrique afin d'optimiser son utilisation tout en assurant la demande de la charge à temps réel.

3 IDENTIFICATION DU SITE

La région de Biskra est caractérisée par des vitesses des vents et une insolation sur un plan horizontal qui sont remarquables. La base des données utilisées, émane du site de la NASA [16], et sont données dans le tableau 1. La ville de Biskra est localisée géographiquement par les coordonnées:

Longitude: 5° 75' 00'' E; altitude: 87 m

Latitude: 34° 85' 00'' N; avec albédo: 20%.

Tableau 01: Données météorologiques de v (m/s) et I_r (W/m^2) par mois. [Source: Site NASA]

t (h)	V Vent à 50m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1h30	Avg@0130	5,51	5,62	5,61	6,13	6,15	6,4	6,48	6,17	5,83	5,49	5,53	5,48
4h30	Avg@0430	5,52	5,54	5,51	5,85	5,73	5,98	5,99	5,81	5,47	5,25	5,52	5,49
7h30	Avg@0730	5,15	4,75	4,21	3,86	3,53	3,66	3,36	3,4	3,63	4,2	4,95	5,19
10h30	Avg@1030	2,77	3,22	3,86	4,49	4,4	4,51	4,3	3,6	3,08	2,73	2,59	2,68
13h30	Avg@1330	4,23	4,5	4,55	4,66	4,3	3,88	3,38	3,16	3,26	3,81	4,09	4,15
16h30	Avg@1630	4,56	4,66	4,78	4,81	4,34	3,89	3,7	3,45	3,45	3,98	4,38	4,45
19h30	Avg@1930	5,27	5,36	5,42	5,64	5,37	5,39	5,33	4,9	4,8	4,99	5,11	5,19
22h30	Avg@2230	5,52	5,67	5,71	6,26	6,32	6,63	6,76	6,28	5,9	5,58	5,48	5,44
	V_{moy} [m/s]	4,82	4,92	4,96	5,21	5,02	5,04	4,91	4,60	4,43	4,50	4,71	4,76

t (h)	I_r Irradiance	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1h30	Avg@00	n/d											
4h30	Avg@03	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
7h30	Avg@06	0	0,01	0,04	0,11	0,13	0,14	0,12	0,11	0,07	0,03	0,02	0,01
10h30	Avg@09	0,24	0,32	0,42	0,6	0,69	0,72	0,71	0,64	0,5	0,36	0,27	0,23
13h30	Avg@12	0,39	0,54	0,7	0,79	0,86	0,89	0,9	0,85	0,74	0,57	0,39	0,34
16h30	Avg@15	0,18	0,28	0,37	0,44	0,52	0,6	0,61	0,49	0,33	0,23	0,15	0,14
19h30	Avg@18	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,09	0,05	0,02	0	0	0
22h30	Avg@21	n/d											

4 SPECIFICATIONS TECHNIQUES DE LA CHARGE

La charge considérée combine un foyer (D_m) de type F3 pour une famille de (7) sept membres, équipé d'appareils électroménagers standards et d'un système de pompage d'eau (P_g) pour l'irrigation et les besoins domestiques. L'énergie demandée par le foyer, U_{Dm} [kWh], est relevée par lecture directe sur le compteur et évaluée en moyenne journalière.

La quantité d'eau, Q_{Eau} [m^3/h], nécessaire sera pompée et stockée dans un réservoir collectif ouvert

Dans cette étude la consommation d'énergie journalière, sous 220 V AC, est relevée sur le compteur d'énergie sur la période « Novembre - Décembre 2013 » chaque 2 heures. Le volume d'eau demandé est évalué à $50 m^3$ chaque 2 heures, ce qui représente un équivalent énergétique de **6,049 kWh**. Cette quantité d'eau doit être pompée d'un puits de hauteur manométrique totale HMT de **40 m** avec un rendement de pompage de 90% et disponible de 08 h à 18 h. La consommation énergétique détaillée du 11/12/2013 au 20/12/2013 par intervalles de temps de 2 heures est donnée dans la figure 1 durant le mois critique (Décembre) de l'année où les conditions climatiques sans les moins

favorables à l'insolation. On remarque que les limites des demandes journalières correspondent aux 24^{ème} et 25^{ème} jours du mois.

Comme la demande en énergie domestique varie chaque

jour on a considéré comme base de calcul la journée du 13/12/2013. Le tableau 2 et la figure 1.a montrent les données recueillies en considérant que l'énergie consommée par le système d'irrigation est toujours la même.

