



## Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique (ConFrEGE 2010)



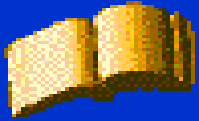
«Etude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage :  
dimensionnement et analyse de cycle de vie»

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



**Présenté par Dhaker ABBES**





# Plan

- **INTRODUCTION**
- **DONNEES : SOURCES ET PROFIL DE CONSOMMATION**
- **MODELISATION DU SYSTEME**
- **OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT**
- **EVALUATION DES PERFORMANCES**
- **ANALYSE DU CYCLE DE VIE**
- **CONCLUSIONS & PERSPECTIVES**

# INTRODUCTION

## ● Contexte et motivation

➔ Ce travail entre dans le cadre d'un projet de la Région Poitou Charentes "GERENER" qui vise à développer un système hybride éolien / solaire avec stockage d'énergie qui devra gérer de façon optimale la production d'électricité provenant des panneaux photovoltaïques et de l'éolienne en tenant compte des demandes instantanées et prévisionnelles de consommation au niveau de l'utilisateur.

# INTRODUCTION

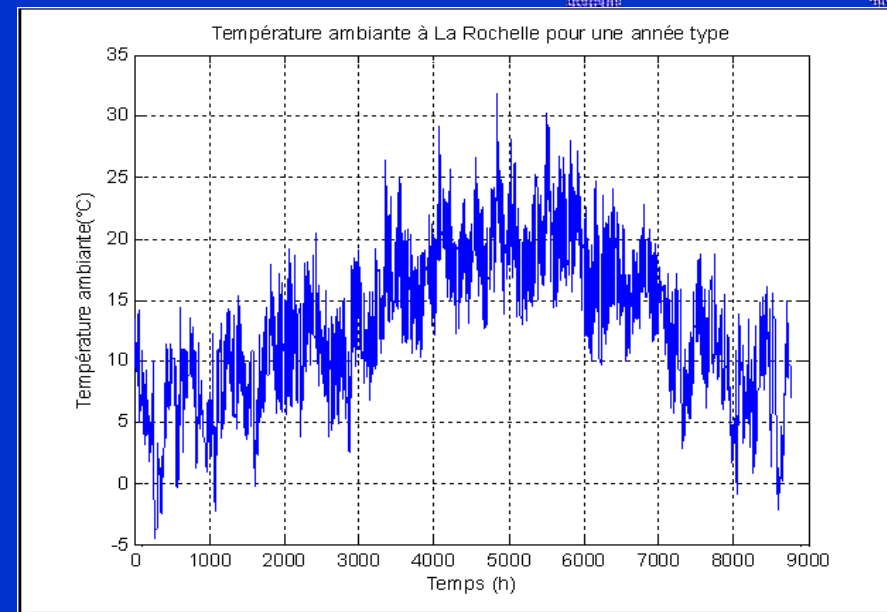
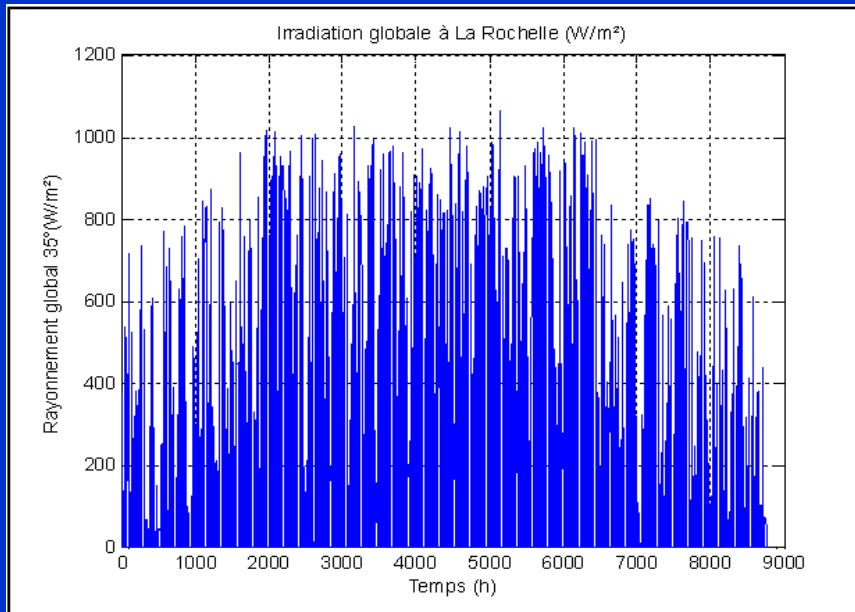
## ● Problématique

