École d'été Franco-Roumaine

Commande Avancée des Systèmes & Nouvelles Technologies Informatiques – CA'NTI 2014

Optimisation et supervision des systèmes énergétiques complexes intégrant des sources renouvelables

Dr. Ing. Dhaker ABBES

Enseignant-Chercheur

Co-responsable du domaine ESEA :

Energie, Systèmes Electriques et Automatisés

Membre de l'Equipe RESEAUX (L2EP)

Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieurs

(HEI-Lille, France)

Plan général

- Introduction
- Problématique
- Exemple de projets et applications

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

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

  III- Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)
- Publications

Introduction

- Afin de diminuer le pourcentage d'utilisation des énergies traditionnelles dans la consommation globale, il convient de lever les difficultés liées à l'emploi des énergies propres.

- L'une de ces difficultés en est l'optimisation de la combinaison de plusieurs énergies (comme par exemple le soleil, le vent, …) et l'utilisation des dispositifs de stockage pour pallier au caractère intermittent de ces énergies.

- On peut réinjecter l'énergie provenant des sources renouvelables directement sur le réseau électrique, en prévoyant, soit un dispositif de stockage (des batteries par exemple), soit un système de gestion intelligente afin de mettre en adéquation la production avec l'usage de l'énergie.

- C'est dans ce contexte que se situe cette présentation: concevoir et optimiser des système multi-sources pour satisfaire aux besoins en électricité.

Plan général

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Exemple de projets et applications**

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

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

  III-Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)
- **Publications**

Problématique

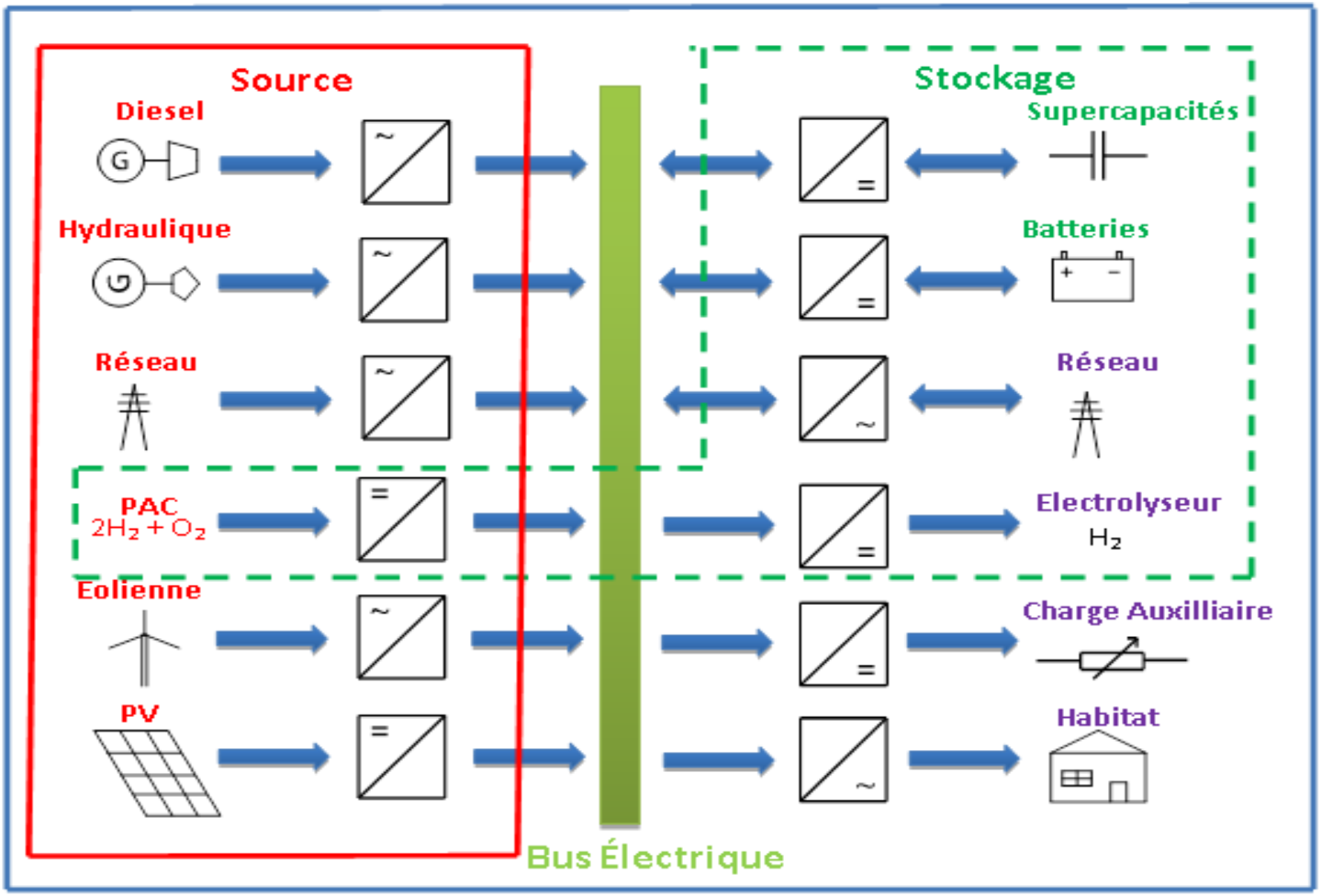


Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage

Comment intégrer et gérer toutes ces sources d'énergie ?

Problématique

Systèmes énergétiques complexes

Optimisation du dimensionnement des systèmes électriques (Dimensionnent des systèmes multi-sources, des systèmes de stockage, des fermes éoliennes, des installations photovoltaïques, etc.)

Gestion optimale des systèmes énergétiques (Smart grids)

Optimisation sous contraintes prise en compte des incertitudes

Augmenter le rendement des systèmes énergétiques et électriques, Maximiser la puissance (MPPT), Améliorer la fiabilité, etc.

Stockage de l'énergie

Etude et modélisation des systèmes multi-stockage (Dimensionnement, Supervision optimale)

Intégration du stockage aux réseaux électrique (lissage de la puissance, stabilisation du réseau, etc.).

Estimation du vieillissement des batteries et des super-capas.

Plan général

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Exemple de projets et applications**

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

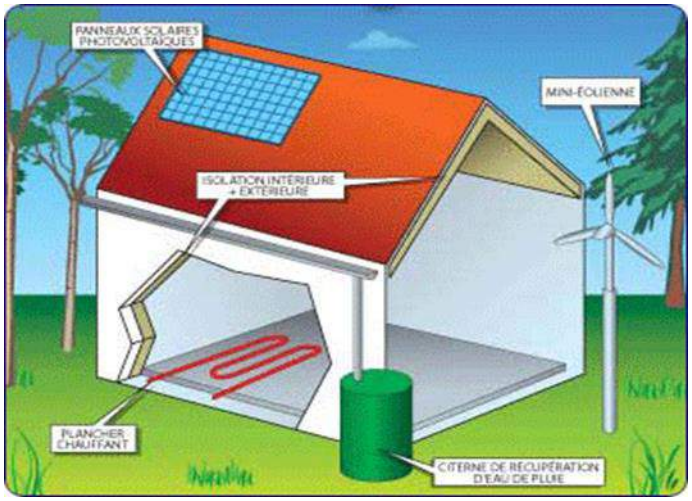
  II- Dimensionnement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque avec groupe diesel et batteries) pour une électrification utilisant une simulation dynamique

  III- Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)
- **Publications**

Exemple de projets et applications

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

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



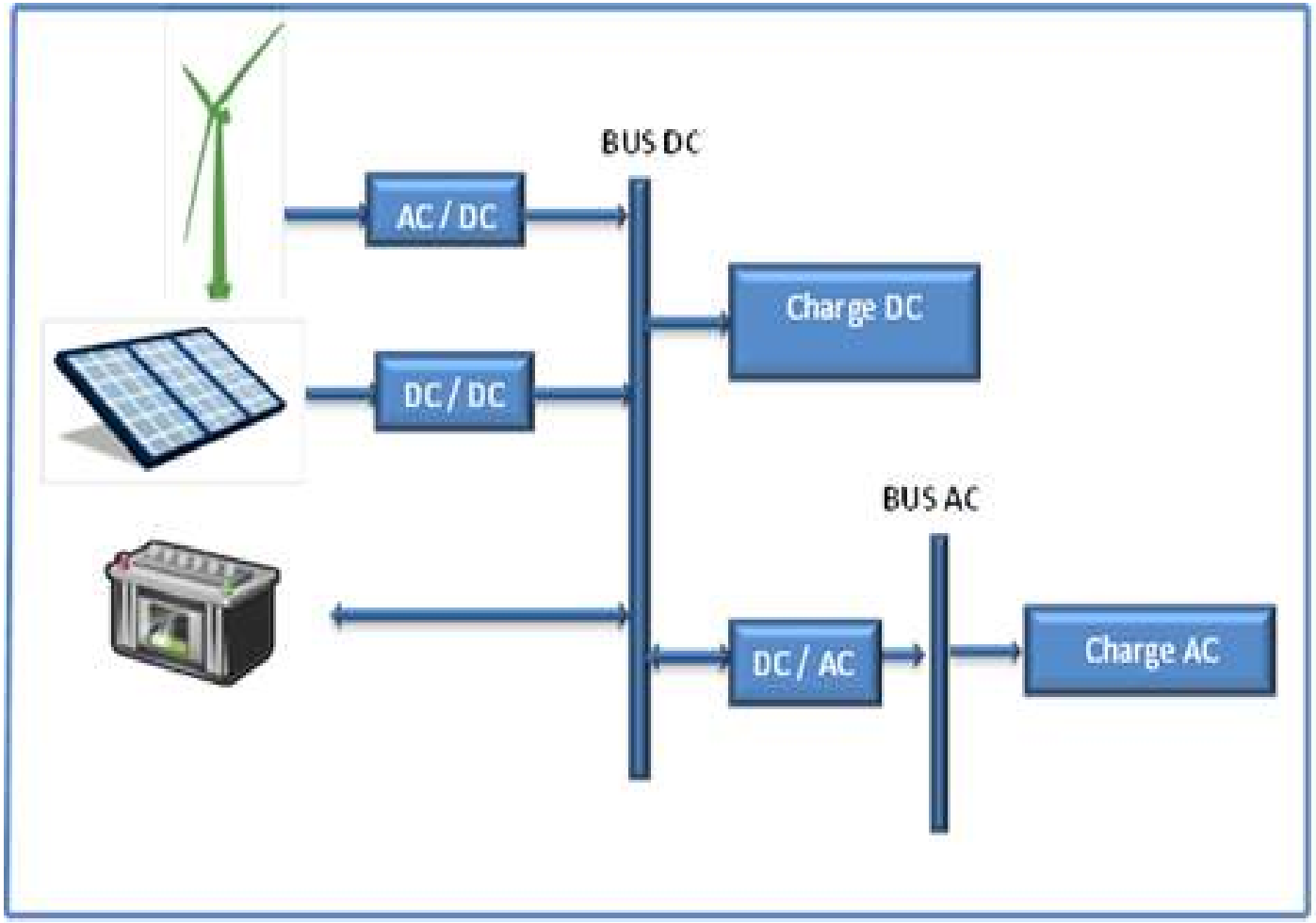
- **Principaux points abordés :**
  - **Modélisation & Simulation**
  - **Commande**
  - **Optimisation**
    - **Gestion optimale de la production**
    - **Minimisation du coût écologique et économique**

Motivation

Vers des habitats résidentiels autonomes …

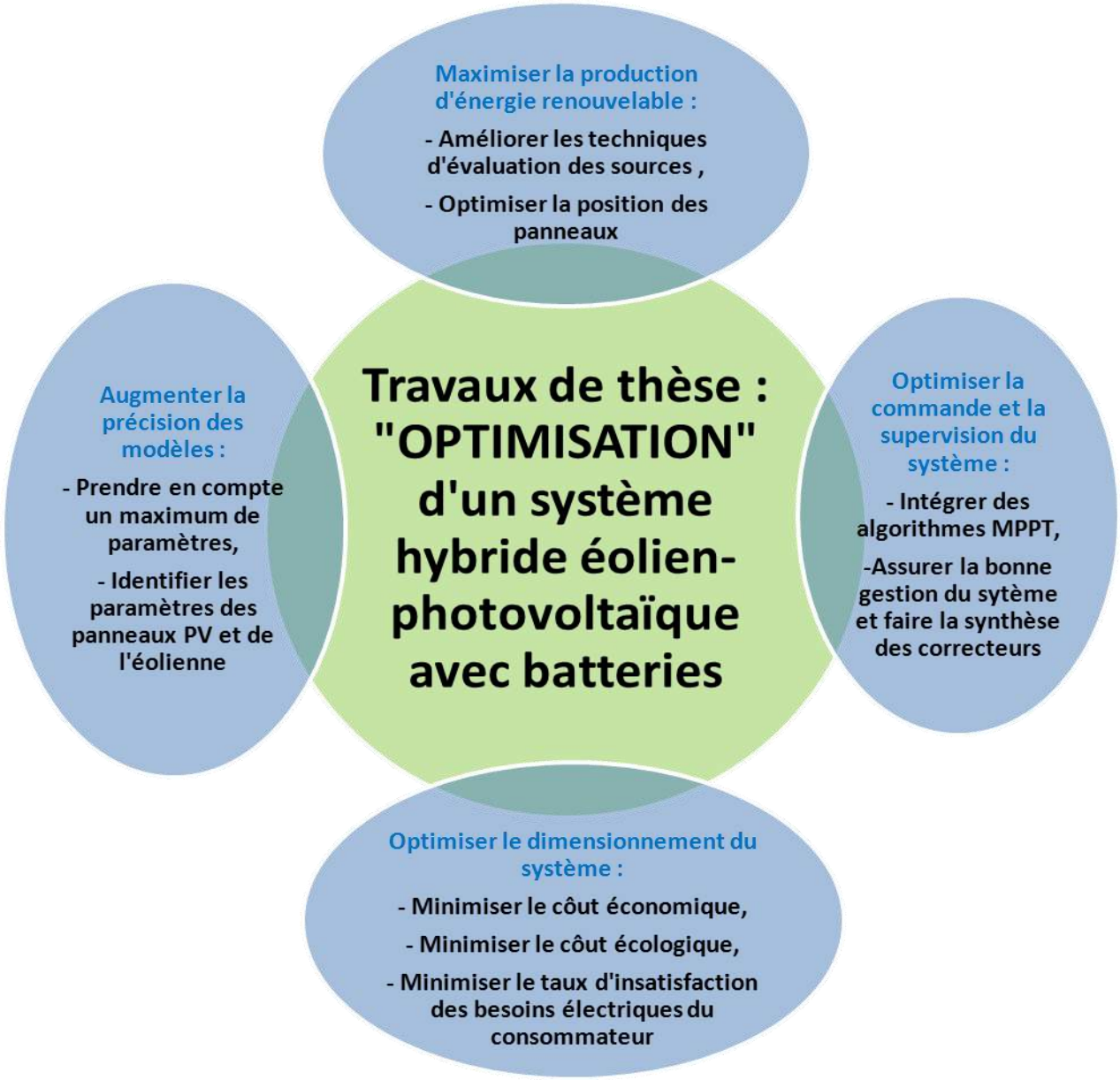
Objectif principal :

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

Objectifs intermédiaires



Développement et Résultats

- **Analyse bibliographique**
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Influence de la période d'acquisition des données**
- **Modélisation et simulation du système**
- **Optimisation du dimensionnement**

Analyse bibliographique

Des contributions sur le dimensionnement global du système :

- Les méthodes conventionnelles

Approche « Ampère heure » : Méthode itérative

Etapes:

1) Evaluation de la puissance à produire *Ep* pour satisfaire la demande,

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

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

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

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),

Analyse bibliographique

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.