Tableau 02: Consommation énergétique en kWh du 13/12/2013

t [h]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	U _{tot} /j
U _{Dm}	0,70	1,20	0,80	1,54	1,46	1,24	1,64	1,72	1,50	1,30	2,20	0,98	16,28
U _{Pg}	0	0	0	6,049	6,049	6,049	6,049	6,049	6,049	0	0	0	36,29

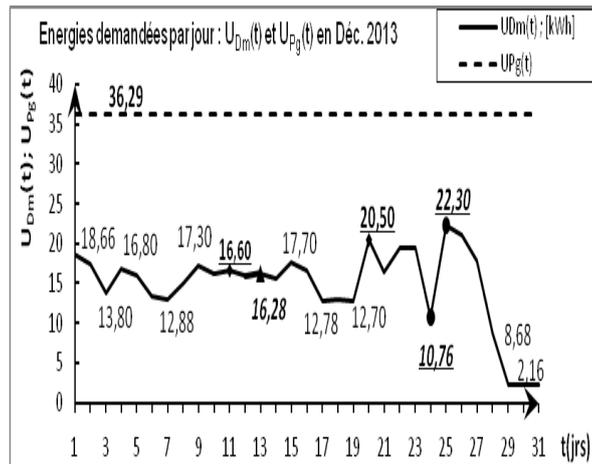


Figure 01: Variations de la demande par jour U_{Dm}(t) et U_{Pg}(t) en Décembre 2013

(SEEO et SEPV) et la source contrôlable (stockage électrochimique SSBt) le tout relié au réseau RDE avec un fonctionnement indépendant. Pour un fonctionnement convenable, le système doit comporter un onduleur pour adapter l'alimentation DC aux charges AC de même qu'une station de monitoring, pour mesurer les paramètres (courant, tension, insolation, température...etc.).

Les deux sources produisent de l'électricité, selon les données locales du vent et de l'irradiation solaire, pour assurer l'énergie demandée par la charge. Les batteries peuvent stocker l'énergie quand la production satisfait la charge et réalimenter celle-ci lors du besoin. Il faudrait une seule unité de contrôle et de management pour contrôler le flux de l'énergie mais l'approvisionnement à partir du réseau doit être minimisé étant donné qu'il est non renouvelable.

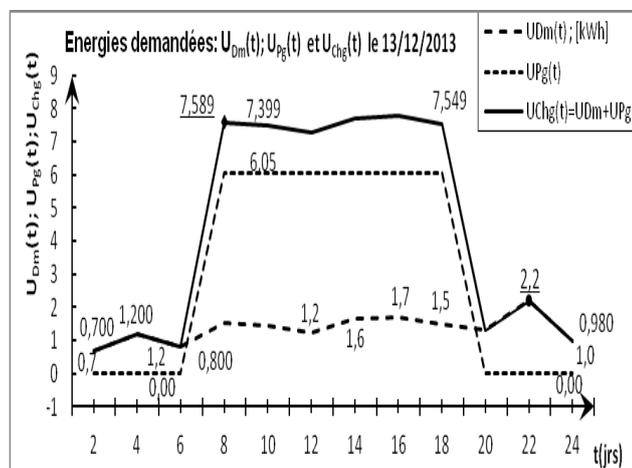


Figure 01.a: Variations de la demande journalière. U_{Dm}(t) et U_{Pg}(t) le 13/12/2013

La charge du 13/12/2013 est caractérisée par une énergie totale (U_{Dm}+U_{Pg}) de 52,57 kW/j.

5 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE SERH

Le microréseau intelligent (figure 2) regroupe deux parties principales : le système de production hybride SERH

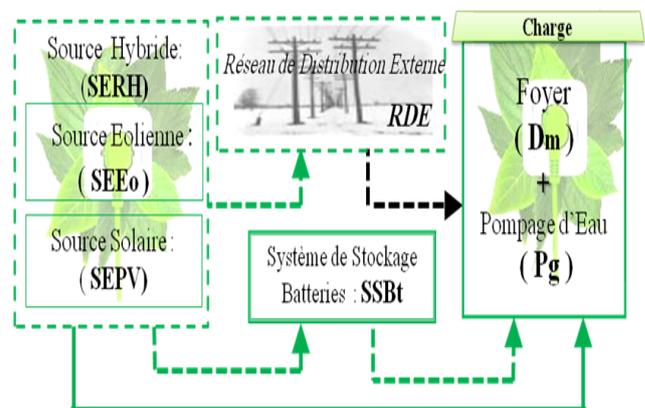


Figure 02: Topologie du Système hybride SEEO/SEPV/SSBt relié au réseau RDE

L'excédent d'énergie produit sera stocké dans les batteries pour une utilisation ultérieure, durant les périodes où le système SERH fournira assez d'énergie pour satisfaire la demande. Pendant la période de surproduction d'énergie et si la capacité maximale des batteries est atteinte l'excédent d'énergie sera systématiquement injectée dans le réseau pour d'autres fins. Pour exploiter ce modèle il est nécessaire d'avoir à disposition la banque de données du site, les spécifications détaillées et le coût des composants.