- ➔ Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui s'intéressent à l'analyse économique et environnementale des systèmes de production à bases de sources renouvelables.
- ➔ Néanmoins, la majorité de ces travaux s'intéressent aux systèmes de production séparément et dans la plupart des cas concerne le domaine des grandes puissances surtout pour les éoliennes.
- ➔ Dans ce papier, nous présentons 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.

# DONNEES : SOURCES ET PROFIL DE CONSOMMATION

## Sources

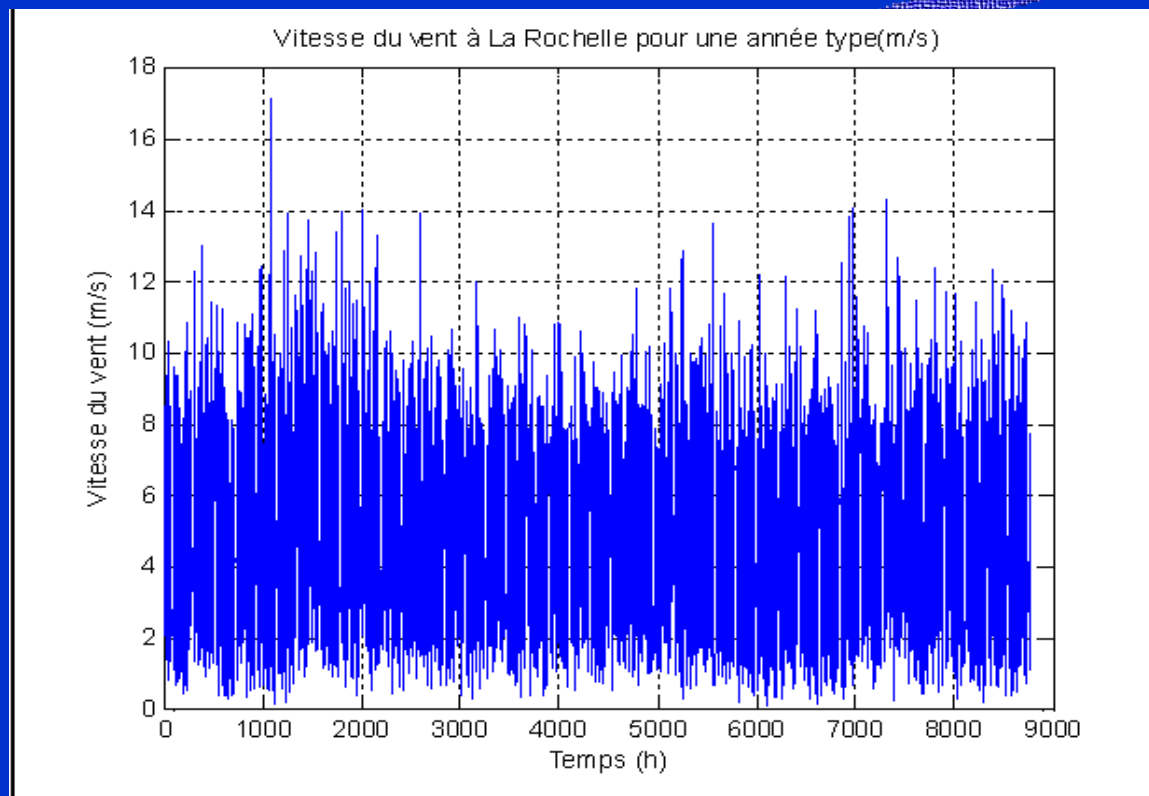
- L'étude présentée dans cet article est faite pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle.
- Nous avons établi une année type à l'échelle horaire et supposé reproduite 25 fois, la durée de vie de notre système.
- Pour l'irradiation et la température ambiante, nous avons utilisé des données horaires synthétisées par le logiciel Meteonorm 6.0.