Pgrp_elect = 48*1.2*82/0.9 = 5248 W

Capacité de batterie : 820 Ah

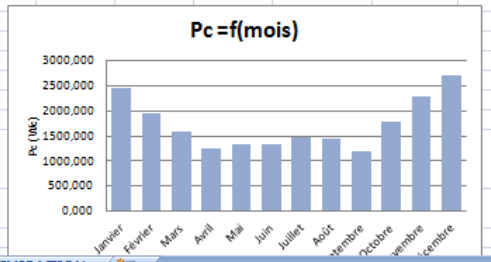
Temps de recharge : 10h

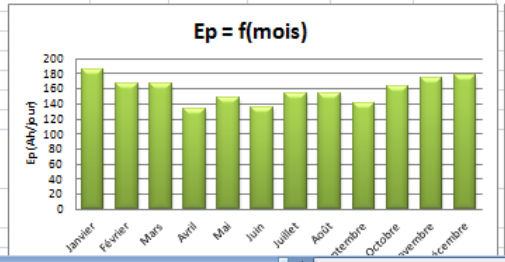
Analyse bibliographique

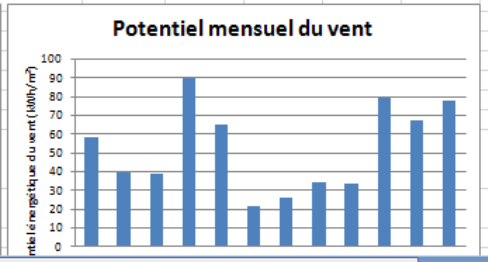
méthode itérative_7pv - Microsoft Excel

Mois	Epv(panneaux) (kWh)	Ewt(éolienne) (kWh)	Eload(charge) (kWh)	Nbre de valeurs prélevées	Valeurs cumulées	Ep (kWh) : Eload/k	Ep (kWh/jour)	Ep (Ah/jour)	Cn (Ah)	Ira (kWh/m²/jour	Pc (Wc)	Nbre de panneaux nécessaire	kWhPV (4panneaux)	kWhPV (6panneaux)	kWhPV (7panneaux)	kWhPV (8panneaux)	kWhPV (9panneaux)	kWhBatt	kWhEol	Potentiel du vent (kWh/m²)	S (m²)
Janvier	16,76	13,6	218,3	31*24*2	1488	275,858	8,89864	185,38825	960,6106	4,0256	2456,124	12	89,851	134,777	157,240	179,703	202,166	118,618	149,833	58,714	8,506
Février	17,39	8,06	177,1	28*24*2	2832	223,795	7,99267	166,51397	862,8114	4,5525	1950,740	10	91,778	137,668	160,612	183,557	206,501	63,183	79,80958	39,672	6,706
Mars	22,88	8,35	196,7	31*24*2	4320	248,563	8,01815	167,04475	865,5617	5,614	1586,935	8	125,304	187,957	219,283	250,609	281,935	29,280	36,98494	38,506	3,202
Avril	21,98	19,99	151,3	30*24*2	5760	191,192	6,37308	132,77241	687,9756	5,6483	1253,686	6	122,003	183,005	213,506	244,007	274,507	-22,313	-28,1854	89,905	0
Mai	23,46	14,43	174,4	31*24*2	7248	220,383	7,10913	148,10678	767,4324	5,931	1331,821	7	132,380	198,570	231,665	264,760	297,855	-11,282	-14,2509	65,134	0
Juin	20,1	3,9	154,2	30*24*2	8688	194,857	6,49523	135,31728	701,1622	5,4544	1323,138	7	117,815	176,723	206,176	235,630	265,084	-11,319	-14,2982	21,223	0
Juillet	20,8	4,94	180	31*24*2	10176	227,459	7,33740	152,8625	792,0747	5,5143	1478,459	7	123,079	184,619	215,389	246,158	276,928	12,071	15,24739	26,285	1,934
Août	21	6,64	180	31*24*2	11664	227,459	7,33740	152,8625	792,0747	5,6067	1454,094	7	125,142	187,712	218,998	250,283	281,568	8,462	10,68847	34,003	1,048
Septembre	22,8	6,64	160	30*24*2	13104	202,186	6,73954	140,40704	727,5353	6,2438	1199,330	6	134,866	202,299	236,016	269,732	303,449	-33,830	-42,732	33,933	0
Octobre	19,2	18,05	193	31*24*2	14592	243,887	7,86732	163,90257	849,2801	4,8702	1794,889	9	108,703	163,054	190,230	217,406	244,581	53,657	67,77728	79,532	2,841
Novembre	16,2	15,3	199	30*24*2	16032	251,469	8,38230	174,63126	904,872	4,0769	2284,497	11	88,061	132,092	154,107	176,122	198,137	97,362	122,9838	67,532	6,070
Décembre	14,5	17,6	209	31*24*2	17520	264,106	8,51954	177,49035	919,6868	3,5091	2697,601	13	78,323	117,485	137,065	156,646	176,227	127,040	160,4718	77,565	6,896
TOTAL	237,07	137,5	2193		17520	2771,214	7,592366435	158,1743	819,5984	5,0887	1657,783	8	1337,306	2005,959	2340,286	2674,613	3008,939				4,650
					Nbre de batteries (12V/130 Ah) nécessaire	25							Ann PV%	48,257	72,386	84,450	96,514	108,578			

k	0,79135
Tension (V)	48
Ta (°C)	9,9567
ft	0,8271
N	3
DOD	0,7
npc	0,9
Pcrête unitaire (Wc)	200
Rendement éolienne	0,3







Méthode itérative | OPTIMISATION

Prêt 70 %

FR 00:59 18/05/2014

Méthode itérative généralisée et adaptée sous le logiciel Excel

Analyse bibliographique

Des contributions sur le dimensionnement global du système :

- Les méthodes conventionnelles

Approche « Ampère heure » : Méthode itérative

Avantages	Inconvénients
Efficace Ajustable/Adaptable Prise en compte de l'ensemble des éléments du système hybride Plusieurs solutions possibles Facilement programmable	Incertitude des données météorologique non prise en compte Imprécision (Arrondis et hypothèse du nombre de jours d'autonomie) : - Pour N=3, on obtient 25 accumulateurs - Pour N=1, on obtient 8 accumulateurs

Analyse bibliographique

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):

Minimum $\longrightarrow$ 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 :

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

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

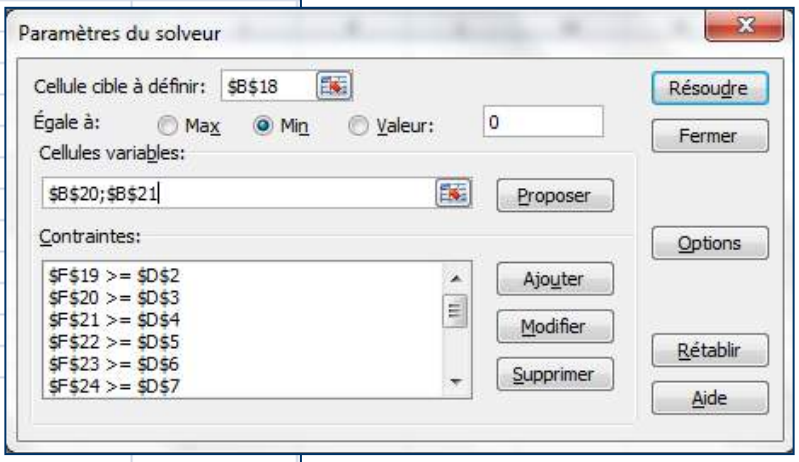
C_{Wt} et C_{pv} représentent les facteurs de coût économique respectivement pour un m² de surface balayée par l'éolienne et un m² de panneaux photovoltaïques.

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.

Analyse bibliographique

	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



Méthode par programmation linéaire généralisée et adaptée sous le logiciel Excel

Analyse bibliographique

Des contributions sur le dimensionnement global du système :

- Les méthodes conventionnelles

Approche énergétique avec programmation linéaire

Avantages	Inconvénients
Rapidité	Incertitude des données météorologique non prise en compte
Ajustable/Adaptable	Ne prend pas en compte le système de stockage (Capacité calculée par calcul analytique)
Prise en compte des contraintes	

Analyse bibliographique

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

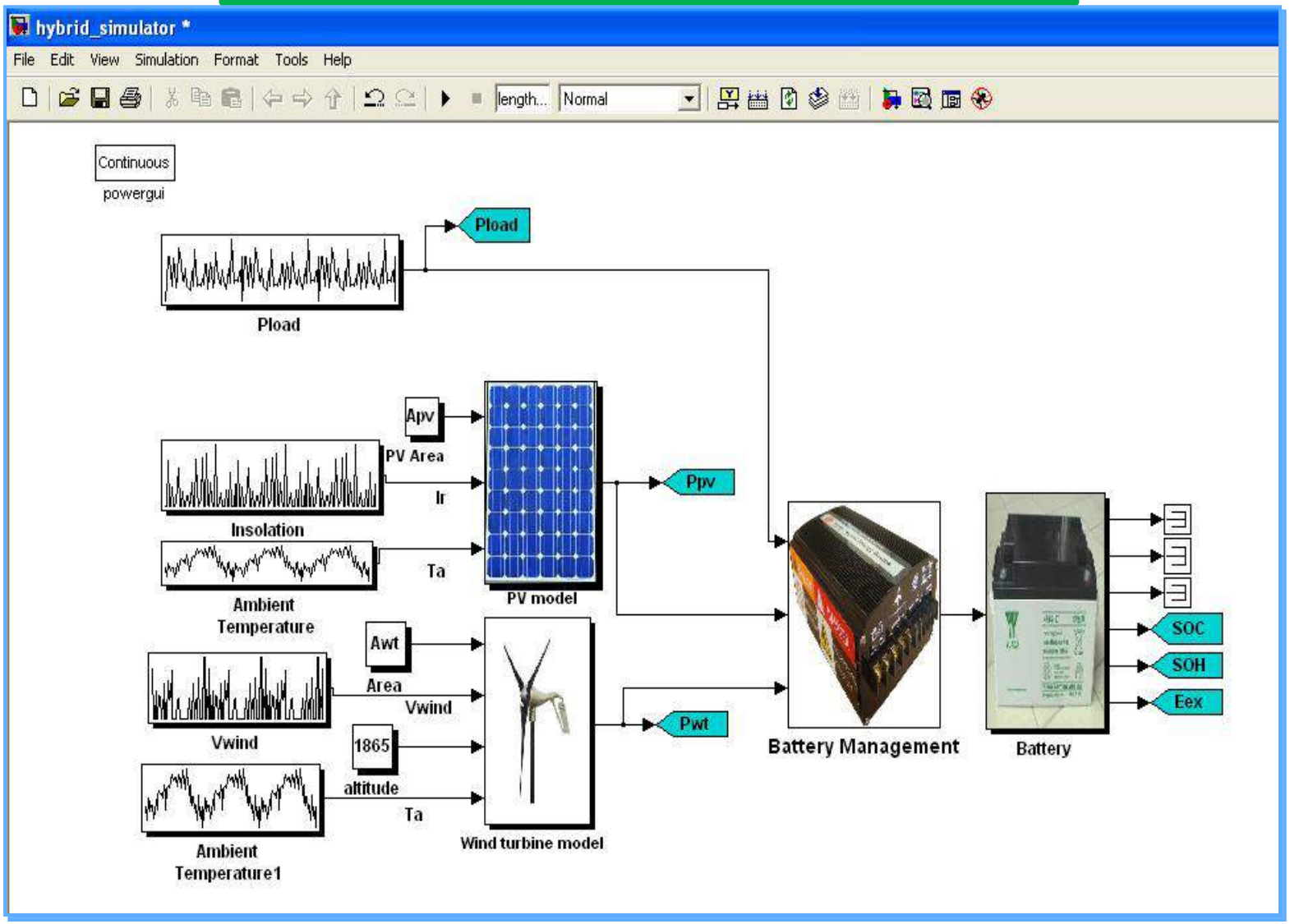
+ + prise en compte du profil temporel des sources et de la consommation,

- complexes.

Développement et Résultats

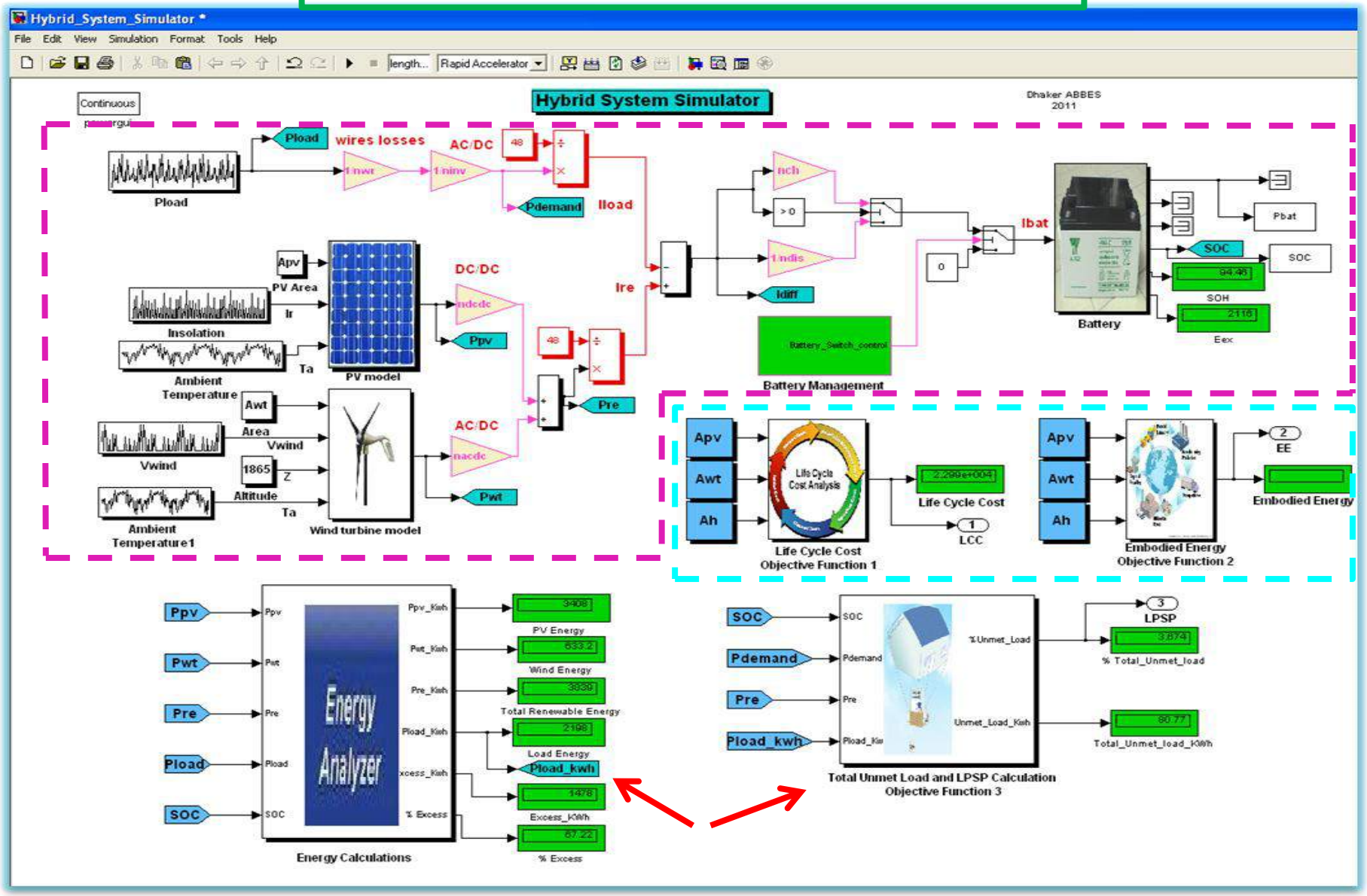
- Analyse bibliographique
- Simulation dynamique
- Recueil des données météorologiques
- Recueil des données de consommations
- Influence de la période d'acquisition des données
- Modélisation et simulation du système
- Optimisation du dimensionnement