6 SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES COMPOSANTS DU SYSTEME

Les paramètres techniques des composants utilisés dans le système sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 03: Spécifications techniques des composants du système hybride

SEEO : Eolienne		SEPv : Solaire		Pompage	
P_n nominale [kW]	50	A_{PV} surface [m ²]	100	Q_V : Débit [m ³ /h]	30
v_d démarrage [m/s]	3	η_{PV} rendement [%]	15	η_{ps} : rendement [%]	90
v_n nominale [m/s]	11	p_f facteur d'assemblage [%]	90	HMT: Hauteur totale [m]	93
v_c coupure [m/s]	25	η_{pc} rendement de Conditionnement [%]	86	P_m : Puissance moteur [kW] Type : S-181A/4*	18,5 25 HP
H hauteur [m]	50			I_n : Courant [A]	38

Avec:

- Pour l'Eolienne :

P_n : puissance nominale ; v_d : vitesse de démarrage, v_n : vitesse nominale ; v_c : vitesse de coupure ou limite.

- Pour les panneaux solaires :

A_{PV} : surface des panneaux solaires;

η_{PV} : rendement des panneaux; p_f : facteur d'assemblage des panneaux.

- Pour le pompage :

HMT: hauteur manométrique totale; Q_V : débit volumique de la pompe.

- $u_{Rx,Dm}^t$ ($u_{Rx,Pg}^t$) : Energie fournie par le réseau électrique [kWh] pour alimenter le foyer (pompage de l'eau), durant l'intervalle (t, t+dt),
- Q_{Eau}^t : Quantité d'eau pompée [m³] durant l'intervalle (t, t+dt).
- m^t : Niveau d'eau dans le réservoir [m³/h] durant l'intervalle (t, t+dt), réservoir ouvert.
- x^t : Niveau de la charge des batteries [kWh] durant l'intervalle (t, t+dt).

7 DESCRIPTION DU MODÈLE

NOTATIONS UTILISÉES:

- u_{PV}^t (u_{Eo}^t): Energie produite par l'éolienne (PV) [kWh], durant l'intervalle (t, t+dt ; dt = 2h) ;
- $u_{PV,Dm}^t$ ($u_{PV,Pg}^t$) : Energie fournie par les modules PV [kWh] pour alimenter le foyer (pompage de l'eau), durant l'intervalle (t, t+dt) ;
- $u_{Eo,Dm}^t$ ($u_{Eo,Pg}^t$) : Energie fournie par l'éolienne [kWh] pour alimenter le foyer (pompage de l'eau), durant l'intervalle (t, t+dt),
- $u_{PV,Bt}^t$ ($u_{Eo,Bt}^t$) : Energie produite par les

modules PV (éolienne) [kWh] à stockée dans les batteries durant l'intervalle (t, t+dt);

- $u_{PV,Rx}^t$ ($u_{Eo,Rx}^t$): Excès de production des modules PV (éolienne) [kWh] envoyé au réseau électrique durant l'intervalle (t, t+dt);
- $u_{Bt,Dm}^t$ ($u_{Bt,Pg}^t$) : Energie fournie par les batteries [kWh] pour alimenter le foyer (pompage de l'eau), durant l'intervalle (t, t+dt),

A- ENERGIE PRODUITE PAR L'EOLIENNE

Le modèle suivant (Eq. 1) est utilisé pour simuler, instantanément, l'énergie électrique produite par la source éolienne :

$$P_{Eo}^t = \begin{cases} 0 & \text{si } v^t < v_d \text{ ou } v^t > v_d \\ P_n \cdot (a \cdot (v^t)^3 - b) & \text{si } v_d \leq v^t \leq v_n \\ P_n & \text{si } v_n \leq v^t \leq v_c \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{où } \begin{cases} b = \frac{(v_o)^3}{[1 - (v_o)^3]} & \text{et : } v_o = \frac{v_d}{v_n} ; \\ a = \frac{(1 + b)}{(v_n)^3} \end{cases}$$

Avec:

P_n : Puissance nominale de l'éolienne (donnée par le constructeur 50 kW) ; v_n : vitesse prévue de l'éolienne à l'instant considéré (t), « on note ici que la vitesse de l'éolienne est prédite par certains modèles météorologiques et que ces prédictions sont retenues comme valeurs de bases (fiables) » ; v_d : vitesse de démarrage (donnée par le constructeur 3 m/s) ; v_n : vitesse nominale de l'éolienne

(donnée par le constructeur 11 m/s); v_c : vitesse de coupure ou limite de l'éolienne (donnée du constructeur 25 m/s).

En général les mesures de la vitesse du vent sont prises à différentes hauteurs de la nacelle (hub) de l'éolienne. La vitesse du vent peut être évaluée, à la hauteur voulue, par l'équation 2 suivante :

$$v^t = v_{data}^t \cdot \frac{\ln(H_{hub}/Z)}{\ln(H_{data}/Z)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec: H_{hub} : hauteur de la nacelle (hub) ;

H_{data} : Hauteur des mesures ; Z : surface de rugosité.

v_{data}^t : vitesse prédite du vent à la hauteur des mesures. ln : symbole du logarithme népérien.