# DONNEES : SOURCES ET PROFIL DE CONSOMMATION

## ● Sources

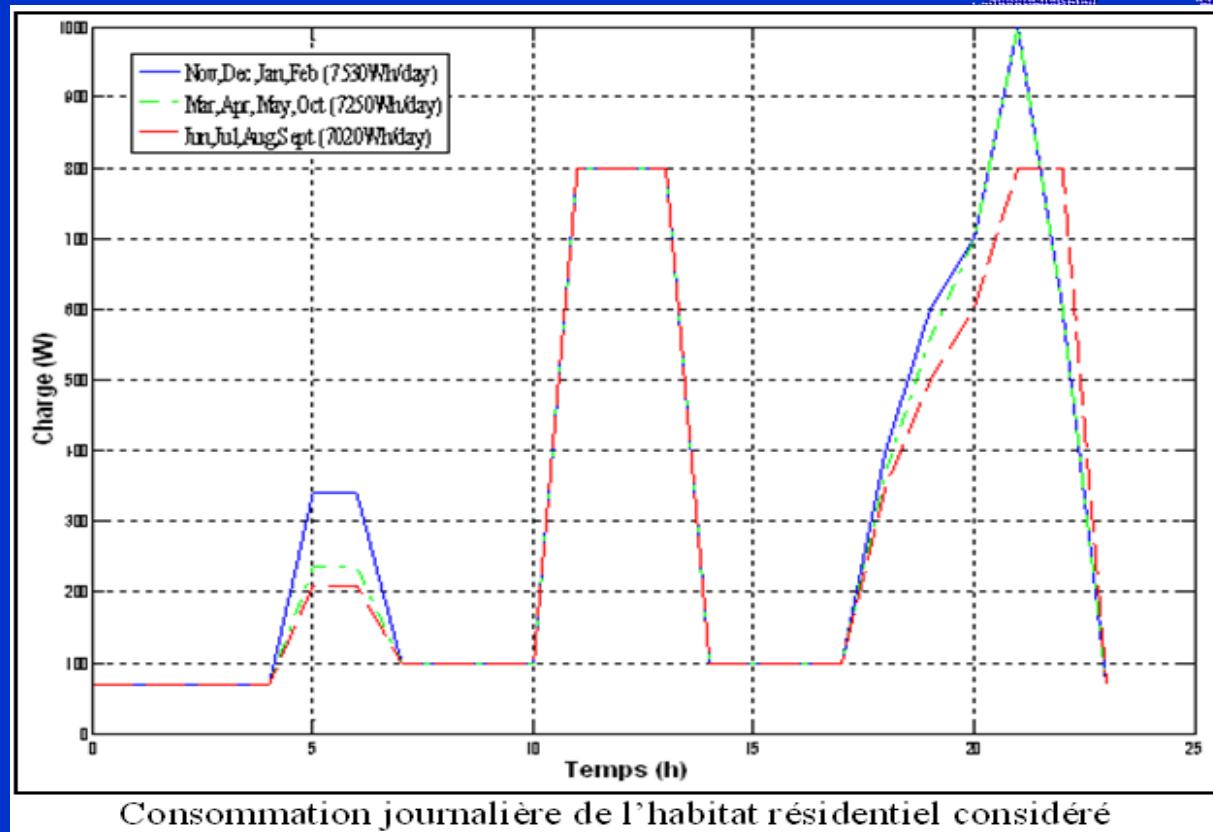
➔ Pour la vitesse du vent, nous avons généré des données horaires types pour une année par transformation inverse de la distribution de Weibull à partir d'acquisitions mi-horaire disponibles sur un site spécialisé dans les mesures météorologiques.



