

# Etude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : dimensionnement et analyse du cycle de vie

Dhaker ABBES\*, André MARTINEZ\*, Gérard CHAMPENOIS†, Jean Paul GAUBERT†

\* EIGSI, 26 rue de vaux de Foletier, 17041 La Rochelle Cedex France [Dhaker.abbes@eigsi.fr](mailto:Dhaker.abbes@eigsi.fr)

† LAII- ESIP Bât de Mécanique 40, Avenue du Recteur Pineau 86022 Poitiers Cedex France

**Résumé**—Dans ce papier, nous présentons l'étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle en France. Cette étude comprend le dimensionnement du système, l'évaluation de ses performances ainsi que l'analyse économique et environnementale de son cycle de vie. Les résultats montrent un impact environnemental faible et un coût raisonnable du point de vue économique.

**Mots-clés**—“système hybride”, “dimensionnement” “optimisation”, “analyse du cycle de vie”, “écobilan”

## I. INTRODUCTION

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. En effet, les systèmes éoliens et photovoltaïques ont connu un grand essor ces derniers temps et sont devenus de plus en plus accessibles en terme de technologies et de coûts. Une fois installés, ces systèmes ne dépendent d'aucune source ou réseau et présentent l'avantage de se trouver à proximité des sites de consommation. Cependant nous pouvons nous poser quelques questions. Sont-ils énergétiquement efficaces ? Quel est le temps de retour sur investissement de ces systèmes ?

Plusieurs travaux de recherche ont abordés ces questions. A. Stoppato [1] s'est intéressé à l'évaluation du cycle de vie de la production d'électricité par panneaux photovoltaïques. Son étude s'est basée sur l'estimation des flux d'énergie au cours des différents processus de production dès l'extraction du silicium jusqu'au montage final des panneaux. On peut citer aussi Carl Johan Rydh & Björn A. Sandén [2] qui ont étudié les besoins en énergie pour la production d'un système autonome photovoltaïque avec stockage en considérant une variété de technologies de batteries et dans différentes conditions de fonctionnement.

Du côté éolien, on peut évoquer l'étude menée par Brian Fleck & Marc Huot [3] et qui emploient une méthode d'évaluation du cycle de vie pour comparer directement les impacts environnementaux, les besoins finaux d'énergie, et le coût du cycle de vie de deux systèmes: un système autonome de petites éoliennes à comparer avec un générateur diesel. La publication d'Eduardo Martinez et al. [4] dédiée à l'analyse du cycle de vie d'une éolienne de forte puissance est aussi intéressante surtout qu'elle prend en compte la plupart des composants de l'éolienne. Il existe aussi dans la littérature quelques travaux synthétiques des impacts environnementaux des systèmes de production à bases de sources renouvelables. A titre

d'exemple, on peut mentionner les analyses économique et environnementale faite par Varun et Al. [5] [6].

Néanmoins, la majorité des travaux mentionnés s'intéressent aux systèmes de production séparément et dans la plupart des cas concerne le domaine des grandes puissances surtout pour les éoliennes. Les études sur l'analyse du cycle de vie de systèmes multi sources sont rares pour des maisons autonomes par exemple. C'est la raison pour laquelle nous avons entamé l'étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage pour un habitat résidentiel à La Rochelle. Cette étude comprend la modélisation du système complet, l'optimisation de son dimensionnement, l'évaluation de ses performances ainsi que l'analyse économique et environnementale de son cycle de vie.

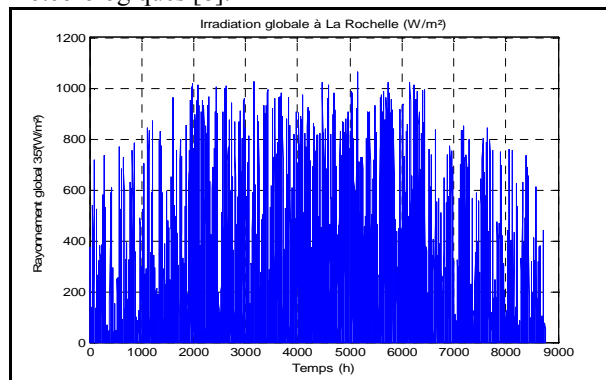
Dans le premier paragraphe, nous présentons les données utilisées. Dans le second, nous proposons une description complète du système. Ensuite, nous exposons les résultats du dimensionnement optimal qui prend en compte les conditions de l'étude et les performances souhaitées. Enfin, nous présentons une évaluation économique et environnementale du système complet.

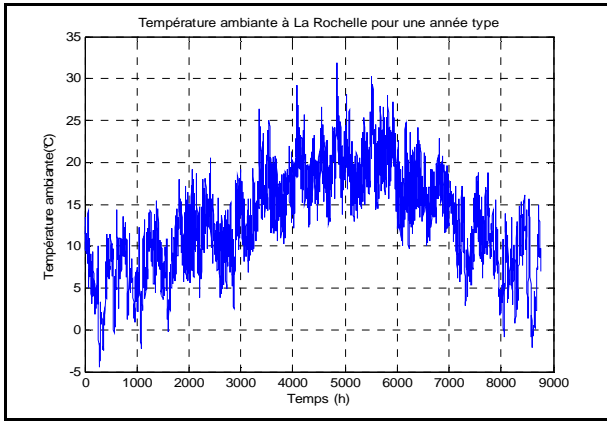
## II. DONNEES : SOURCES ET PROFIL DE CONSOMMATION

L'étude présentée dans cet article est faite pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle. Après étude et analyse statistique des données sources sur plusieurs années, nous avons établi une année type à l'échelle horaire et supposé reproduite 25 fois, la durée de vie de notre système.