Donc l'énergie produite sera:

$$u_{Eo}^t = P_{Eo}^t \cdot dt \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec:

dt : Intervalle de temps considéré (2h).

B- ENERGIE PRODUITE PAR LES MODULES PV

La puissance produite par les modules PV peut être calculée d'après la formule suivante:

$$P_{PV}^t = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot p_f \cdot \eta_{pc} \cdot Ir^t \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec : A_{PV} : Surface des panneaux solaires ; η_{PV} : Rendement de référence des modules ; p_f : facteur

$$J = \sum_{t=1}^{dt-1} (u_{Dm}^t - \bar{u}_{Dm}^t)^2 + \alpha \cdot \sum_{t=1}^{dt-1} (Q_{Eau}^t - \bar{Q}_{irrg}^t)^2 - \beta \cdot \sum_{t=1}^{dt-1} m^t - \chi \cdot \sum_{t=1}^{dt-1} x^t \quad (\text{Eq. 6})$$

Avec: α , β et χ sont des facteurs de pondération

u_{Dm}^t et \bar{u}_{Dm}^t : Energies fournies au foyer et demandées par le foyer Dm.

Q_{Eau}^t et \bar{Q}_{irrg}^t : Quantités d'eau pompées et utilisées pour l'irrigation.

d'assemblage ; η_{pc} : rendement de conditionnement de la puissance et Ir^t : Irradiation horaire prévue, « elle est prédite par certains modèles météorologiques et que ces prédictions sont retenues aussi comme valeurs de bases (fiables) » .

Donc l'énergie produite par les modules sera :

$$u_{PV}^t = P_{PV}^t \cdot dt \quad (\text{Eq. 5})$$

8 PROBLÉMATIQUE DE L'OPTIMISATION

Le système hybride SERH doit permettre d'exploiter au maximum les sources solaires et éoliennes. Il doit intégrer la nécessité de réduire les coûts de fonctionnement, d'où une planification adéquate pour une utilisation optimale des diverse sources d'énergie disponibles. Le procédé de contrôle de la charge permet de vérifier que le système fournit toujours l'énergie demandée tout en assurant les fonctions suivantes:

- Le contrôle de l'état de charge des batteries (s'assurer du non dépassement de leur capacité): capacité Ah, limites de tension, limite de charge ou décharge.
- La commande de la source d'appoint : déterminer à quelle valeur de tension il faut recourir au réseau ainsi que sa durée d'utilisation en cas d'absence des autres sources.

Les variables décisionnelles du problème d'optimisation sont données par les flux d'énergie échangés par les sous systèmes du microréseau, alors que l'énergie stockée représente la variable d'état. La fonction objectif à minimiser (Eq. 6) est caractérisée par la somme des différents paramètres qui sont plus importants : Ecart entre les divers demandes (foyer et irrigation); la quantité d'eau dans le réservoir et l'énergie dans les batteries de stockage (ces deux derniers paramètres doivent être maximisés durant la phase d'optimisation).

8.1 Contraintes et équations d'état

A- EQUATIONS D'ETAT REPRESENTANT L'ENERGIE A DOMICILE ET POUR LE POMPAGE DE L'EAU

La demande en énergie électrique pour le foyer, dans l'intervalle de temps considéré, est donnée par l'expression suivante:

$$u_{Dm}^t = u_{PV,Dm}^t + u_{Eo,Dm}^t + x_{Bt,Dm}^t + u_{R,Dm}^t \quad (\text{Eq. 7})$$

La demande en énergie électrique pour le pompage de l'eau, dans l'intervalle de temps considérée, est donnée par l'expression suivante:

$$u_{Pg}^t = u_{PV,Pg}^t + u_{Eo,Pg}^t + x_{Pg}^t + u_{Rx,Pg}^t \quad (\text{Eq. 8})$$

L'énergie électrique à envoyer vers le réseau est composée de l'excès de production des deux sources éolienne et modules PV soit:

$$\bar{u}_{Rx}^t = u_{PV,Rx}^t + u_{Eo,Rx}^t \quad (\text{Eq. 9})$$

L'énergie électrique produite par les sources pendant chaque intervalle de temps, pour être utilisée pour des raisons différentes, est composée de : demande domestique, demande pour le pompage, stockage dans les batteries ou revendre au réseau. Alors les équations suivantes donnent la production de chaque source:

$$u_{Eo}^t = u_{Eo,Dm}^t + u_{Eo,Pg}^t + u_{Eo,Bt}^t + u_{Eo,Rx}^t \quad (\text{Eq. 10})$$

$$u_{PV}^t = u_{PV,Dm}^t + u_{PV,Pg}^t + u_{PV,Bt}^t + u_{PV,Rx}^t \quad (\text{Eq. 11})$$