# DONNEES : SOURCES ET PROFIL DE CONSOMMATION

## ● Profil de consommation

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



# MODELISATION DU SYSTEME

## ● Générateur éolien

- La puissance électrique générée par l'éolienne est donnée par :

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

Avec:

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

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

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

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

## ● Générateur photovoltaïque

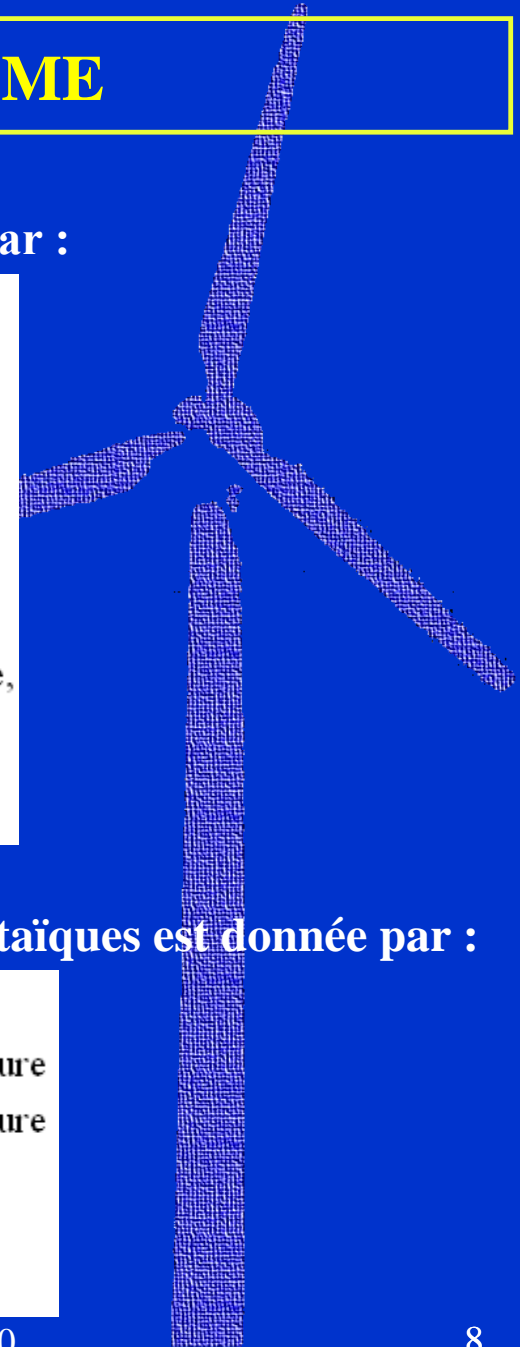
- La puissance électrique générée par les panneaux photovoltaïques est donnée par :

$$P_{pv} = \eta_g \cdot A_g \cdot I_g$$

$\eta_g$ : 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>].



# MODELISATION DU SYSTEME

## Batteries

➤ Elles sont de type Plomb-acide à cyclage profond. Chacune d'entre elles est représentée par un modèle idéal simple. Un tel modèle est suffisant pour la validation de notre méthode d'optimisation.

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

$$\text{SOCmin} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOCmax}$$

➤ Un switcher assure la gestion de l'énergie .

# OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

- **Objectif** : Minimiser le coût d'acquisition des composants du système

$$\text{Coût} = f(A_{wt}, A_{pv}, C_n)$$

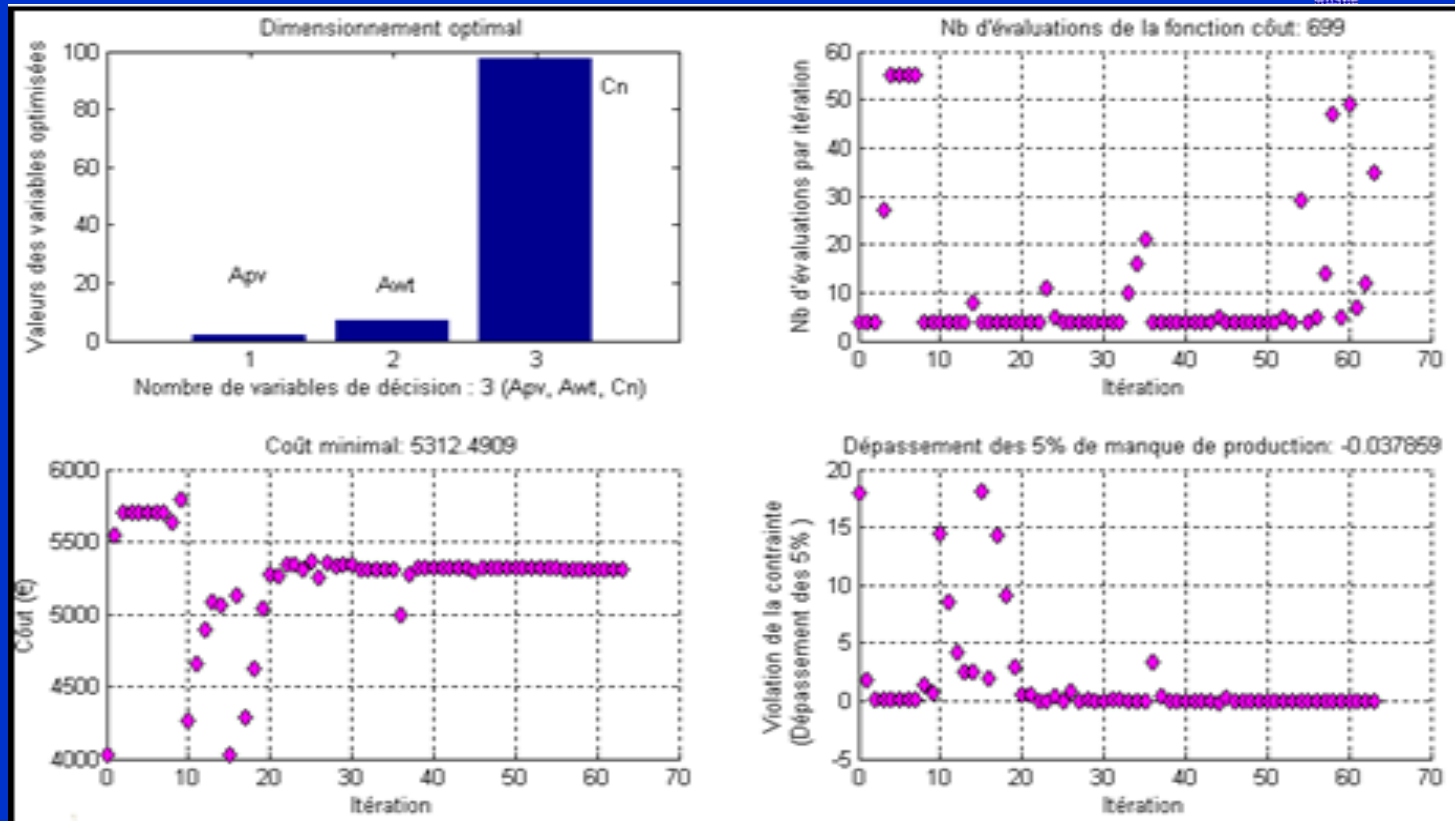
**Contrainte** : satisfaire 95% de la demande en énergie électrique de l'habitat.

- 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 ».

- La fonction utilisée (« fmincon ») est bien adaptée aux problèmes non linéaires. Elle converge plus rapidement que les algorithmes génétiques.

# OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

➤ La solution avec le coût le plus faible a été obtenue à la 63<sup>ème</sup> itération en partant des conditions initiales [ $A_{pv\_in}=0$ ,  $A_{wt\_in}=0$ ,  $Cn\_in=10$ ] 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  $2 E-6$ , d'où la forme des alibres obtenues.