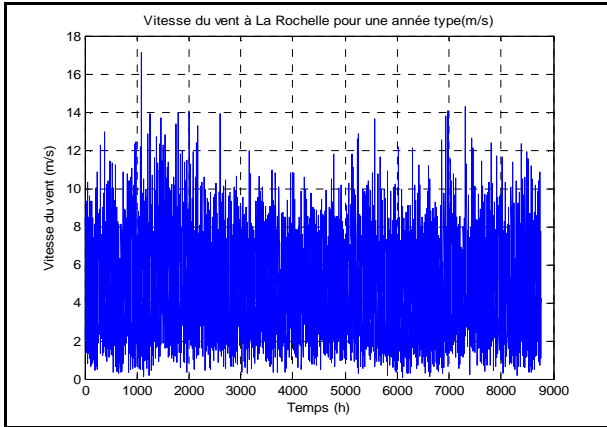
Pour l'irradiation et la température ambiante, nous avons utilisé des données horaires types synthétisées par le logiciel Meteonorm version 6.0 [7].

Pour la vitesse du vent, nous avons généré des données horaires types pour une année par transformation inverse de la distribution de Weibull à partir d'acquisitions mi-horaire disponibles sur un site spécialisé dans les mesures météorologiques [8].





b



c

Fig.1. Données météorologiques pour une année type à La Rochelle  
(a) Rayonnement global  
(b) Température ambiante  
(c) Vitesse de vent

Selon ces données, l'irradiation globale à La Rochelle est importante pendant la journée durant les mois compris entre Mars et Septembre. Le potentiel photovoltaïque est estimé à 192.2Kwh/an/m<sup>2</sup> alors que celui de l'éolien est d'environ 429.5Kwh/an/m<sup>2</sup>. Par conséquent, le potentiel éolien est plus important pour le site étudié.

Concernant les besoins en électricité de l'habitat résidentiel, nous avons considéré un profil de consommation établi suite à une étude développée sur les besoins énergétiques d'un foyer type de 120m<sup>2</sup> avec 4 personnes, hors cuisson, eau chaude sanitaire et chauffage du logement, avec une période de moyennage d'une heure. Il est établi sur la figure 2 selon des journées types et prend en considération les variations de saisons.

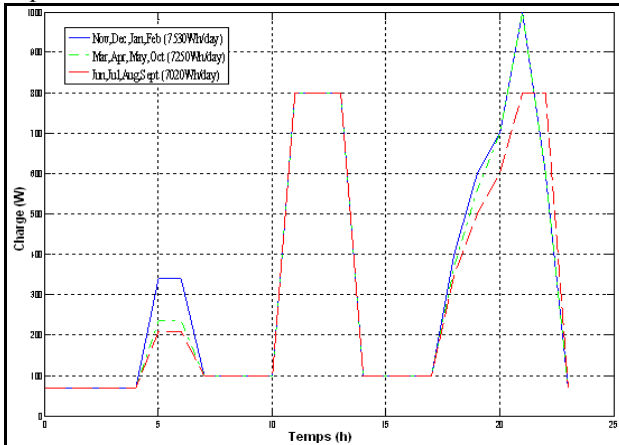


Fig.2. Consommation journalière de l'habitat résidentiel considéré

Selon ce profil, la consommation annuelle de l'habitat est estimée à 2688 Kwh.

### III. MODELISATION DU SYSTEME

#### A. Générateur éolien

La puissance électrique générée par l'éolienne est donnée par [9]:

$$P_{wg} = C_p \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_g \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho A V^3 = \eta_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho A V^3 \quad (1)$$

Avec:

$\rho$ : densité de l'air (1.275 Kg/m<sup>3</sup>),  $V$ : Vitesse du vent,  
 $A$ : surface balayée par le rotor,

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_w} : \text{Rendement de la turbine éolienne,}$$

$$\eta_{gb} = \frac{P_g}{P_{ex}} : \text{Rendement du multiplicateur de vitesse,}$$

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_g} : \text{Rendement de la génératrice,}$$

Pour notre étude, nous avons considéré des éoliennes à trois pâles avec un rendement global intéressant ( $\eta_t = 47\%$  [10, 11]).

#### B. Générateur photovoltaïque

La puissance électrique générée par les panneaux photovoltaïques est donnée par [12]:

$$P_{pv} = \eta_g \cdot A_g \cdot I_g \quad (2)$$

$\eta_g$ : rendement du module qui dépend de la température de la cellule et par conséquent de la température ambiante,

$A_g$ : sa surface,

$I_g$ : l'irradiation [W/m<sup>2</sup>].

Dans notre travail, nous avons choisi des modules polycristallins au Silicium avec un rendement de l'ordre de 13%.