B- EQUATION D'ETAT DU NIVEAU D'EAU DANS LE RESERVOIR

La quantité d'eau à pomper est proportionnelle à l'énergie utilisée pour cette fin. Elle est donnée par l'expression suivante:

$$Q_{Eau}^t = \frac{u_{Pg}^t}{\rho \cdot g \cdot h} \cdot \eta_{ps} \quad (\text{Eq. 12})$$

L'équation d'état régissant le niveau d'eau dans le réservoir est modélisée par:

$$m^t = m^{t-dt} + Q_{Eau}^t - Q_{irrg}^t \quad (\text{Eq.13})$$

C- EQUATION D'ETAT DU NIVEAU DES BATTERIES

Le système de stockage fonctionne comme un réservoir d'énergie qui peut, dans ce sens, être stockée. Spécialement, l'équation d'état du système de stockage peut être de la forme:

$$x^t = x^{t-dt} + (u_{PV,Bt}^t + u_{Eo,Bt}^t) - (u_{Bt,Dm}^t + u_{Bt,Pg}^t) ;$$

$$\text{Avec } x^t = u_{Bt}^t \quad (\text{Eq.14})$$

D- AUTRES CONTRAINTES

La quantité d'eau pompée peut être bornée par deux limites tel que:

$$\delta_{Eau}^t \cdot Q_{min} \leq Q_{Eau}^t \leq \delta_{Eau}^t \cdot Q_{max} \quad (\text{Eq.15})$$

Avec: δ_{Eau}^t : distribution de DIRAC ;

$$Q_{max} = 50 + Q_{min} \quad (\text{m}^3)$$

L'énergie stockée dans les batteries et la quantité d'eau dans le réservoir sont bornées par les limites supérieure et inférieure tel que :

$$x_{min} \leq x^t \leq x_{max} \quad (\text{Eq.16})$$

$$m_{min} \leq m^t \leq m_{max} \quad (\text{Eq.17})$$

Alors que, l'énergie injectée dans le réseau doit être inférieure à la somme des énergies produites par les sources éolienne et solaire. Ce qui donne :

$$u_{Rx}^t < u_{Eo}^t + u_{PV}^t \quad (\text{Eq.18})$$

Cette méthodologie représente une optimisation unitaire. Si on a plusieurs systèmes on doit adapter autant de nombre pour l'optimisation.

9 RÉSULTATS DE SIMULATION

Le problème d'optimisation décrit avant a été résolu en utilisant l'outil d'optimisation Lingo (www.lindosystems.org).

Le programme a été réalisé tout au long de l'utilisation des conditions météorologiques réelles [16] décrites ci-dessous ainsi que sur la base d'une demande moyenne en eau de 50 m³ (moyenne pour l'irrigation et le foyer).

Les résultats de simulation obtenus sont convertis sous le logiciel Microsoft Excel V7 pour le tracer des différentes courbes. Les tableaux et les figures suivants représentent ces résultats. Le tableau 4 et les figures (3, 4) donnent

l'énergie produite par les deux sources PV et Eolienne.

$(UPr(t) = U_{Eo}(t) + UPV(t))$ selon les données météorologiques considérées et la balance énergétique $(UDif(t) = UPr(t) - UChg(t))$ entre production et demande : $UChg(t) = UDm(t) + UPg(t)$.

Tableau 04: Energies produites ($U_{Eo}(t)$, $UPV(t)$ et $UPr(t)$) en fonction des vitesses moyennes du vent à une hauteur de 50 m, et les irradiances solaire en Décembre 2013

t (h)	v du vent (m/s) à 50m	Ir solaire (kW/m ²)	Energies produites (kWh)		
			$U_{Eo}(t)$	$UPV(t)$	$UPr(t)$
2	5,48	0	5,27	0	5,27
4	5,49	0	5,31	0	5,31
6	5,49	0,01	5,31	0,23	5,54
8	5,19	0,01	4,33	0,23	4,56
10	2,68	0,23	0	5,34	5,34
12	4,15	0,34	1,71	7,89	9,60
14	4,15	0,14	1,71	3,25	4,96
16	4,45	0,14	2,34	3,25	5,59
18	5,19	0	4,33	0	4,33
20	5,19	0	4,33	0	4,33
22	5,44	0	5,14	0	5,14
24	5,48	0	5,27	0	5,27
		$U_{tot/i}$	45,04	20,20	65,24