## Résultats d'optimisation de la solution retenue

# OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT

➔ Le dimensionnement optimal du système est obtenu pour :

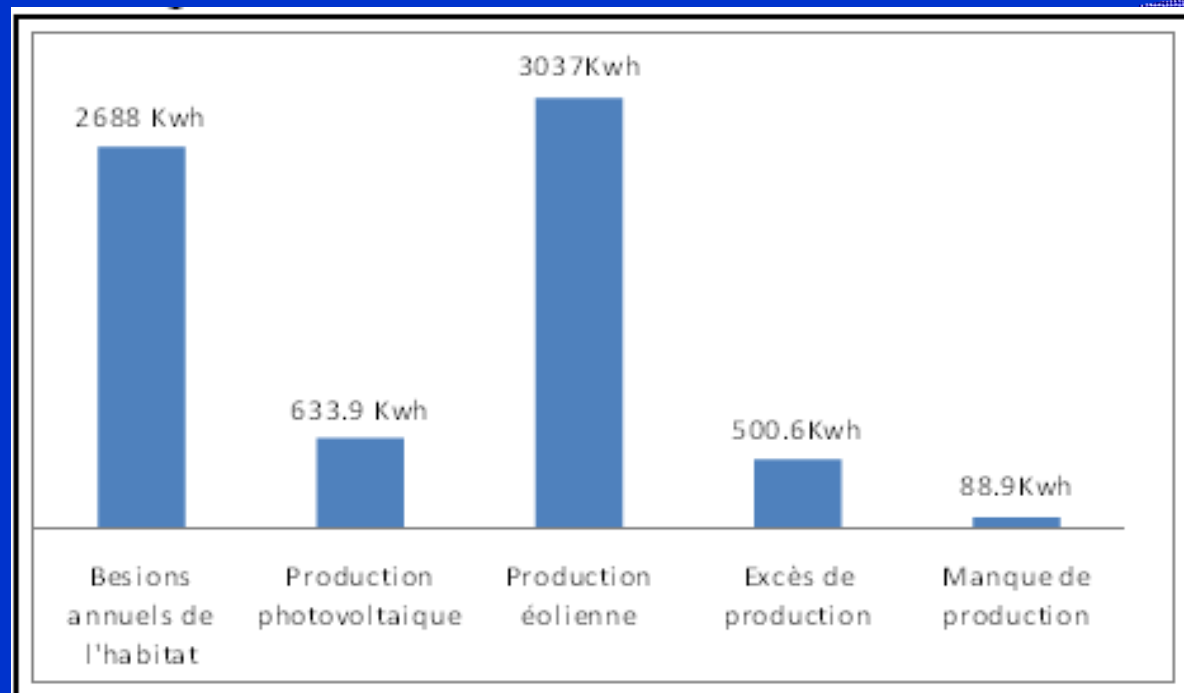
■ une surface de panneaux photovoltaïques installée de 2.129 m<sup>2</sup>. D'un point de vue de la satisfaction du critère énergétique, il est décidé d'installer deux panneaux de type Sharp 170 (surface totale de  $1.649 * 2 = 3.298$  m<sup>2</sup> et prix d'achat de 900 euros),

■ une surface balayée par le rotor de l'éolienne de 7.209m<sup>2</sup>, Ce qui reviendrait à installer une éolienne de type Kestrel Wind(1000) de 7.07m<sup>2</sup> de surface et un coût approximatif de 2300 euros,

