

OPTIMISATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES HYBRIDES A ÉNERGIES RENOUVELABLES

Présenté par : Dr. Ing. Dhaker ABBES

Enseignant – Chercheur (Maître de Conférences HDR)

Co-responsable du domaine ESEA

HEI-Lille

Membre de l'équipe Réseaux Electriques au L2EP Lille



Programme

- **Contexte :** - Transition énergétique et intégration des ENR
- Evolution du mix énergétique : systèmes multi-sources
- **Problématique :** *Analyse technico-économique des systèmes hybrides/ Optimisation du dimensionnement*
- **Objectifs de cette première partie (2 heures) :**
 - Comprendre le principe, la structure et les éléments d'un système hybride
 - Apporter les connaissances nécessaires pour évaluer le coût de cycle de vie d'un système hybride
 - Avoir une idée sur les tendances du marché des énergies renouvelables.

Plan

❖ Introduction

❖ Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

- Définition, principe et schéma général
- Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage
- Avantages et limites des systèmes hybrides avec stockage
- Composants d'un système hybride éolien photovoltaïque avec batteries
- Applications

❖ Analyse économique

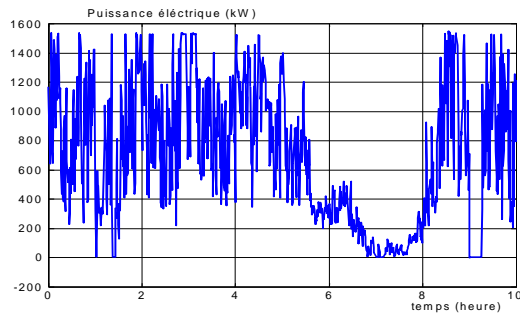
- Coût de cycle de vie
- Coût moyenné de l'énergie LCOE
- Temps de retour sur investissement
- Outils

❖ Tendances du marché des énergies renouvelables

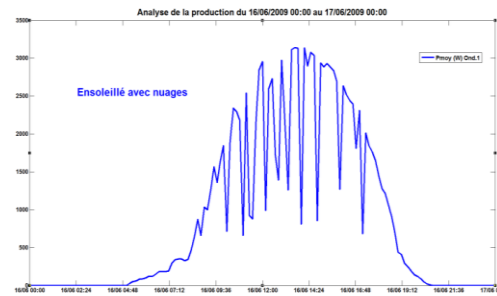
❖ Etudes de cas

Introduction

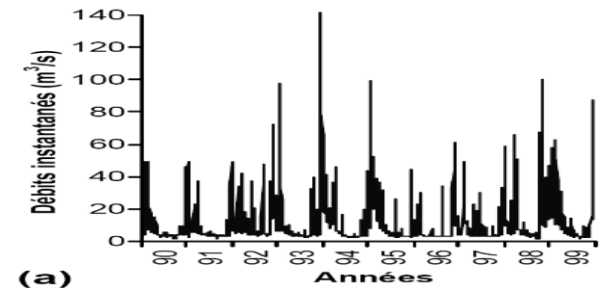
- L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui.
- Cependant, leur utilisation est limitée par la variabilité des ressources qui risque de diminuer leur fiabilité.



Eolien



Solaire

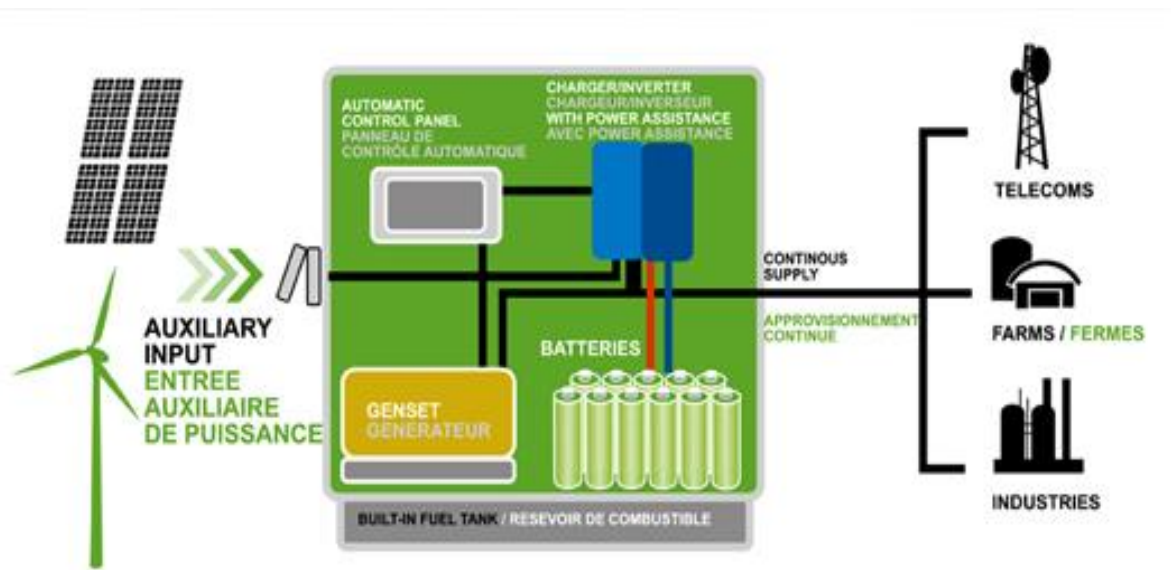


Hydraulique

- En plus, les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles.

Introduction

- Pour surmonter cette limite, la solution à retenir, en particulier pour les sites isolés, est certainement le recours et la combinaison de plusieurs sources, telles que les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques avec stockage.



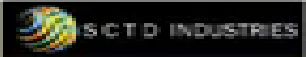
Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Définition :

- ❑ Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources.
- ❑ Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel, turbines à gaz, etc.), différents éléments de stockage et différentes charges.
- ❑ Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.
- ❑ Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source.
- ❑ Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie.

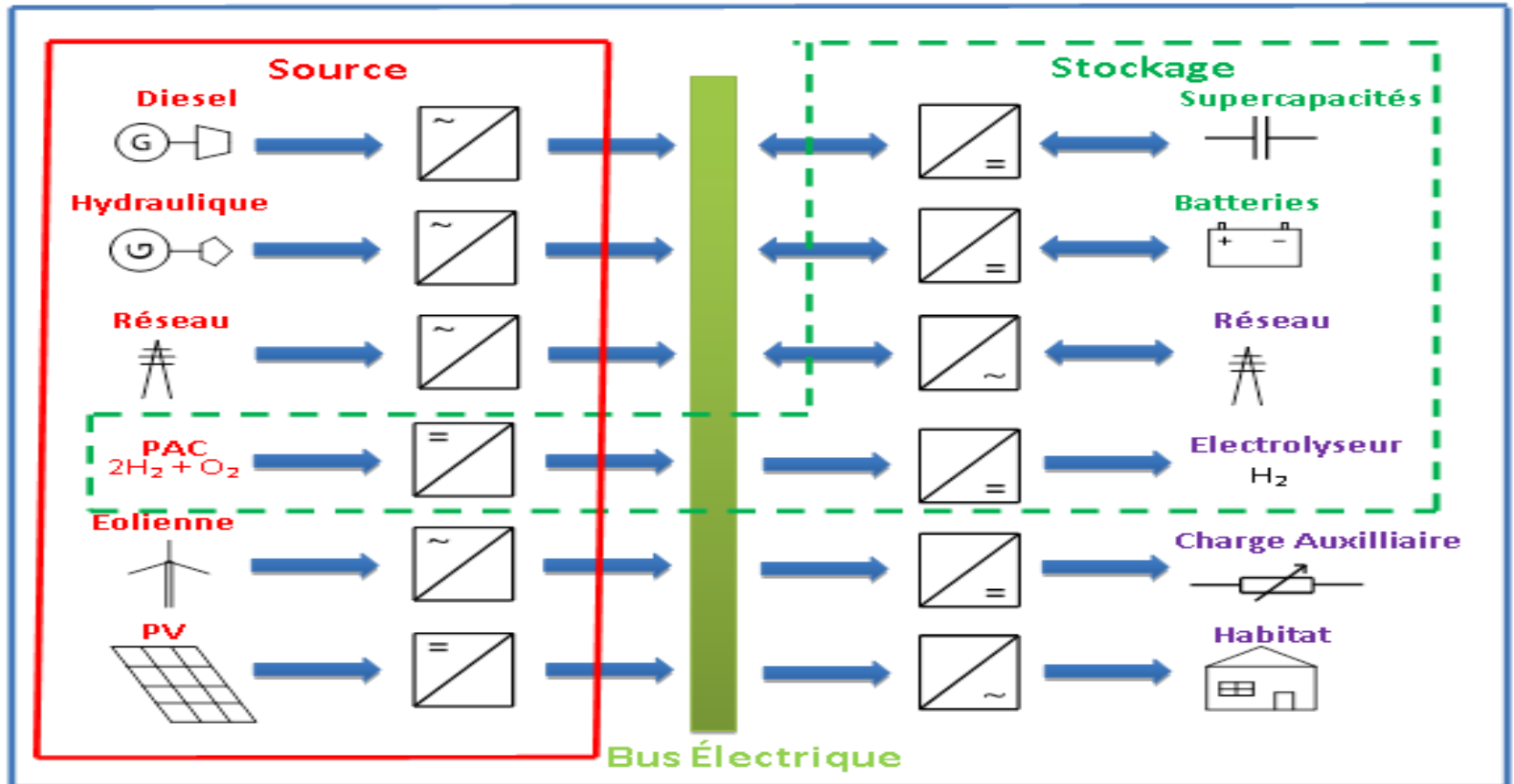
Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Principe :



Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Schéma général:



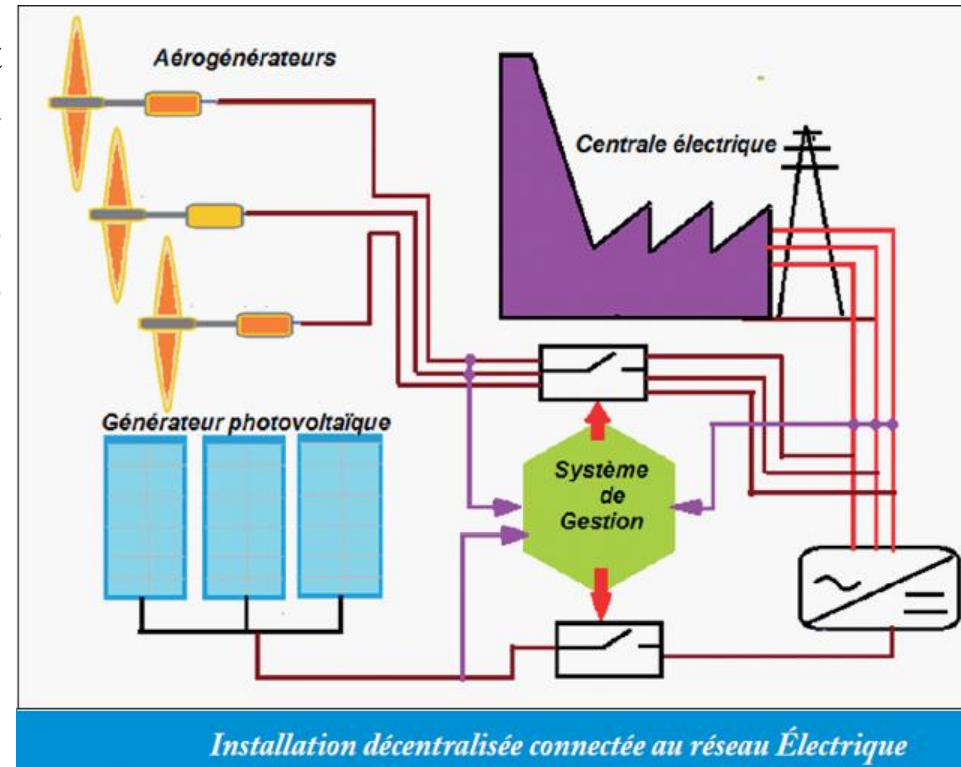
Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage :

□ Les systèmes d'énergie hybrides connectés aux réseaux électriques

- Les énergies éoliennes et solaires sont transformées sous la forme électrique transportable via les lignes vers le réseau. La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation.

- Majoritairement, les centrales hybrides sont de puissance inférieure à 12 MW. Alors elles sont soumises à la réglementation pour le raccordement des systèmes de micro-génération.



❖ Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage :

□ Les systèmes d'énergie hybrides connectés aux réseaux électriques

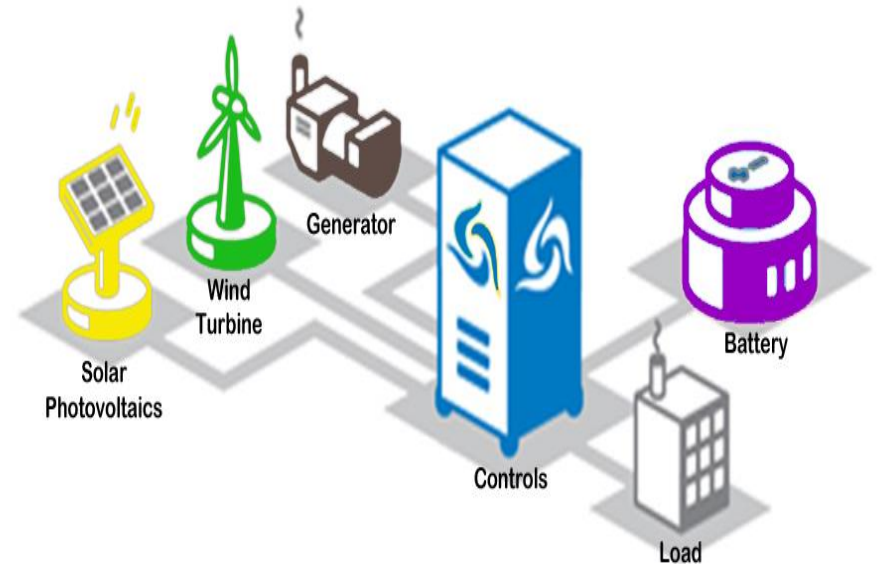
- La majorité des systèmes hybrides raccordés au réseau, sont sans dispositif de stockage.
- Dans certains systèmes connectés à un réseau électrique « faible », des unités de stockage sont introduites pour renforcer le réseau en cas de défaillance.
→ assurer un fonctionnement, éventuellement en mode dégradé, pour la durée de la coupure.
- En cas de forte pénétration renouvelable, les dispositifs de stockage joueront un rôle important pour assurer la stabilité du réseau.
- Dans d'autres systèmes, on remarque la présence de générateurs diesel qui constituent un second moyen de secours.

Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage :

□ Les systèmes d'énergie hybrides autonomes (en site isolé)

- Dans ce cas, il est parfaitement envisageable, voire impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système.

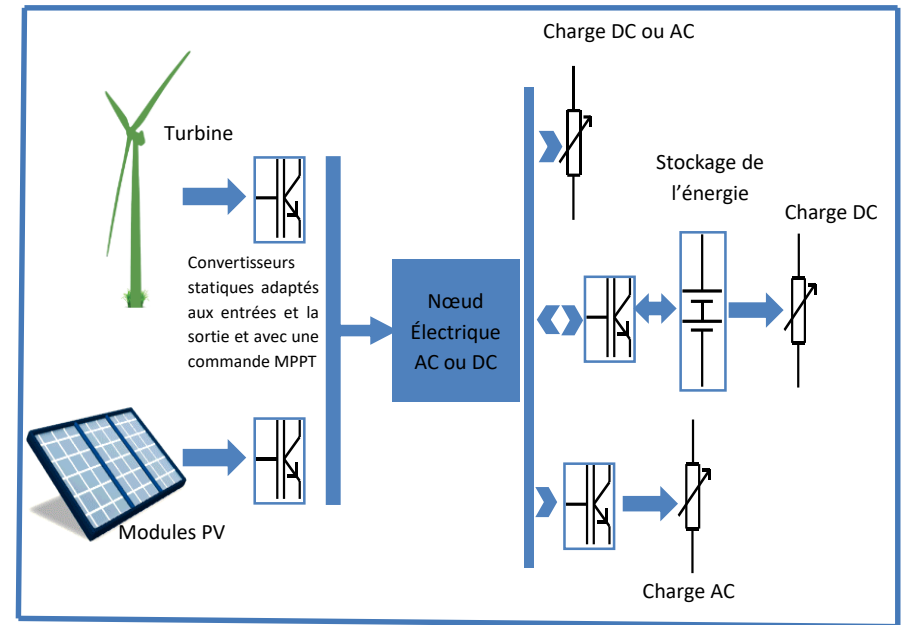


Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage :

❑ Les systèmes d'énergie hybrides autonomes (en site isolé)

- Le « nœud électrique » permet de connecter et de distribuer l'énergie entre les différents composants du système.
- Avec cette association, nous obtenons un réseau électrique complètement autonome à courant continu DC et/ou à courant alternatif AC.
- On parle ainsi d'un mini- réseau local « iloté », à faible puissance de court-circuit.
- **Dans la plupart des références bibliographiques, il y a une corrélation établie comme naturelle entre, mini réseau « iloté » et système multi-sources.**



Exemple d'une configuration hybride générale dédiée à un site isolé : Couplage éolien photovoltaïque

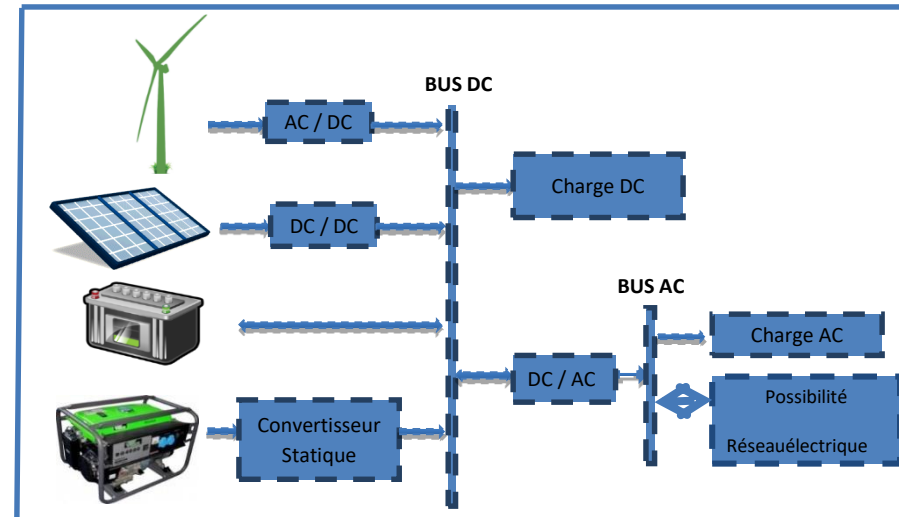
Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Les systèmes hybrides(éolien-photovoltaïque) avec stockage :

□ Les systèmes d'énergie hybrides autonomes (en site isolé)

- Les systèmes hybrides à configuration de bus commun continu sont plus adaptés à une génération ilotée de petite puissance.

- La majorité de ces systèmes sont utilisés en sites isolés où l'énergie est produite et directement consommée en courant continu sur place ou à proximité des générateurs.



Exemple d'une configuration hybride multi-sources dédiée à un bus commun continu DC

Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Avantages et limites des systèmes hybrides avec stockage :

- + Complémentarité des ressources en particulier vent et irradiation solaire que ce soit à l'échelle annuelle ou à l'échelle journalière.
- + Disponibilité de l'énergie plus fiable.
- + Efficacité environnementale.
- Stockage cher.
- Parfois ajout d'un groupe diesel de secours : approvisionnement en carburant, polluant, bruyant, économiquement moins viable en comparaison avec les sources d'énergies renouvelables.
- Si l'excès d'énergie ne peut être éliminé, la production doit alors être limitée ou même arrêtée.
- Problème de l'interconnexion et de la gestion énergétique.
- Dynamique rapide des générateurs : possibilité de surtension.

Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Composants d'un système hybride éolien photovoltaïque avec batteries :

- Système photovoltaïque : modules ou panneaux
- Eolienne : pales, moyeu, arbre primaire, multiplicateur, arbre secondaire, générateur électrique, mât, système d'orientation de la nacelle, système de refroidissement, outils de mesure du vent, système de contrôle électronique, transformateur, etc.
- Conditionneur d'énergie : régulateur solaire (CC-CC), régulateur éolien (CA-CC), onduleur.
- Stockage : batteries électrochimique, au plomb, alcalines (Ni/Cd et Ni/MH), Lithium (Li-ion), etc.
- BOS : «Balance Of System » : support panneaux, logement des batteries, câbles, connecteurs, protections (disjoncteurs, parafoudres, compteurs électriques, fusibles, coupe-circuit).
- Système de gestion : embarqué en site isolé ou petite installations, centralisé pour les micro-réseaux ou grandes installations.



Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

❖ Applications :

- Maisons et chalets en régions isolées .

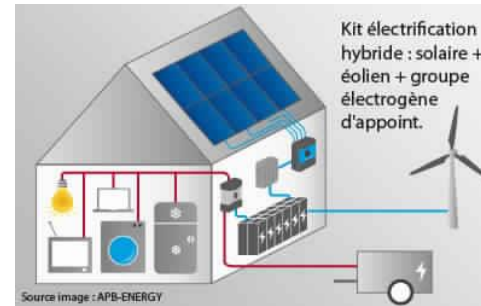
- Alimentations de villages (micro-réseaux) .



- Exploitations agricoles : Chauffage et alimentation des serres, pompage de l'eau, abreuvoir à bétail, etc.



- Bâtiments raccordés au réseau : autoconsommation.



- Système industriel: télécommunication et contrôle.

Analyse économique

❖ Coût de cycle de vie:

$$CCV[\text{€}] = C_0 + C_{ins} + CC_{maint} + CC_{replace}$$

Le coût cumulé du remplacement est calculé comme suit :

$$CC_{replace} = f_a \times C_0$$

C_0 : coût d'acquisition du produit.

f_a : facteur d'actualisation de ce coût si le produit serait racheté n années plus tard.

$$f_a = \left(\frac{1+\tau}{1+d}\right)^n = x^n$$

$$x = \frac{1 + \tau}{1 + d}$$

τ : taux d'inflation qui est une mesure de la baisse durable de la valeur de la monnaie.

d : taux d'actualisation par année; c'est le pourcentage de retour sur investissement (rémunération pour le capital avancé).

n : nombre d'année de vie des installations



Analyse économique

❖ Coût de cycle de vie:

$$CCV[\text{€}] = C_0 + C_{ins} + CC_{maint} + CC_{replace}$$

Le coût cumulé de maintenance est obtenu de la manière suivante :

$$CC_{maint} = C_{maint} \times x \times \frac{1-x^n}{1-x} = C_{maint} \times x \times f_m$$

$$f_{m1} = x \times \frac{1-x^n}{1-x} = x \times f_m$$



Attention : For simplification reasons, we have not integrated:

- Loan repayment rate (heavy investment case)
- Cost of insurance
- Positive externalities such as avoided greenhouse gas emissions.

Analyse économique

❖ Coût de cycle de vie:

Exemple :

Comparer le coût du cycle de vie d'un panneau d'avertissement de construction routière alimenté par un système photovoltaïque par rapport à l'utilisation d'un générateur essence pour la même application. Le système doit pouvoir fonctionner **24 heures par jour** avec un minimum d'indisponibilité.

Supposons que la charge soit de **2 kWh par jour** et **une durée de vie de 20 ans**.

Pour alimenter cette charge avec un système photovoltaïque, il faudra un ensemble de modules photovoltaïques de **500 watts** au coût de **4 \$ par watt**, d'accumulateurs de **900 \$**, qui doivent être **remplacés tous les 5 ans** et un **contrôleur de charge de 300 \$**. Supposons un coût de **maintenance du système de 100 \$ par année**.

Bien que la puissance moyenne ne soit que de 83 watts, il est peu probable qu'un générateur de 83 watts sera utilisé. Aux fins de cet exemple, supposons qu'un générateur essence de **500 watts** peut être acheté pour **250 \$**. Comme il fonctionne bien sous la charge nominale, une estimation généreuse de l'efficacité est de **2 kWh par gallon**, et utilisera environ **365 gallons d'essence par an avec un prix de 550 \$/an** et nécessitera un **entretien fréquent avec un coût annuel d'environ 1500 \$** pour les changements d'huile, les entretiens du moteur. En raison de l'utilisation intensive, **après 5 ans, le générateur doit être remplacé**.

Supposons **un taux d'inflation de 3%** et **un taux d'actualisation de 10%**.

❖ Coût de cycle de vie:

Exemple :

Solution: Pour le système photovoltaïque, f_a est nécessaire pour **5 ans, 10 ans et 15 ans.**

Pour le générateur, f_a est également nécessaire pour **son remplacement après 5 ans, 10 ans et 15 ans.**

Pour le système photovoltaïque, f_{m1} , est nécessaire pour les coûts de maintenance et f_m est nécessaire pour le carburant du générateur et les coûts de sa maintenance.

Pour les chiffres d'inflation et d'actualisation donnés :

$$x = \frac{1+0,03}{1+0,1} = 0,9364$$

$$f_m = \frac{1-x^n}{1-x} = \frac{1-0,9364^{20}}{1-0,9364} = 11,5$$

$$f_{m1} = x \times f_m = 10,77$$

$$\begin{aligned} CC_{\text{replace_batt_5ans}} &= f_a \times C_{0_bat} \\ &= x^5 \times C_{0_bat} = 0,9364^5 \times 900 = 648 \$ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} CC_{\text{maint_PV}} &= C_{\text{maint_PV}} \times x \times \frac{1-x^n}{1-x} \\ &= 100 \times f_{m1} = 100 \times 10,77 = 1077 \$ \end{aligned}$$

Analyse économique

❖ Coût de cycle de vie:

Exemple :

Système PV			Générateur			
Composant	Coût initial	Coût actualisé	Composant	Coût initial	Coût annuel	Coût actualisé
Module	\$2000	2000	Générateur	\$250		\$250
Régulateur	\$300	300				
Batteries	\$900	900	Fuel		\$550	\$6326
Batt 5 ans	\$900	648	Gen 5 ans	\$250		\$180
Batt 10 ans	\$900	466	Gen 10 ans	\$250		\$130
Batt 15 ans	\$900	336	Gen 15 ans	\$250		\$93
Maintenance	\$100	1077	Maintenace		\$1500	\$17250
CCV [\$]		\$5727	CCV [\$]			\$24229

Même si le coût initial du système photovoltaïque est significativement plus élevé, son CCV est significativement plus bas.

Analyse économique

❖ Coût moyenné de l'énergie LCOE

Le coût de cycle de vie divisé par l'énergie produite le long de la vie du système :

$$LCOE = \frac{\text{Coût total de cycle de vie}}{\text{Energie totale produite le long de la vie du système}} = \frac{\text{€}}{\text{KWh}}$$

Le LCOE PV, exprimé en €/MWh, peut se définir par la formule suivante :

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n [OPEX(t) / (1 + WACC_{nom})^t]}{\sum_{t=1}^n [Production_0 \times (1 - Dégradation)^t / (1 + WACC_{réel})^t]}$$

Avec :

t = temps (en années)

n = durée de vie économique du système (en années)

CAPEX = investissement initial du système (en €/kWc)

OPEX(t) = frais d'exploitation et de maintenance à l'année t (en €/kWc)

Production₀ = production annuelle initiale sans dégradation (en kWh/kWc)

Dégradation = dégradation annuelle de la puissance nominale du système (en % par an)

WACC_{nom} = coût moyen pondéré du capital nominal

WACC_{réel} = coût moyen pondéré du capital réel

avec WACC_{réel} = (1 + WACC_{nom}) / (1 + Inflation) - 1

l'inflation est le taux d'inflation annuel.

❖ Temps de retour sur investissement

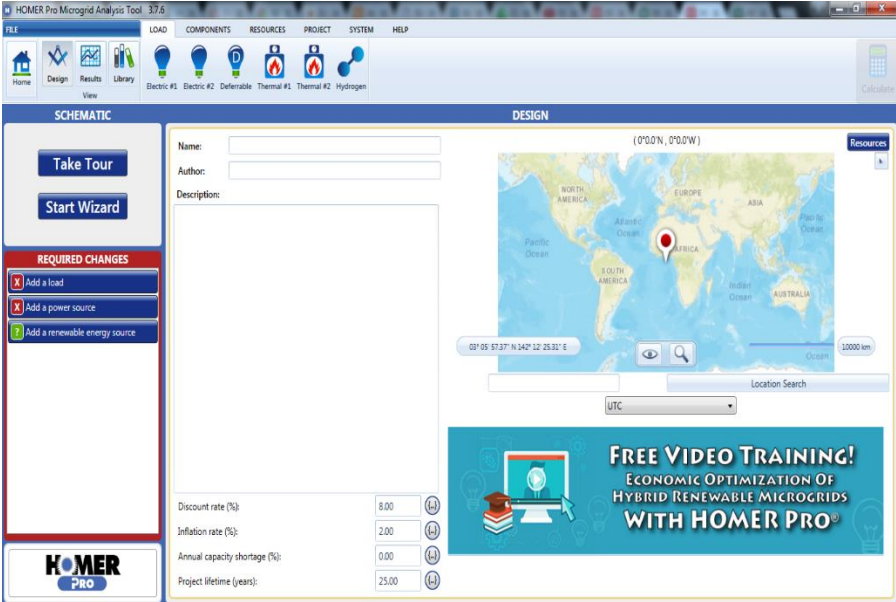
Période de temps nécessaire pour récupérer les fonds dépensés dans l'investissement ou pour atteindre le point de rentabilité.

$$PBT = \frac{\text{Coût total du cycle de vie du système}}{\text{Revenues par an}} = \text{ans}$$

Analyse économique

❖ Outils :

HOMER



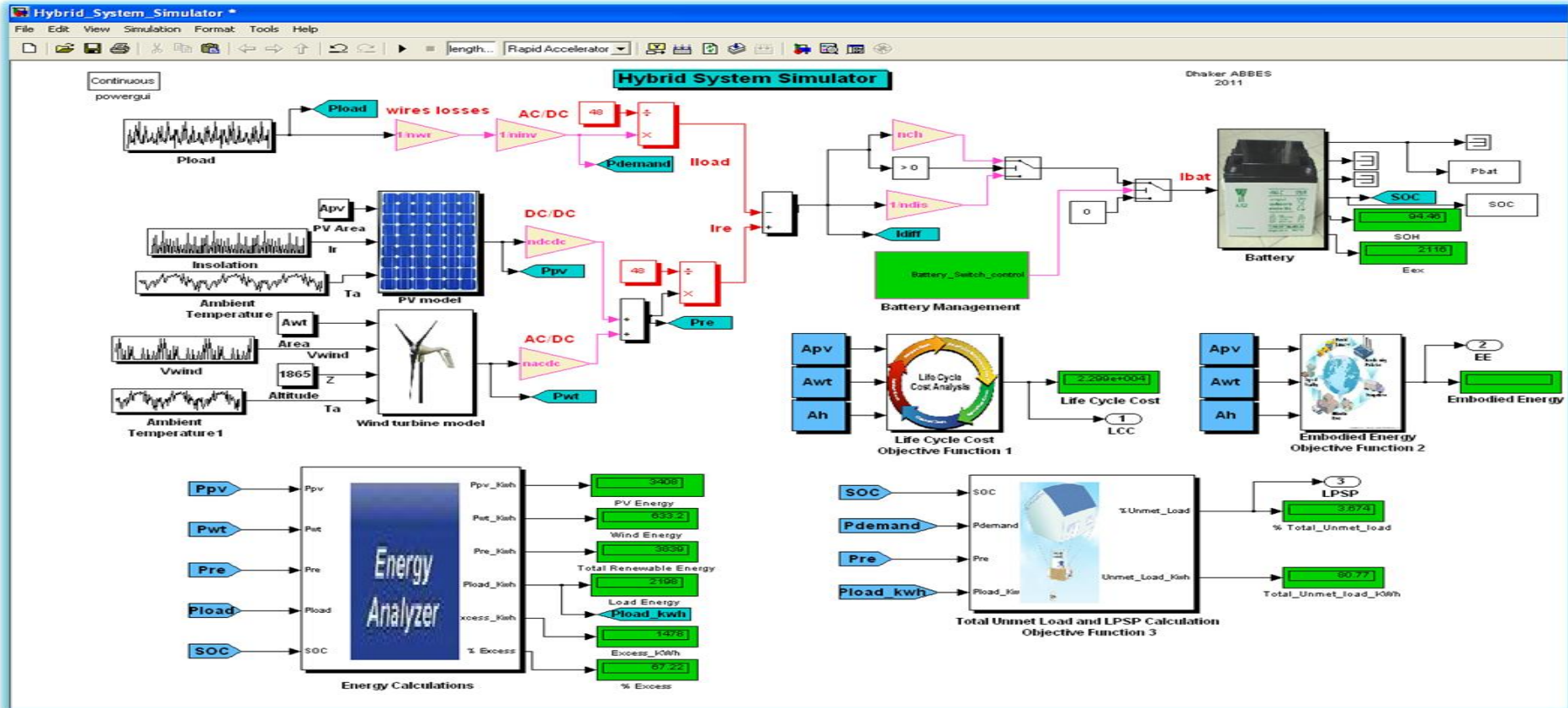
RETScreen



Analyse économique

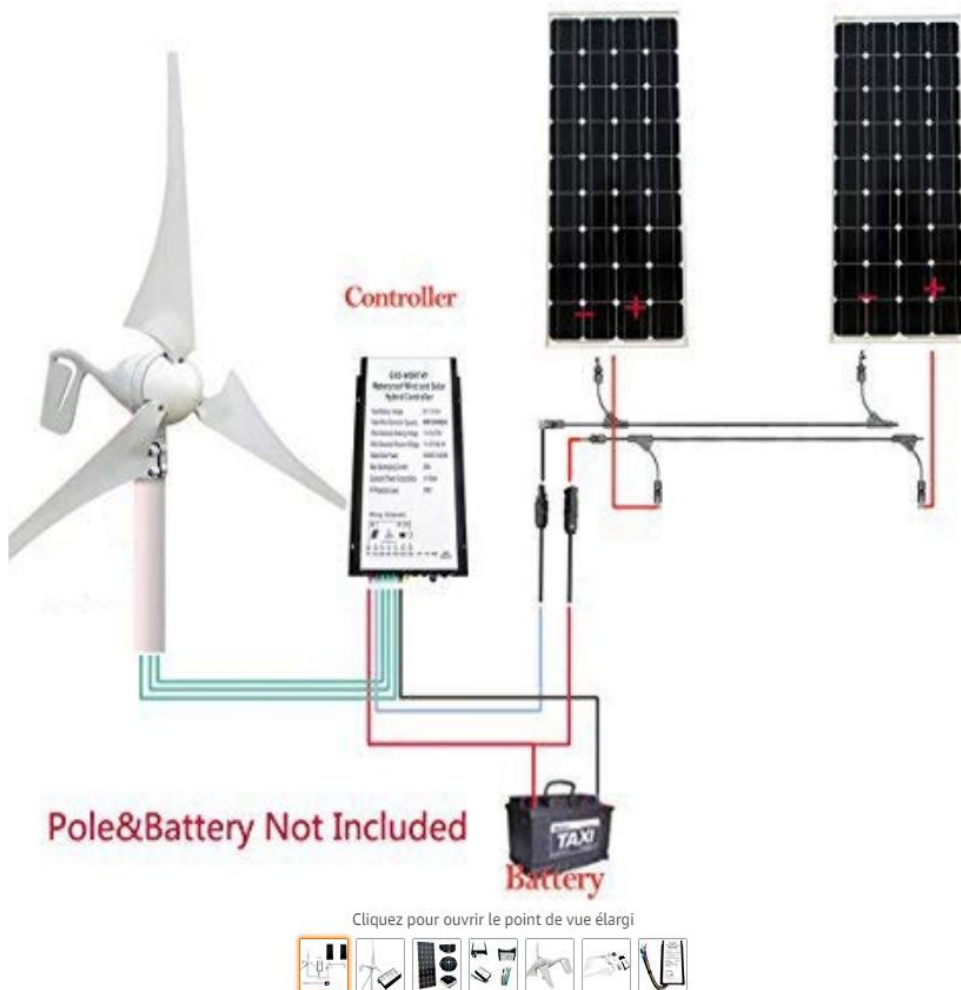
❖ Outils :

Notre Simulateur : HYBRIDSIM



Tendances du marché des énergies

❖ Kits hybrides pour petites installations :



ECO-WORTHY 12 V/24 V 600 W Vent - Kit hybride solaire qui Incluent 400 W Vent Générateur de Turbine + 2 pcs 100 W Mono Panneaux solaires + Wind-solar hybride contrôleur de charge de ECO-WORTHY

Prix : 492,66 € LIVRAISON GRATUITE.
Tous les prix incluent la TVA.

Payez jusqu'en 24 fois Voir détails et conditions

Neufs (1) à partir de 492,66 € + Livraison GRATUITE

- Sur system-to font de ce système complet, il vous faut des câbles électriques (iec-320-c1 suggéré) pour brancher l'éolienne et du panneau solaire au contrôleur, vous avez également besoin d'une batterie pour stocker l'énergie et alimentation de vos appareils.
- Sur use-this wind-solar systèmes hybrides sont particulièrement utiles pour les systèmes de sauvegarde de la maison d'hiver où temps couvert et venteux se produisent simultanément. Génération de l'électricité produite par le vent dans des conditions de vent ou par des panneaux solaires en jours de soleil peuvent être stockées dans les piles pour un usage domestique quand il le faut.
- Sur contrôleur hybride (qui inclus dans le package) Le contrôleur est de 12 V/24 V AutoDetect, veuillez connecter la batterie au contrôleur tout d'abord, et ensuite se connecter au panneau solaire et éolienne avec le contrôleur.
- Sur le vent turbine-high performance Fibre nylon lames de précision de moulage par injection, démarrage faible (2.5 m/s)/la vitesse du vent de conjonction de design unique à électroaimant, suis-je la protection électrique au design spécial et aeroelastic lame.
- Sur pole-this système n'est pas livré avec une barre qui reprend les mêmes locaux éolienne, nous suggérons que vous achetez une en local. Hauteur de la tour/pole : 4,5/, diamètre du mât : 7.4 cm – Diamètre extérieur, 5.3 cm – Diamètre intérieur.



DOKIO Panneau solaire 80W 12V Mono Idéal pour toutes applications camping -car, marine - bateau, chalet - cabane, maison

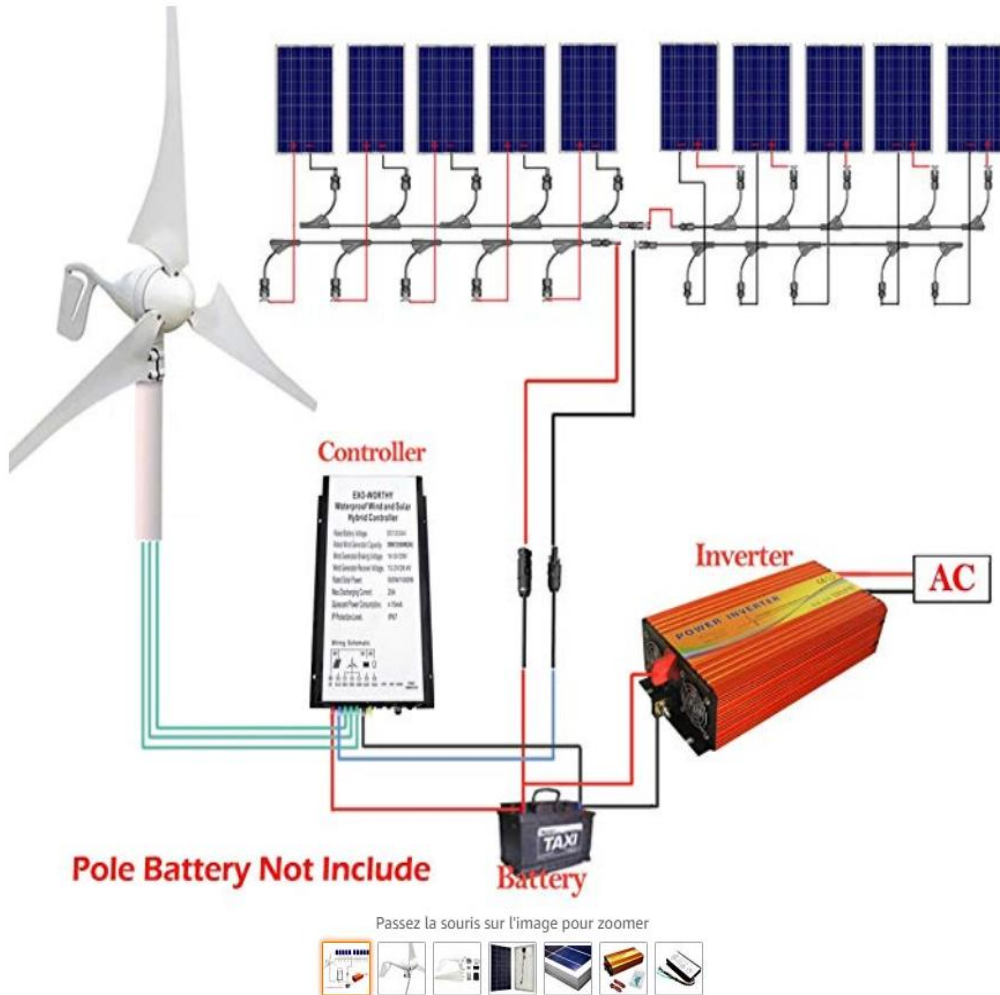
★★★★★ 1 | 65,77 € **prime**

[Acheter >](#)

Commentaires sur la publicité

Tendances du marché des énergies

❖ Kits hybrides pour petites installations :



ECO-WORTHY 1400W Hors Réseau Grid & Kits de charge de système éolien: Générateur de turbine de vent de 400W + Panneaux solaires Poly de 10pcs 100W + 1500 Watts hors grille MPPT inverter

de ECO-WORTHY

5 questions avec réponses

Prix : **1 787,99 € LIVRAISON GRATUITE.**

Tous les prix incluent la TVA.