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

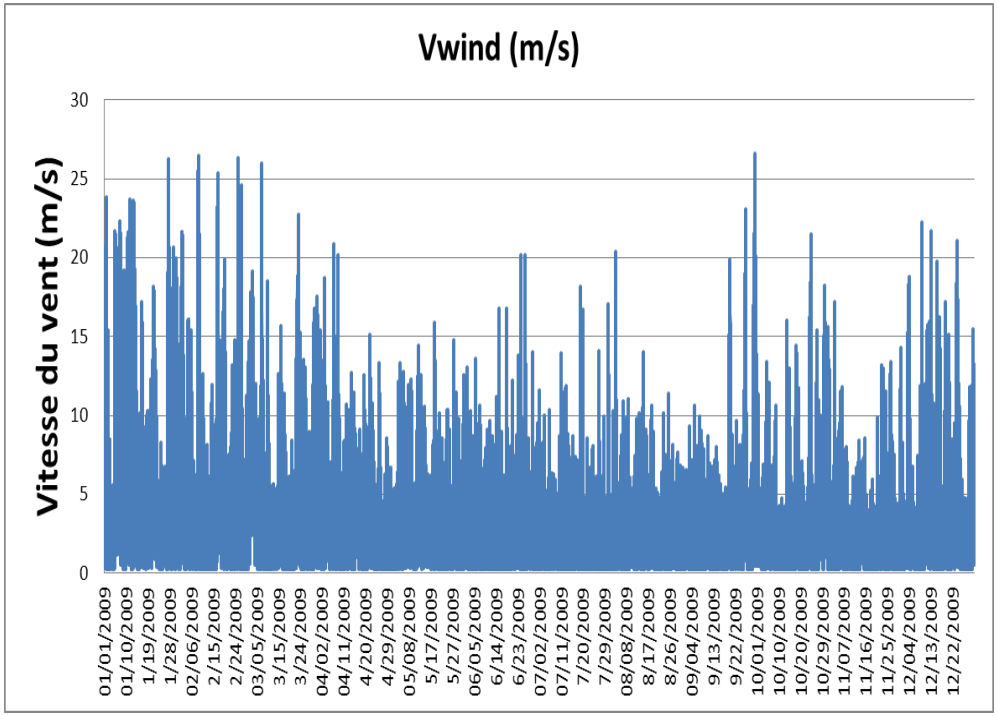
Développement et Résultats

- **Analyse bibliographique**
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Influence de la période d'acquisition des données**
- **Modélisation et simulation du système**
- **Optimisation du dimensionnement**

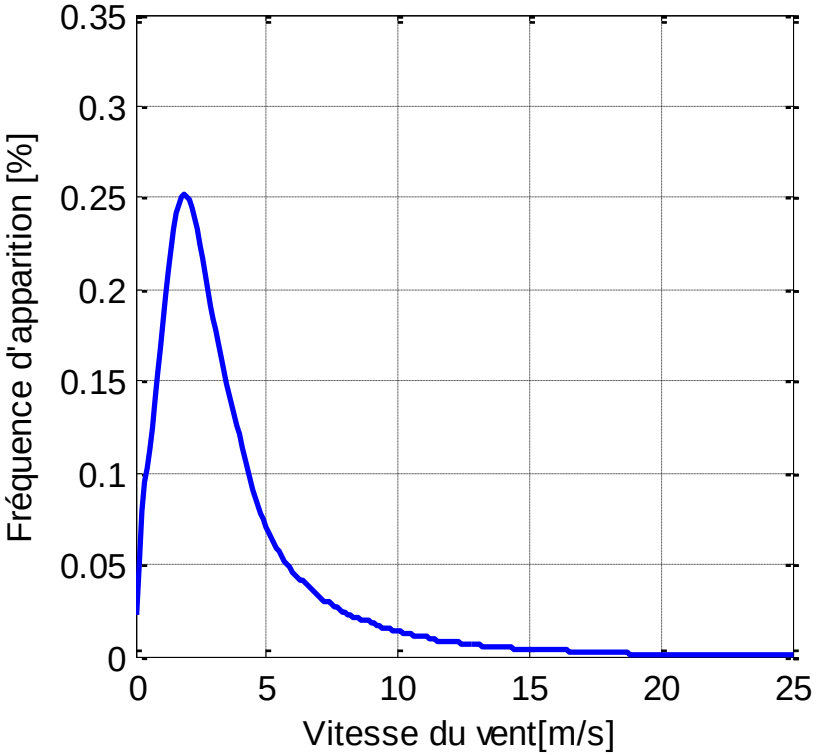
Recueil des données météorologiques

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

Données du vent



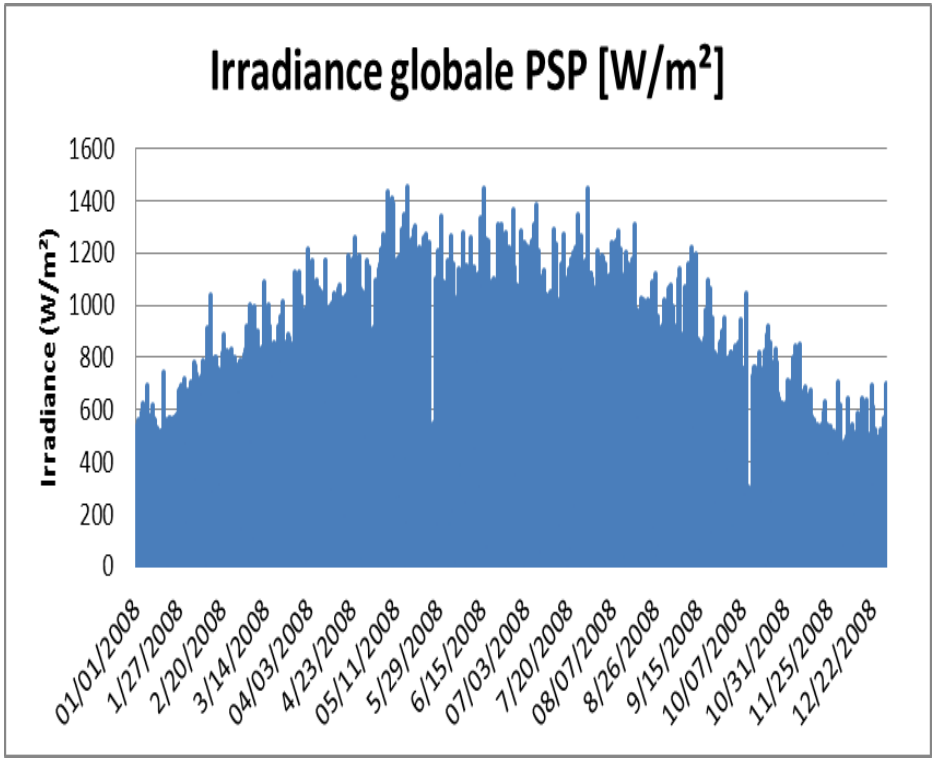
Vitesse du vent [m/s] enregistrée au cours de l'année 2009



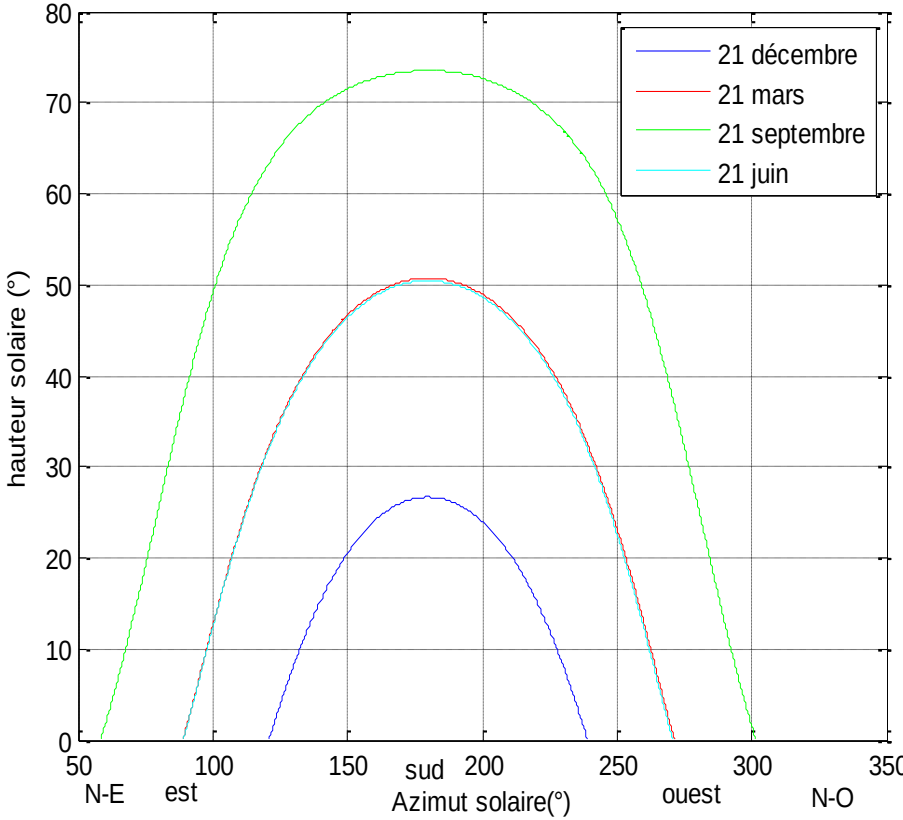
Distribution de la vitesse du vent pour l'année 2009

Recueil des données météorologiques

Donnés d'irradiance



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

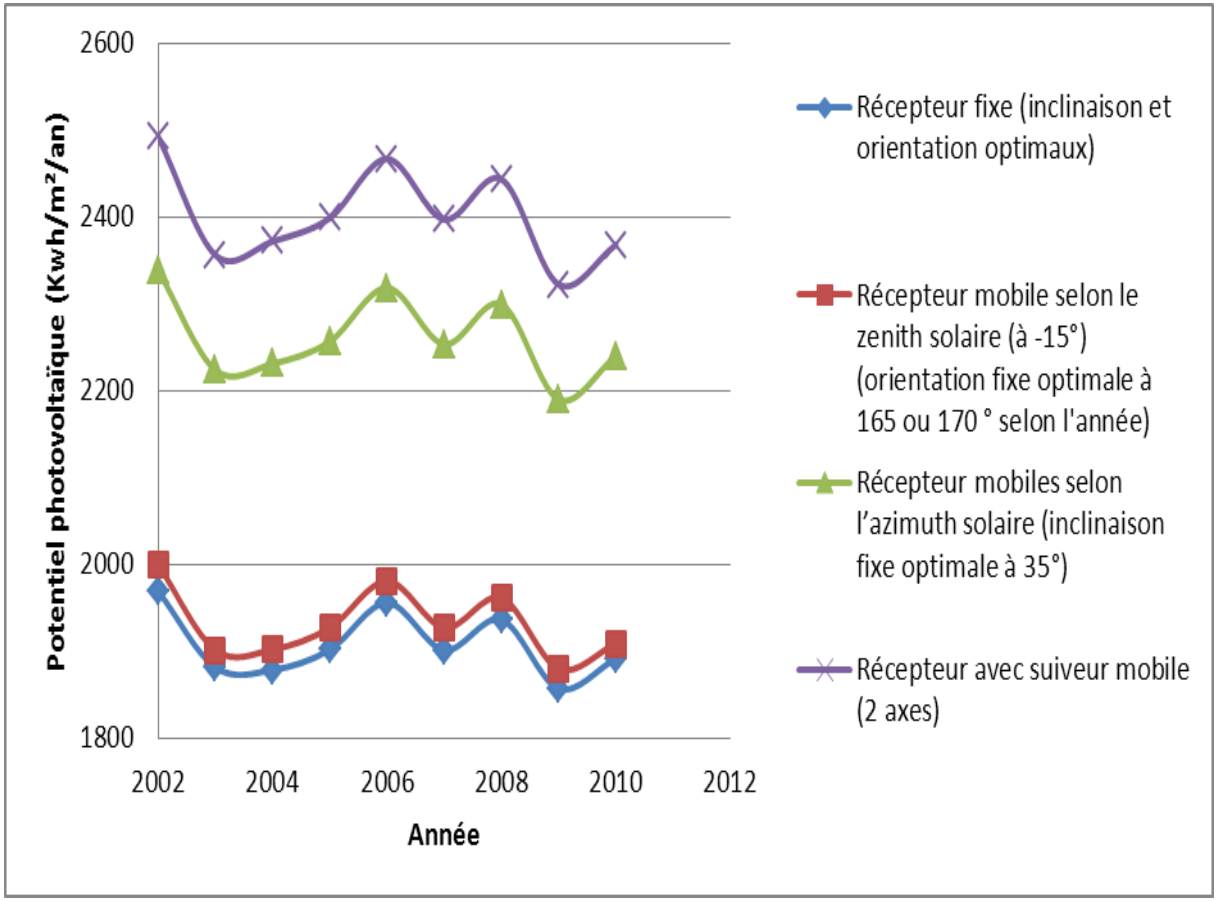


Hauteur du soleil en fonction de l'azimut solaire pour différents jours de l'année