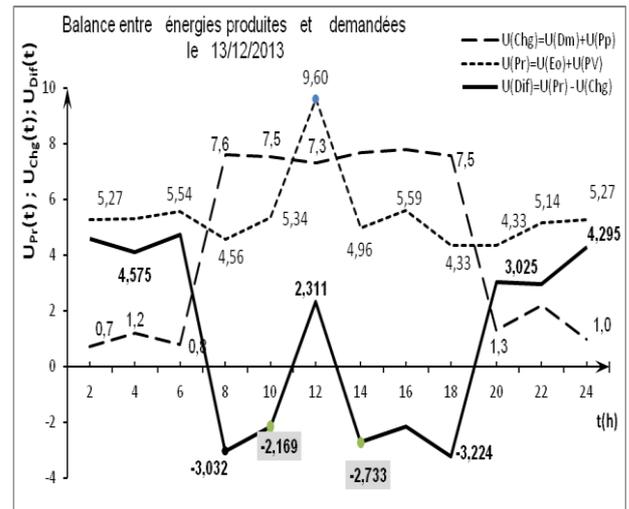


Figure 04: Balance $U(Dif)$ entre la production et la demande le 13/12/2013

On remarque, d'après la figure 4, que la production couvre la demande pendant la nuit à 100%. Pendant la journée, on a deux déficits de production qui apparaissent de 7h15 à 11h (Déficit 1) et de 13h à 19h (Déficit 2). Ces déficits seront compensés, partiellement, par les batteries et une mise au point par le réseau, sera nécessaire, suivant le niveau des batteries de stockage.

Pour répartir l'énergie produite entre la demande, le stockage et la vente on applique les contraintes suivantes:

$$\begin{aligned} \text{Si : } U_{Dif}(t) > 0; & U_{Rx-Dm}(t) = 0 \text{ et } U_{Rx-Pg}(t) = 0 \\ \text{Si : } U_{Dif}(t) > 0; & U_{Bt-Dm}(t) = 0 \text{ et } U_{Bt-Pg}(t) = 0 \end{aligned} \quad (Eq.19)$$

$$\begin{aligned} \text{Si : } U_{Dif}(t) < 0; & U_{Pv-Rx}(t) = 0 \text{ et } U_{Eo-Rx}(t) = 0 \\ \text{Si : } U_{Dif}(t) < 0; & U_{Pv-Bt}(t) = 0 \text{ et } U_{Eo-Bt}(t) = 0 \end{aligned} \quad (Eq.20)$$

a) Conditions pour le stockage de l'énergie dans les batteries :

$$\begin{cases} x(t) < 20\% ; \\ x(t) > 2\% \end{cases} \quad (Eq.21)$$

b) Conditions pour le stockage de l'eau dans le réservoir :

$$\begin{cases} m(t) < 100\% ; \\ m(t) > 10\% \end{cases} \quad (Eq.22)$$

c) Conditions initiales :

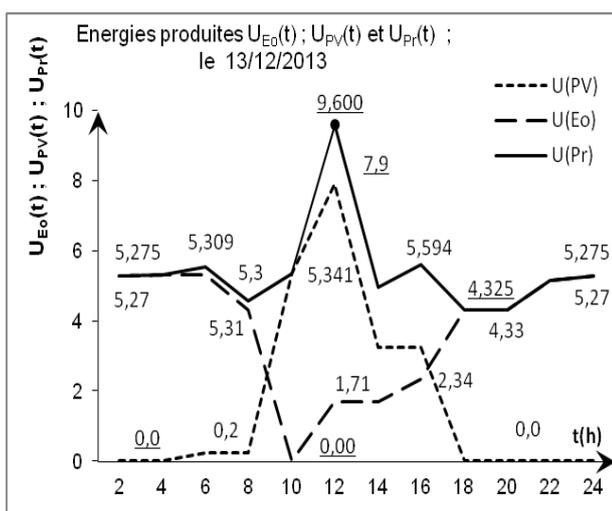


Figure 03: Energies produites par: l'éolienne Eo, le PV et leur somme le 13/12/2013
(Lecture: $UPV = x,x$; $UEo = x,xx$ et $UPr = x,xxx$;
 x : n chiffres après la virgule)

$$\begin{cases} x(1) = 2 \text{ kWh;} \\ m(1) = 10 \text{ m}^3 \end{cases} \quad (\text{Eq.22})$$

L'application de ces contraintes, pour répondre à la demande, nous donne les résultats suivants.

Les tableaux 5 et 6 indiquent l'acheminement du flux énergétique à savoir:

- la répartition de la production PV et de l'éolienne entre les différents points : Foyer $U_{(Eo; PV)-Dm}$, pompage $U_{(Eo; PV)-Pg}$, stockage $U_{(Eo; PV)-Bt}$ et injection dans le réseau ou vente $U_{(Eo; PV)-Rx}$; et
- l'utilisation de l'énergie stockée $U_{Bt-(Dm; Pg)}$ avec une mise au point du système par le réseau avec une contribution à la demande énergétique de : **7,46 kW (PV)** et **7,05 kW (Eo)**.