Payez jusqu'en 24 fois Voir détails et conditions

Neufs (1) à partir de 1 787,99 € + Livraison GRATUITE

- Livraison gratuite à partir du Royaume-Uni, Usd pour le système de maison éolienne-solaire
- Comprend: Générateur éolien 400W + 10 x 100W (1KW) Panneau solaire poly + 1.5KW Off Grid Onduleur + Régulateur de turbine hybride + 8 pcs Y Connecteur MC4 + 1 pc Connecteurs MC4 avec fil de 24cm
- Lames en fibre de nylon hautes performances par injection de moulage de précision. Fait pour la terre et la marine. Peut être utilisé en conjonction avec des panneaux solaires.
- Les générateurs de turbines éoliennes transforment l'énergie éolienne en électricité, les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en électricité.
- Les éoliennes de 400 watts sont incroyablement faciles à installer, très silencieuses et très efficaces. C'est le modèle pour vous, et l'option la plus polyvalente pour les maisons, les entreprises et la supplémentation énergétique industrielle!



DOKIO Panneau solaire 80W 12V Mono Idéal pour toutes applications camping -car, marine - bateau, chalet - cabane, maison

★★★★★ 1 | 65,77 € **prime**

[Acheter >](#)

Commentaires sur la publicité

Tendances du marché des énergies

❖ Kits hybrides pour petites installations :



Kit de système hybride AUECOOR 1400 W : éolienne 400 W et 10 panneaux solaires 100 W + onduleur pur 3000 W (pic 6000 W) + accessoires pour usage domestique

de AUECOOR

Prix : 1 968,06 € LIVRAISON GRATUITE.

Tous les prix incluent la TVA.

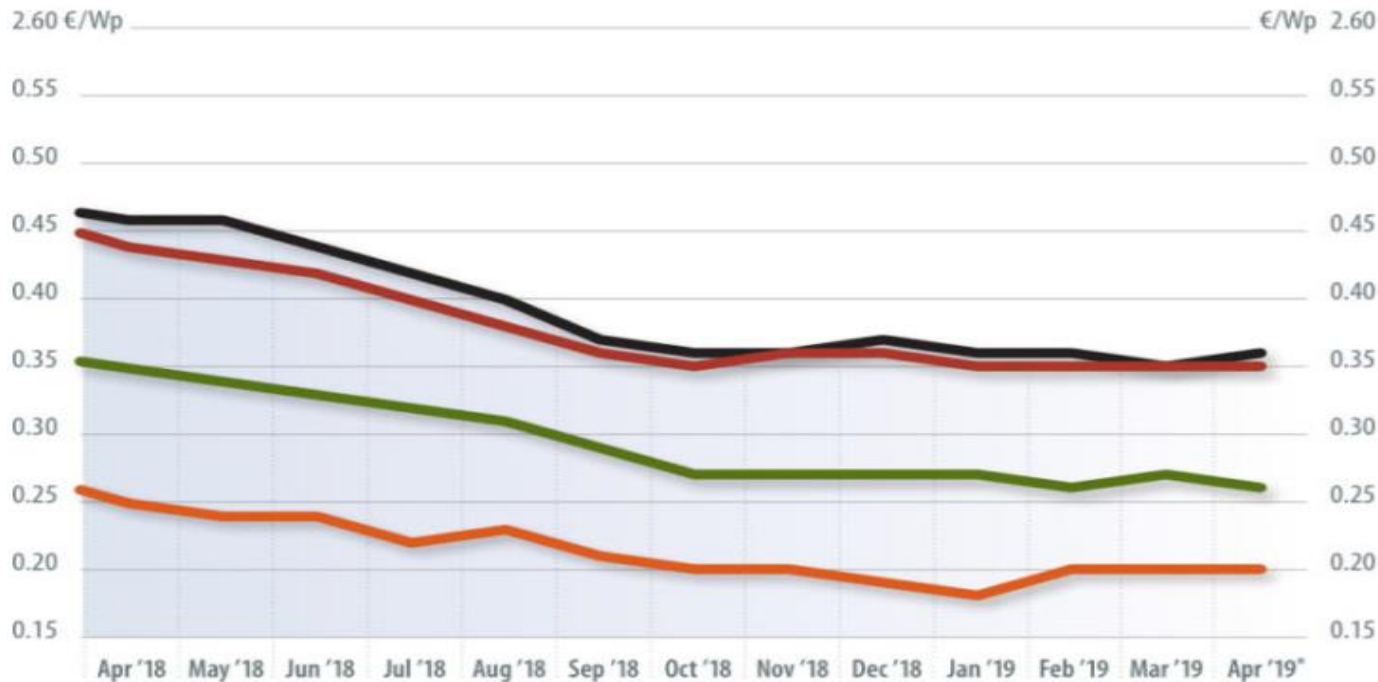
Neufs (1) à partir de 1 968,06 € + Livraison GRATUITE

- Le cadre en aluminium résistant à la corrosion protège le panneau solaire, adapté pour une utilisation en extérieur par temps difficile, permettant aux panneaux de durer pendant des décennies.
- Haute efficacité de conversion de module et excellente performance dans des conditions de faible luminosité, plus efficace que le panneau traditionnel.
- Conçu spécifiquement pour les clients débutants au solaire. Facile et pratique à installer avec des trous pré-perçés sur les panneaux et des crochets en zinc pour un montage rapide et sécurisé.
- Ce type d'onduleur à onde sinusoïdale pure, réaction plus rapide et plus sensible ; fonction de protection électrique parfaite ; boîtier en alliage d'aluminium antirouille, résistant à la chaleur, résistant au froid et anti-corrosion.
- Garantie : 6 ans de matériaux et de fabrication, garantie de transfert de puissance de 25 ans ; service convivial 24h/7D. Le kit solaire sera livré en plusieurs colis.

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

EU spot market module prices by technology



<https://www.pv-magazine.com/features/investors/module-price-index/>

Crystalline modules (mono-/poly-Si) average net prices (€/Wp)

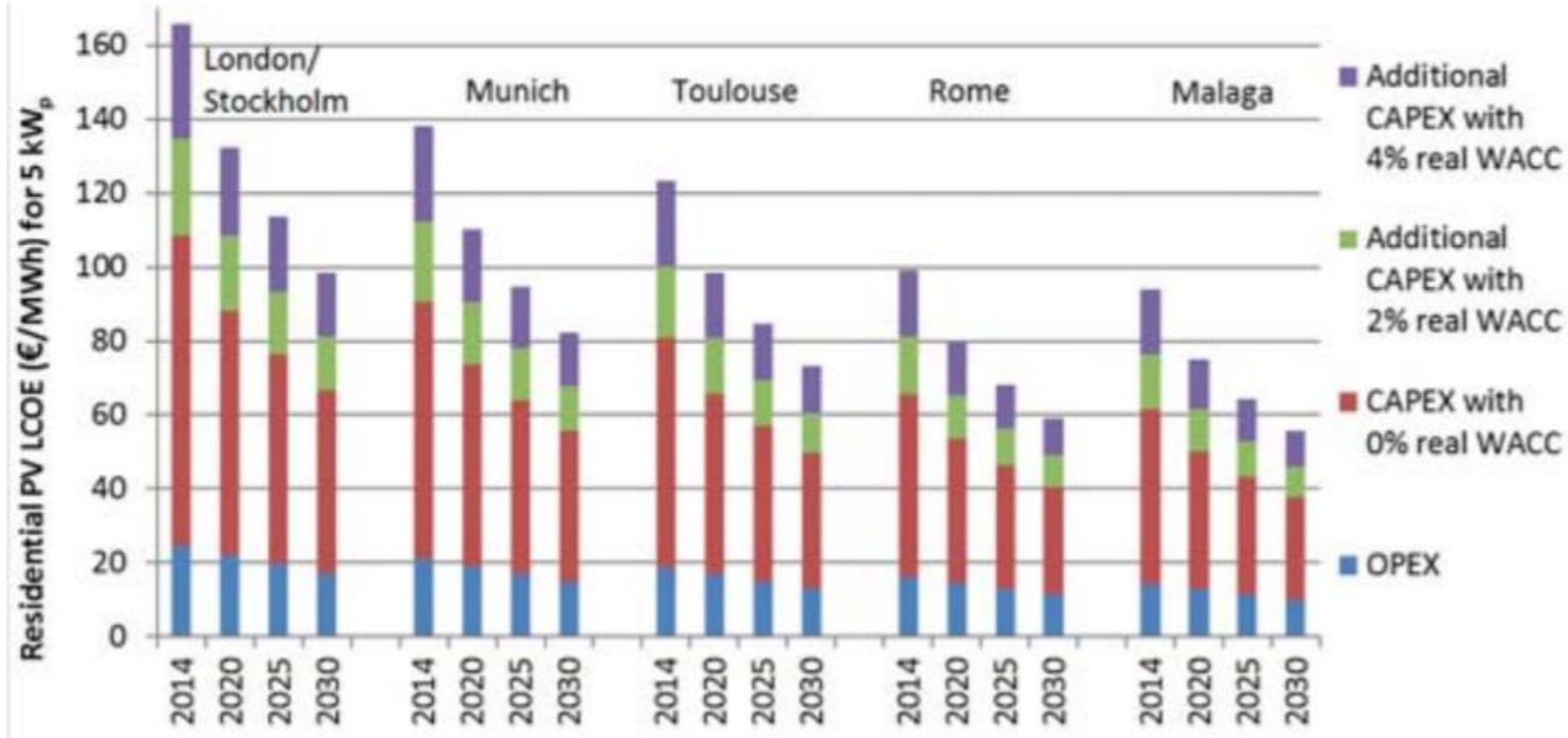
- High efficiency:** Crystalline modules 290 Wp and above with Cello, PERC, HIT-, n-type – or back-contact cells or combinations thereof
- Mainstream:** Modules with usually 60 cells, standard aluminum frames, white backing and 260 Wp to 285 Wp – the majority of modules on the market
- All black:** Module types with black backsheets, black frames and rated outputs of between 200 Wp and 320 Wp
- Low cost:** Reduced-capacity modules, factory seconds, insolvency goods, used modules (crystalline), products with limited or no guarantee

* Data up to April 11, 2019

More information: www.pvXchange.com

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :



LCOE d'installations de 5kW pour 6 locations

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

■ 1. Prix moyens des installations en revente d'énergie d'une puissance de 3 kW

Évolution des prix moyens depuis 2005 en € HT par W, pour les installations en vente totale de l'énergie produite

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Évolution 2015-2016
Prix matériel	6,3	6,75	6,95	7,75	7,10	6,57	5,62	3,90	3,15	2,65	2,20	2,1	- 5 %
Prix pose	0,72	0,75	0,84	1,05	0,90	0,90	0,90	0,90	0,85	0,80	0,70	0,6	- 14 %
Prix total	7,80	7,65	7,90	8,80	8,30	7,51	6,27	4,90	4,0	3,45	2,90	2,7	- 7 %

Autour des prix moyens de 2016, les fourchettes hautes et basses observées ont été les suivantes :

Prix du matériel en € HT par W

- ✓ fourchette haute : 2,9 €/W
- ✓ fourchette basse : 1,4 €/W

Prix de la pose en € HT par W

- ✓ fourchette haute : 0,9 €/W
- ✓ fourchette basse : 0,3 €/W

Les prix du matériel portent sur les éléments suivants :

Les panneaux photovoltaïques, 1 onduleur, 1 coffret AC/DC, câbles et connexion

Les prix de la pose portent sur les opérations suivantes :

Livraison, pose du système en intégration toiture, câblage électrique. La garantie matériel constructeur de 10 ans sur l'onduleur et les panneaux, ainsi que la garantie de production sur 25 ans sur les panneaux, sont incluses.

En revanche, le raccordement au réseau n'est pas compris.

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

2. Prix moyens des installations en autoconsommation

Prix moyens pour une installation en autoconsommation en € HT par Wc (sans option de stockage)

Prix	2014	2015	2016	Evolution 2015-2016
Prix matériel	2,9	2,3	2	- 13 %
Prix pose	0,7	0,70	0,6	- 14 %
Prix total	3,2	3,00	2,6	- 13 %

Ces prix moyens correspondent à une installation en autoconsommation sans stockage, et en surimposition de toiture, pour une puissance unitaire de l'ordre de 1 kW

Autour des prix moyens de 2016, les fourchettes hautes et basses observées ont été les suivantes :

Prix du matériel en € HT par W

- ✓ fourchette haute : 2,5 €/W
- ✓ fourchette basse : 1,3 €/W

Prix de la pose en € HT par W

- ✓ fourchette haute : 0,9 €/W
- ✓ fourchette basse : 0,2 €/W

Les prix du matériel portent sur les éléments suivants :

Les panneaux photovoltaïques, 1 onduleur, 1 coffret AC/DC, câbles et connexion – pas d'équipement de stockage de l'énergie

Les prix de la pose porte sur les opérations suivantes :

Livraison, pose du système en surimposition de toiture, câblage électrique. La garantie matériel constructeur de 10 ans sur l'onduleur et les panneaux, ainsi que la garantie de production sur 25 ans sur les panneaux, sont incluses.

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

Prix des panneaux solaires avec la prime à l'autoconsommation

Après application de la prime pour l'autoconsommation, l'installation de vos panneaux solaires peut vous revenir à :

Taille	Prix moyen	Prime à l'autoconsommation	Montant prime déduite
3 kWc	9 000€	1 170€	7 830€
6 kWc	14 000€	1 740€	12 260€
9 kWc	19 000€	2 610€	16 390€

N'oubliez que l'aide est versée sur 5 ans.

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

Prix des panneaux solaires avec la prime à l'autoconsommation

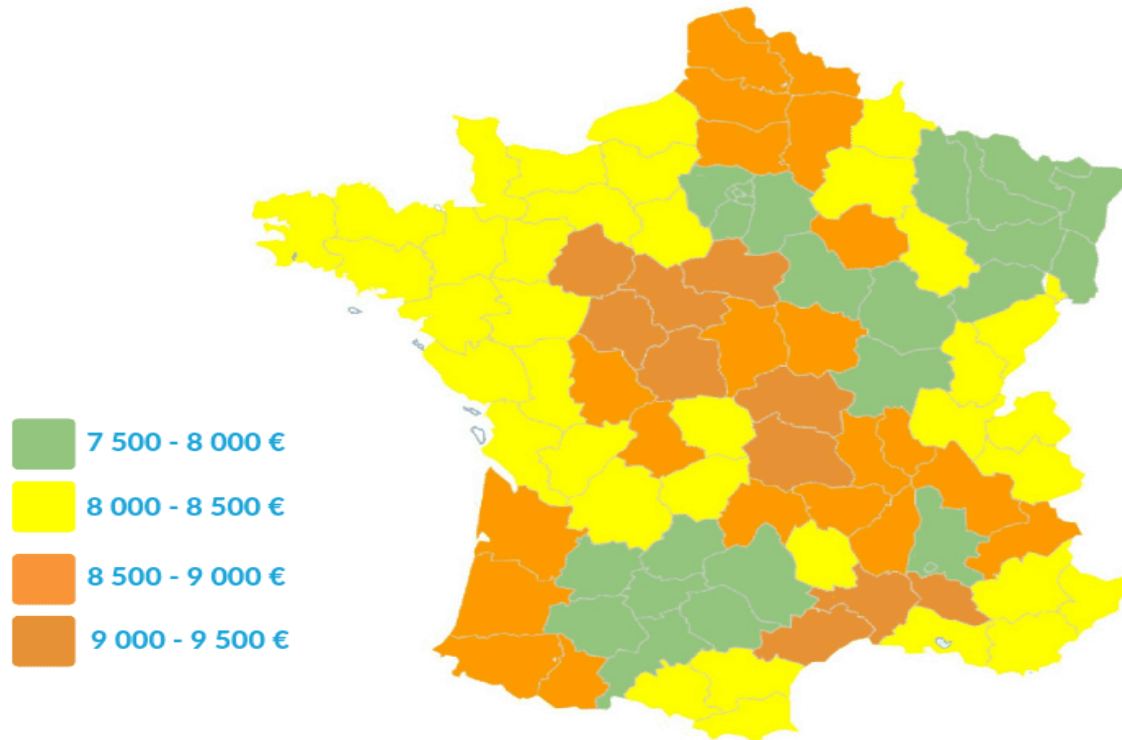
Les facteurs les plus influents sont la puissance de l'installation et la manière dont vous souhaitez poser les panneaux photovoltaïques sur votre toiture. Si vous choisissez **l'intégration au bâti (IAB)**, le prix de votre installation sera plus élevé car les **travaux à entreprendre sont plus conséquents**. En moyenne, pour une installation intégrée au bâti, il faut compter entre 2700 € et 3500 € par kWc (matériel + pose + démarches administratives).

La surimposition est une **solution moins coûteuse** et qui n'implique pas d'altération de votre toiture ; les panneaux solaires sont simplement **posés au dessus**, en "surimposition". Avec cette technique, le coût moyen de l'installation de panneaux solaires photovoltaïques est compris entre 2200 € et 2800 € par kWc (matériel + pose + démarches administratives).

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des systèmes photovoltaïques :

Carte des prix des installations solaires de 3 kWc en France *



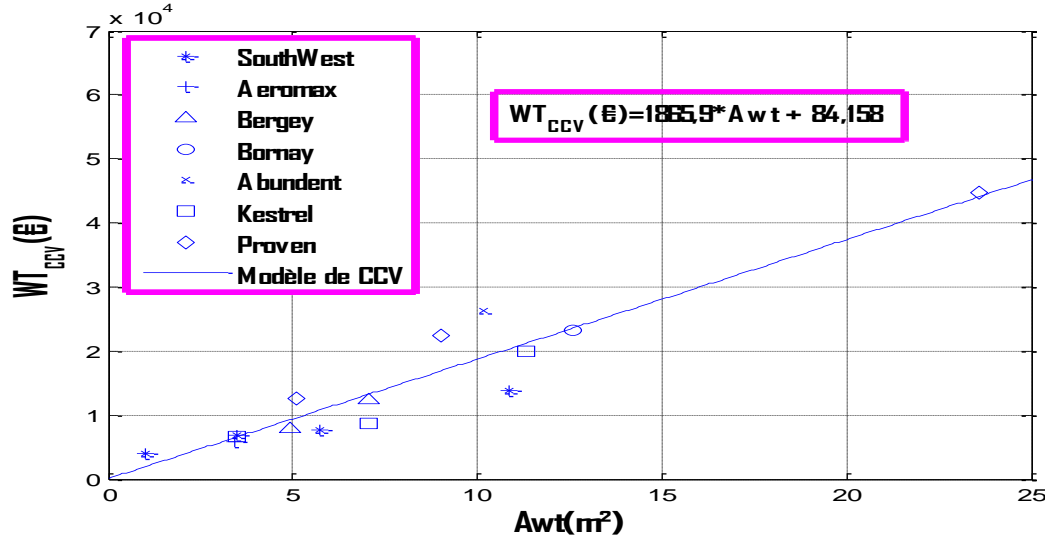
*meilleurs prix observés chez les installateurs contactés pour 3 kWc (main d'oeuvre, matériel et missions administratives inclus hors difficulté technique particulière)



❖ Coût des systèmes éoliens :

Cas des éoliennes domestiques (petites installations)

Notre étude de 2011 : Les calculs supposent que le coût initial du système éolien est partagé entre l'éolienne et sa tour (environ **55%**), l'installation (**25%**), les composants nécessaires au bon fonctionnement du système (Balance-of-System components BOS) tels que les câbles, les connecteurs, les protections, etc. (**10%**) et le convertisseur statique (**10%**). Les coûts récurrents concernent seulement la maintenance annuelle qui représente environ **2,5%** du coût investi initialement. Le convertisseur est remplacé tous les 10 ans. Tous les CCVs sont donnés en dollars \$ et convertis en euros € (1\$ = 0,71854€, valeur moyenne en 2011 donnée par l'institut national de la statistique et des études économiques



Evolution du coût du cycle de vie des éoliennes choisies (WT_{CCV}) en fonction de la surface balayée par leurs rotors (Awt)

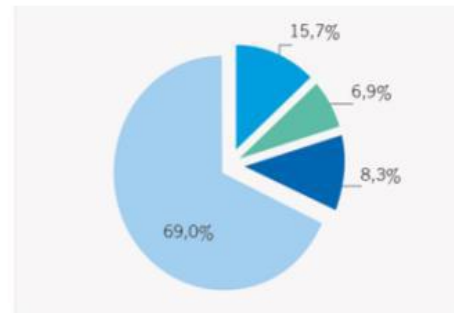
❖ Coût des systèmes éoliens :

Cas des grandes installations connectés au réseau électrique

- ❑ Le coût de production de l'électricité éolienne provient essentiellement de ses coûts d'investissement initial, dont 75% pour l'achat de l'éolienne.
- ❑ Les coûts d'exploitation et de maintenance représentent une part relativement faible des coûts de production des parcs éoliens.