#### C. Batterie

La plupart des batteries utilisées dans les systèmes hybrides de type Plomb-acide sont à cyclage profond [13]. Le modèle simple d'une telle batterie est représenté à la figure 3. Il s'agit d'un modèle idéal avec  $V_0$ ,  $R_{bat}$ ,  $V_{bat}$  représentant respectivement la tension en circuit ouvert, la résistance interne équivalente et la tension aux bornes.

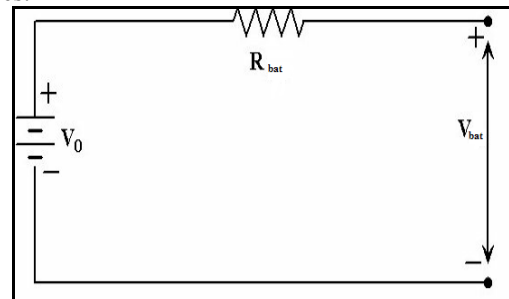


Fig.3. Modèle idéal d'une batterie Plomb-acide

L'état de charge des batteries (SOC) est soumis aux contraintes suivantes :

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (3)$$

Avec  $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$  étant les capacités de stockage maximal et minimal permises.  $SOC_{max}$  correspond à la capacité nominale des accumulateurs assemblés  $C_n$ . Cette dernière est liée au nombre total de batteries  $N_{bat}$ , au

nombre de batteries montées en série, Nbats et à la capacité nominale de chaque batterie, Cbat [14] par :

$$C_n = (N_{bat} / N_{bats}) \cdot C_{bat} \quad (4)$$

SOCmax et SOCmin sont liées par la formule suivante :  
 $SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{max}$  (5)

DOD étant la profondeur de décharge.

Les batteries sont connectées en série pour atteindre la tension de bus continu Ubus souhaitée (dans notre cas 48V) et sont branchées en parallèle pour obtenir la capacité de stockage désirée (en Ah). L'équation (6) présente comment calculer le nombre de batteries en série à partir de la tension du bus continu et la tension nominale de chaque batterie Vbat (dans notre cas 12V) :

$$N_{bats} = U_{bus} / V_{bat} = 48 / 12 = 4 \quad (6)$$

La charge et la décharge des batteries sont contrôlées par la différence entre l'électricité produite par les sources renouvelables (Pres) et les besoins énergétiques de l'habitat (Pload). Un switcher assure la gestion de l'énergie de manière que le banc de batteries ne soit connecté que dans deux cas de figures:

\*Si l'état de charge des accumulateurs est inférieur à SOCmax (fixé à 100%) et Pload < Pres, alors l'excès de production (Pres - Pload).Δt est stockée dans les batteries,

\*Si l'état de charge de la batterie est supérieur à SOCmin (fixé à 20%) et Pload > Pres, alors dans ce cas l'énergie précédemment stockée est utilisée pour combler le manque de production (Pload - Pres).Δt.

#### IV. OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

Ce paragraphe a pour but de dimensionner le système hybride Eolien – Photovoltaïque par simulation dynamique. Nous cherchons à déterminer la surface balayée par l'éolienne (Awt) et par conséquent la puissance produite, la surface du module photovoltaïque (Apv) et la capacité de stockage de batteries (Cn en Ah) de manière à satisfaire au moins 95% de la demande en énergie électrique de l'habitat avec un coût d'acquisition des composants du système le plus faible possible.

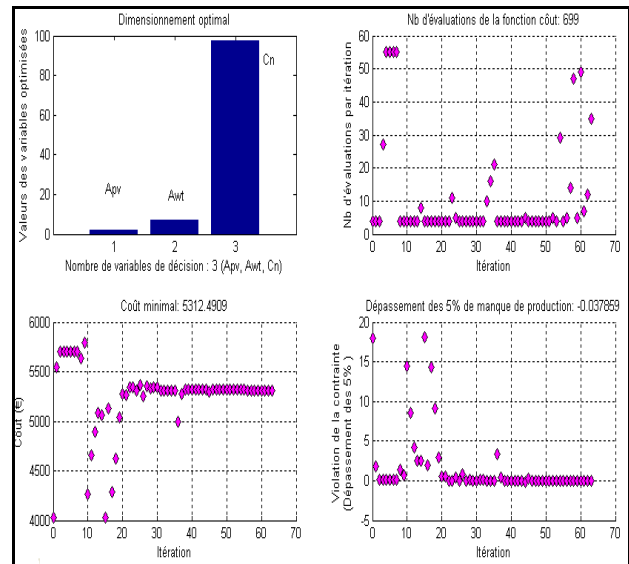
Pour cela, le prix de chaque composant a été estimé en fonction de sa variable de décision. En effet, à partir de différents catalogues constructeurs [15] [16], nous avons déterminé le prix d'achat d'une éolienne en fonction de la surface balayée par son rotor :

$$\text{Prix}_{wt} = 543.15 A_{wt} + 159.37 \quad (7)$$

Pour les modules photovoltaïques, selon le site spécialisé Wholesalesolar.com [17], nous avons établi un prix de 277.58€/m².

En ce qui concerne les batteries, nous avons choisi la technologie Acide Plomb pour des questions de coûts et de performances avérées. Son prix s'élève à 138€/KWh [18].