tableau05: résultats de la gestion de l'énergie produite et demandée par la charge
(Répartition de la production PV et Eolienne entre les différents éléments)

t (h)	U - Solaire (kW)				Calcul	U - Eolienne (kW)				Calcul
	U_{PV-Dm}	U_{PV-Pg}	U_{PV-Bt}	U_{PV-Rx}		U_{PV}	U_{Eo-Dm}	U_{Eo-Pg}	U_{Eo-Bt}	
2	0	0	0	0	0	0,700	0,000	4,586	0,000	5,286
4	0	0	0	0	0	1,200	0,000	4,121	0,000	5,321
6	0,000	0,232	0,000	0,000	0,232	0,800	1,133	2,399	0,000	4,332
8	0,232	0,000	0,000	0,000	0,232	0,896	3,436	0,000	0,000	4,332
10	1,460	3,881	0,000	0,000	5,341	0	0	0	0	0
12	1,240	1,839	0,000	4,816	7,895	0,000	1,702	0,000	0,000	1,702
14	0,000	3,251	0,000	0,000	3,251	0,948	0,753	0,000	0,000	1,701
16	0,000	3,251	0,000	0,000	3,251	0,981	1,362	0,000	0,000	2,343
18	0	0	0	0	0	1,500	2,832	0,000	0,000	4,332
20	0	0	0	0	0	1,300	3,032	0,000	0,000	4,332
22	0	0	0	0	0	2,200	2,948	0,000	0,000	5,148
24	0	0	0	0	0	0,980	0,000	0,000	4,306	5,286
Tot =	2,932	12,453	0,000	4,816	20,201	11,505	17,198	11,105	4,306	44,114
Energie vendue: $U_{vend} = U_{PV-Rx} + U_{Eo-Rx}$ (kW)										9,122

Tableau 06: résultats de la gestion de l'énergie produite et demandée par la charge
(Utilisation des batteries et du réseau avec les conditions imposées)

t (h)	U - Batteries [kW]		U - Réseau [kW]		Conditions				
	U_{Bt-Dm}	U_{Bt-Pg}	U_{Rx-Dm}	U_{Rx-Pg}	x (%)	U_{Pg} [kW]	Q_{Eau} [m ³]	Q_{irrig} [m ³]	m (%)
2	0	0	0	0	2	0	0	0	10
4	0	0	0	0	6,59	0	0	0	10
6	0	0	0	0	10,71	1,365	11,273	0	21,273
8	0,412	1,133	0	1,133	13,11	5,703	47,087	50	18,360
10	0	1,839	0	1,839	11,56	7,558	62,406	50	30,767
12	0	0	0	0	9,72	3,540	29,233	50	10
14	0,346	1,026	0,346	1,026	9,72	6,056	50	50	10
16	0,370	1,167	0,370	1,167	8,35	6,946	57,351	50	17,351
18	0	1,167	0	1,167	6,81	5,165	42,649	50	10
20	0	0	0	0	5,65	3,032	25,037	0	35,037
22	0	0	0	0	5,65	2,948	24,342	0	59,379
24	0	0	0	0	2	0	0	0	10
Tot =	1,128	6,331	0,716	6,331		42,314	349,379	300,000	
	7,458		7,046						

D'après ces valeurs on déduit le bilan des énergies et des contributions suivant :

Energie :	Produite	Consommée	Economisée	Vendue	Achetée U_{Rx-Chg}
kW	64,316	51,546	3,647	9,122	7,046
%	100	80,15	5,67	14,18	10,96

Les contributions des différentes sources à l'alimentation de la charge sont données par:

Elément		Foyer	Pompage	Charge	Batterie	Réseau
SEPV	kW	2,93	12,45	20,2	0	4,82
	%	3,68	15,62	25,33	0	6,04
SEEO	kW	11,50	17,2	44,1	11,1	4,31
	%	14,43	21,57	55,32	13,93	5,4
SSBt	kW	1,13	6,3	7,46	-	-
	%	1,41	7,94	9,35	-	-
Rx	kW	0,72	6,3	7,05	0	-
	%	0,90	7,94	8,84	0	-

D'après ce bilan des contributions il apparait clairement que la contribution de l'éolienne dans l'alimentation de la charge est deux (2) fois celle des modules PV ce qui explique la favorisation de l'éolienne par rapport au PV dans la région.

10 ESTIMATION DU COUT DE LA QUANTITE D'ENERGIE ECONOMISEE PAR L'INSTALLATION

Sachant que les tarifs du kW appliqués en Algérie, avec une

TVA de 7%, sont:

1^{ère} tranche (T1): 1,779 DA (pour 125 kW) et 2^{ème} tranche (T2): 4,179 DA

Le tableau 7, donne les estimations des différentes factures sur différentes périodes.

D'après ces résultats on voit qu'on peut économiser une somme de **83.350,74 DA** et injecter **4, 56 MW par an** dans le réseau ce qui permet de mieux amortir l'investissement.

Tableau 07: Estimations des différentes factures sur différentes périodes

U consommée	U _{Dm} [kW]	U _{Pg} [kW]	U _{Chg} [kW]	U _{Dir} [kW]	T1
Par jour	16,28	36,30	52,58	12,66	1,39
Par 3 Mois	1465,20	3266,67	4731,87	1139,40	125,00
Facture (DA) par		T1	T2	Total	/ T2
Charge (Chg)	jour	2,64	228,89	231,53	235,10
	3 Mois	237,94	20599,74	20837,68	21158,68
	An (4 Fct)	951,77	82398,97	83350,74	84634,74
	20 ans	19035,3	1647979,40	1667014,70	1 692 694,70

11 ESTIMATION DE LA QUANTITE DE CO₂ EVITEE

Pour estimer la quantité de CO₂ évitée, on admet que l'énergie produite par le système substitue de l'électricité produite uniquement en journée et dont la production émet en moyenne **60 g de CO₂/kW**.