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

# 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.

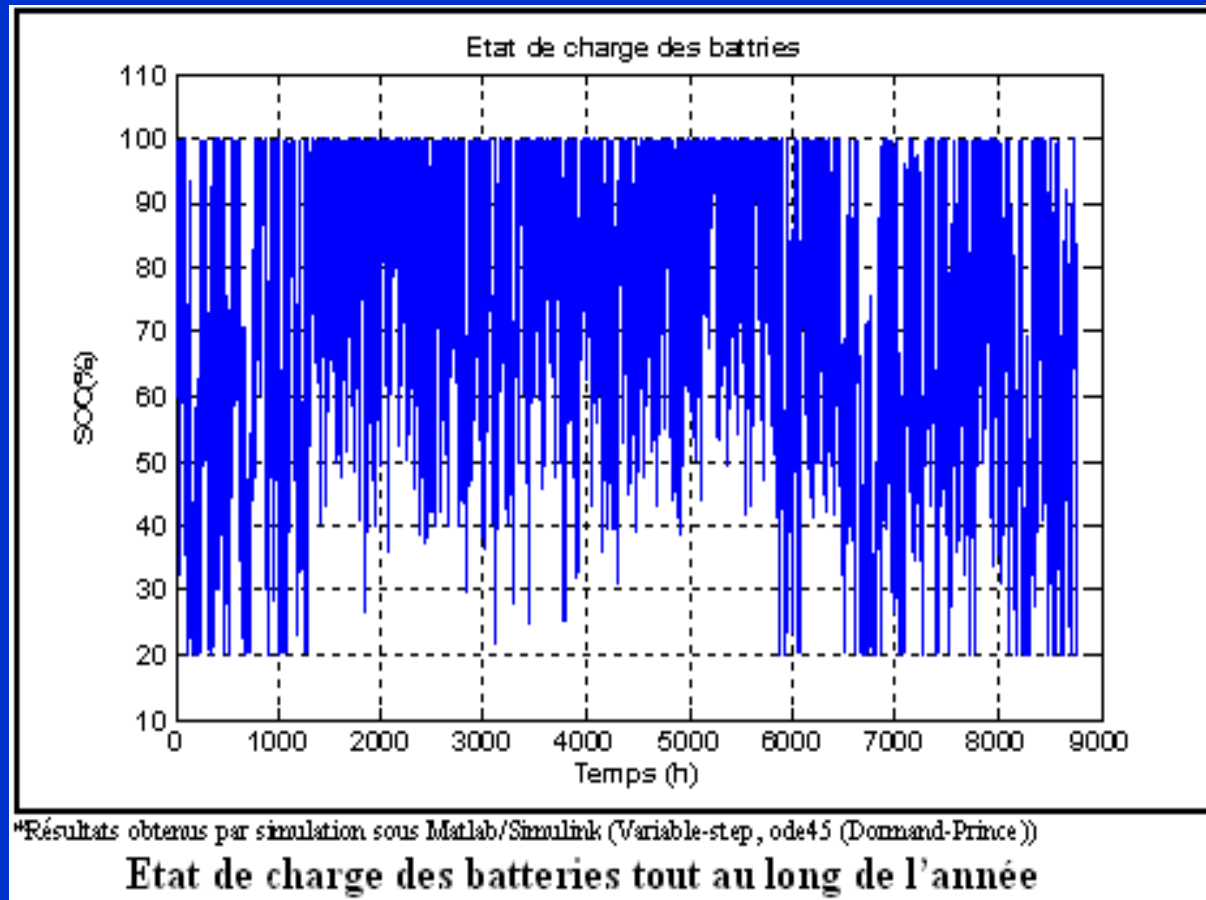


\*Résultats obtenus par simulation sous Matlab/Simulink (Variable-step, ode45 (Dormand-Prince))

**Bilan énergétique de l'année type avec la configuration optimale**

# EVALUATION DES PERFORMANCES

➔ Concernant l'état de charge des batteries, il est tout au long de l'année toujours compris entre 20 % et 100%.



# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## Analyse économique (Life Cycle Cost Analysis)

➔ Coûts du projet durant toute sa durée de vie : prise en compte du prix du matériel, du coût de l'installation, de remplacement et de maintenance.