Son coût de fonctionnement est par conséquent très faible.

=> Coût moyen de production de l'éolien : 76,4 €/MWh (sur 20 ans, actualisation 5%)



Sources SER – avril 2014

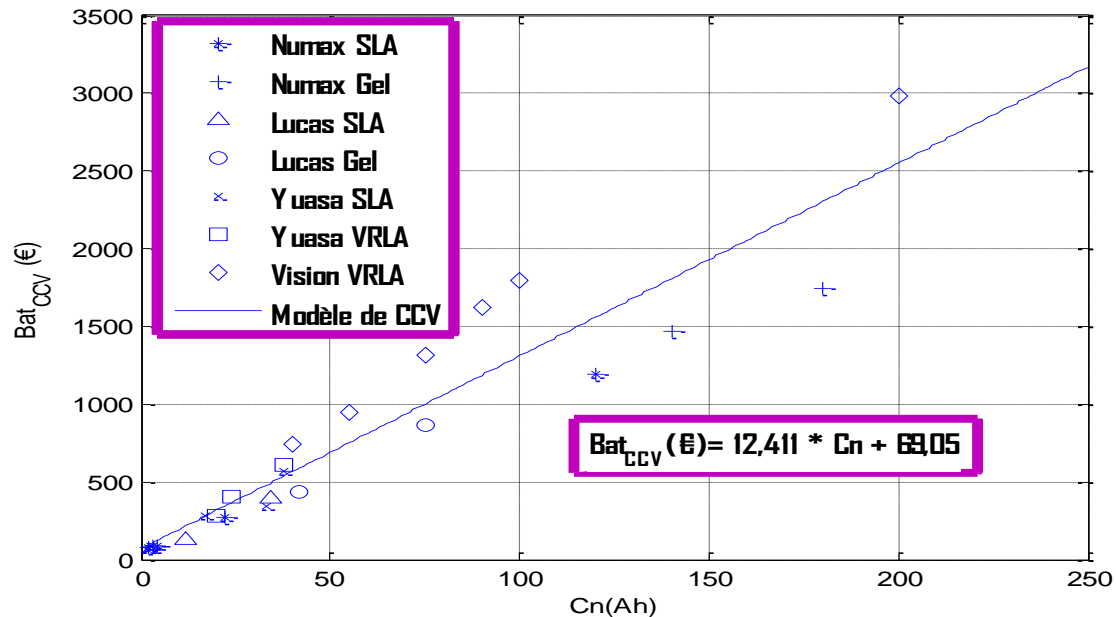


Tendances du marché des énergies

❖ Coût des batteries :

Cas des batteries Plomb-Acide

Notre étude de 2011 : nous avons supposé un remplacement tous les 4,2 ans.



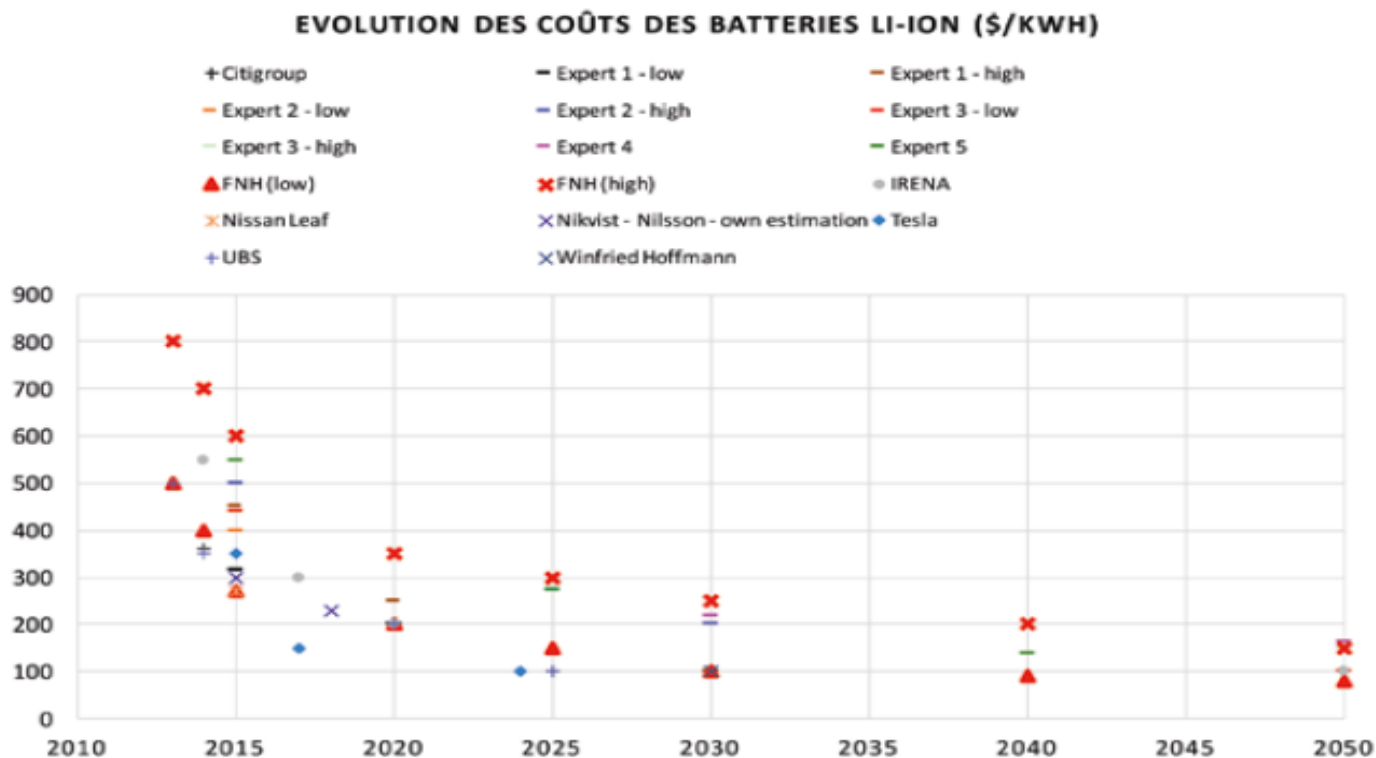
Evolution du coût du cycle de vie de différentes batteries en fonction de leur capacité nominale

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des batteries :

Cas des batteries Li-ion

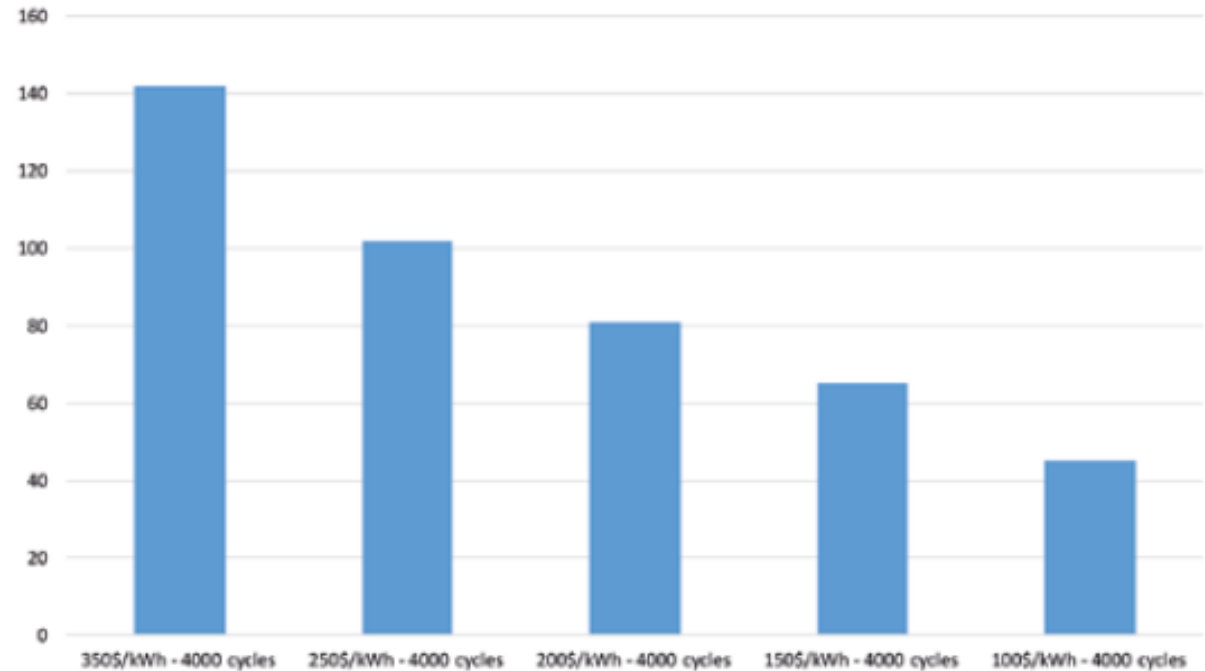
► FIGURE 47 : PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU COÛT DES BATTERIES AU LITHIUM-ION.
ILLUSTRATION : FONDATION NICOLAS HULOT.



❖ Coût des batteries :

LCOE

LCOE des batteries pour différents coûts de l'énergie stockée (en \$/MWh)



► FIGURE 50 : EVOLUTION DU LCOE D'UNE BATTERIE EN FONCTION DE SON COÛT ET D'UNE UTILISATION JUSQU'À 80% DE SA CAPACITÉ DE STOCKAGE INITIALE, CALCULS : FONDATION NICOLAS HULOT*.

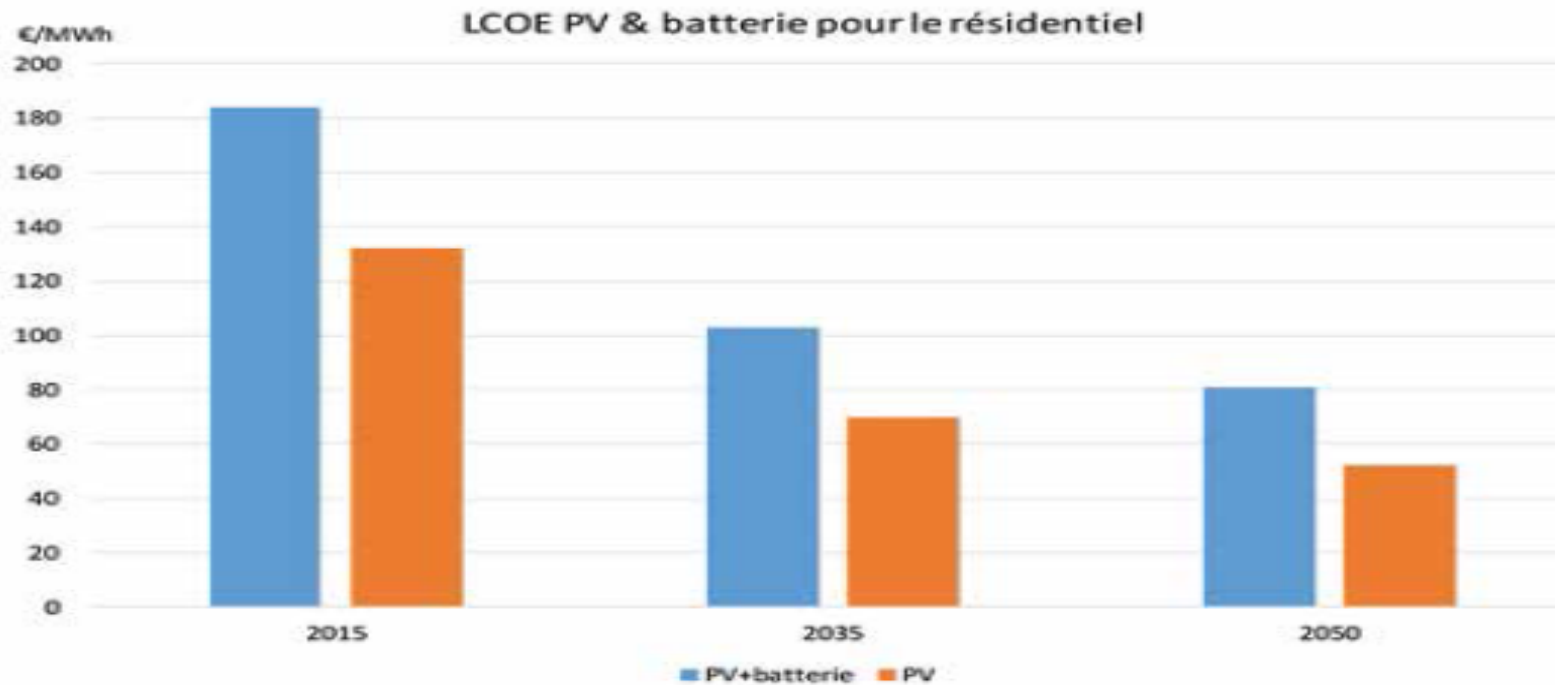
LECTURE : UNE BATTERIE QUI CÔUTE 350\$ PAR kWh STOCKÉ A UN LCOE DE 142 \$/MWh.

* On considère un surcoût de 10% pour la partie installation / onduleur par rapport au seul coût d'investissement de la batterie avec un minimum de 150-200 \$ pour une batterie de 10 kWh. On considère un WACC à 5% et une perte d'énergie stockable de 2%/an avec une efficacité de l'onduleur de 93%. Celle-ci n'est comptée qu'une seule fois du fait du stockage DC-DC entre la production photovoltaïque et la batterie. Au plan technique, la batterie est supposée avoir une durée de vie standard de 4 000 cycles.

Tendances du marché des énergies

❖ Coût des batteries :

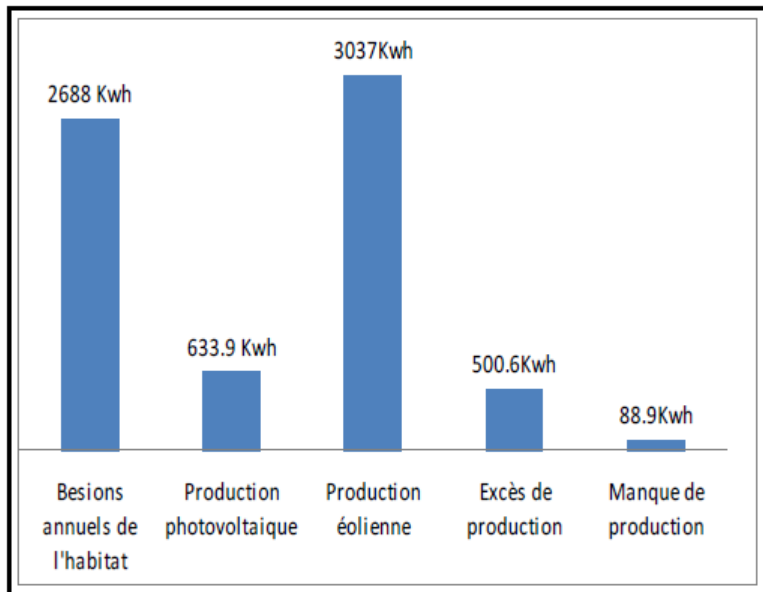
LCOE



► FIGURE 53 - LCOE D'UNE INSTALLATION DE 9 KWh AVEC OU SANS STOCKAGE POUR UN ENSOLEILLEMENT DE 1 350 KWh/KWhC ET LES HYPOTHÈSES DE COÛTS DES SCÉNARIOS PRÉSENTÉS PRÉCÉDEMMENT DANS LE RAPPORT (FIGURE 22), CALCULS : FONDATION NICOLAS HULOT.

Etude de cas

❖ Système hybride éolien photovoltaïque avec batteries pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle (France) (notre étude en 2010) :



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

Bilan énergétique de l'année type

- Deux panneaux PV de type Sharp 170, qui présente le meilleur rapport qualite/prix chez les fabricants (surface totale de $1.649 * 2 = 3.298$ m² et prix d'achat de 900 euros).
- Une éolienne de type Kestrel Wind(1000) de 7.07m² de surface : un bon rapport qualite/prix et un cout approximatif de 2300 euros.
- 4 batteries en serie de type power-sonic 12V/103Ah avec un prix total d'achat de 695 euros

❖ Système hybride éolien photovoltaïque avec batteries pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle (France) (notre étude en 2010) :

Hypothèses de calcul : Le coût de l'installation comprend celui des panneaux estime a **0,8€/W** et celui de la chaine de conversion éolienne estimé a **25% du cout total de l'éolienne et de la tour**. On suppose que le prix de la **tour est de 1200€ (12m*100 €/ m)**. 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 couts **d'entretien annuels fixes a 2,5% du cout total du capital**.

Taux **d'actualisation de 5%**, un taux **d'inflation de 3%** et une **durée de vie de 25 ans**.

Résultats :

$$\text{Prix}_{kwh_re} = \frac{LCC}{[\text{Energie_produit}/\text{an}].25}$$
$$= 16159.17 / [(3037+633.9)*25] = 0.176\text{€/KWh}$$

Ce qui est raisonnable pour une maison autonome par comparaison aux tarifs proposes 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)

Etude de cas

- ❖ Système hybride éolien photovoltaïque avec batteries pour un habitat résidentiel de 4 personnes à La Rochelle (France) (notre étude en 2010) :

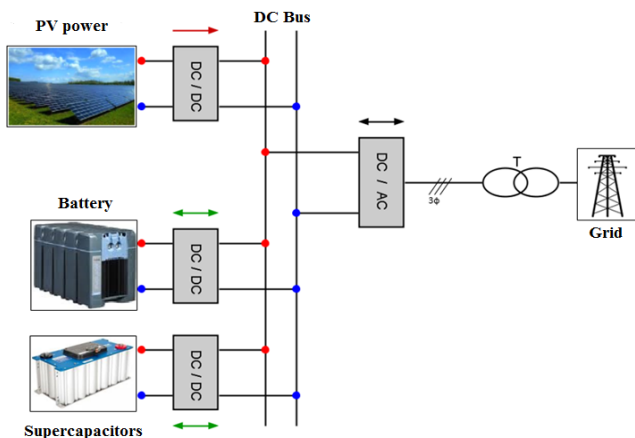
Table de calcul :

Element	Coût (€)	Valeur actuelle (€)	% Total LCC
Coûts initiaux			
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
Coûts récurrents			
Maintenance	216.3	4251.9	26.313
Remplacement			
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

Etude de cas

❖ Etude techno-économique d'une centrale photovoltaïque avec stockage hybride (batteries Li-ion et supercapacités) (Notre étude de 2016):

Hypothèses de calcul :



- Durée de vie de la centrale PV : 25 ans ;
- Prix d'acquisition des batteries lithium-ion: 350 € / kWh;
- Coût des convertisseurs de puissance associés à la station de stockage : 200€/kW;
- Coûts d'operations et de maintenance (O&M) des panneaux solaires pour une année 20k€/MWc;
- Coûts d'operations et de maintenance du système de stockage pour une année: 10k€/MW;
- Coûts des équipements électriques : 200€ / kWc;
- Prix des panneaux photovoltaïques (PV): 0.5€/ Wc;
- Coût d'installation des panneaux photovoltaïques (Inst_PV) : 150€/kWc;
- Coût de la connexion au réseau électrique (RNU_cost): 100€ / kWc;
- Taux d'intérêt (r): 7%;
- Dégradation de la production PV par an : 0.5%.
- Coût communiqué par le producteur lors de la réponse à l'offre : 250€/MWh.