Le dimensionnement a été obtenu par simulation dynamique du système sous Matlab/Simulink et à l'aide des outils d'optimisation présents dans « Optimization toolbox » [19]. La fonction utilisée (« fmincon ») est bien adaptée aux problèmes non linéaires [20]. En plus, afin d'approcher au maximum l'optimum global, la routine d'optimisation a été reproduite une dizaine de fois avec des conditions initiales différentes. La solution avec le coût le plus faible se trouve à la figure 4. Elle a été obtenue à la 63ème itération en partant des conditions initiales [Apv\_in=0, Awt\_in=0, Cn\_in=10] et après 699 évaluations de la fonction objective.



\*Conditions d'arrêt de l'algorithme d'optimisation : Dépassement des 5% de manque de production inférieur à 1E-6 et variation du coût de production inférieur à 2E-6, d'où la forme des allures obtenues.

Fig.4. Résultats d'optimisation de la solution retenue

Le dimensionnement optimal du système est obtenu par :

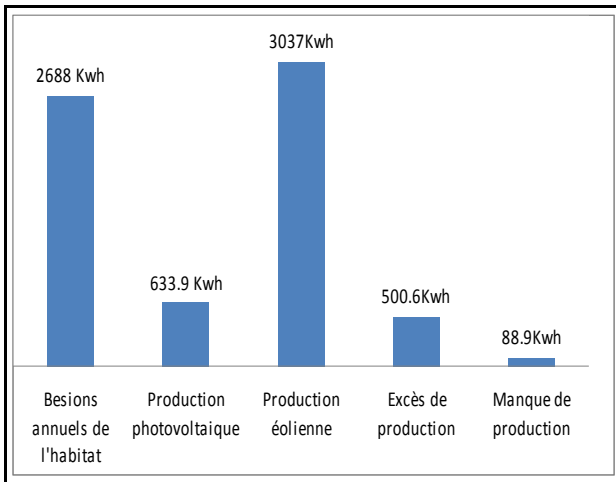
- une surface de panneaux photovoltaïques installée de 2.129 m². D'un point de vue de la satisfaction du critère énergétique (assurer au moins 95% de l'énergie de la charge), il est décidé d'installer deux panneaux PV plutôt qu'un seul ; par exemple de type Sharp 170, qui présente le meilleur rapport qualité/prix chez les fabricants (surface totale de 1.649\*2 = 3.298 m² et prix d'achat de 900 euros).

- une surface balayée par le rotor de l'éolienne de 7.209m², Ce qui reviendrait à installer une éolienne de type Kestrel Wind(1000) [16] de 7.07m² de surface (surface balayée industrielle la plus proche avec un bon rapport qualité/prix) et un coût approximatif de 2300 euros,

- une capacité de stockage Cn = 97.579 Ah, donc on peut installer 4 batteries en série de type power-sonic 12V/103Ah avec un prix total d'achat de 695 euros [21].

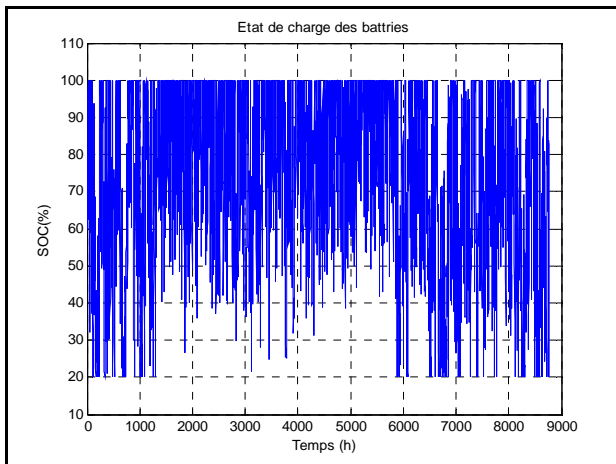
#### V. EVALUATION DES PERFORMANCES

Un des objectifs de la procédure d'optimisation est d'obtenir un dimensionnement qui assure les besoins en électricité de l'habitat résidentiel à 95% au moins et présentant un excès de production raisonnable garantie d'un système bien dimensionné. Dans ce paragraphe, nous avons cherché à évaluer les performances obtenues selon le critère énergétique. Les résultats pour l'année type si on installe les composants choisis (c'est-à-dire 2 panneaux Sharp 170, une éolienne Kestrel 1000 et 4 batteries en série de type power-sonic 12V/103Ah) sont décrits dans la figure 5. 83% de l'énergie produite est assurée par l'éolienne et 17% par le panneau photovoltaïque. Le manque de production est de 3.307% (bien inférieur au 5% exigé). Il peut être surmonté grâce au délestage. L'excès de production est raisonnable et peut être utilisé pour cuisiner ou pour soutenir le chauffage de l'eau.



\*Résultats obtenus par simulation sous Matlab/Simulink (Variable-step, ode45 (Dormand-Prince))  
Fig.5. Bilan énergétique de l'année type avec la configuration optimale

Concernant l'état de charge des batteries, il est important de signaler que tout au long de l'année celui-ci est toujours compris entre 20 % et 100% comme le montre la figure 6 : ce qui respecte l'objectif que nous nous étions fixé au niveau de la gestion de la batterie.