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

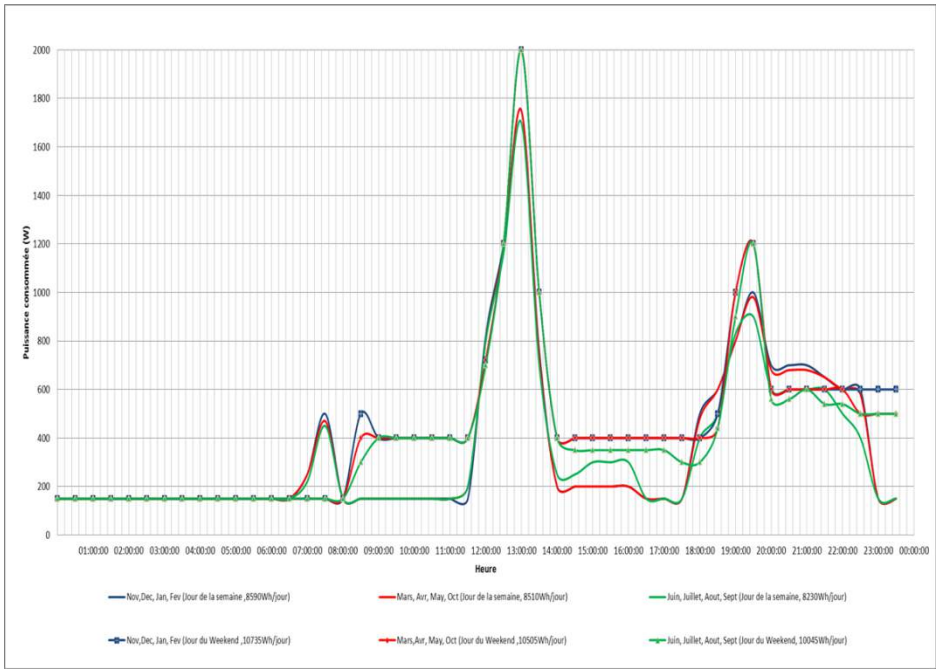
- **Plus rentable de faire un tracking selon l'azimut ou autour des deux axes.**

Développement et Résultats

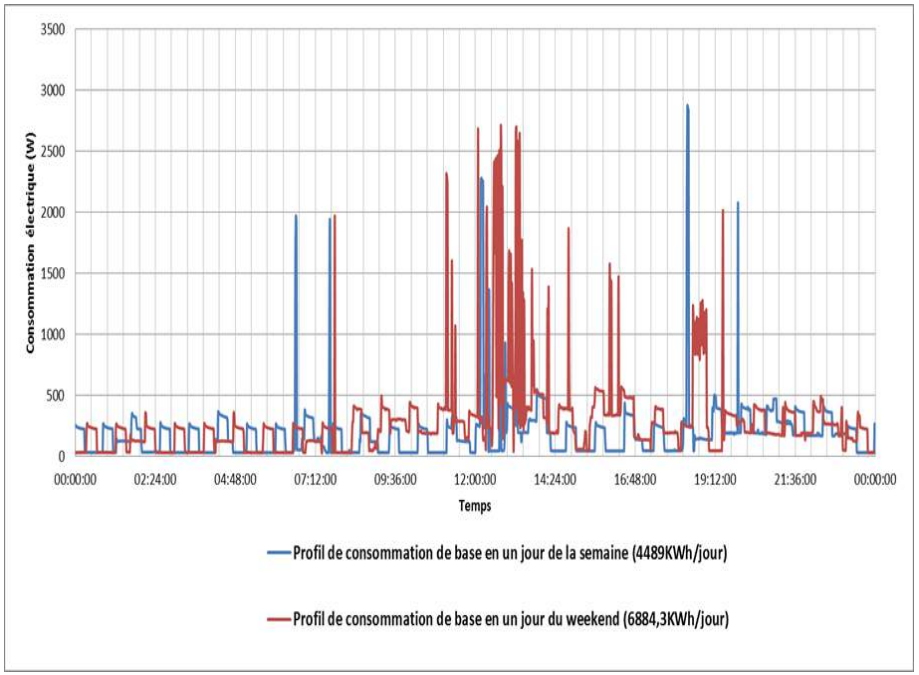
- **Analyse bibliographique**
- **Simulation dynamique**
- **Recueil des données météorologiques**
- **Recueil des données de consommations**
- **Influence de la période d'acquisition des données**
- **Modélisation et simulation du système**
- **Optimisation du dimensionnement**

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



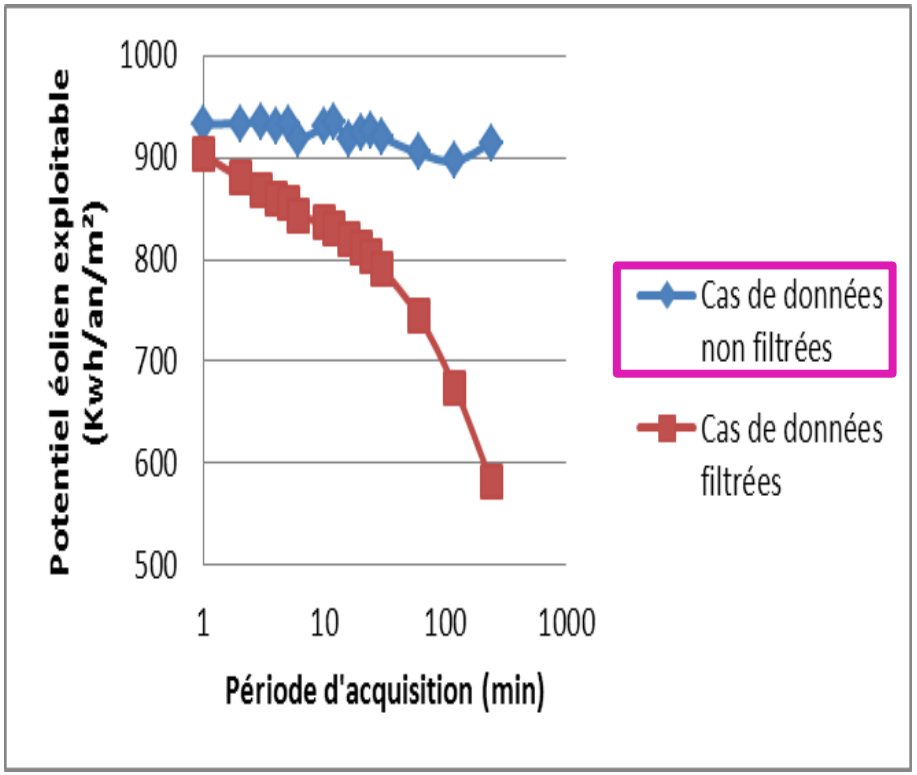
Profils de consommations journalière de base enregistrés dans l'habit résidentiel en fonction du temps pour un jour de semaine et un jour de weekend

Développement et Résultats

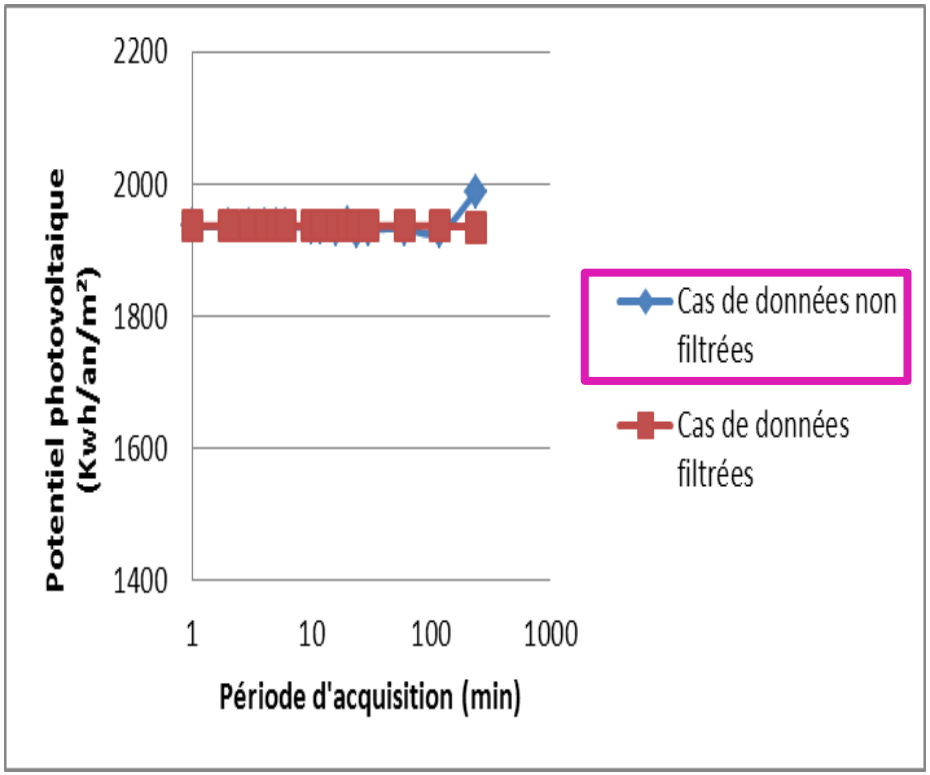
- Analyse bibliographique
- Simulation dynamique
- Recueil des données météorologiques
- Recueil des données de consommations
- Influence de la période d'acquisition des données
- Modélisation et simulation du système hybride
- Optimisation du dimensionnement

Influence de la période d'acquisition des données

Cas de la vitesse du vent et de l'irradiance solaire



Evolution de l'énergie du vent estimée en 2009 en fonction de la période d'acquisition

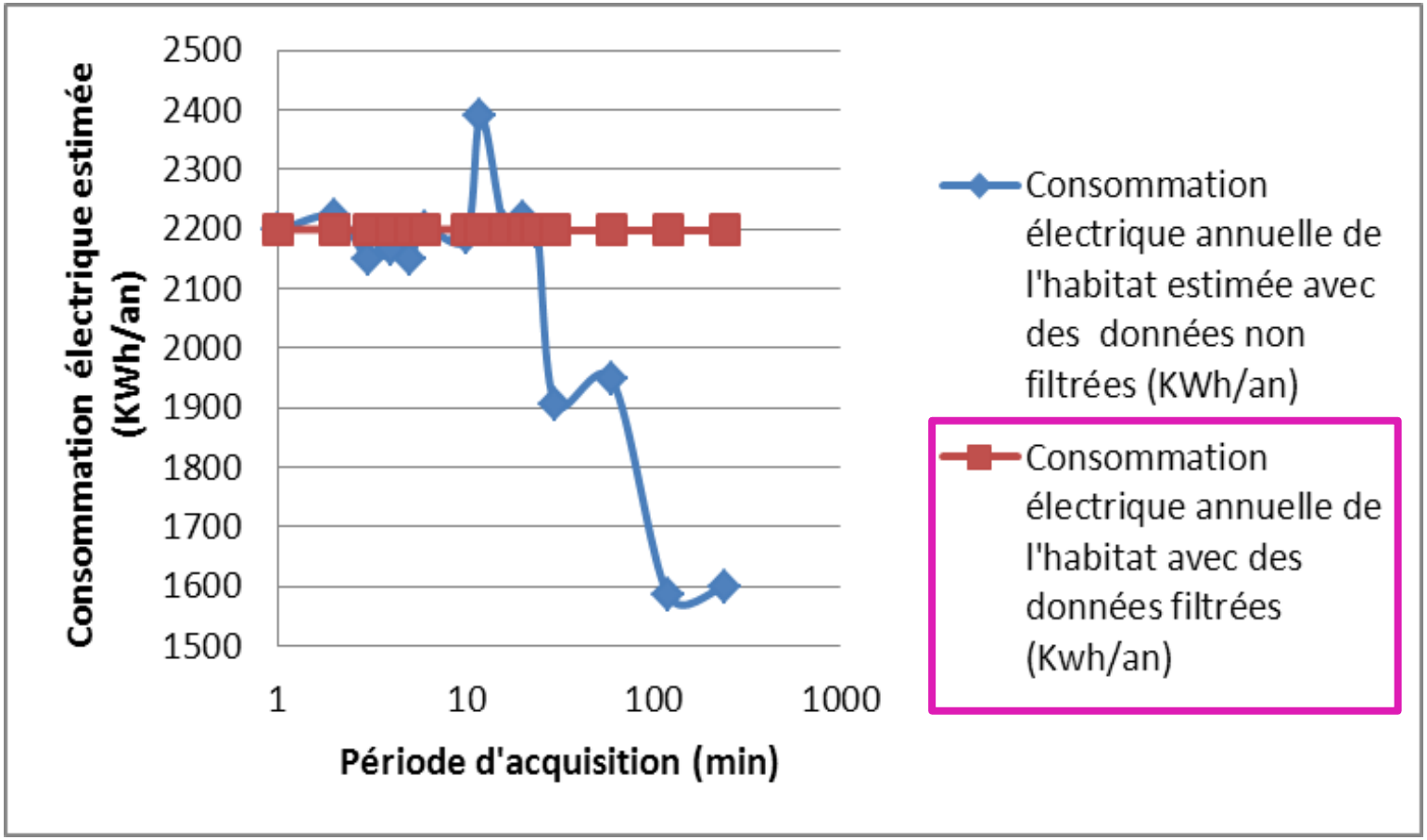


Evolution de l'irradiation solaire estimée en 2008 en fonction de la période d'acquisition de l'irradiance

- **Suffisance d'utiliser des données horaires ou mi- horaires du vent et de l'ensoleillement.**

Influence de la période d'acquisition des données

Cas de la consommation



Evolution de la consommation électrique de l'habitat durant l'année 2009 en fonction de la période d'acquisition de la charge.