Etude de cas

❖ Etude techno-économique d'une centrale photovoltaïque avec stockage hybride (batteries Li-ion et supercapacités) (Notre étude de 2016):

Résultats de l'étude :

Coût du stockage pour différentes puissances sur les 25 ans

Puissance Batteries KW	Batt. Cap. (KWh)	Batt. coût (k€)	Nb de replace. batteries	Batt. Coût total sur 25 ans (k€)	5 KW SuperCap. coût (k€)	Coût total du stockage (k€)
Case 1 : 10	24.864	8.7	25	217.5	1.200	218.7
Case 2 : 15	35.520	12.4	5	62	1.200	63.2
Case 3 : 30	71.04	24.9	2	49.8	1.200	51
Case 4 : 45	106.56	37.3	2	74.6	1.200	75.8

$$\text{LCOE} = \text{Total coûts} / \text{Total Energie}$$

Pour le cas 3 :

➔ Si on suppose une production au nord de France de 1000 kWh /KW/an, on obtient : **LCOE = 194 €/MWh.**

Références

- [1] Abbes, D. (2012). *Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome* (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Université de Poitiers).
- [2] Abbes, D., Martinez, A., Champenois, G., & Gaubert, J. P. (2012). Étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage: Dimensionnement et analyse du cycle de vie. *European Journal of Electrical Engineering (EJEE)*, vol15/5, 479-497.
- [3] R.A. Messenger, J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, 2nd ed., CRC Press, 2005.
- [4] ABBES, Dhaker, MARTINEZ, André, et CHAMPENOIS, Gérard. Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2014, vol. 98, p. 46-62
- [5] IRENA Working Paper : RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, Solar Photovoltaics, Volume 1 , Issue 4/5, June 2012.
- [4] (IEA,2010) : International Energy Agency (IEA) (2010), *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*, IEA/OECD, Paris.
- [5] (Cotal, 2009) : Cotal, H. et al. (2009), III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics, *Energy Environment Science*, 2009, 2, pps 174–192, Sylmar, CA.
- [6] (EPIA, 2011a) : European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (2011a), *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Energy Empowering the World*, EPIA, Brussels.
- [7] (Kersten, 2011) : Kersten, F. et al. (2011), PV Learning Curves: Past and Future Drivers of Cost Reduction, *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 5 – 9 September, Hamburg.

Références

- [8] Solarbuzz (2011), *Annual World PV Market Review*, Solarbuzz, 12 April 2011, Port Washington, NY.
- [9] Goodrich, A.; T. James and M. Woodhouse (2012), *Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost Reduction Opportunities*, NREL, Golden, CO.
- [10] EPIA and A.T. Kearney (2011), *Solar Photovoltaics: Competing in the Energy Sector*, EPIA, Brussels.
- [11] Présentation ppt : « Les bénéfices d'un projet éolien , Concevoir un projet exemplaire », Rencontres nationales des Energies Renouvelables , 14 et 15 décembre 2016.
- [12] Christopher Gross , « Le marché photovoltaïque en Tunisie , Situation actuelle et perspectives », Juillet 2013
- [13] FONDATION NICOLAS HULOT POUR LA NATURE ET L'HOMME • WWW.FNH.ORG « Etats des lieux : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : 25% de l'électricité mondiale sans carbone en 2050 ! », Novembre 2015.
- [14] Faycal Bensmaine, Dhaker Abbes, Antoine Labrunie, Benoit Robyns, “Sizing and techno-economic analysis of a grid connected photovoltaic system with hybrid storage” , UPEC 2016, Coimbra, Portugal.*
- [15] <https://portail.cder.dz/spip.php?article2368>
- [16] <http://www.phaesun.com/fr/portfolio/systemes-et-projets/competences/electrification-rurale-decentralisee/generateurs-hybrides.html>
- [17] <http://www.systemoffgrid.com/index.php?P=95&Titre=systemes-hybrides>
- [18] Cours Analyse de projets d'installation photovoltaïque , <http://slideplayer.fr/slide/1167130/> , RETScreen.
- [19] https://www.youtube.com/watch?v=ivyWH_Rr6BA

OPTIMISATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE DES SYSTÈMES HYBRIDES A ÉNERGIES RENOUVELABLES

Présenté par : Dr. Ing. Dhaker ABBES

Enseignant – Chercheur (Maître de Conférences HDR)

Co-responsable du domaine ESEA

HEI-Lille

Membre de l'équipe Réseaux Electriques au L2EP Lille



Programme

- **Contexte :** - Transition énergétique et intégration des ENR
- Evolution du mix énergétique : systèmes multi-sources
- **Problématique :** *Analyse technico-économique des systèmes hybrides/ Optimisation du dimensionnement*
- **Objectifs de cette deuxième partie (2 heures) :**
 - Optimiser le dimensionnement

I- Optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque avec batteries :

Développer un système hybride éolien/photovoltaïque avec stockage d'énergie

➡ Principaux points abordés :

✚ Modélisation & Simulation

✚ Commande

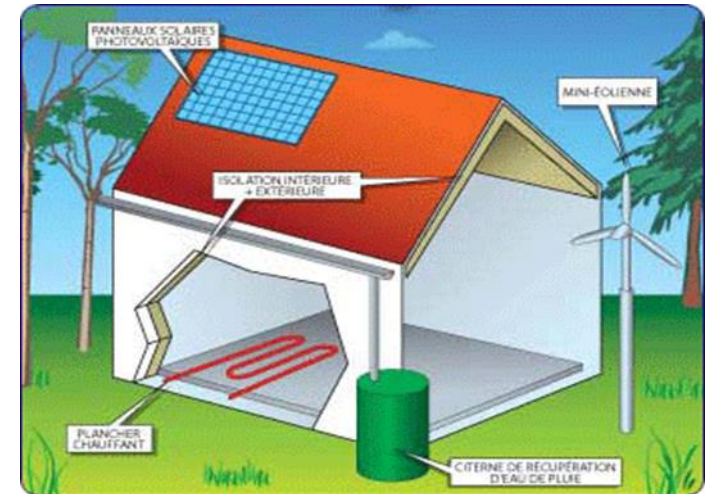
✚ Optimisation

↳ Gestion optimale de la production

↳ Minimisation du coût écologique et économique

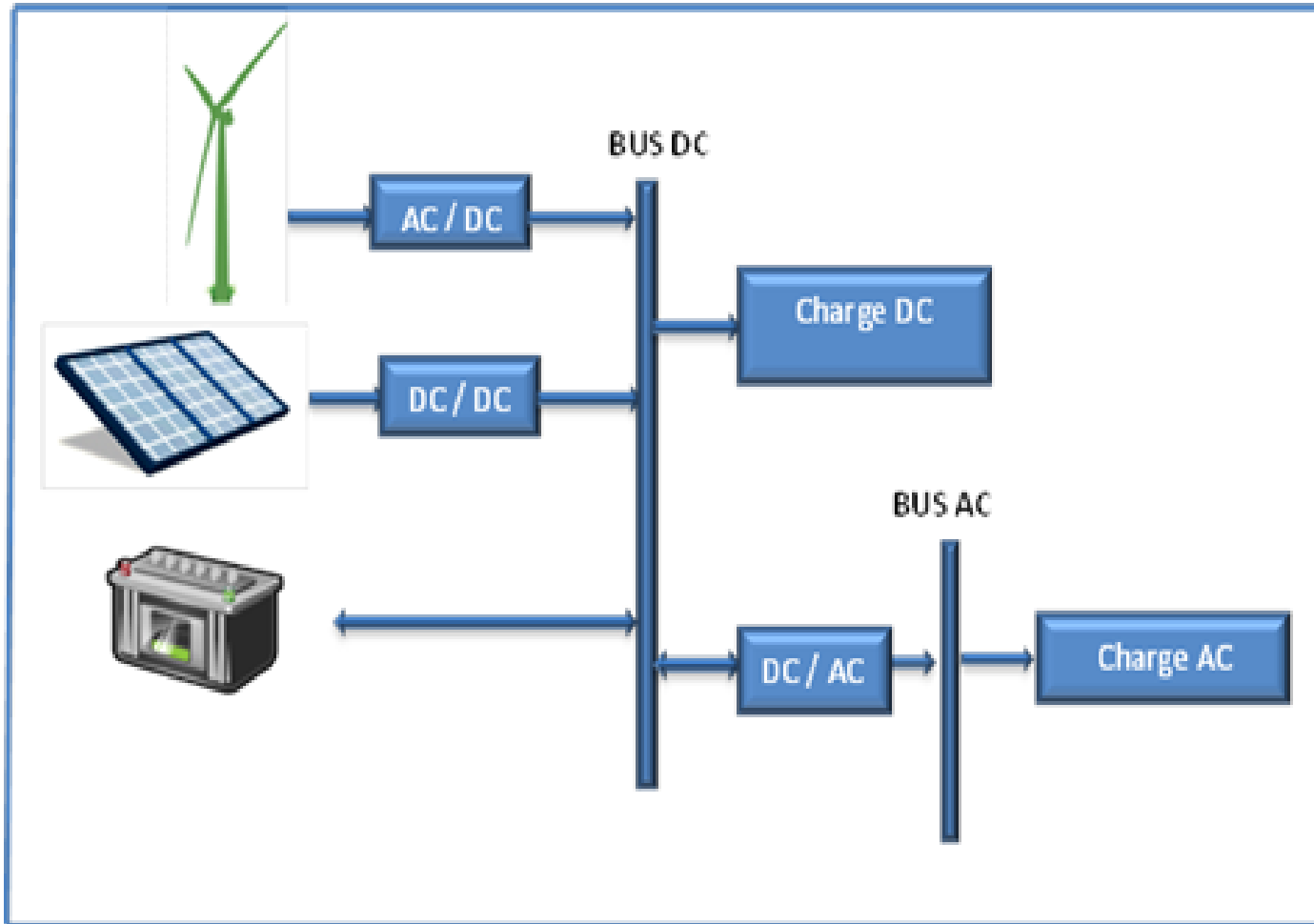
Motivation

Vers des habitats résidentiels autonomes ...



Objectif principal :

- ➔ Concevoir un système hybride éolien –photovoltaïque avec batteries :
modélisation, simulation et supervision en vue d'optimiser son dimensionnement



Configuration du système hybride utilisé pour les travaux de thèse

Plan

- **Méthodes conventionnelles de dimensionnement**
- **Méthode proposée**
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

Méthodes conventionnelles de dimensionnement

➔ Des contributions sur le dimensionnement global du système :

- Les méthodes conventionnelles

➔ Approche « Ampère heure » : Méthode itérative

Etapes:

1) Evaluation de la puissance à produire E_p pour satisfaire la demande, $E_p = \frac{E_c}{k}$

2) Détermination de la capacité de stockage des batteries en cas d'insuffisance des sources renouvelables,

$$C_n = \frac{E_p \times N}{DOD \times f_t}$$

3) Calcul de la puissance crête nécessaire P_c du générateur photovoltaïque pour chaque mois (avec la moyenne des données quotidiennes sur un mois),

$$P_c = \frac{E_p}{\eta_{pc} \times T_{sun}}$$

4) Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire chaque mois,

$$N = \frac{C_n}{P_c}$$

Puissance crête unitaire panneau

5) Déduction du nombre de panneaux photovoltaïques pour couvrir les besoins énergétiques annuels,

6) Calcul de la contribution en énergie de la part de la source complémentaire (éolienne),

$$KWh_{WT} = KWh_{Bat} \times \frac{1,2}{0,95}$$

Méthodes conventionnelles de dimensionnement

➡ Des contributions sur le dimensionnement global du système :

• Les méthodes conventionnelles

➡ Approche « Ampère heure » : Méthode itérative

Etapes:

Les étapes 5, 6 et 7 peuvent être répétées avec différents nombres de panneaux jusqu'à ce que l'on aboutisse au dimensionnement adéquat qui réponde à la plupart des critères exigés par le concepteur et décrits dans la procédure de l'étape 5.

8) Calcul de la puissance d'un éventuel groupe électrogène.

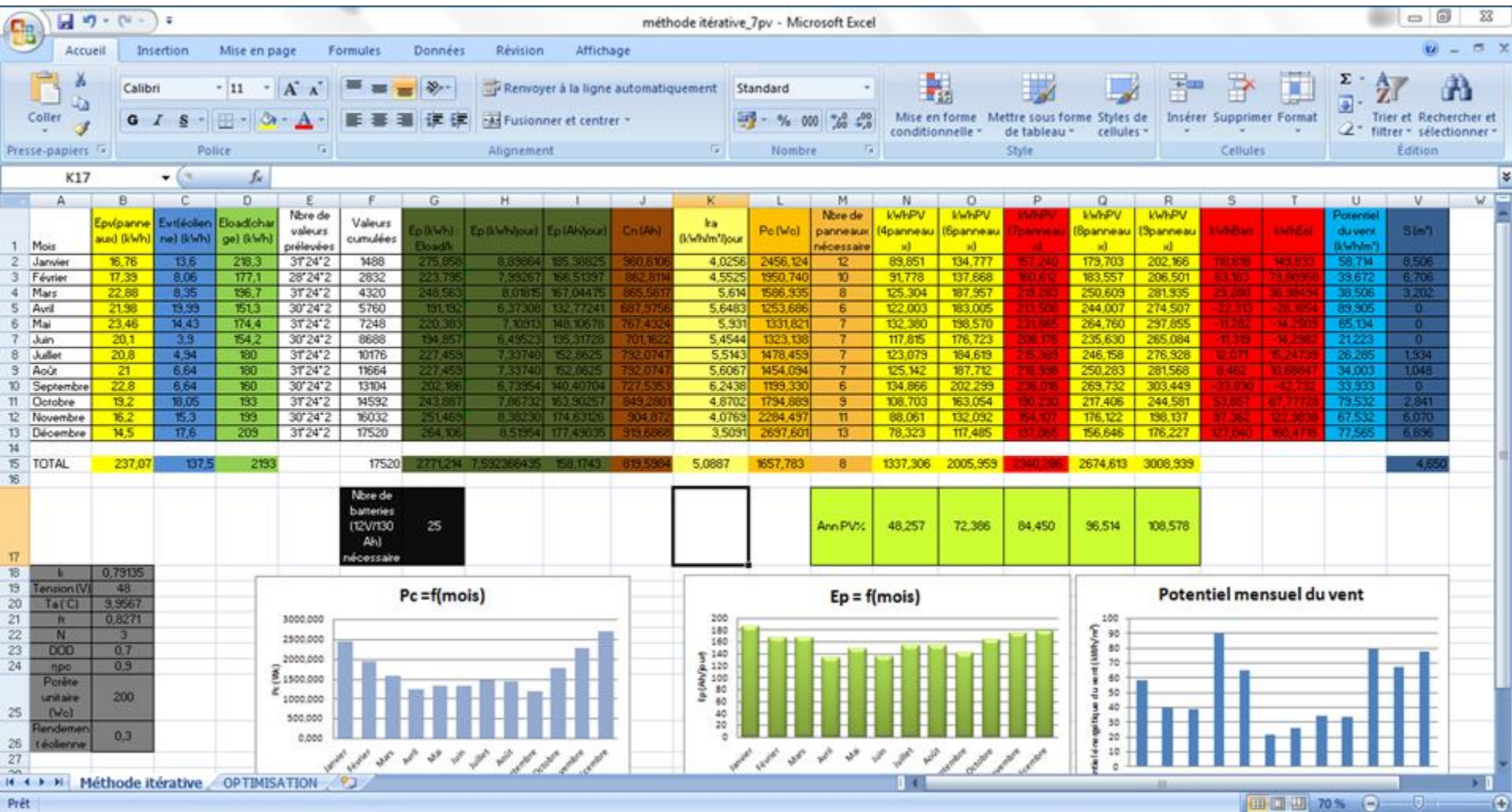
$$P_{grp_elect} = 48 * 1.2 * 82 / 0.9 = 5248 \text{ W}$$

Capacité de batterie : 820 Ah

Temps de recharge : 10h



Méthodes conventionnelles de dimensionnement



Méthode itérative généralisée et adaptée sous le logiciel Excel

Méthodes conventionnelles de dimensionnement

Des contributions sur le dimensionnement global du système :

Les méthodes conventionnelles

Approche énergétique avec programmation linéaire

Le problème d'optimisation linéaire est présenté de la manière suivante :

Fonction objective (Optimum):

$$\text{Minimum} \rightarrow \text{Coût économique} : C = C_{WT} \times Awt + C_{pv} \times Apv$$

Sous réserve des restrictions imposées par le critère de satisfaction énergétique :

$$E_{pv}^{Jan} \times Apv + E_{WT}^{Jan} \times Awt \geq E_{load}^{Jan}$$

$$E_{pv}^{Fev} \times Apv + E_{WT}^{Fev} \times Awt \geq E_{load}^{Fev}$$

$$E_{pv}^{Mars} \times Apv + E_{WT}^{Mars} \times Awt \geq E_{load}^{Mars}$$

$$E_{pv}^{Avr} \times Apv + E_{WT}^{Avr} \times Awt \geq E_{load}^{Avr}$$

$$E_{pv}^{Mai} \times Apv + E_{WT}^{Mai} \times Awt \geq E_{load}^{Mai}$$

$$E_{pv}^{Juin} \times Apv + E_{WT}^{Juin} \times Awt \geq E_{load}^{Juin}$$

$$E_{pv}^{Juil} \times Apv + E_{WT}^{Juil} \times Awt \geq E_{load}^{Juil}$$

$$E_{pv}^{Aout} \times Apv + E_{WT}^{Aout} \times Awt \geq E_{load}^{Aout}$$

$$E_{pv}^{Sept} \times Apv + E_{WT}^{Sept} \times Awt \geq E_{load}^{Sept}$$

$$E_{pv}^{Oct} \times Apv + E_{WT}^{Oct} \times Awt \geq E_{load}^{Oct}$$

$$E_{pv}^{Nov} \times Apv + E_{WT}^{Nov} \times Awt \geq E_{load}^{Nov}$$

$$E_{pv}^{Dec} \times Apv + E_{WT}^{Dec} \times Awt \geq E_{load}^{Dec}$$

En prenant compte des contraintes de faisabilité pour une résidence autonome :

$$Apv_{min} \leq Apv \leq Apv_{max}$$

$$Awt_{min} \leq Awt \leq Awt_{max}$$

C_{WT} et C_{pv} représentent les facteurs de coût économique respectivement pour un m² de surface balayée par l'éolienne et un m² de panneaux photovoltaïques.

E_{pv}^{mois} et E_{WT}^{mois} correspondent respectivement au potentiel énergétique mensuel éolien et photovoltaïque multiplié par le rendement de chacun des générateurs. E_{load}^{mois} est la demande mensuelle en énergie électrique de l'habitat.

Apv_{min} , Apv_{max} , Awt_{min} et Awt_{max} sont les limites inférieures et supérieures des variables de dimensionnement.

Méthodes conventionnelles de dimensionnement

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Mois	Epv(panneaux) (kWh)	Ewt(éolienne) (kWh)	Eload(charge) (kWh)	Nbre de valeurs	Valeurs cumulées		
2	Janvier	16,76	13,6	218,3	31*24*2	1488		
3	Février	17,39	8,06	177,1	28*24*2	2832		
4	Mars	22,88	8,35	196,7	31*24*2	4320		
5	Avril	21,98	19,99	151,3	30*24*2	5760		
6	Mai	23,46	14,43	174,4	31*24*2	7248		
7	Juin	20,1	3,9	154,2	30*24*2	8688		
8	Juillet	20,8	4,94	180	31*24*2	10176		
9	Août	21	6,64	180	31*24*2	11664		
10	Septembre	22,8	6,64	160	30*24*2	13104		
11	Octobre	19,2	18,05	193	31*24*2	14592		
12	Novembre	16,2	15,3	199	30*24*2	16032		
13	Décembre	14,5	17,6	209	31*24*2	17520		
14								
15								
16								
17								
18	Coût économique	9453,123517						
19					Contrainte 1	241,5751724	Contrainte 7	299,8068966
20	Apv	14,4137931			Contrainte 2	250,6558621	Contrainte 8	302,6896552
21	Awt	0			Contrainte 3	329,7875862	Contrainte 9	328,6344828
22					Contrainte 4	316,8151724	Contrainte 10	276,7448276
23	Cpv	650			Contrainte 5	338,1475862	Contrainte 11	233,5034483
24	Cwt	1865,9			Contrainte 6	289,7172414	Contrainte 12	209

Paramètres du solveur

Cellule cible à définir:

Égale à: Max Min Valeur:

Cellules variables:

Contraintes:

Méthode par programmation linéaire généralisée et adaptée sous le logiciel Excel

Méthodes conventionnelles de dimensionnement

➡ Des contributions sur le dimensionnement global du système :

- Les méthodes conventionnelles
 - ➡ Approche « Ampère heure » : Méthode itérative
 - ➡ Approche énergétique avec programmation linéaire
 - + simples à mettre en œuvre ,
 - lentes ,
 - choix du nombre de jours d'autonomie.
- Les méthodes à base de simulations dynamiques
 - + + prise en compte du profil temporel des sources et de la consommation,
 - complexes.