\*Résultats obtenus par simulation sous Matlab/Simulink (Variable-step, ode45 (Dormand-Prince))  
Fig.6. Etat de charge des batteries tout au long de l'année

## VI. ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Dans cette partie nous avons établi une évaluation économique et écologique du système tout au long de sa vie.

### A. Analyse économique (Life cycle cost analysis)

L'analyse économique est importante car elle permet de connaître les coûts du projet durant toute sa durée de vie. Elle prend en compte les coûts globaux de tous les composants du système. Cela inclut le prix du matériel, le coût de l'installation, de remplacement et de maintenance. Le coût de l'installation comprend celui des panneaux estimé à 0.8€/W et celui de la chaîne de conversion éolienne estimé à 25% du coût total de l'éolienne et de la tour. On suppose que le prix de la tour est de 1200€ (12m\*100 €/ m [22]). De plus, il faut prévoir 1000€ pour les composants nécessaires au bon fonctionnement du système (Balance-Of-System components BOS) tels que les câbles, les connecteurs, les protections, le logement des batteries et le rack pour les panneaux. A tout cela s'ajoute les coûts d'entretien annuels fixés à 2,5% du coût total du capital. Le tableau I montre le calcul du coût de cycle de vie LCC (Life Cycle Cost) pour notre système hybride. Il est basé

sur un taux d'actualisation de 5%, un taux d'inflation de 3% et une durée de vie de 25 ans. Selon cette évaluation économique, il est clair que notre configuration optimale a un acceptable LCC (ou coût de cycle de vie). Si on suppose que l'année type est reproduite pour les 25 ans, le coût du KWh produit par le système hybride avec des sources renouvelables revient à [23]:

$$\text{Prix}_{kwh\_re} = \frac{LCC}{[\text{Energie\_produite}/\text{an}].25}$$

$$= 16159.17 / [(3037+633.9)*25] = 0.176\text{€/KWh} \quad (11)$$

Ce qui est raisonnable pour une maison autonome par comparaison aux tarifs proposés par EDF Bleu Ciel avec un prix du KWh d'énergie conventionnelle avec raccordement au réseau de 0.12€/KWh (puissance souscrite de 6KVA, offre de base) [24]

Element	Coût (€)	Valeur actuelle (€)	% Total LCC
<b>Coûts initiaux</b>			
Panneau	900	900	5.57
Eolienne	2300	2300	14.233
Batteries	695	695	4.3
Tour d'éolienne (12m)	1200	1200	7.426
Régulateur de charge	150	150	0.928
PV controleur mppt	420	420	2.6
Onduleur	840	840	5.198
BOS	1000	1000	6.188
Installation	1147	1147	7.098
<b>Coûts récurrents</b>			
Maintenance	216.3	4251.9	26.313
<b>Remplacement</b>			
Batteries 5 ans	695	631.28	3.906
Batteries 10 ans	695	573.4	3.548
Batteries 15 ans	695	520.84	3.223
Batteries 20 ans	695	473.09	2.928
Régulateur de charge 15 years	150	112.41	0.695
PV contrôleur mppt 15 years	420	314.75	1.948
Onduleur 15 years	840	629.5	3.896
<b>Totals</b>		<b>16159.17€</b>	<b>100</b>

Tableau I : Evaluation Economique du système hybride (LCC ANALYSIS)

### B. Analyse écologique (Life cycle assesement : ecobilan)

L'analyse est basée sur l'étude de l'impact environnemental du système en termes d'énergie primaire nécessaire à la production de ses différents composants (« embodied energy » exprimée en MJ ou Kwh) et aussi en termes d'émissions de gaz à effet de serre tel que le CO2 (exprimé en Kg) au cours de sa vie. Pour les panneaux photovoltaïques, les batteries et les composants supplémentaires (BOS), nous avons admis les hypothèses et les données présentées par Tom Markvart et Luis Castañer dans le livre « Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications » [25]. Ces dernières sont récapitulées dans le tableau qui suit :



<b>Hypothèses</b>		
1-	Les données présentées concernent un module type multi cristallin silicium avec châssis en aluminium.	
2-	On suppose un taux de recyclage optimiste de 90% pour la ferraille de batteries.	
3-	Les composants complémentaires tels que les câbles ou les régulateurs de charge ont des besoins en énergies primaires relativement faibles (<10% du système installé).	
4-	On assume une amélioration annuelle de 1% de l'efficacité pour le traitement des matériaux et les processus de fabrication.	
5-	L'approximation des émissions CO2 est faite en considérant que les émissions CO2 ne sont liées qu'à la phase de production des composants et en évaluant toutes les énergies nécessaires en tant qu'électricité produite par cogénération.*	
<b>Données</b>		
<b>Panneau PV</b>		
Processus	Besoins en énergies primaires (MJ/m <sup>2</sup> )	Besoins en énergies primaires (Kwh**/m <sup>2</sup> )
Extraction et purification du silicium	2200	611.6
Production des tranches de silicium	1000	278
Traitement des cellules et du module	300	83.4
Encapsulation des matériaux du module	200	55.6
Besoins supplémentaires pour la fabrication des équipements	500	139
Installation du châssis (en aluminium)	400	111.2
<b>Total</b>	<b>4600</b>	<b>1278.8</b>
<b>Autres composants</b>		
Batterie	11MJ/Ah	3Kwh/Ah
Régulateur de charge	1MJ/Wel	0.278Kwh/Wel
PV contrôleur mppt	1MJ/Wel	0.278Kwh/wel
Onduleur	1.6 MJ/Wel	0.44Kwh/Wel
Composants supplémentaires (BOS)	700 MJ/m <sup>2</sup>	194.6Kwh/m <sup>2</sup>
<b>Emissions CO2</b>		
<b>Facteur d'émission***</b>	<b>0.066 Kg/MJ (primaire)</b>	<b>0.06 Kg/kwhelec</b>