- **Obligation d'utiliser des données filtrées de manière à avoir une consommation annuelle égale à celle avec des acquisitions à la minute.**

Développement et Résultats

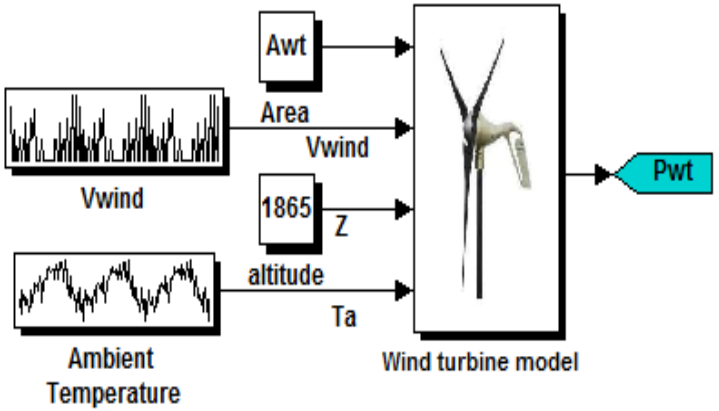
Modélisation et simulation du système hybride

- **Modélisation énergétique du système**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Modélisation économique et environnementale du système**
- **Influence du profil de consommation**

Modélisation énergétique du système

Modèle de l'éolienne

$$Pwg = Cp \times \eta gb \times \eta g \times \frac{1}{2} \times \rho \times Awt \times V^3$$
$$= \eta t \times \frac{1}{2} \times \rho \times Awt \times V^3$$

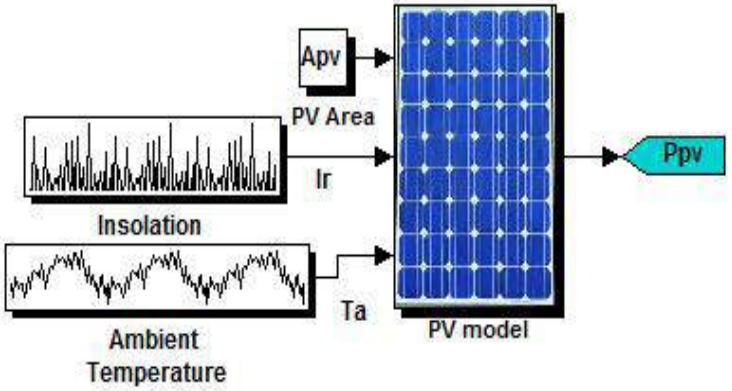


Modèle du générateur photovoltaïque

$$Ppv = \eta pv \times Apv \times Ir$$

ηpv: rendement global du module, il est donné par :

$$\eta pv = \eta r \times \eta pc \times [1 - \beta_t(Tc - TNOCT)]$$



Etages de conversion représentés par des gains

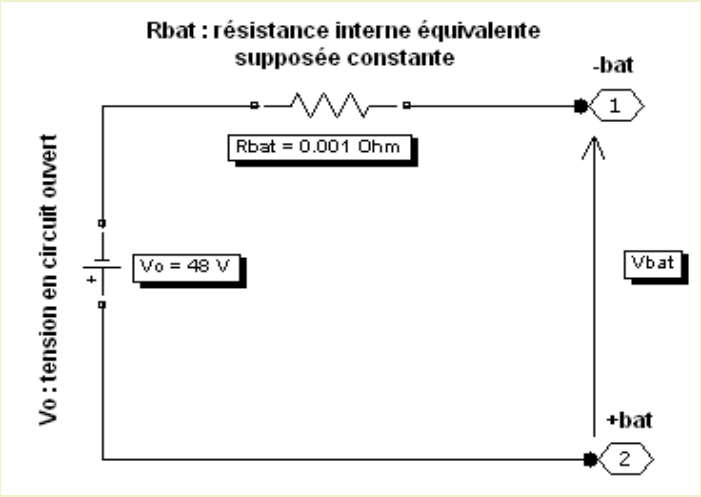
Possibilité d'expliciter leur dépendance par rapport à la puissance transitée :

$$\eta_{conv} = \frac{Pout}{Pin} = \frac{\alpha + \beta \times Pin + \gamma \times Pin^2}{Pin}$$

Modélisation énergétique du système

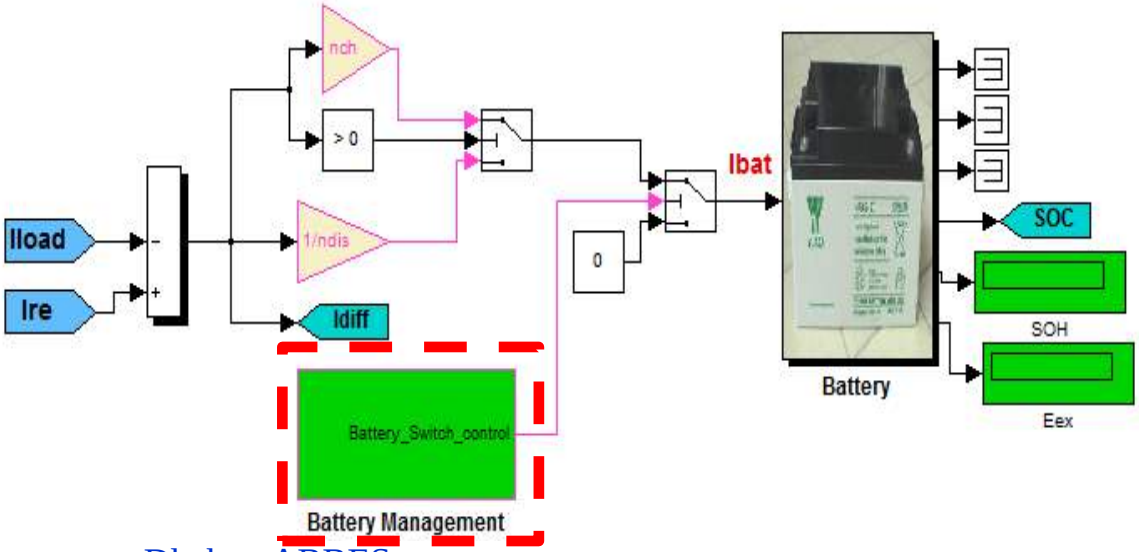
Modèle du banc de stockage (banc de batteries)

- **Modèle de tension**
- **Modèle de vieillissement, détermination du nombre de remplacements : SOH**
- **Modèle énergétique du banc de batteries, établissement de son état de charge :** $SOCmin \leq SOC(t) \leq SOCmax$



Modèle idéal d'une batterie Plomb-acide

Nécessité d'un système de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries.



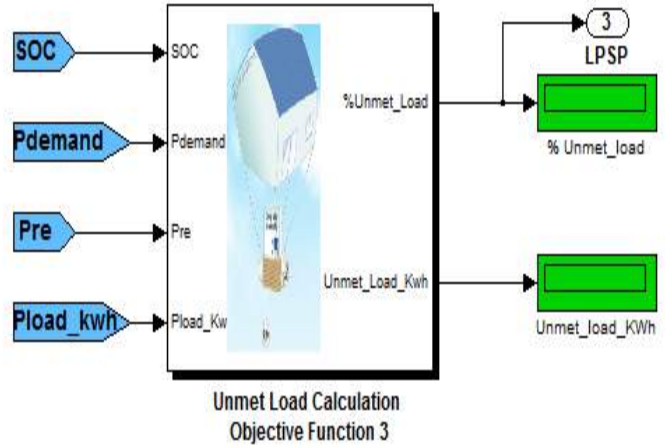
Modélisation énergétique du système

Probabilité d'insatisfaction de la demande (en anglais : « Loss of Power Supply Probability LPSP »

$$LPSP[\%] \ : \ Pr\{Pre \leq Pdemand \ et \ SOC(t) \leq SOCmin \ \}$$

$$LPSP(\%) = \frac{\sum_{\Delta t=1}^{T} DE(\Delta t, Apv, Awt, Cn) \times \Delta t}{\sum_{\Delta t=1}^{T} Pload(\Delta t) \times \Delta t}$$

$$DE(\Delta t, Apv, Awt, Cn) = |Pre(\Delta t, Apv, Awt, Cn) - Pdemand(\Delta t)|$$

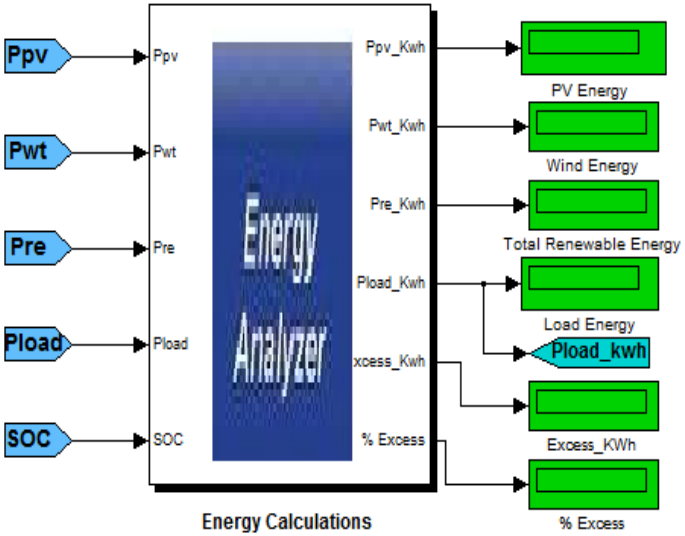


Probabilité d'excès de production

$$EP[\%] : \ Pr\{Pre \ \geq \ Pdemand \ et \ SOC(t) \geq SOCmax \}$$

$$\mathrm{E}P(\%) = \frac{\sum_{\Delta t=1}^{T} E(\Delta t, Apv, Awt, Cn) \times \Delta t}{\sum_{\Delta t=1}^{T} Pload(\Delta t) \times \Delta t}$$

$$E(\Delta t, Apv, Awt, Cn) = Pre(\Delta t, Apv, Awt, Cn) - Pdemand(\Delta t)$$

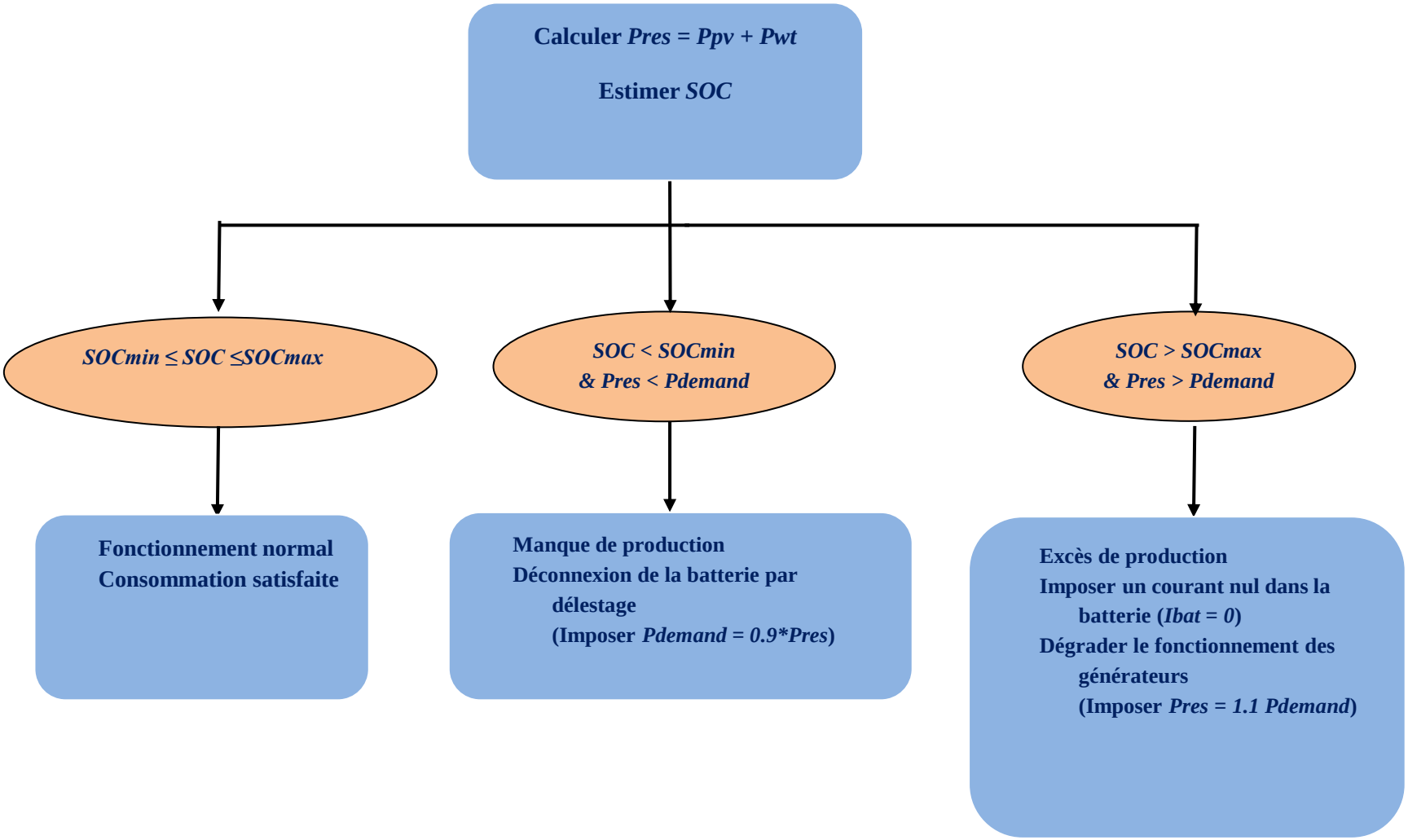


Développement et Résultats

Modélisation et simulation du système hybride

- Modélisation énergétique du système
- Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries
- Modélisation économique et environnementale du système
- Influence du profil de consommation

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

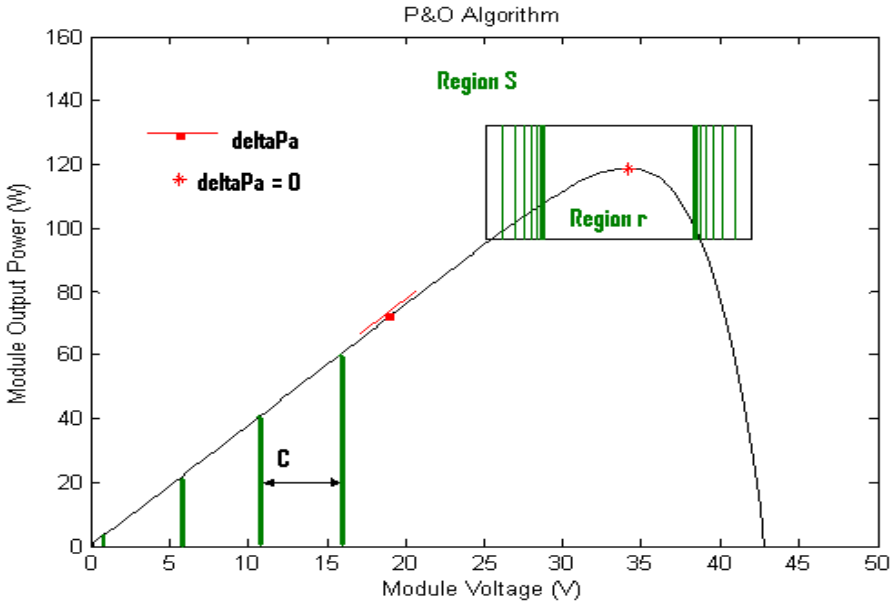


Organigramme de la méthode de supervision proposée

Algorithmes de maximisation de la puissance

Cas du système photovoltaïque :