Plan

- **Méthodes conventionnelles de dimensionnement**
- **Méthode proposée**
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

Méthode proposée

Récolte et analyse des données météorologiques du site et de la consommation électrique de l'habitat



Modélisation et simulation du système hybride éolien-photovoltaïque avec stockage



Optimisation du dimensionnement du systèmes hybride

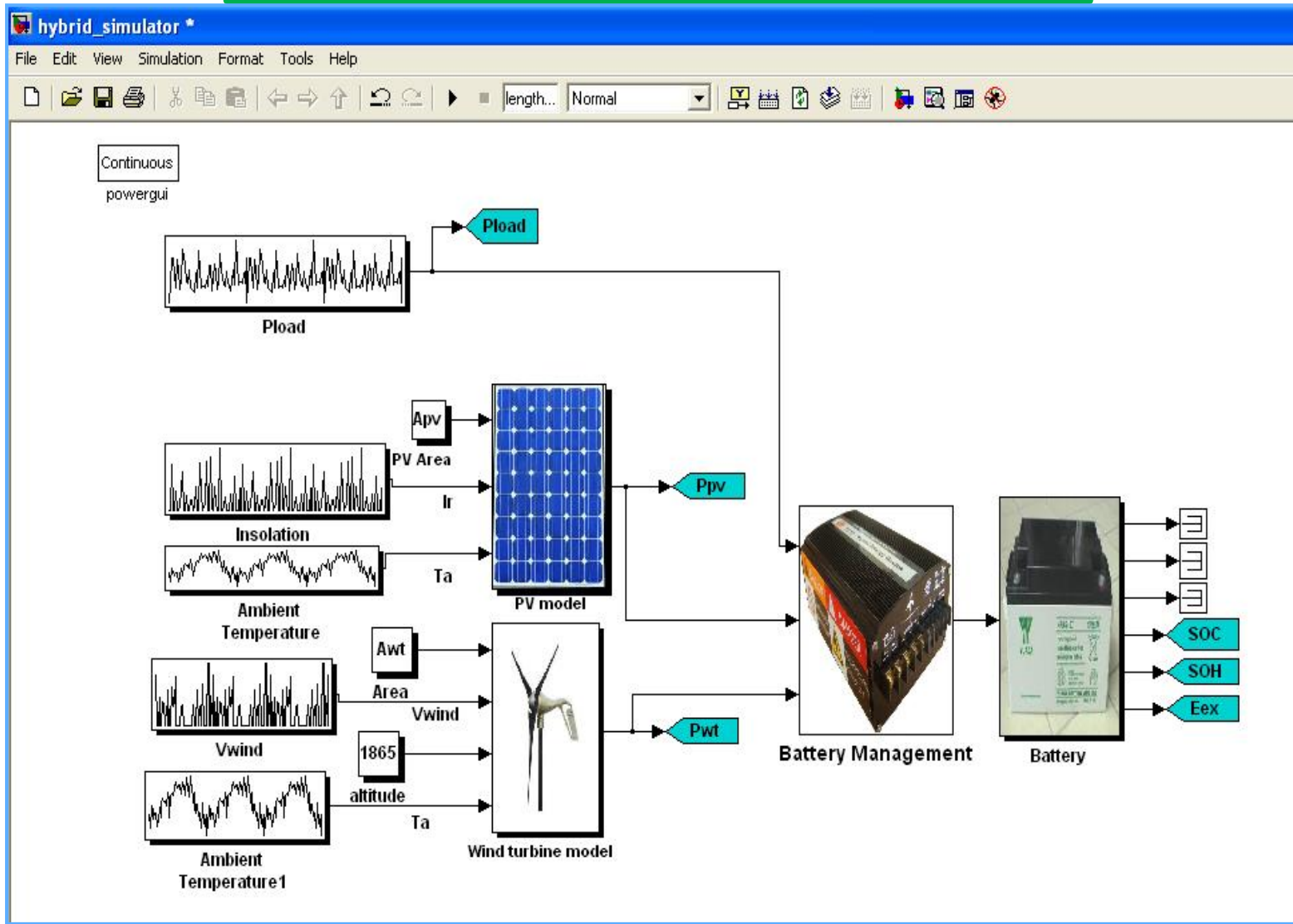


Mise en œuvre du système éolien-photovoltaïque avec batteries

Méthode proposée

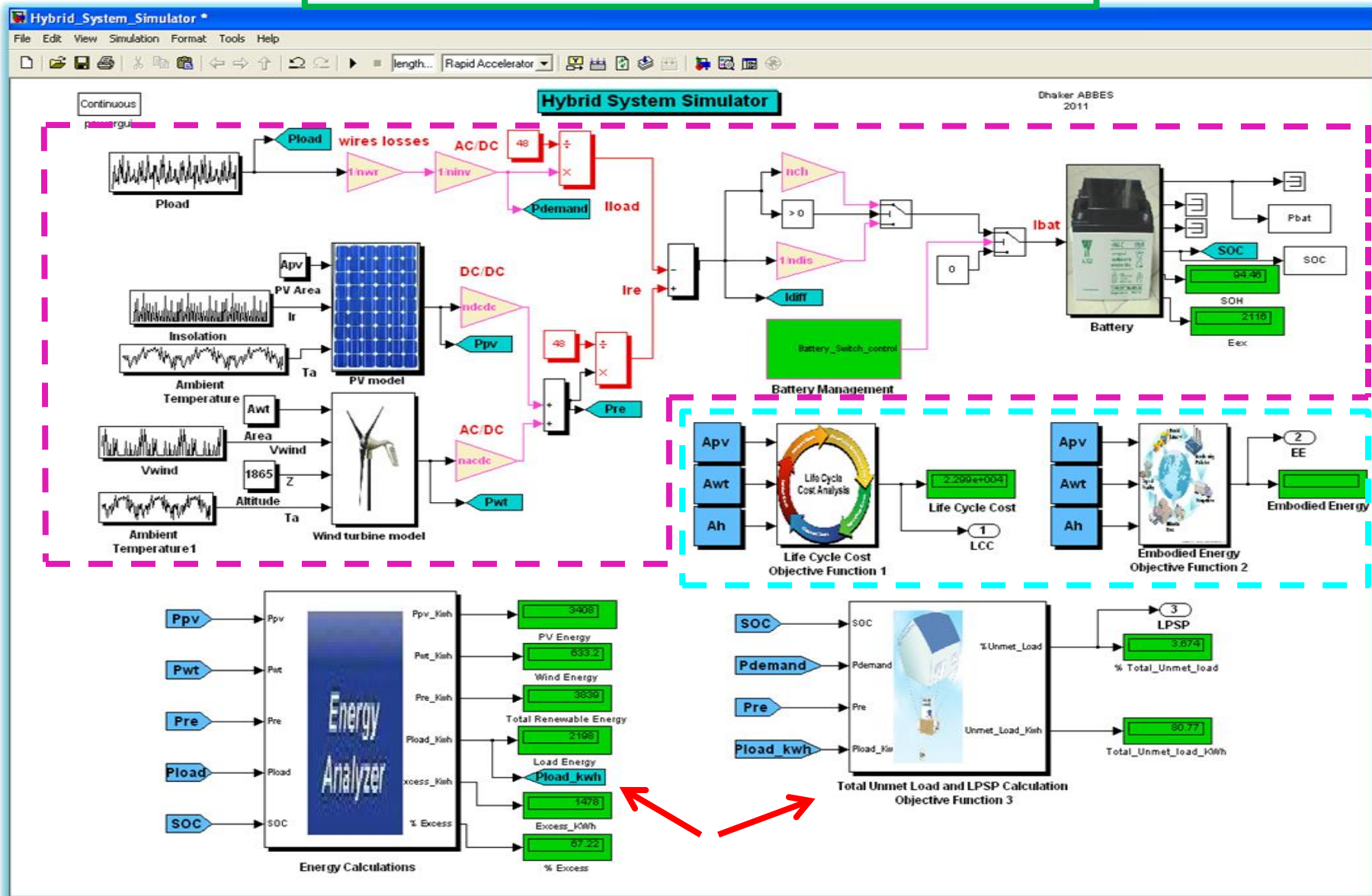
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

Simulation dynamique du système



➡ Simulation de l'état du système en fonction du temps avec prise en compte des limites des composants (SOC batteries)

Simulation dynamique du système



Modélisation détaillée sous Matlab/Simulink du système hybride éolien-photovoltaïque avec batteries

Simulation dynamique du système

HOMER - [dhaker_essai.hmr]

File View Inputs Outputs Window Help

Equipment to consider: Add/Remove...

AC resources: Solar resource, Wind resource

DC resources: PV, Aeromax Engineer..., 6FM2000

Primary Load 1: 6 kWh/d, 1.5 kW peak

Converter

Resources: Economics, System control, Temperature, Emissions, Constraints

Document: Author dhaker ABBES

Notes: Evaluation de la solution : 9 panneaux Sharp ND-240QCJ soit une puissance installée de 2,16 kW, une éolienne Aeromax Engineering (Lacota S, SC) avec une surface balayée de 3,43 m² et une puissance nominale de 900 W à 13 m/s, 4 batteries Vision VRLA 6FM2000 de 200 Ah 12 V et un onduleur de 2 kW.

Calculate Simulations: 0 of 1 Progress: Sensitivities: 0 of 1 Status:

Sensitivity Results Optimization Results

Double click on a system below for optimization results.

	PV (kW)	LaK	6FM2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage
<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	2.16	1	4	2	\$ 24,319	991	\$ 38,281	1.288	1.00	0.05

Modélisation du système hybride considéré sous HOMER

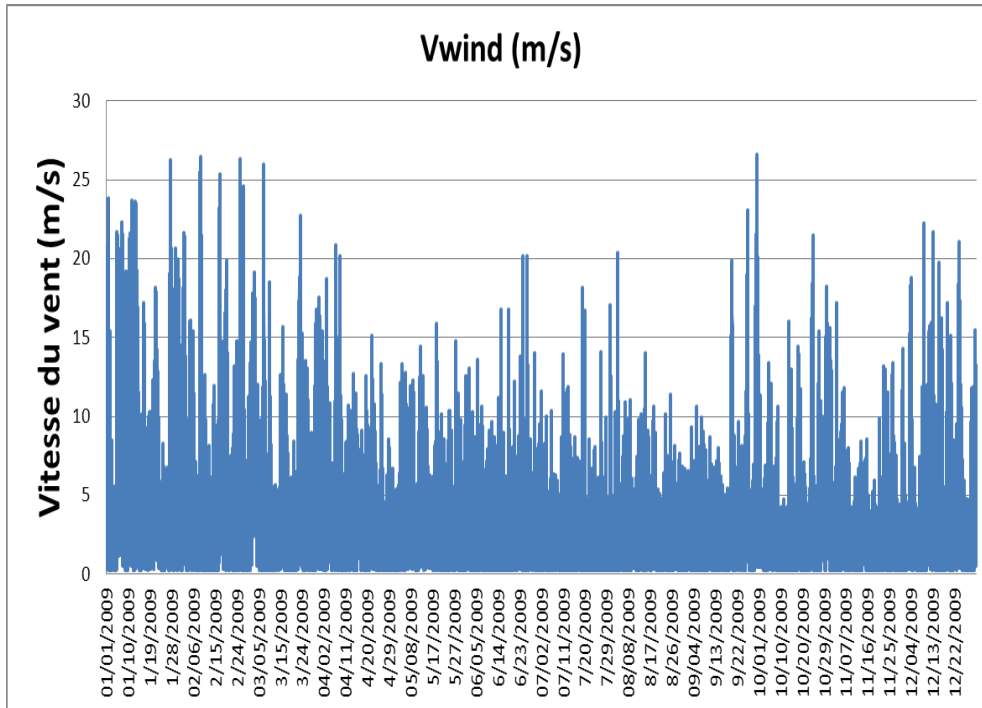
Méthode proposée

- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

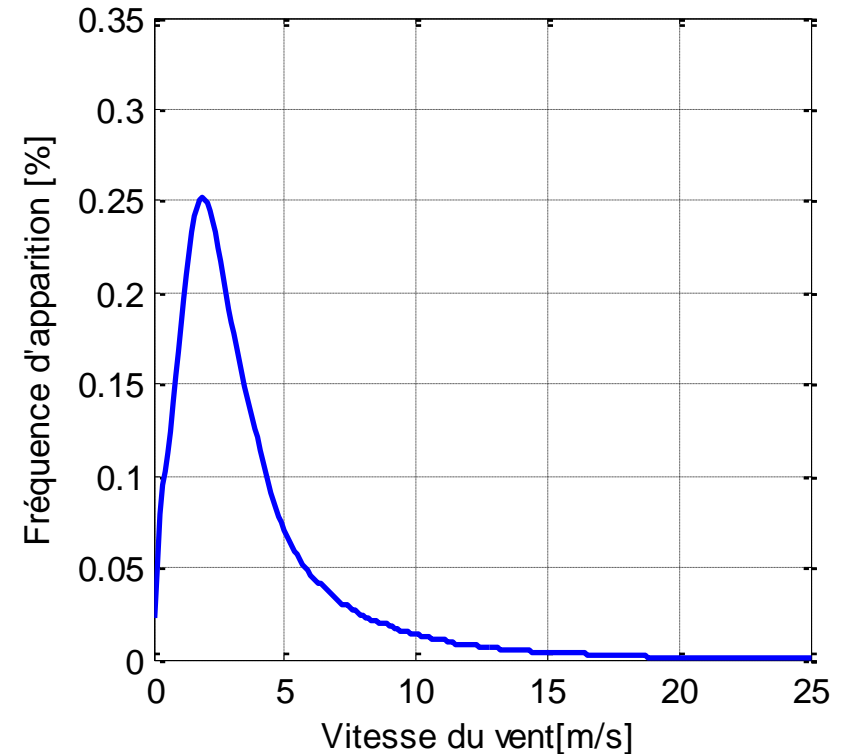
Recueil des données météorologiques

➔ Données réelles du centre technologique éolien (National Wind Technology Center) du Colorado aux Etats Unis.

+ Données du vent



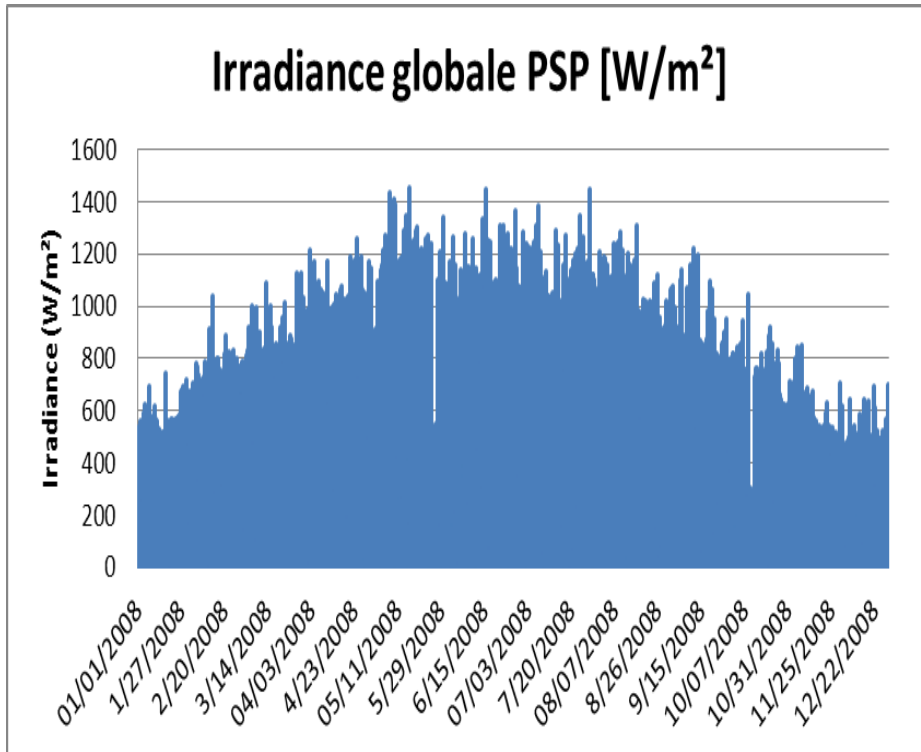
Vitesse du vent [m/s] enregistrée au cours de l'année 2009



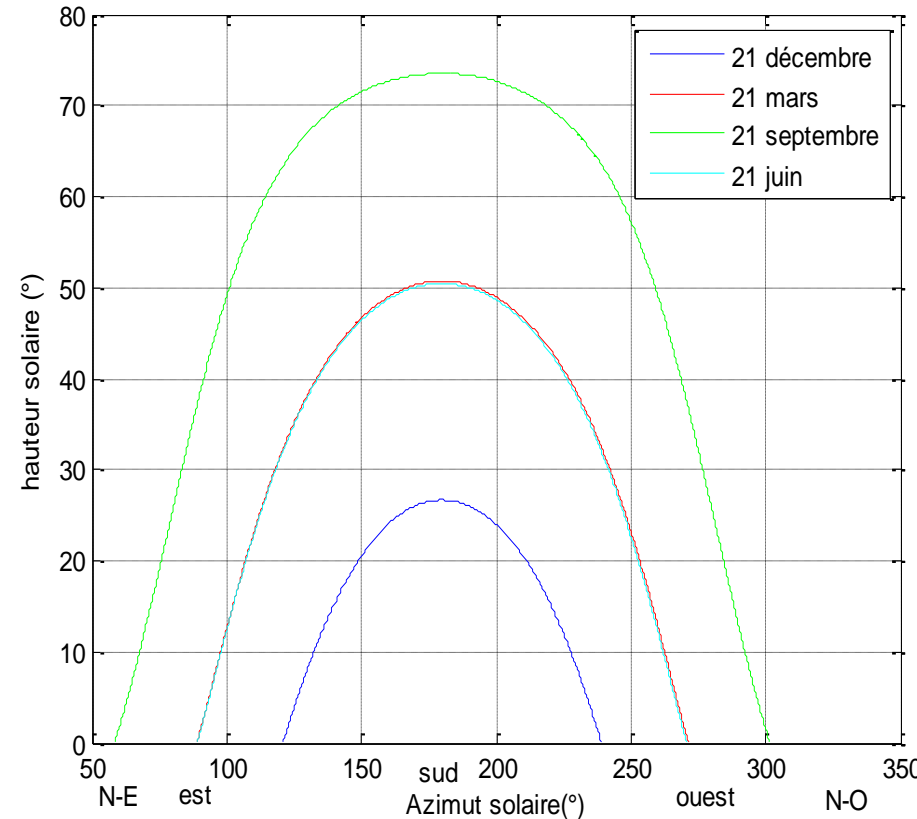
Distribution de la vitesse du vent pour l'année 2009

Recueil des données météorologiques

Données d'irradiance



Irradiance globale PSP [W/m²]
enregistrée au cours de l'année 2008

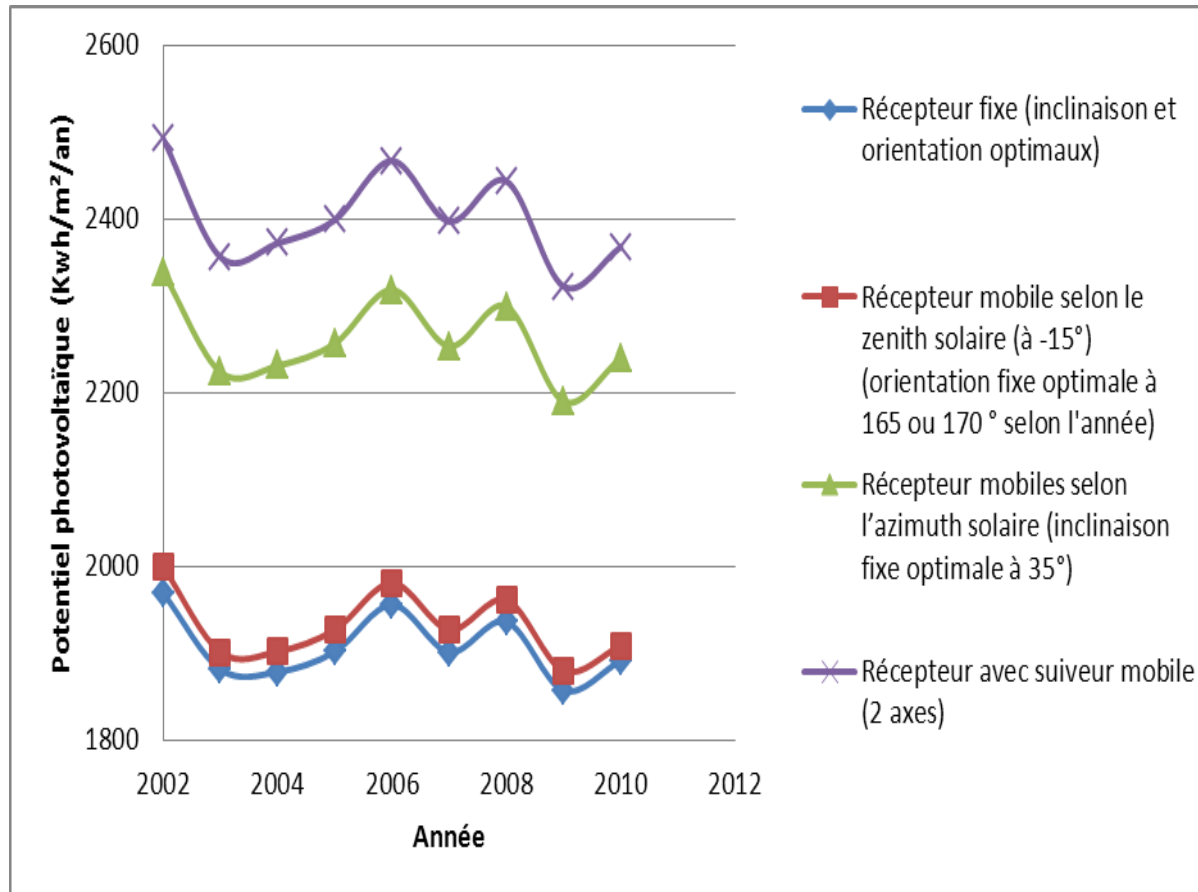


Hauteur du soleil en fonction de l'azimut
solaire pour différents jours de l'année