➔ 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 :

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

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

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
Totals		16159.17€	100

Evaluation Economique du système hybride  
(LCC ANALYSIS)

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## Analyse écologique (Life Cycle Assessment :écobilan)

➔ Etude de l'impact environnemental du système au cours de sa vie : énergie primaire nécessaire à la production de ses différents composants

& émissions de gaz à effet de serre tel que le CO<sub>2</sub>.

➔ Bilan écologique des différents composants du système.

Hypothèses		
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 CO <sub>2</sub> est faite en considérant que les émissions CO <sub>2</sub> 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. *	
Données		
Panneau PV		
Processus	Besoins en énergies primaires (MJ/m <sup>2</sup> )	Besoins en énergies primaires (Kwh <sup>**</sup> /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>
Autres composants		
Batterie	11MJ/Ah	3Kwh/Ah
Régulateur de charge	1MJ/We1	0.278Kwh/Wel
PV contrôleur mppt	1MJ/We1	0.278Kwh/wel
Onduleur	1.6 MJ/We1	0.44Kwh/Wel
Composants supplémentaires (BOS)	700 MJ/m <sup>2</sup>	194.6Kwh/m <sup>2</sup>
Emissions CO <sub>2</sub>		
Facteur d'émission <sup>***</sup>	0.066 Kg/MJ (primaire)	0.06 Kg/1whelec
* 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		
Hypothèses et données utilisées pour le bilan écologique du panneau photovoltaïque, des batteries et des composants supplémentaires		

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## ● Analyse écologique (Life Cycle Assessment :écobilan)

➡ 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.

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>			
Boite 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
<b>Inventaire des constituants de l'éolienne</b>			

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## Analyse écologique (Life Cycle Assessment :écobilan)

\* 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 % ciment remplacement flyash »)

Matériel							
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>	
Fabrication							
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>	
Analyse énergétique de l'éolienne							

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## ● Analyse écologique (Life Cycle Assesement :écobilan)

Elément	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
<b>BOS</b>	<b>1154.3</b>	<b>320.89</b>	<b>76.184</b>
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 ensembles 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

Ecobilan du système hybride Eolien photovoltaïque avec stockage

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## ● Analyse écologique (Life Cycle Assesement :écobilan)

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

$$\begin{aligned} \text{Temps}_{\text{rec}} &= \frac{[\text{Energie}_{\text{totale\_investie}}(\text{kwh})]}{[\text{Energie}_{\text{produite\_an}}(\text{kwh})]} \\ &= 14486.827 / [(3037+633.9)] = 3.95 \text{ années} = 47 \text{ mois} \end{aligned}$$

➔ 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:

$$\begin{aligned} \text{Intensité}_{\text{énergie}} &= \frac{[\text{Energie}_{\text{totale\_requisse}}(\text{MJ})]}{[\text{Energie}_{\text{produite}}(\text{kwh}) / \text{an}]} \\ &= 55708.616 / [(3037+633.9) * 25] = 0.607 \text{ MJ/kwh} \\ &= 0.169 \text{ kwh}_{\text{prim}} / \text{kwh} \end{aligned}$$

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

# CONCLUSIONS

➔ Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont les suivantes :

- un système hybride bien dimensionné est avantageux pour le développement durable.
- ce sont les batteries qui sont les plus gourmandes en énergies primaires et en émissions de CO<sub>2</sub>.
- l'analyse du cycle de vie faite pour l'éolienne apporte des éléments de réponse dans le domaine des faibles puissances, peu souvent abordés dans la littérature.
- Cette analyse a montré aussi que l'éolienne est plus efficace énergétiquement et moins polluantes que les panneaux PV.

# PERSPECTIVES

- **Optimisation multi objective du dimensionnement en tenant compte des deux critères économiques et écologiques afin d'apporter une aide à la décision aux investisseurs potentiels.**
- **Amélioration du modèle de la batterie dans la perspective de développer une nouvelle stratégie de gestion d'énergie dans le système hybride.**
- **Faire des essais de validation du dimensionnement sur un banc d'essai.**

# 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.**

**MERCI !**

**EN ATTENDANT VOS QUESTIONS**