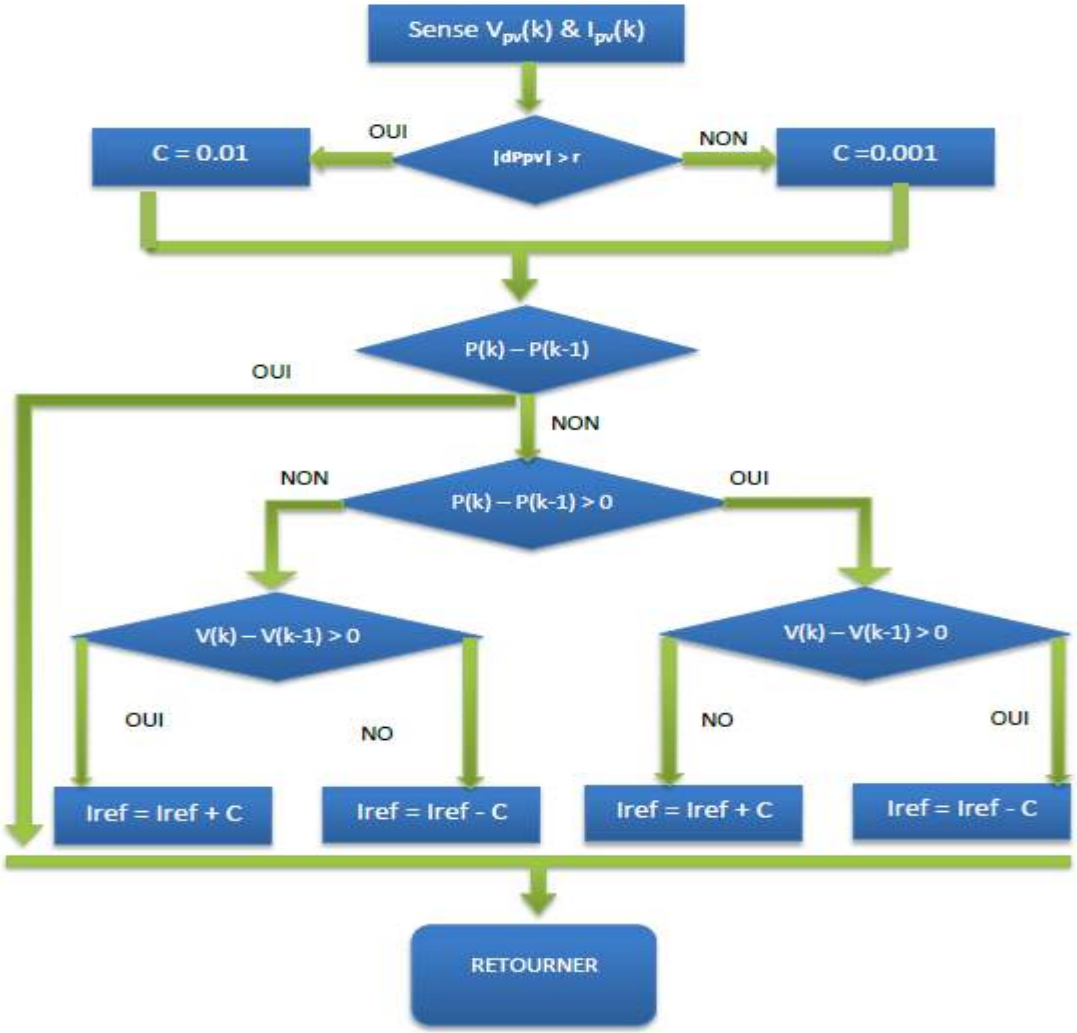
Dans notre cas, l'algorithme retenu pour la mise en œuvre est un P&O amélioré avec un pas adaptatif. Le principe fondamental de celui-ci est la variation du pas d'incrémentation de manière à converger plus rapidement vers le point optimal (MPP) tout en réduisant les oscillations autour de ce point. En effet, afin de converger rapidement vers le MPP, nous réduisons, le pas d'incrémentation 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 :

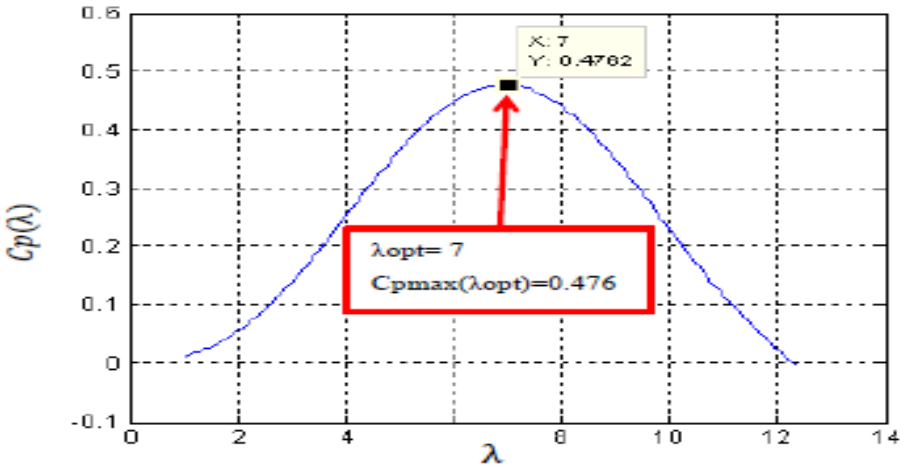
Dans le cas des éoliennes, les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω réf) calculée pour maximiser la puissance extraite.

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

La courbe spécifique Cp (λ) 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 λopt et le coefficient de puissance maximal Cpmax . La référence de la vitesse de la turbine doit donc correspondre à cette valeur optimale. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$\Omega ref = \frac{\lambda \mathbf{opt} \,.\, V}{R} \times m$$

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



Courbe caracteristique de l'éolienne $Cp(\lambda)$

Développement et Résultats

Modélisation et simulation du système hybride

- **Modélisation énergétique du système**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Modélisation économique et environnementale du système**
- **Influence du profil de consommation**

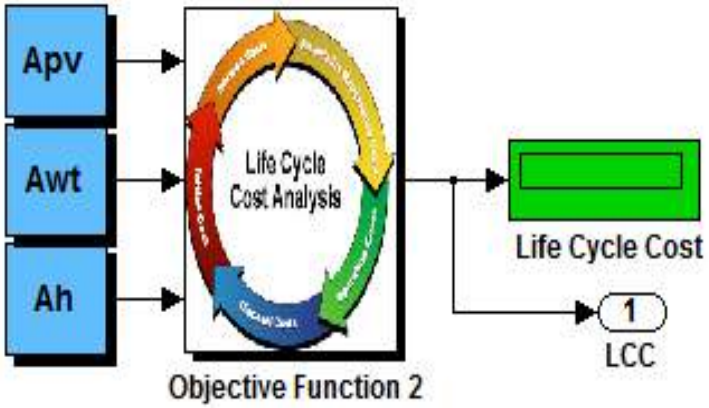
Modélisation économique et environnementale du système

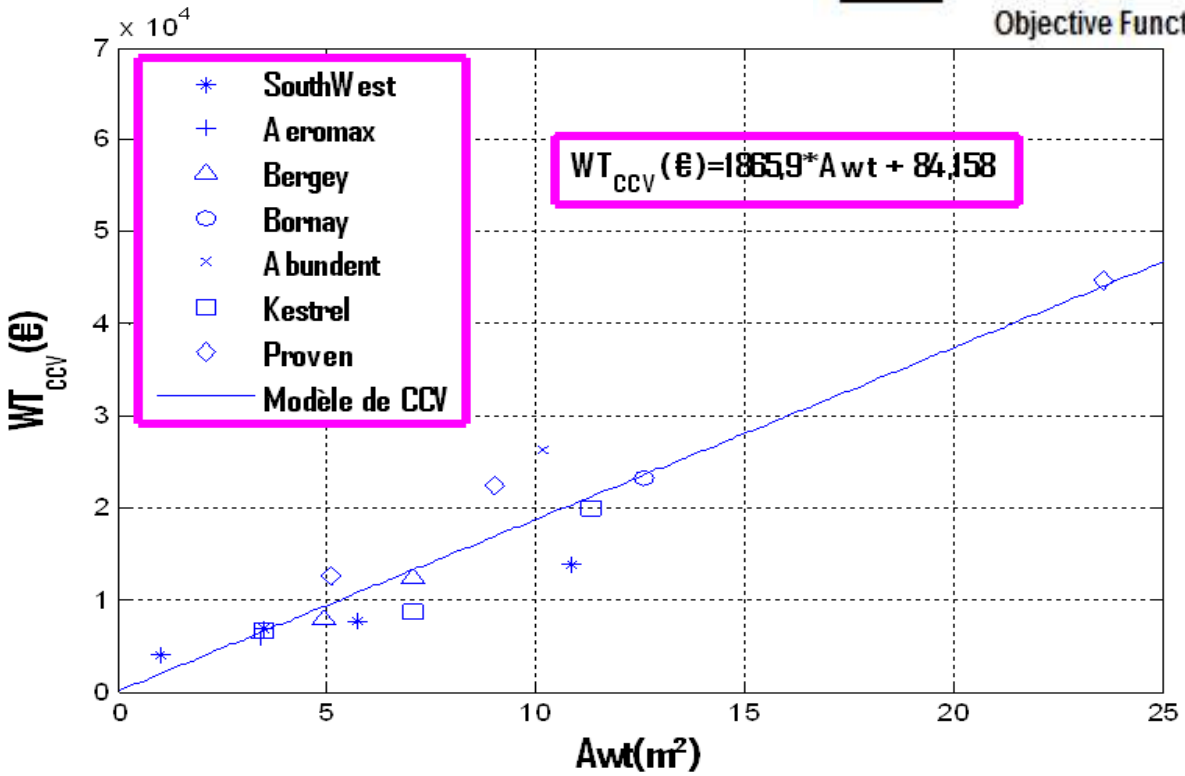
Evaluation économique

- **Concept du coût du cycle de vie (CCV)**

(en anglais : Life Cycle Cost ou LCC) [€]

$$CCV = Co + Cinst + CCmaint + CCreplace$$

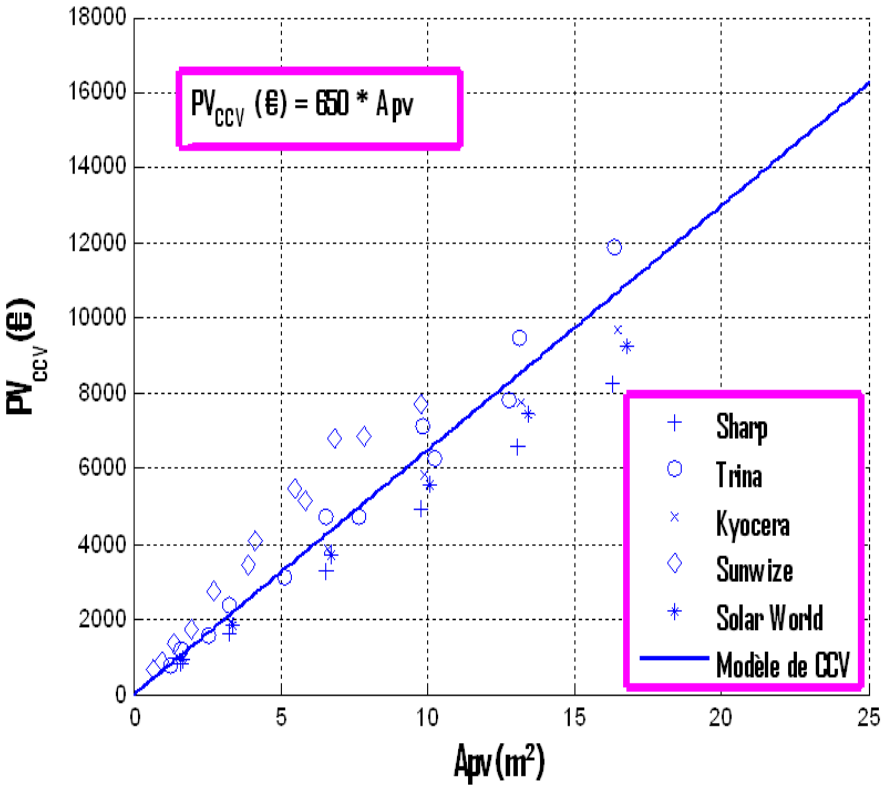




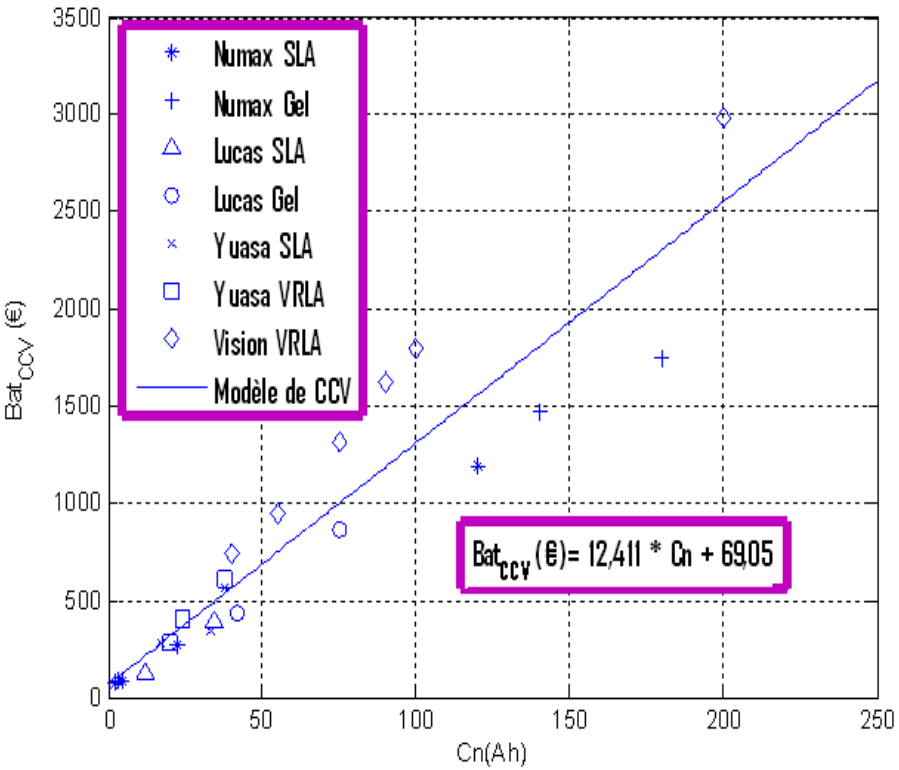
Evolution du coût du cycle de vie des éoliennes choisies (WT_{CCV}) en fonction de la surface balayée par leurs rotors (*Awt*)

Modélisation économique et environnementale du système

Evaluation économique



Evolution du coût du cycle de vie de différentes installations photovoltaïques en fonction de la surface des panneaux

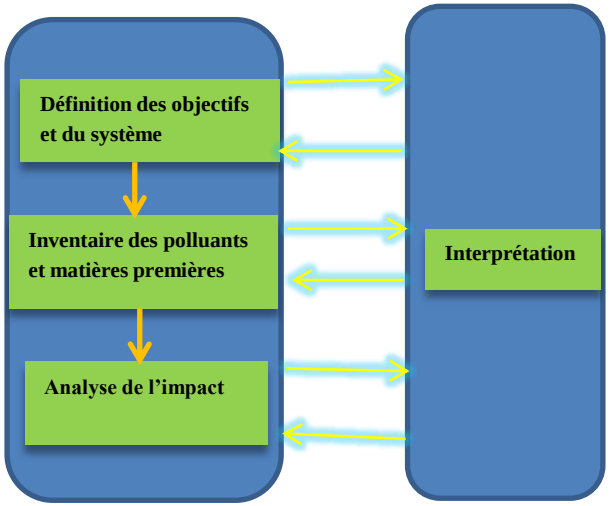


Evolution du coût du cycle de vie de différentes batteries en fonction de leur capacité nominale