\* Avec adaptation : hypothèse élargie à tous les composants même y compris les batteries et les composants supplémentaires (BOS)

\*\* 1Kwh=3.6 MJ ou 1MJ=0.278 Kwh

\*\*\* Adapté au cas particulier de la France où la production de l'électricité est assurée en grande partie par le nucléaire

Tableau II : Hypothèses et données utilisées pour le bilan écologique des panneaux photovoltaïques, des batteries et des composants supplémentaires

Pour l'éolienne, nous avons effectué notre propre analyse vu le manque de données concernant les processus de fabrication des petites éoliennes et le nombre limité des travaux consacrés aux bilans écologiques de ces machines. L'éolienne retenue est de type Kestrel Model E300i 1000 Watt 48 Volt. Elle pèse 75 Kg [26]. Le tableau III fait l'inventaire de ses constituants. Les informations s'inspirent des références [3], [27] et [28].

<b>Eolienne</b>			
Composant	% Poids de l'éolienne	Répartition des matériaux	Poids des matériaux en kg
<b>Rotor</b>			
Moyeu	4%	95% Acier, 5 % Aluminium	2.85 kg Acier , 0.15kg Aluminium
pâles	10%	100% fibre de verre moulé	7.5 kg fibre de verre
<b>Nacelle</b>			
Boîte de vitesse	6%	100% Acier	4.5Kg Acier
Génératrice	15%	50% aimants, 20% Acier, 30% Cuivre	5.625Kg aimants, 2.25Kg Acier, 3.375Kg Cuivre
<b>Autres</b>			
Carcasse	35%	30% Aluminium, 12% Cuivre, 5% plastique renforcé de verre, 53% Acier	7.875Kg Aluminium, 3.15 Kg Cuivre, 1.3125Kg plastique renforcé de verre, 13.9125Kg Acier
Autres composants (câbles, supports internes et cartes électroniques)	30%	80% Acier, 20% Cuivre	18 Kg Acier 4.5 Kg Cuivre
<b>Tour</b>			
Tour	Poids de la tour estimé à 226 Kg	98% Acier, 2% Aluminium	221.48 Kg Acier 4.52 Kg Aluminium
<b>Fondations</b>			
Pieux de fondations et plate-forme	Poids total estimé à 416 Kg	97% Béton, 3 % Acier	403.52 Kg Béton 12.48 Kg Acier

Tableau III : Inventaire des constituants de l'éolienne

A l'aide de cet inventaire, nous avons déterminé la quantité d'énergie nette et les émissions de CO2 liées à la fabrication de l'éolienne. Les calculs sont basés sur les énergies intrinsèques à chaque matériau ainsi que l'énergie nécessaire au processus de fabrication.

Les résultats sont présentés dans le tableau IV.

De cette manière, nous avons établi l'écobilan du système complet éolien photovoltaïque avec stockage. Ce bilan prend en compte les énergies nécessaires à la production des différents composants ainsi que les énergies consommées durant la durée de vie du système (25 ans) dissipées en transport et en travaux de maintenance.

Le tableau V montre l'écobilan du système hybride. Ce sont les batteries qui sont les plus gourmandes en besoins énergétiques primaires et les plus polluantes à cause de leur remplacement régulier tous les 5 ans. On remarque aussi que l'éolienne est plus efficace énergétiquement que les panneaux photovoltaïques avec une énergie requise de 1608.55MJ/m<sup>2</sup> contre 4600MJ/m<sup>2</sup> pour les panneaux. De même, son impact environnemental est moins important avec 110.42 KgCO2 pour 1m<sup>2</sup> de surface éolienne contre 303.60KgCO2 par m<sup>2</sup> de surface photovoltaïque.

\* En raison du manque de données, une hypothèse a été faite d'inclure les aimants permanents dans la catégorie d'aluminium en raison de son énergie intrinsèque élevée.  
\*\* Béton type RC30 utilisé pour les fondations (« 25 % cement replacement flyash »)

<b>Matériel</b>							
Type de matériau	Quantité (Kg)	Energie intrinsèque (MJ/kg)	Emissions CO2 intrinsèques (KgCO2/kg)	Energie totale investie (MJ)	Energie totale investie (KWh)	Emis. totales de CO2 (KgCO2)	Source
Acier	275.5	24.4	1.77	6722.2	1868.771	487.635	[29]
Aluminium & Aimants permanent*	18.17	155	8.24	2816.35	782.945	149.720	[29]
Cuivre	11.03	48	3.01	529.44	147.184	33.2	[29]
Fibre de verre	7.5	28	1.53	210	58.38	11.475	[30]
Plastique renforcé de verre	1.313	100	8.1	131.3	36.5	10.635	[30]
Béton**	403.5	0.9	0.12	363.15	100.955	48.42	[30]
<b>Total</b>				<b>10772.44</b>	<b>2994.73</b>	<b>741.08</b>	
<b>Fabrication</b>							
Processus de fabrication de l'éolienne	1 éolienne	NA	0.066 KgCO2/MJ	600	166.8	39.6	Estimation
<b>Bilan total</b>				<b>11372.44</b>	<b>3161.53</b>	<b>780.68</b>	