Recueil des données météorologiques

Données d'irradiance

Estimation de la production photovoltaïque en fonction de l'orientation et de l'inclinaison



Evolution du potentiel photovoltaïque des années de 2002 à 2010

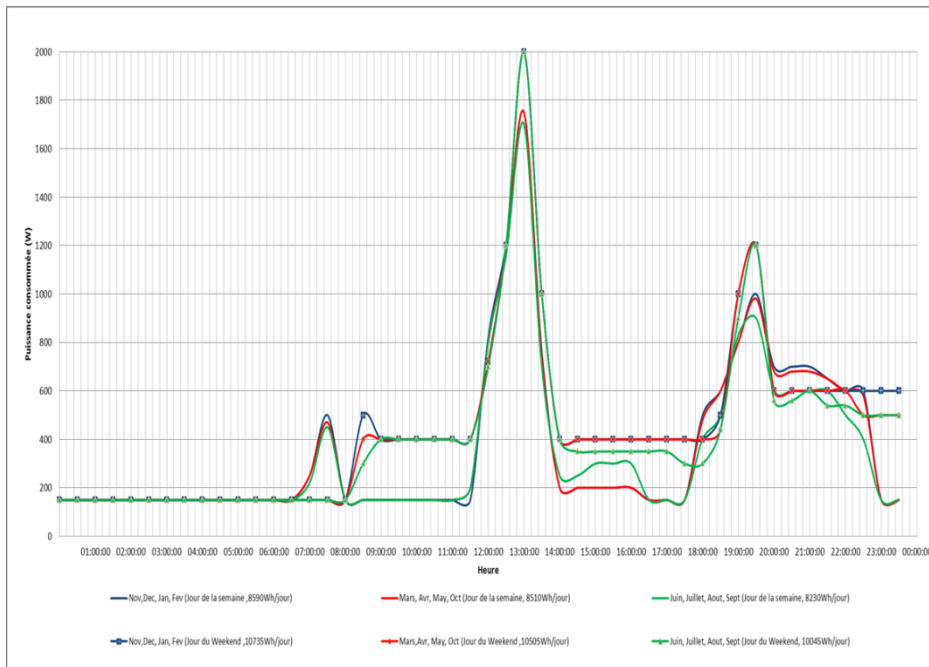
➡ **Plus rentable de faire un tracking selon l'azimut ou autour des deux axes.**

Méthode proposée

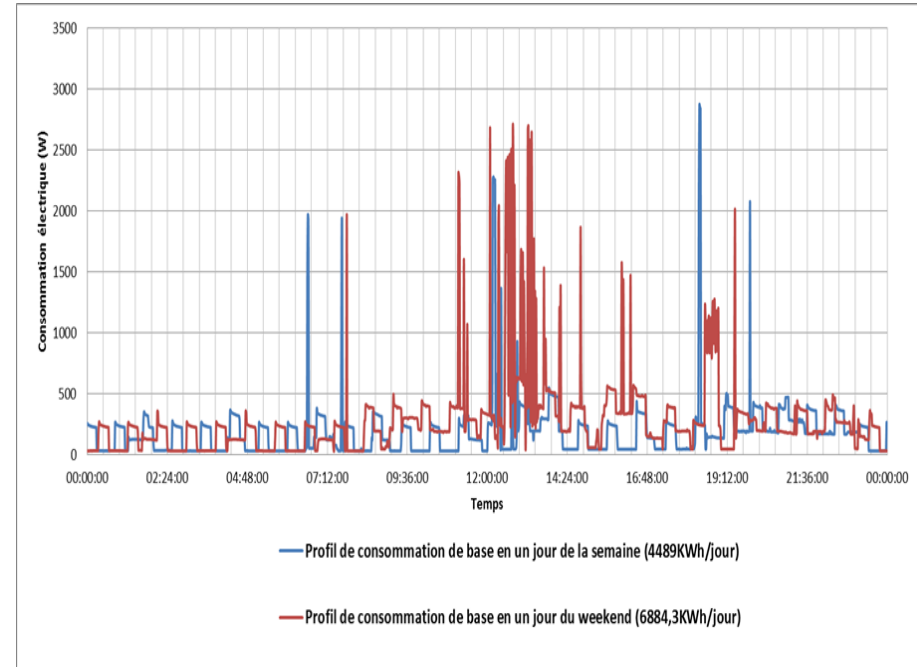
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

Recueil des données de consommation

➔ Deux profils de consommation pour un foyer type de 4 personnes :
synthétisé et mesuré



Modèles des profils de consommation journaliers établis pour l'habitat résidentiel considéré en fonction de l'heure, de la saison, jour de semaine ou weekend

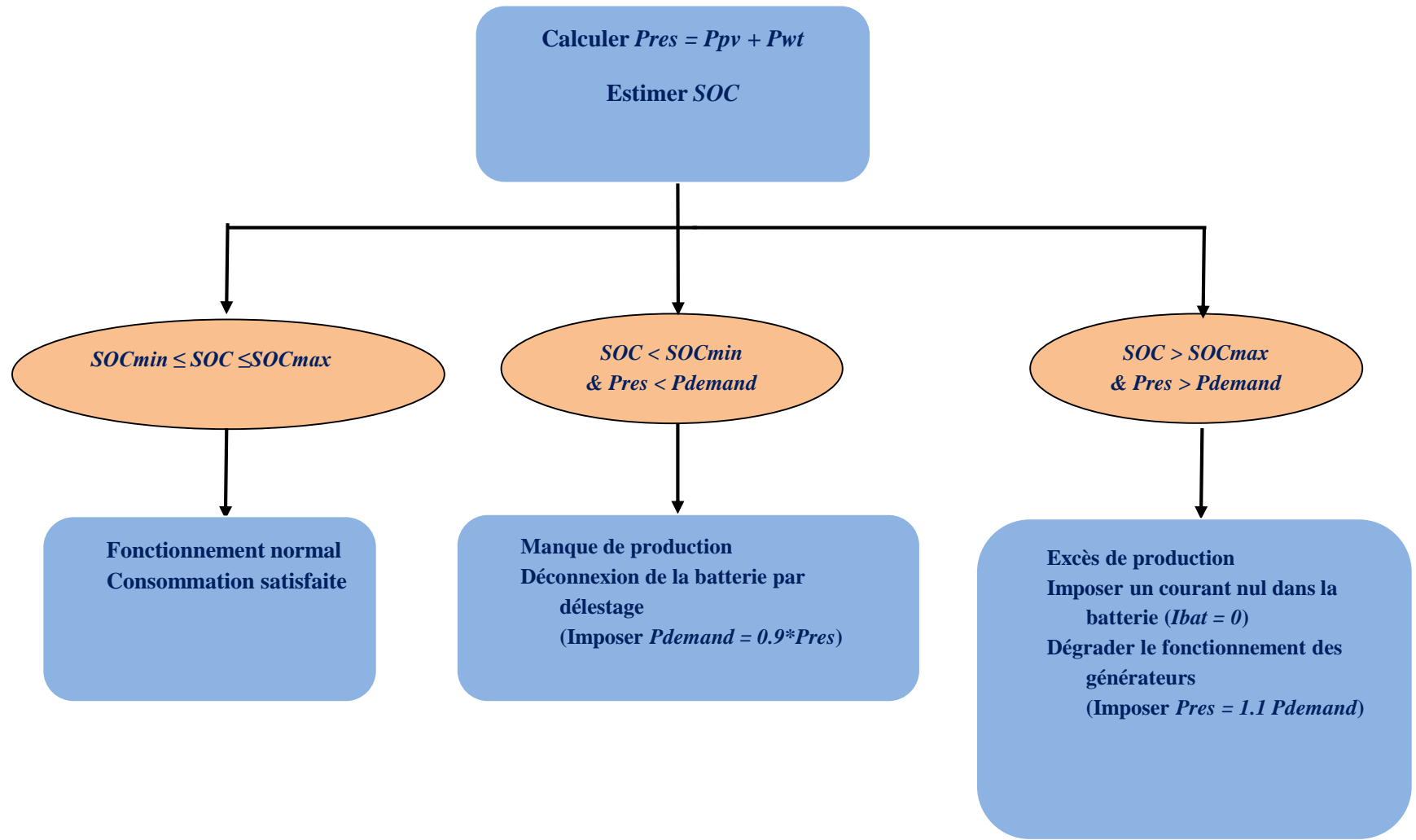


Profils de consommations journalière de base enregistrés dans l'habitat résidentiel en fonction du temps pour un jour de semaine et un jour de weekend

Méthode proposée

- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Optimisation du dimensionnement**

Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries

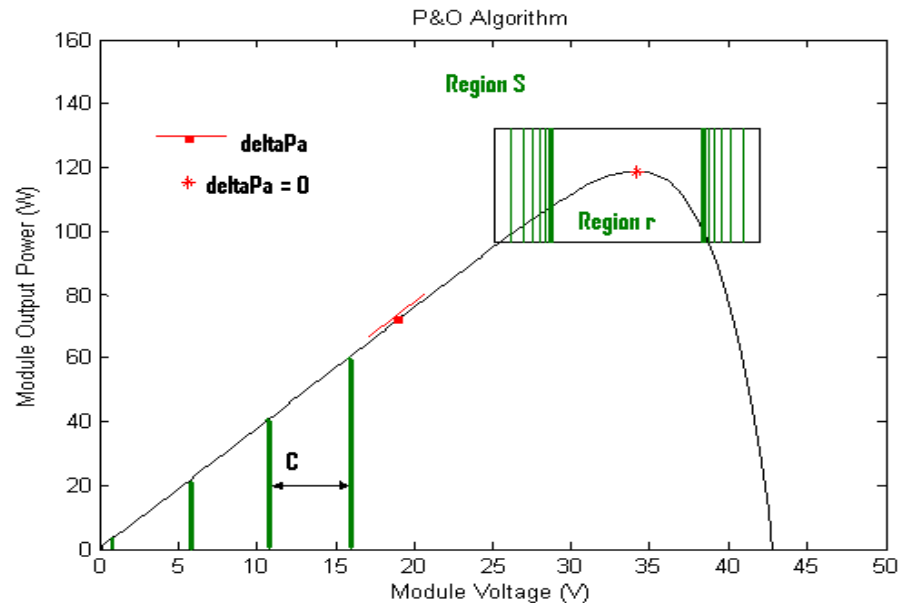


Organigramme de la méthode de supervision proposée

Algorithmes de maximisation de la puissance

Cas du système photovoltaïque :

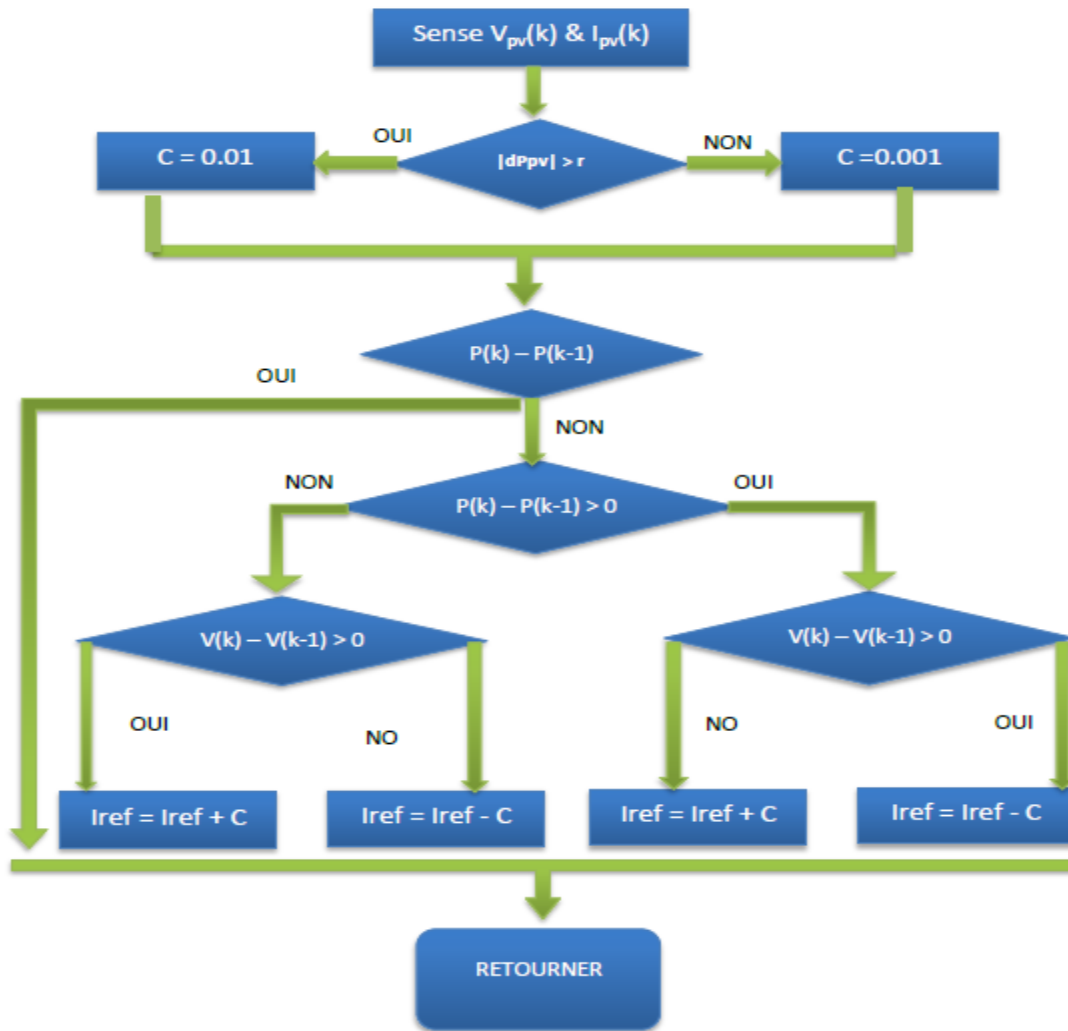
Dans notre cas, l'algorithme retenu pour la mise en œuvre est un P&O amélioré avec un pas adaptatif. Le principe fondamental de celui-ci est la variation du pas d'incrémentement de manière à converger plus rapidement vers le point optimal (MPP) tout en réduisant les oscillations autour de ce point. En effet, afin de converger rapidement vers le MPP, nous réduisons, le pas d'incrémentement C d'une région à une autre : $C = 0.01$ pour la région « S » et 0.001 pour la région « r ».



Principe de recherche avec pas variable dans un algorithme P&O

Algorithmes de maximisation de la puissance

Cas du système photovoltaïque :



Algorithme MPPT
P&O amélioré

Algorithmes de maximisation de la puissance

Cas du système éolien :

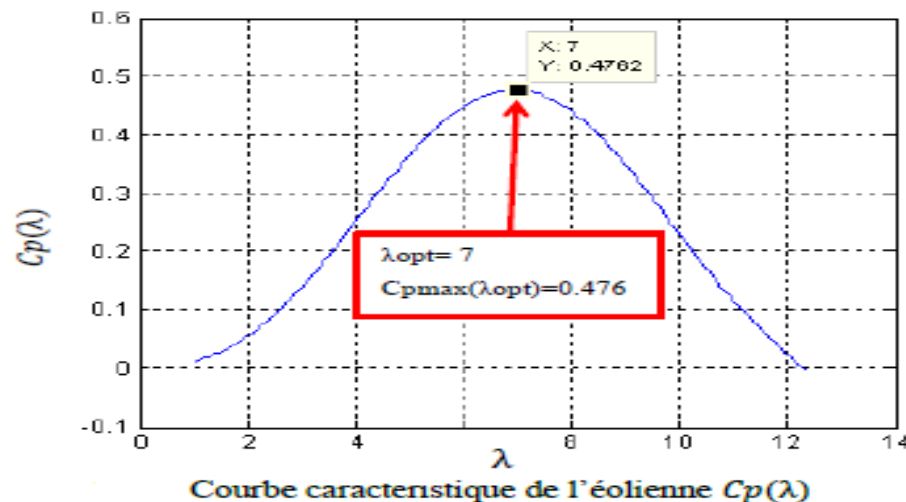
Dans le cas des éoliennes, les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

Nous avons opté pour la méthode directe pour la mise en œuvre.

La courbe spécifique $C_p(\lambda)$ possède une forme en cloche très prononcée. Sur le sommet de cette courbe, on trouve la puissance optimale qu'il est possible d'extraire. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale λ_{opt} et le coefficient de puissance maximal C_{pmax} . La référence de la vitesse de la turbine doit donc correspondre à cette valeur optimale. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \times m$$

m étant le coefficient de multiplication de vitesse. Dans notre cas, il est pris égal à deux.



Développement et Résultats

Optimisation du dimensionnement du système hybride

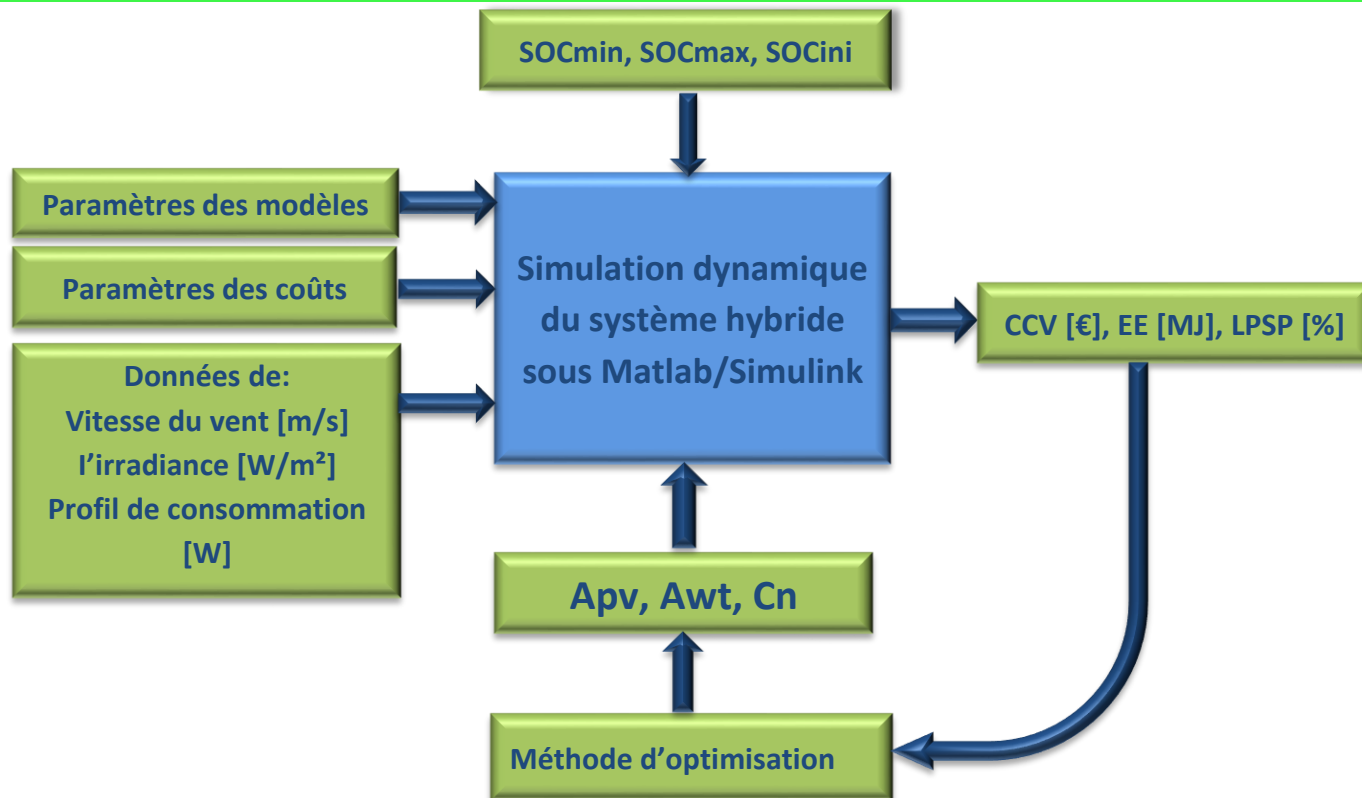
- Principe
- Formulation du problème
- Résultats d'optimisation et interprétations

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Principe

- ➔ Optimisation du dimensionnement de la source hybride suivant trois critères :
 - ✦ le coût sur cycle de vie
 - ✦ le coût en énergie primaire
 - ✦ le taux d'insatisfaction de la demande en énergie (LPSP).