Modélisation économique et environnementale du système

Evaluation environnementale

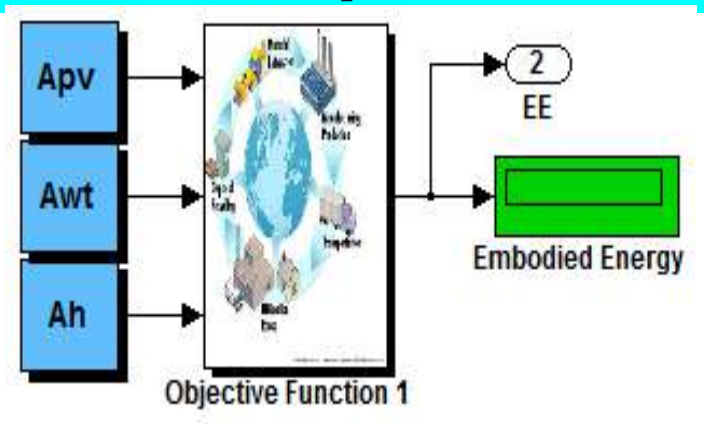
- **Concept de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (en anglais : Life Cycle Analysis)**



Phases de l'analyse du cycle de vie

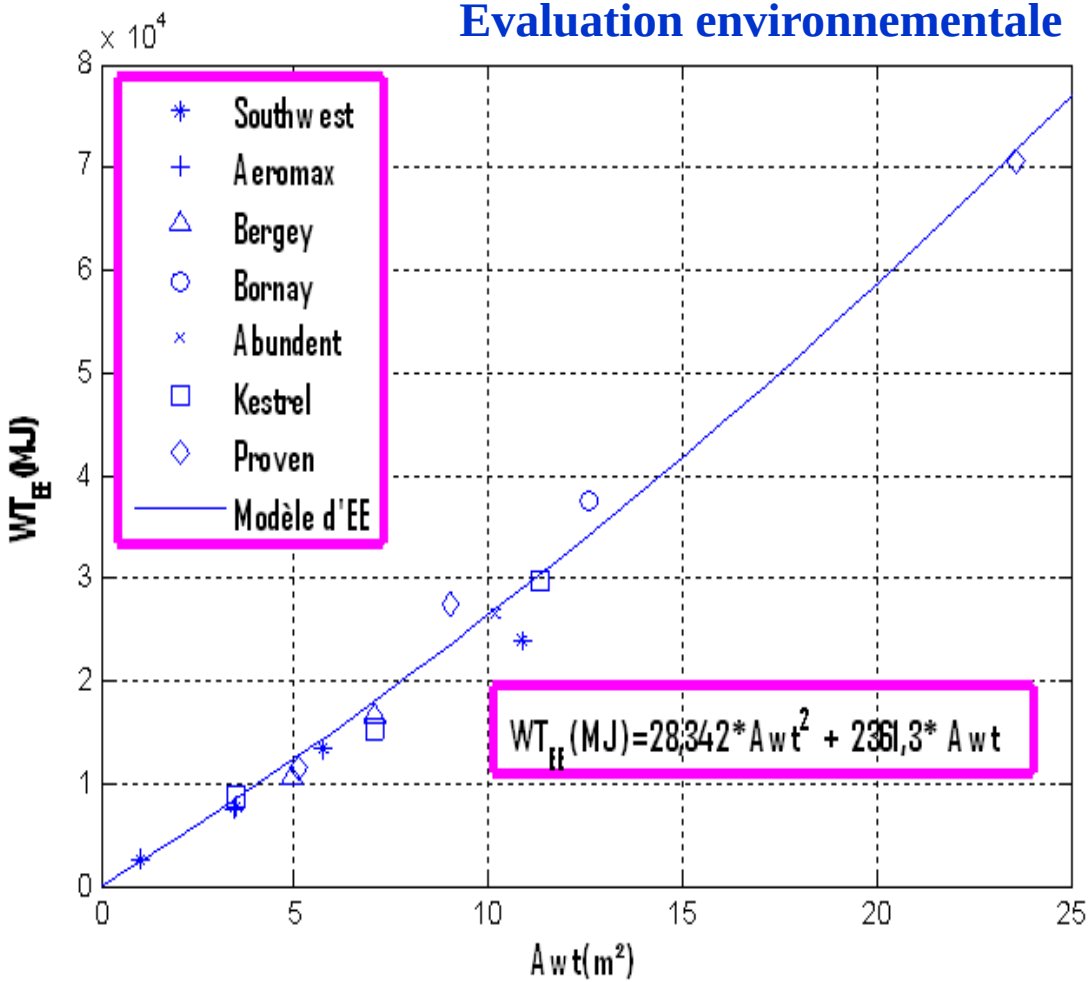
- **Paramètre environnemental utilisé dans le modèle :**

Energie primaire contenue ou intrinsèque «Embodied Energy : EE» [MJ] ou [KWh]



Modélisation économique et environnementale du système

Evaluation environnementale



$$PV_{EE}(MJ) = 3379 \times Apv$$

Cas des panneaux photovoltaïques

$$Bat_{EE}(MJ) = 60 \times Cn$$

Cas des batteries

Evolution de l'énergie primaire incarnée par les éoliennes choisies (WT_{EE}) en fonction de la surface balayée par leurs rotors (*Awt*)

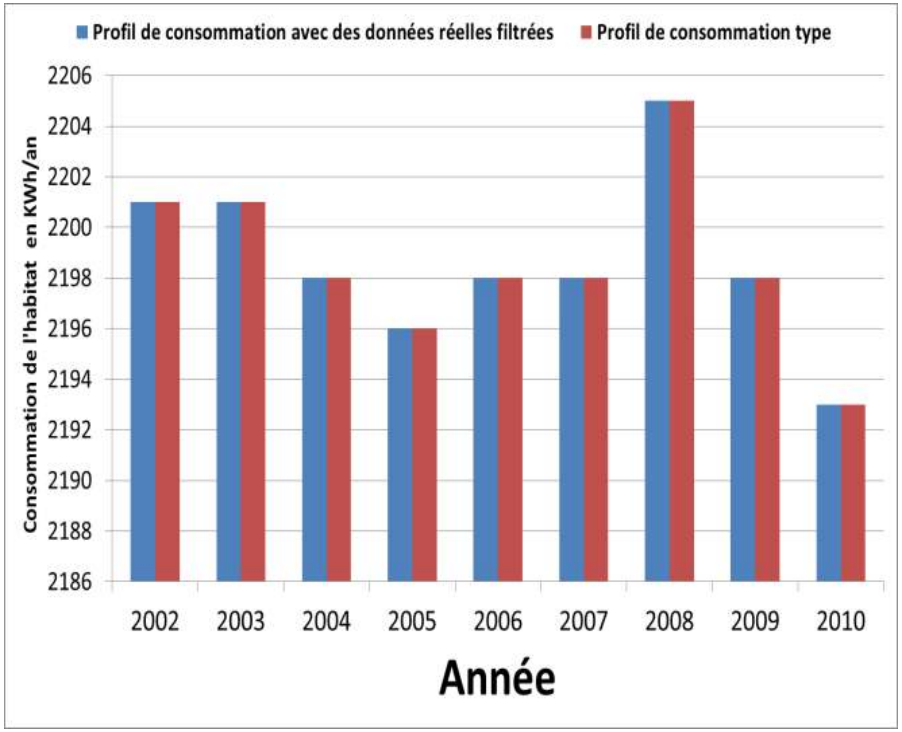
Développement et Résultats

Modélisation et simulation du système hybride

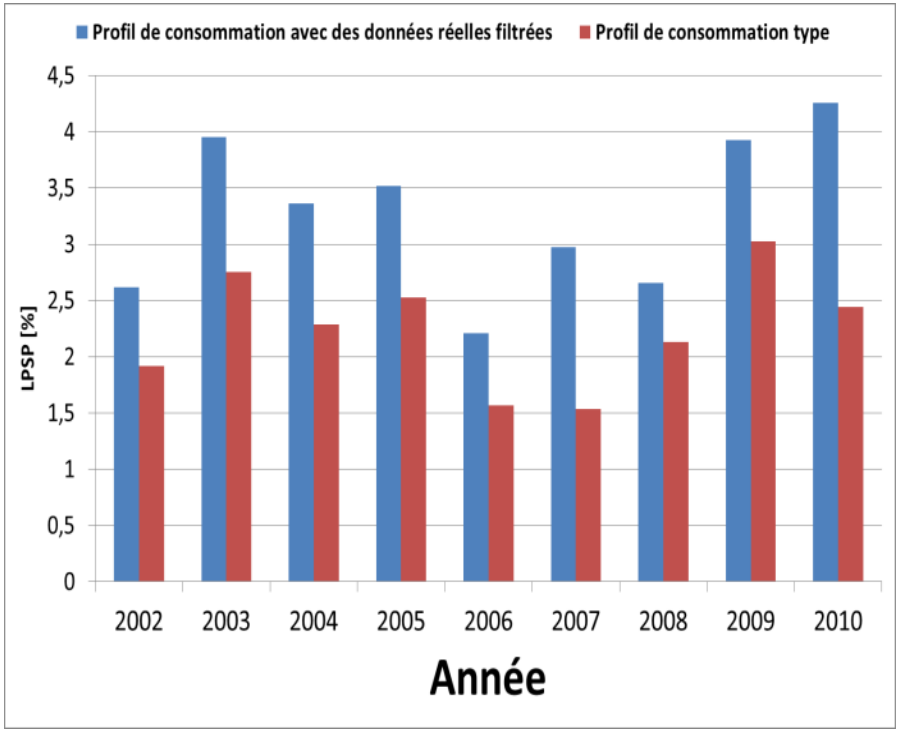
- **Modélisation énergétique du système**
- **Développement d'une stratégie de gestion de l'énergie et de contrôle de l'état de charge des batteries**
- **Modélisation économique et environnementale du système**
- **Influence du profil de consommation**

Influence du profil de consommation

Résultats de simulation d'un système hybride éolien photovoltaïque avec batteries pour différents profils de consommation



Consommation de l'habitat en KWh/an



LPSP [%]

- **La forme du profil de consommation influe sur le dimensionnement du système hybride.**
- **Avantage d'utiliser un simulateur dynamique dans l'étude des systèmes d'énergies renouvelables par rapport à d'autres travaux se basant sur des calculs d'énergies annuelles.**

Développement et Résultats

Optimisation du dimensionnement du système hybride

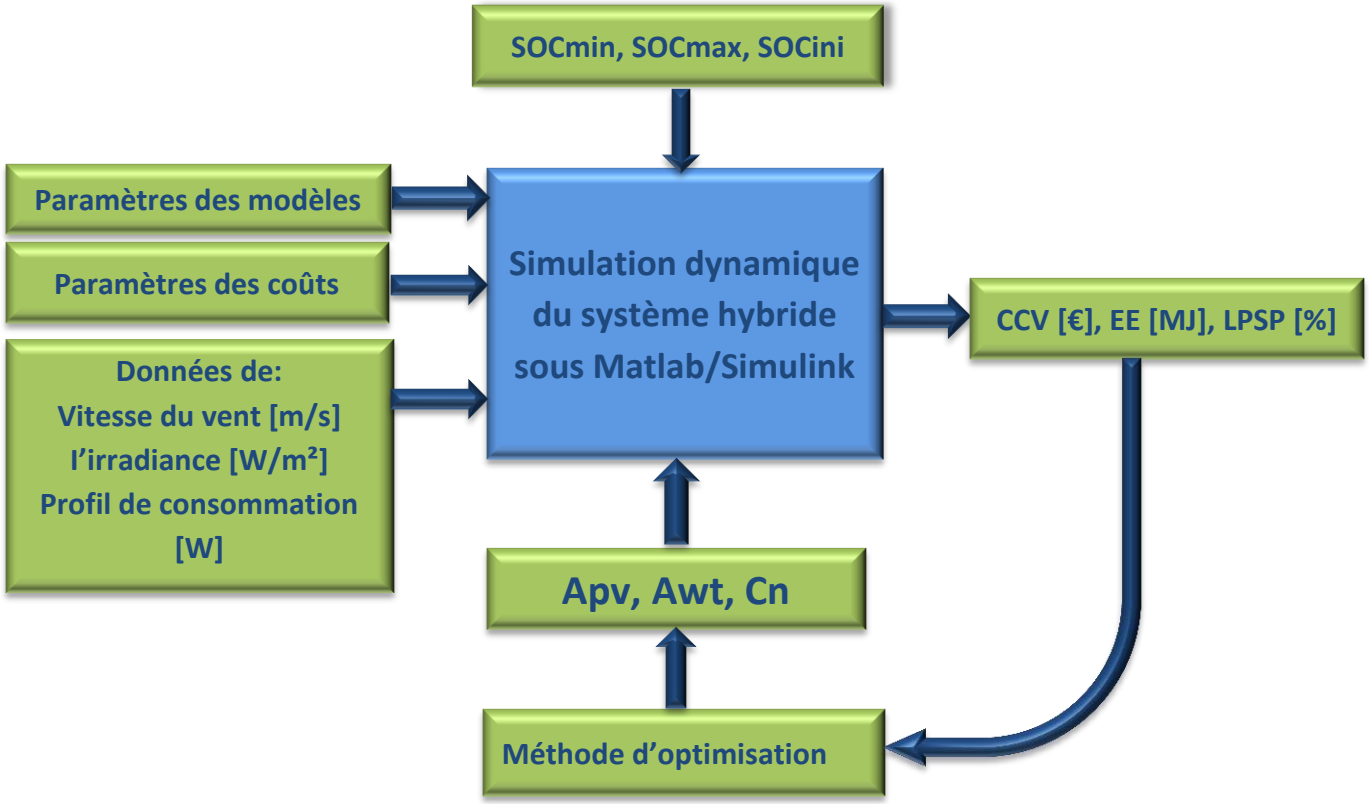
- **Principe**
- **Formulation du problème**
- **Résultats d'optimisation et interprétations**

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 :



Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

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 ⟶ 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 :

$$\mathrm{Apv}_{\min} \leq \mathrm{Apv} \leq \mathrm{Apv}_{\max}$$

$$\mathrm{Awt}_{\min} \leq \mathrm{Awt} \leq \mathrm{Awt}_{\max}$$

$$\mathrm{Cn}_{\min} \leq \mathrm{Awt} \leq \mathrm{Cn}_{\max}$$

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.