12 CONCLUSION

Un modèle d'optimisation en terme de variables d'état et de contrôle intégrant un système hybride éolien / PV avec

On a : U_{Pr} = 34,61 kW de 6 h à 18 h , donc

Q_{CO₂} = 2336,6 g ≈ **2,34 kg de CO₂** évité à dégager dans l'atmosphère par jour.

Soit: **854 kg / année**.

dispositif de stockage commandant une charge (foyer + champ agricole) a été présenté. Sur la base de ce modèle, un problème d'optimisation est formulé pour répondre à la demande électrique journalière du foyer et du pompage de

l'eau pour l'irrigation. Ces deux différents intervalles temporels d'optimisation peuvent être pris en compte et justifient la validité de la méthode adoptée au niveau de la planification en temps réel pour un coût meilleur, comparée aux coûts traditionnels de l'eau domestique et ce, pour toute charge demandant plus de 52 kW / jour.

Les résultats de la simulation montrent l'intérêt de combiner une éolienne avec un système photovoltaïque. Cette combinaison conduit à une réduction de la taille du générateur photovoltaïque et de la capacité de stockage, réduisant ainsi le coût total de l'investissement.

L'approche proposée, complétée par d'autres études de cas, des prévisions météorologiques fiables, des considérations économiques et des évaluations des économies en CO₂, peut représenter une étape importante pour l'évaluation de la fiabilité de systèmes équivalents.

REFERENCES

- [1] S. Abu-Sharkh and al.; "Can microgrids make a major contribution to UK energy supply?"; ELSEVIER-Renewable and Sustainable Energy Reviews 10 (2006) ; pp 78–127.
- [2] M. Fadaee, M.A.M. Radzi; "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012); pp 3364– 3369.
- [3] A. Arulampalam, N. Mithulananthan, R.C. Bansal, T.K. Saba. "Micro-grid Control of PV -Wind-Diesel Hybrid System with Islanded and Grid Connected Operations" IEEE ICSET 2010; 6-9 Dec 2010, Kandy, Sri Lanka.
- [4] José L. Bernal-Agustin, Rodolfo Dufo-Lopez; "Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) ; pp 2111– 2118.
- [5] Levron, Y.; Guerrero, J. M.; Beck, Y.; "Optimal Power Flow in Microgrids With Energy Storage". Power Systems, IEEE Transactions on, vol. no.99, pp.1-9. DOI: 10.1109 / TPWS.2013.2245925.
- [6] Driss Zejli, Ahmed Ouammi, Roberto Sacile, Hanane Dagdougui, Azzeddine Elmidaoui; "An optimization model for a mechanical vapor compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system".ELSEVIER Applied Energy 88 (2011) ; pp 4042–4054.
- [7] Hongxing Yang, Wei Zhou, Lin Lu, Zhaohong Fang; "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm". ELSEVIER-Solar Energy 82 (2008) ; pp 354–367. (Available online at www.sciencedirect.com)
- [8] A. Bouharchouche et al. ; "Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien- photovoltaïque ". Revue Energ. Ren. Vol. 17 N°3 (2014), pp 359 – 376.
- [9] A. Mellit; "Sizing of photovoltaic systems: a review". Revue Energ. Ren. Vol. 10 N°4 (2007) ; pp 463 – 472.
- [10] M. Benabdelkader, A. Malek et B. Draoui ; " Perspective du pompage éolien appliqué à l'irrigation du palmier dattier dans la région de Béchar ». Revue Energ. Ren. Vol. 14 N°3 (2011). pp 381 – 395.
- [11] R. Maouedj, S. Bousalem et B. Benyoucef ; " Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens". Revue Energ. Ren. Vol. 11 N°2 (2008) ; pp 239 – 250.
- [12] Mohammed A. Elgendy, Bashar Zahawi, Senior Member, IEEE, and David J. Atkinson; "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications". IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 3, NO. 1, JANUARY 2012; pp 21-33.
- [13] B. Eker; "SOLAR POWERED WATER PUMPING SYSTEMS". Trakia Journal of Sciences, Vol. 3, No. 7, 2005, pp 7-11.
- [14] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf ; « Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie ». Revue Energ. Ren. : ICPWE (2003) ; pp 147-152.
- [15] N. Kasbadji Merzouk ; "Carte des Vents de l'Algérie - Résultats Préliminaires -". Revue Energ. Ren.: Valorisation (1999) ; pp 209-214.
- [16] Site NASA : <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=steveroi@hotmail.com>