Tableau IV : Analyse énergétique de l'éolienne

Élément	Energie requise (MJ)	Energie requise (kwh)	Emissions CO2 (KgCO2)
Panneaux PV	15170.8	2217.48	1001.272
Eolienne & Tour	11372.44	3161.53	780.685
Batteries (4*103Ah) (initial)	4532	1259.89	299.112
Batteries (4*103Ah) (après 5 ans)	4309.886	1198.15	284.452
Batteries (4*103Ah) (après 10ans)	4098.659	1139.43	270.515
Batteries (4*103Ah) (après 15ans)	3897.784	1083.58	257.254
Batteries (4*103Ah) (après 20ans)	3706.754	1030.48	244.646
Régulateur de charge (1Kwel) (initial)	1000	278	66
Régulateur de charge (1Kwel) (après 15ans)	860.058	239.1	56.764
PV contrôleur mppt (48V/15A) (initial)	720	200.16	47.52
PV contrôleur mppt (48V/15A) (après 15ans)	619.242	172.15	40.87
Onduleur (1Kw) (initial)	1600	444.8	105.6
Onduleur (1Kw) (après 15ans)	1376.093	382.55	90.822
BOS	1154.3	320.89	76.184
Transport*	680	189.04	48.5
Installation**	10	2.78	0.66
Maintenance**	100	27.8	6.6
Démontage**	500	139	33
<b>Bilan total</b>	<b>55708.616</b>	<b>14486.827</b>	<b>3710.456</b>

\*On suppose que les produits ensemble pèsent 1 tonne et proviennent de la région Poitou-Charentes qui souhaite développer la filière des énergies renouvelables, soit une distance parcourue maximale de 500 Km avec des facteurs de : 1.36MJ/tonne. Km et 0.097 KgCO2/tonne.Km

\*\*Approximation

Tableau IV : Ecobilan du système hybride Eolien photovoltaïque avec stockage

Selon cet écobilan, le temps de récupération de l'énergie qui a été investie pour la mise en fonction du système hybride est estimé par [28] :

$$\text{Temps}_{\text{rec}} = \frac{[\text{Energie}_{\text{totale\_investie}}(\text{kwh})]}{[\text{Energie}_{\text{produite}}(\text{kwh})/\text{an}]} = 14486.827/[(3037+633.9)] = 3.95 \text{ années} = 47 \text{ mois} \quad (12)$$

De même l'intensité énergétique ainsi que l'impact environnemental de chaque KWh produit par les sources renouvelables peuvent être calculés de la manière suivante [6] :

$$\text{Intensité}_{\text{énergie}} = \frac{[\text{Energie}_{\text{totale\_requis}}(\text{MJ})]}{[\text{Energie}_{\text{produit}}(\text{kwh})/\text{an}]} = 55708.616/[(3037+633.9)*25] = 0.607 \text{ MJ/kwh} = 0.169 \text{ kwh}_{\text{prim}}/\text{kwh} \quad (13)$$

$$\text{Env}_{\text{impact}} = \frac{[\text{Emissions}_{\text{totales\_KgCO2}}]}{[\text{Energie}_{\text{produite}}(\text{kwh})/\text{an}]} = 3710.456/[(3037+633.9)*25] = 0.04 \text{ KgCO2/kwh} = 40 \text{ gCO2/Kwh} \quad (14)$$

Ces résultats sont a priori très inférieurs à celles des centrales électriques en France (60gCO2/Kwh en production mixte 10% combustibles fossiles, 78% nucléaire, 12% renouvelables). De plus, il est important de signaler qu'avec cette installation hybride, on évite les émissions CO2 chaque année de :

$$2688 \text{ kwh} * [(0.066-0.04) \text{ KgCO2}] = 70 \text{ KgCO2/an.}$$

Ce qui prouve que l'installation et l'utilisation d'un tel système a un impact moindre pour l'environnement.

## VII.CONCLUSION

Cette étude a permis d'optimiser le dimensionnement d'un système multi-sources avec batteries ainsi que l'évaluation économique et environnementale d'un tel système dédié à un habitat résidentiel de 4 personnes « type » basé à La Rochelle. Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont les suivantes :

- un système hybride bien dimensionné est avantageux pour le développement durable vu son faible impact environnemental et son coût économique raisonnable. Dans le premier cas, il faut compter presque 4 ans pour amortir le coût écologique lié à la fabrication du système complet. Pour le coût économique, il est d'environ 0.18€/KWh.
- ce sont les batteries qui sont les plus gourmandes en énergies primaires et en émissions de CO2. Il est important d'améliorer leur processus de fabrication ainsi que leur durée de vie par des techniques de gestion de l'énergie optimales par exemple,
- notre analyse du cycle de vie faite pour l'éolienne a montré que celle-ci est plus efficace énergétiquement et moins polluante que les panneaux PV. De plus, elle apporte des éléments de réponse dans le domaine des faibles puissances, peu souvent abordés dans la littérature en raison du surcoût d'échelle.