➔ Méthode proposée basée sur une simulation dynamique du système associée un algorithme d'optimisation :



Formulation du problème

2 formulations sont proposées :

- une formulation mono-objective résolue avec l'algorithme SQP (Algorithme de Newton-Wilson)
- une formulation multi-objective résolue de deux manières :
 - par une méthode scalaire avec des coefficients de pondération unitaires : Aucune des fonctions « objectif » n'est favorisée.
 - par une approche Pareto (notion de dominance) avec la méthode N.S.G.A-II.

✚ Formulation du problème

- une formulation mono-objective résolue avec l'algorithme SQP (Algorithme de Newton-Wilson)

- *Formulation (I) :*

Fonction objective (Optimum):

Minimum \longrightarrow Coût : [CCV [€] ou EE [MJ]],

Sous réserve de la restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique :

$$LPSP[\%] \leq LPSP_{max}$$

En prenant compte des contraintes de faisabilité pour une résidence autonome :

$$Apv_{min} \leq Apv \leq Apv_{max}$$

$$Awt_{min} \leq Awt \leq Awt_{max}$$

$$Cn_{min} \leq Cn \leq Cn_{max}$$

Apv , Awt , et Cn étant les variables de décision.

✚ Formulation du problème

- une formulation multi-objective résolue de deux manières :

- *Formulation (II) :*

Fonctions objectives:

Minimum → Coûts : [CCV [€] et EE [MJ]]

&

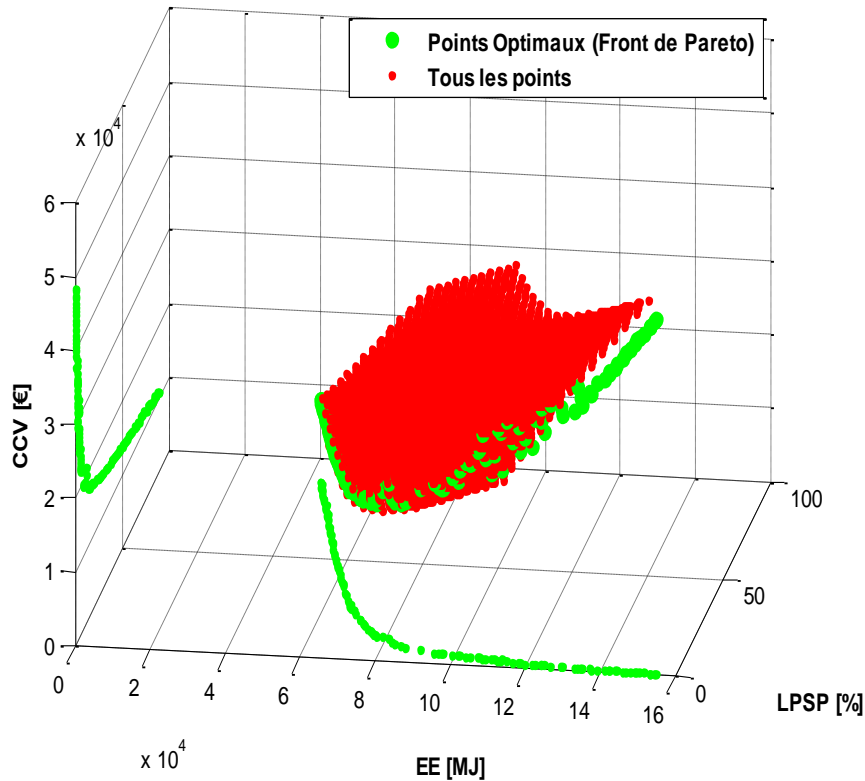
Minimum → $LPSP$ [%]

Sous réserve des contraintes de faisabilité .

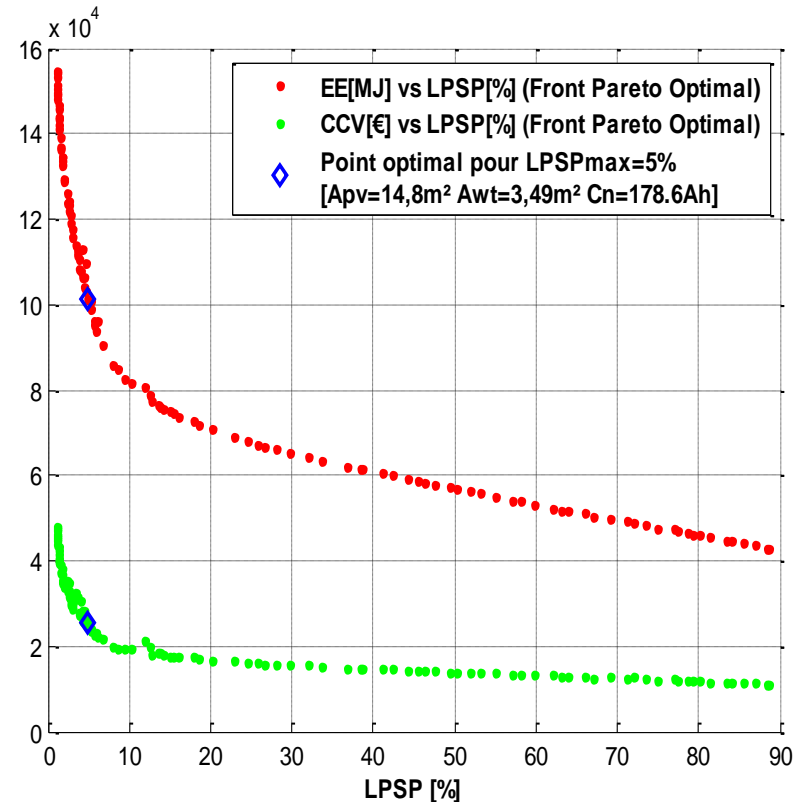
Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Résultats d'optimisation et interprétations Cas d'une optimisation multi-objective

➔ En appliquant la méthode NSGA-II



a) Représentation 3D



b) Projection 2D

Représentation de la surface de compromis Fronts de Pareto dans le cas d'une optimisation tri-objective : CCV [€] vs EE [MJ] & LPSP [%]

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

+ Résultats d'optimisation et interprétations

Cas d'une optimisation multi-objective

➡ Comparatif

Méthode scalaire (SQP)	Méthode NSGA-II
<ul style="list-style-type: none">+ Rapide- Une seule solution- Fixation d'un LPSPmax	<ul style="list-style-type: none">- Lente+ Plusieurs solutions (Fronts de Pareto)+ Ne pas avoir besoin de fixer un LPSPmax
<p>➡ Un bon outil d'aide à la décision, le concepteur décide quoi favoriser : le coût économique, le coût écologique ou la satisfaction de la charge ?</p>	

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

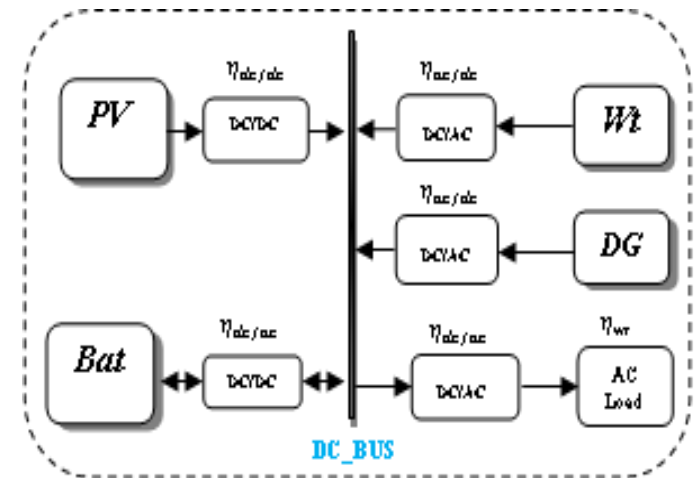
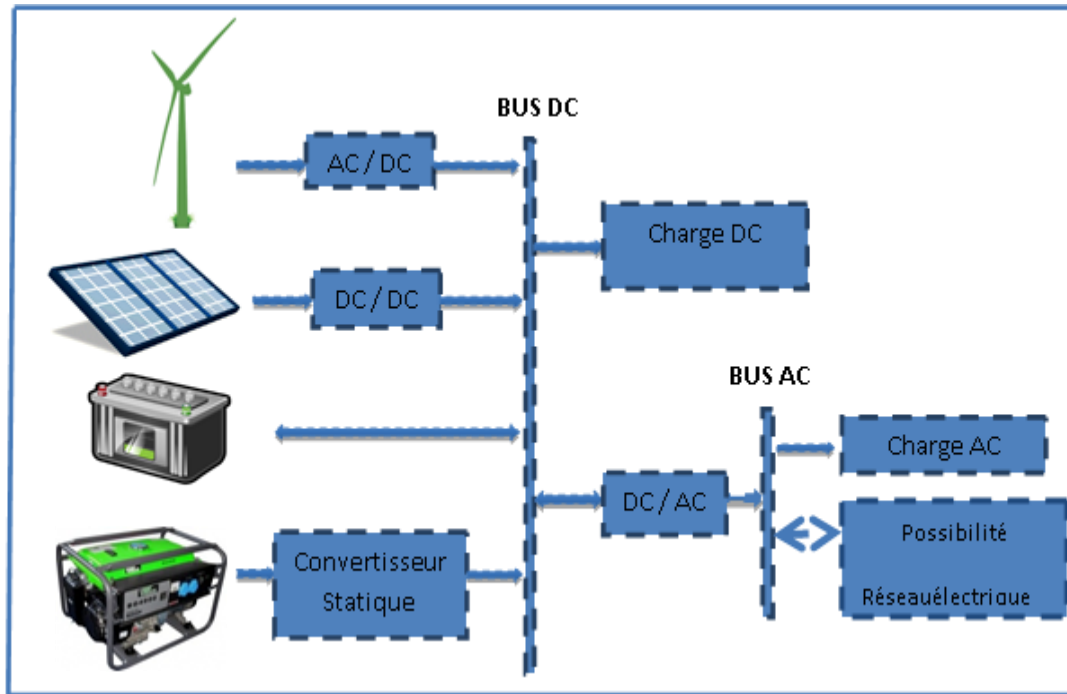
+ Résultats d'optimisation et interprétation

Cas d'une optimisation multi-objective

➡ Solution pratique retenue

- **9 panneaux Sharp ND-240QCJ**, soit une surface installée de $9 * 1,63 = 14,67 \text{ m}^2$,
- **une éolienne de type Aeromax Engineering** (Lacota S, SC) (900 W à 13 m/s) de $3,43 \text{ m}^2$ de surface,
- **4 batteries en série de type Numax Gel SLG180-12 ,12V/180Ah** VRLA à cyclage profond

II- Dimensionnement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque avec groupe diesel et batteries) pour une électrification utilisant une simulation dynamique



Configuration système multi-source

Modélisation du générateur diesel

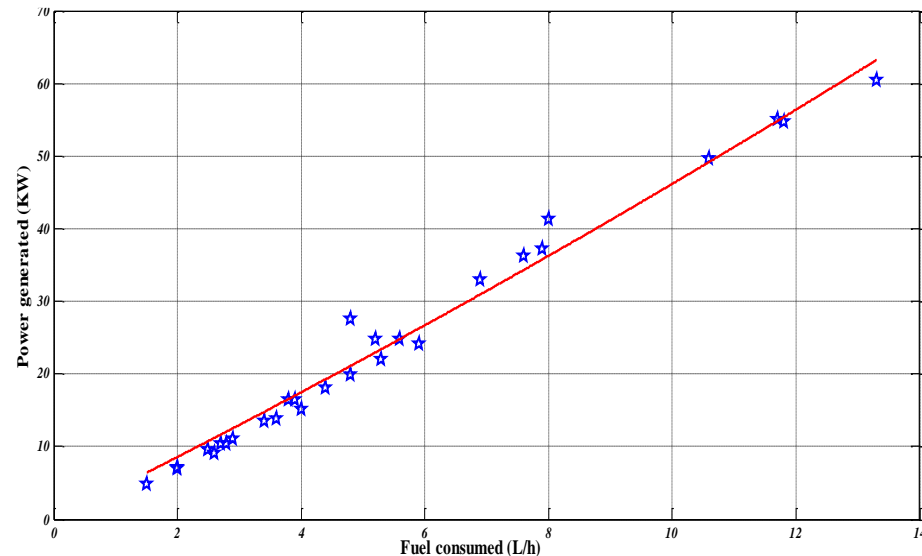
Le modèle de puissance du générateur diesel en fonction du carburant est présenté par l'expression suivante :

$$P_{GD} = 0.04155 Q_{fuel}^2 + 4.2Q_{fuel}$$

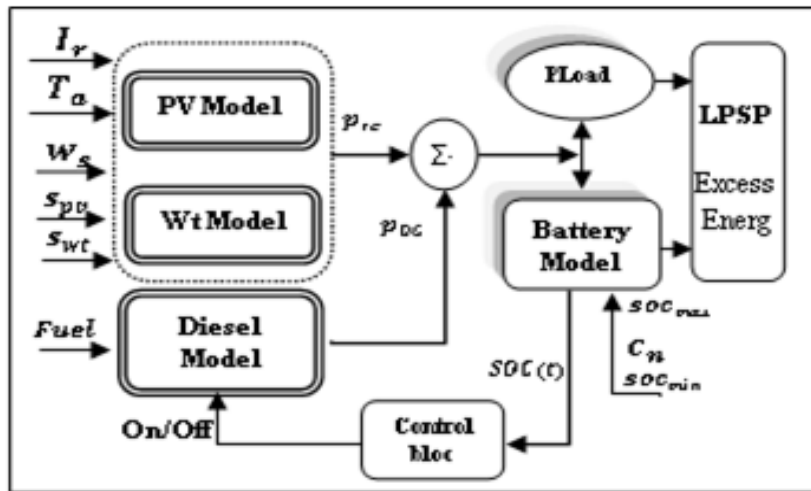
Où

P_{GD} : La puissance fournie par le générateur diesel (kW).

Q_{fuel} : La quantité du carburant consommée pendant une heure (L).



Principe de supervision



La charge et la décharge de la batterie d'accumulateurs est strictement liée à la différence entre l'énergie totale fournie par le système hybride et l'énergie consommée par la charge notée $\Delta P(t)$.

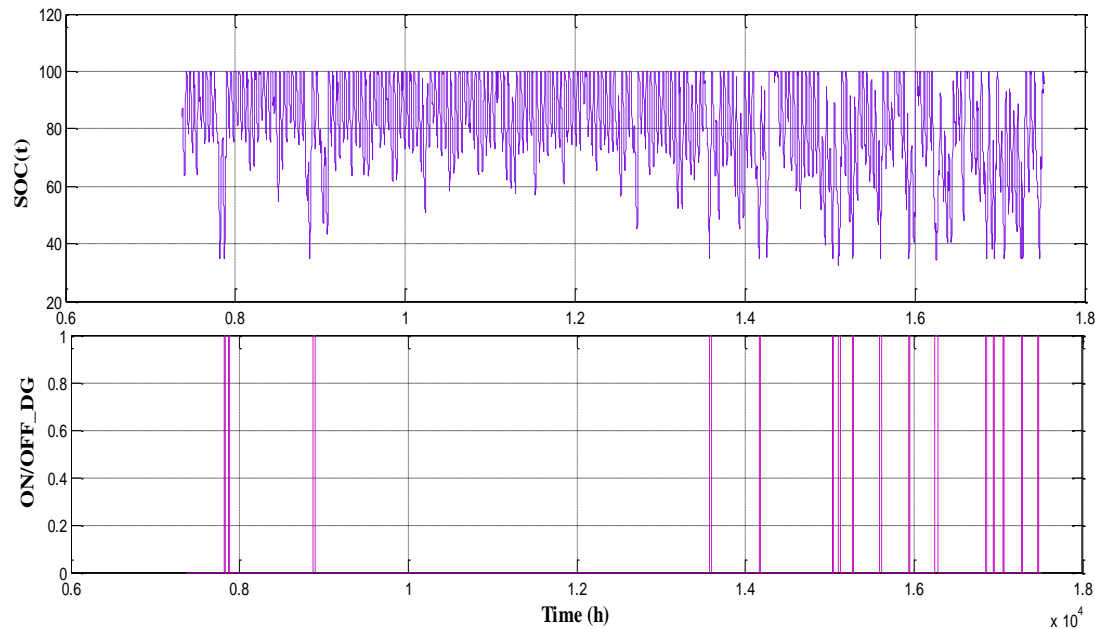
Nous distinguons deux cas:

- Dans le cas où $\Delta P(t) \geq 0$, le reste de l'énergie est utilisé pour charger la batterie. Si l'état de charge dépasse la SOC_{max} un excès d'énergie apparaît.
- Dans le cas où la différence de l'énergie est négative, la charge sera couverte par la batterie ou le générateur diesel. Ici, le rôle du générateur est la surveillance de l'état de charge de la batterie pour ne pas descendre au-dessous de SOC_{Dmin} donné.

Dimensionnement du groupe Diesel

Simulation for $SOC_{min}=35\%$ et $SOC_{max}=70\%$

Power of GD (kw)	Excess of energy (Kwh/year)	LPSP(%)	Number On / Off Of DG/year
0.4204	1403	0.08425	36
0.5467	1413	0	33
0.6309	1414	0	32
0.8417	1413	0	34



Opération du générateur diesel en fonction de l'état de charge des batteries.

Publications

- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Jean Paul Gaubert, Étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : Dimensionnement et analyse du cycle de vie, European Journal of Electrical Engineering (2012) DOI:10.3166/EJEE.15.479-497 © 2012 Lavoisier. (IF: **0,55**).
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Eco-Design Optimization of an Autonomous Hybrid Wind-PV System with Battery Storage, Revue IET: Renewable Power Generation, DOI: 10.1049/iet-rpg.2011.0204 (IF : **2,54**).
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power, J. Math. Comput. Simulat (Matcom), DOI: 10.1016/j.matcom.2013.05.004 (IF : **0,738**).
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Benoit Robyns, Real time supervision for a hybrid renewable power system emulator, Simulation Modelling Practice and Theory, 03/2014; 42:53–72. DOI:10.1016/j.simpat.2013.12.003. (IF: **1,16**).
- Toufik Madani Layadi, Gérard Champenois, Mohammed Mostefei, **Dhaker Abbes**, Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources, Symposium de Génie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, 8-10 JUILLET 2014, ENS Cachan, France.
- Petronela Pankovits; **Dhaker Abbes**; Christophe Saudemont; Othman Mounniabdou; Julien Pouget; Benoit Robyns, Energy Management Multi-Criteria Design for Hybrid Railway Power Substations, 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS 2014), 19-22 May, Valencia, Spain.
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Emulation of a hybrid PV-Wind-Battery system, 14th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering, Sousse, Tunisia; 12/2013.
- **Dhaker Abbes**, Gérard Champenois, André Martinez, Benoit Robyns, Modeling and simulation of a photovoltaic system: An advanced synthetic study, 3d International Conference on Systems and Control (ICSC13), 29 to October 31, 2013, in Algiers, Algeria.
- Petronela Pankovits, Maxime Ployard, Julien Pouget, Stephane Brisset, **Dhaker Abbes**, Benoit Robyns, Design and Operation Optimization of a Hybrid Railway Power Substation, EPE-ECCE Europe Conference, 3-5 September 2013, Lille, France.

Publications

- Layadi. TM, Mostefai .M , Champenois. G , **Abbes. D** , Dimensioning a hybrid electrification system (PV / WT / DG + battery) using a dynamic simulation, International Conference On Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA), 21 Mar to 23 Mar 2013, Hammamet, Tunisia.
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Jean-Paul Gaubert, Riad Kadri, Estimation of Wind Turbine and Solar Photovoltaic Energy Using Variant Sampling Intervals, EPE-Power Electronics and Motion Control, Ohrid, republic of Macedonia, pp. T12_28-34, ID 151, September, 2010.
- **Dhaker Abbes**, André Martinez, Gérard Champenois, Jean-Paul Gaubert, Statistical study of the influence of the data sampling interval on the estimation of wind turbine energy, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain, 2010.

Merci



Dr.Ing. Dhaker ABBES
Dhaker.abbes@yncrea.fr

Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur . Lille.
France

Site Web Personnel : www.da-engineering.com