Finalement, il est important de signaler que l'optimisation du dimensionnement a été faite dans cet article en tenant compte uniquement de l'aspect économique. Suite à cette étude, nous estimons important de refaire l'optimisation selon les deux critères économiques et écologiques afin d'apporter une aide à la décision aux investisseurs potentiels.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la région Poitou-Charentes (Convention de recherche GERENER N° 08/RPC-R-003) et le Conseil General de la Charente Maritime pour leurs supports financiers à ces travaux de recherche.

## REFERENCES

- [1] A. Stoppato, "Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation", Energy 33 (2008) 224-232
- [2] Carl Johan Rydh, Björn A. Sandén, "Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I : Performance and energy requirements", Energy Conversion and Management 46 (2005) 1957-1979
- [3] Brian Fleck, Marc Huot, "Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use", Renewable Energy 34 (2009) 2688-2696
- [4] Eduardo Martinez, Félix Sanz, Stefano Pellegrini, Emilio Jiménez Julio Blanco, "Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine :CML method", Int J Life Cycle Assess (2009) 14:52-63
- [5] Varun, Ravi Prakash, Inder Krishnan Bhat, "Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2716-2721
- [6] Varun , I.K. Bhat , Ravi Prakash, "LCA of renewable energy for electricity generation systems- A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1067-1073
- [7] Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education : <http://www.meteonorm.com/pages/en/meteonorm.php>
- [8] Données du vent : <http://french.wunderground.com/history/airport/LFBH/2008/1/1/DailyHistory.html>

- [9] W.Shepherd and D.W Shepherd, “Energy studies”, Second edition, by Imperial College press, 2003, pp.306-311
- [10] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, “Wind Energy Handbook”, Chapter 4 , wind –Turbine performance, page 173, edition 2001
- [11] Thomas Ackermann, “Wind Power in Power systems”, Chapter 24, Introduction to the modelling of wind turbines, page 527, edition 2005.
- [12] Jaroslav Hofierka and Jàn Kanuk, “Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools”, Renewable Energy 34 (2009) 2206–2214
- [13] Rachid BELFKIRA, Omessad HAJJI, Cristian NICHITA, Georges BARAKAT, “Optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system with battery storage”, EPE 2007, Aalborg
- [14] Koutroulis E., Kolokotsa D.,Potirakis A.,Kalaitzakis K.,“photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms”, Solar Energy 2006.
- [15] Miguel Rios Rivera, “Small wind/Photovoltaic hybrid renewable energy system optimization”, Master of science thesis,2008
- [16] Mick Sagrillo, Ian Woofenden, ”Wind turbine buyer’s guide”, home power 119,June & July 2007
- [17] Source des panneaux solaires et des produits d’énergies renouvelables à bas prix : [www.wholesalesolar.com](http://www.wholesalesolar.com)
- [18] Hewitt D.Crane, Edwin M.Kinderman, Ripudaman Malhotra, “A cubic mile of oil, realities and options for averting the looming global energy crisis”, chapter 8, Energy efficiency and conservation, page 255, Oxford university Press,2010
- [19] Optimization Toolbox 5.1:  
<http://www.mathworks.com/products/optimization/>
- [20] Fmincon : Find minimum of constrained nonlinear multivariable function :  
<http://www.mathworks.com/help/toolbox/optim/ug/fmincon.html>
- [21] World's Largest Site for Batteries :  
<http://www.atbatt.com/product/3617.asp>
- [22] Dan Chiras, “The homeowner’s guide to renewable energy”, chapter 8, wind power-meeting your needs for electricity, page 229, edition 2006
- [23] Vaughn Nelson, “Wind energy: Renewable Energy and the Environment”, chapter 12 Economics , cost of energy , page 249,edition 2009
- [24] Les prix de l’électricité :  
<http://bleuciel.edf.com/abonnement-et-contrat/les-prix/les-prix-de-lelectricite/mon-contrat-electricite-47799.html#acc52437>
- [25] Tom Markvart, Luis Castañer, “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications”, part V, chapter 2, Energy Pay-Back Time and CO2 Emissions of PV systems, pages 870-884, edition 2003
- [26] Eoliennes Kestrel :  
[http://www.windpowerunlimited.com/wind\\_turbines/kestrel.htm](http://www.windpowerunlimited.com/wind_turbines/kestrel.htm)
- [27] Dan Ancona, Jim McVeigh, “Wind Turbine – Materials and Manufacturing Fact Sheet”, pdf 29 August 2001, Prepared for the Office of Industrial Technologies, US Department of Energy By Princeton Energy Resources International, LLC.
- [28] Michael F. Ashby, “Materials and the Environment : Eco-Informed Material Choice”, chapter 7 : Eco-audits and eco-audit tools, Energy flows and payback time of a wind turbine, pages 146-148, edition 2009
- [29] Energie intrinsèque (Embodied Energy):  
<http://www.greenspec.co.uk/embodied-energy.php>
- [30] Geoff Hammond, Graig Jones, “Inventory of carbon and energy (ICE)”,Version 1.6a, University of Bath 2008