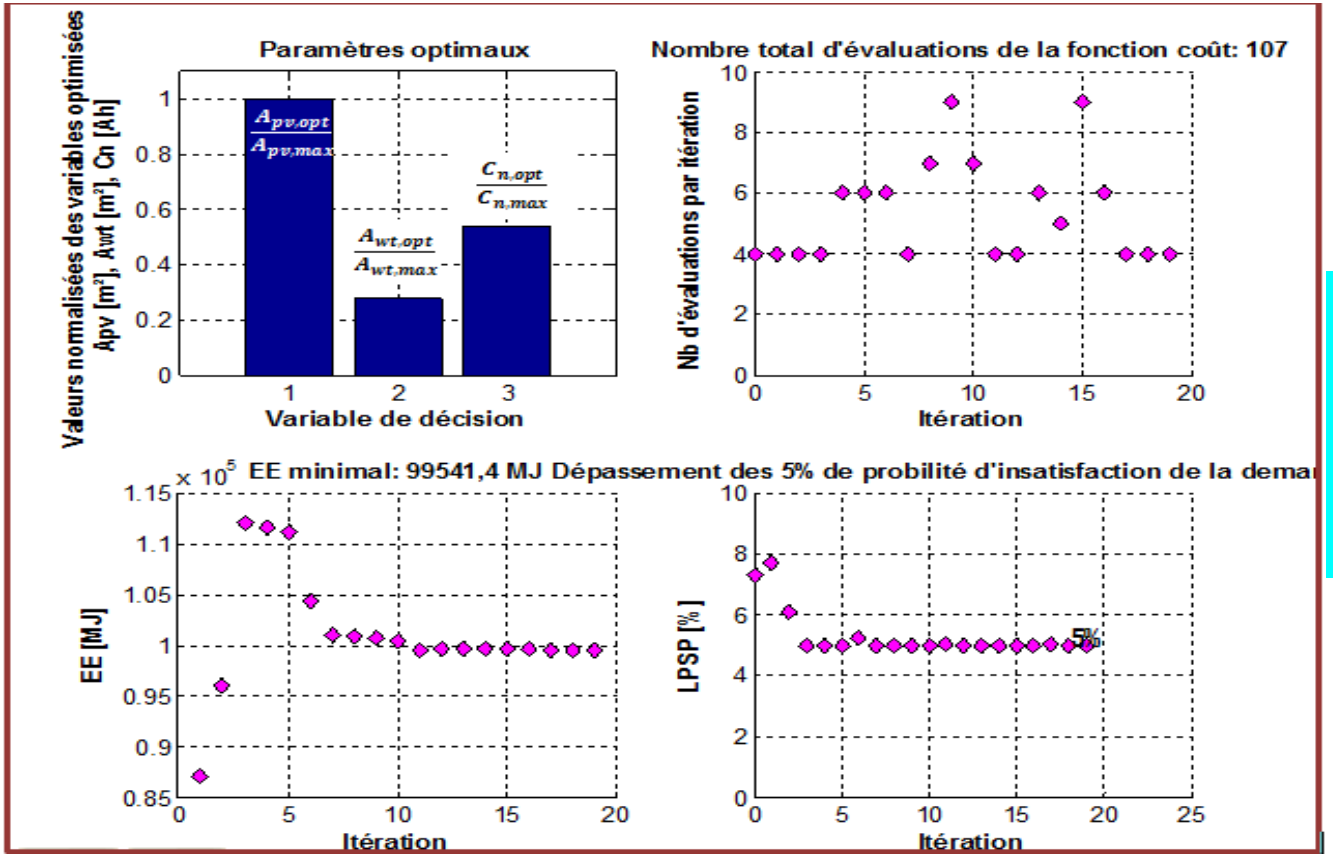
Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Résultats d'optimisation et interprétations

Cas d'une optimisation mono-objective selon l'approche écologique

$EE_{min}[MJ] = 99541,4MJ$

LPSPmax = 5%



Résultats d'optimisation dans le cas d'une optimisation mono-objective selon l'approche écologique

Le dimensionnement optimal du système est obtenu par :

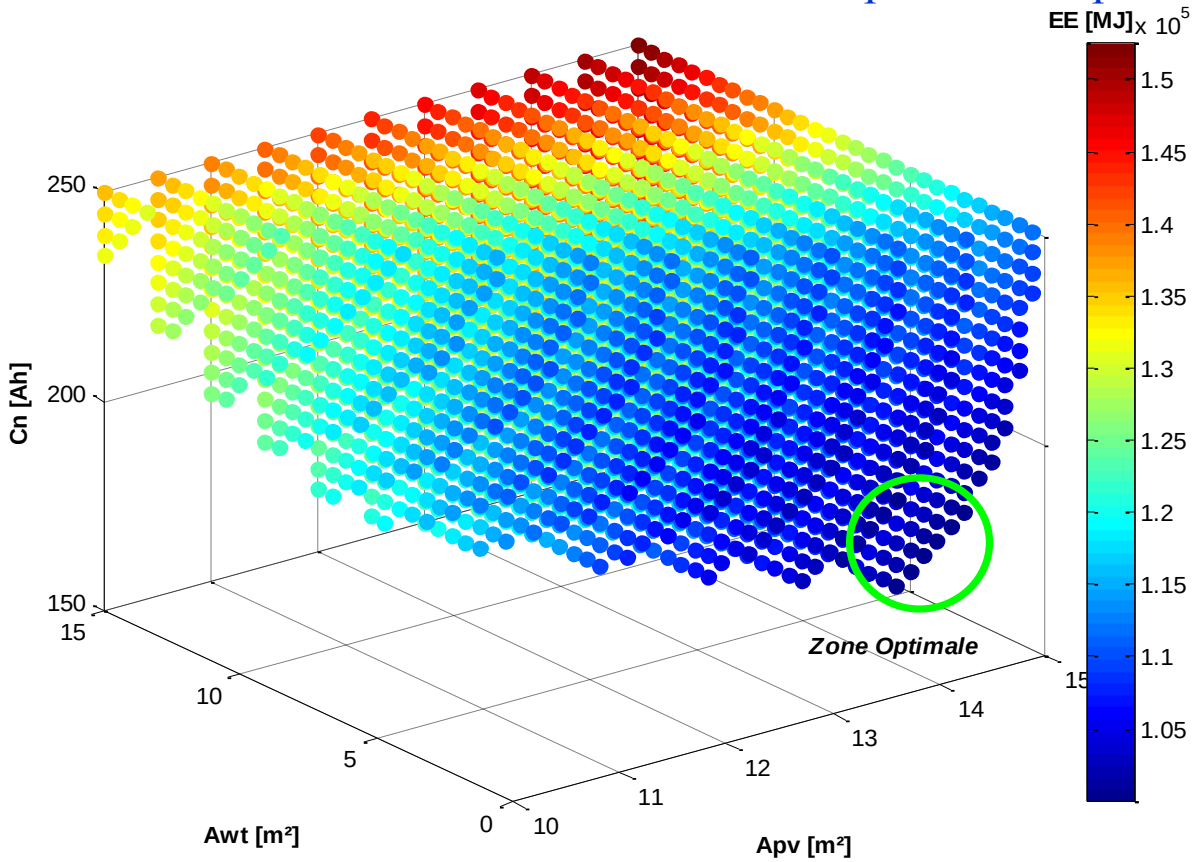
- $Apv_{opt}[m^2] = 15\ m^2$,
- $Awt_{opt}[m^2] = 4,115\ m^2$,
- $Cn_{opt}[Ah] = 161,081\ Ah$.

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Résultats d'optimisation et interprétations

Cas d'une optimisation mono-objective selon l'approche écologique

Validation de la fiabilité des résultats d'optimisation par une approche systématique



$$EE_{min}[MJ] = 99541,4MJ$$

LPSPmax = 5%

Le dimensionnement optimal du système est obtenu par :

- $Apv_{opt}[m^2] = 15\ m^2$,
- $Awt_{opt}[m^2] = 4,115\ m^2$,
- $Cn_{opt}[Ah] = 161,081\ Ah$.

Estimation de l'énergie primaire incarnée dans le système hybride EE(MJ) en fonction de *Apv*[m²],*Awt*[m²], *Cn*[Ah]

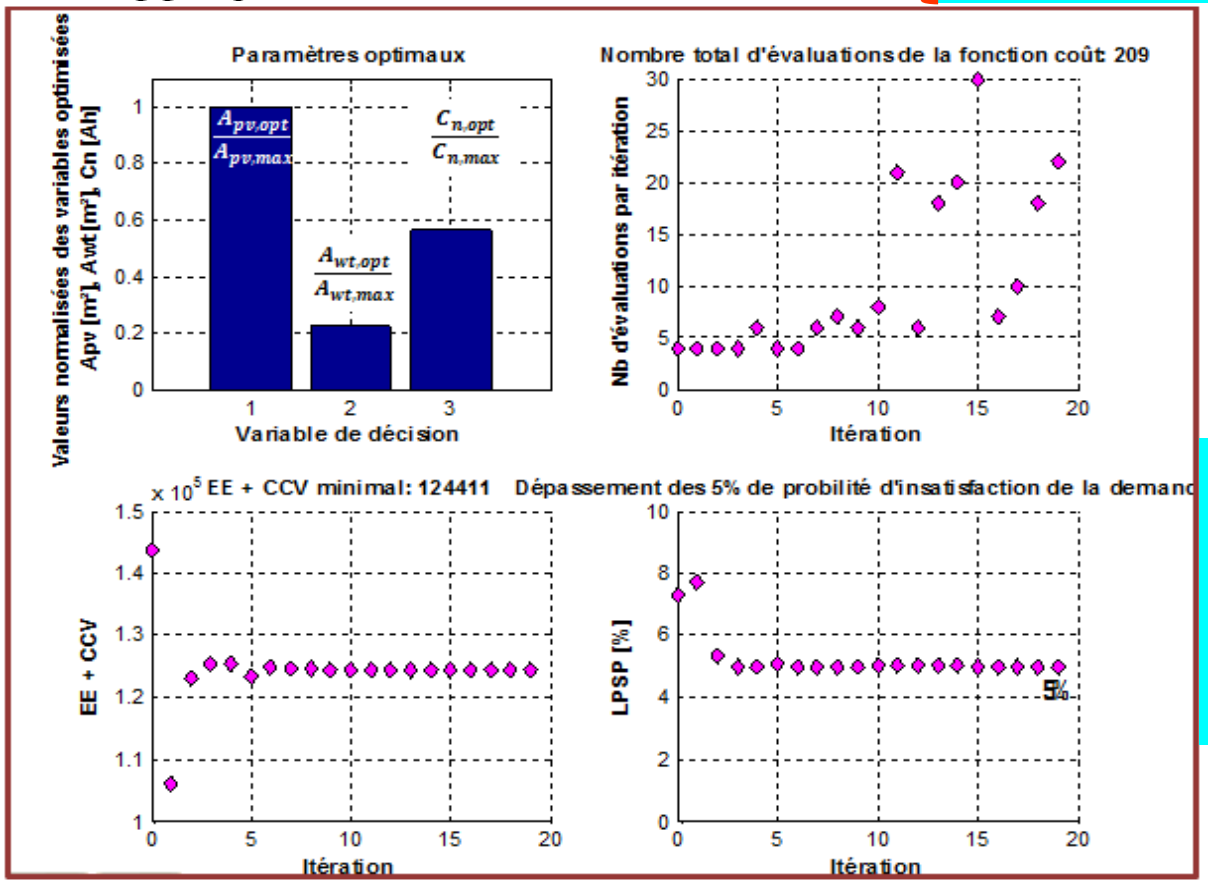
Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Résultats d'optimisation et interprétations

Cas d'une optimisation multi-objective

- En appliquant la méthode scalaire

$$CCV_{min}[€] = 24814€$$
$$EE_{min}[MJ] = 99597,4MJ$$



LPSPmax = 5%

Le dimensionnement optimal du système est obtenu par :

- $Apv_{opt}[m^2] = 15\ m^2$,
- $Awt_{opt}[m^2] = 3,378\ m^2$,
- $Cn_{opt}[Ah] = 169,217\ Ah$.

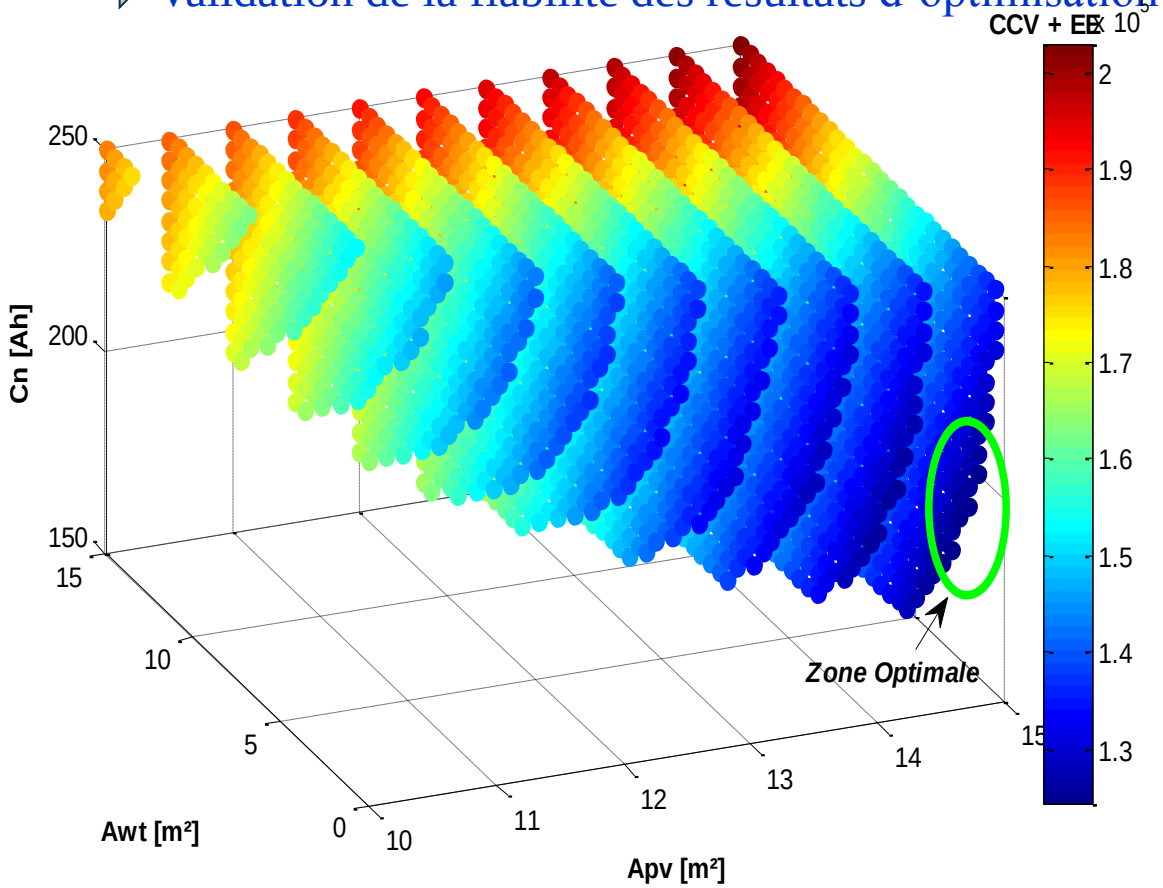
Résultats d'optimisation dans le cas d'une optimisation multi-objective obtenus par application de la méthode scalaire

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

Résultats d'optimisation et interprétations

Cas d'une optimisation multi-objective

Validation de la fiabilité des résultats d'optimisation par une approche systématique



Estimation de la somme (EE + CCV)
en fonction de *Apv* [m²], *Awt*[m²], *Cn*[Ah]

$$CCV_{min}[€] = 24814€$$

$$EE_{min}[MJ] = 99597,4MJ$$

LPSPmax = 5%

Le dimensionnement optimal du système est obtenu par :

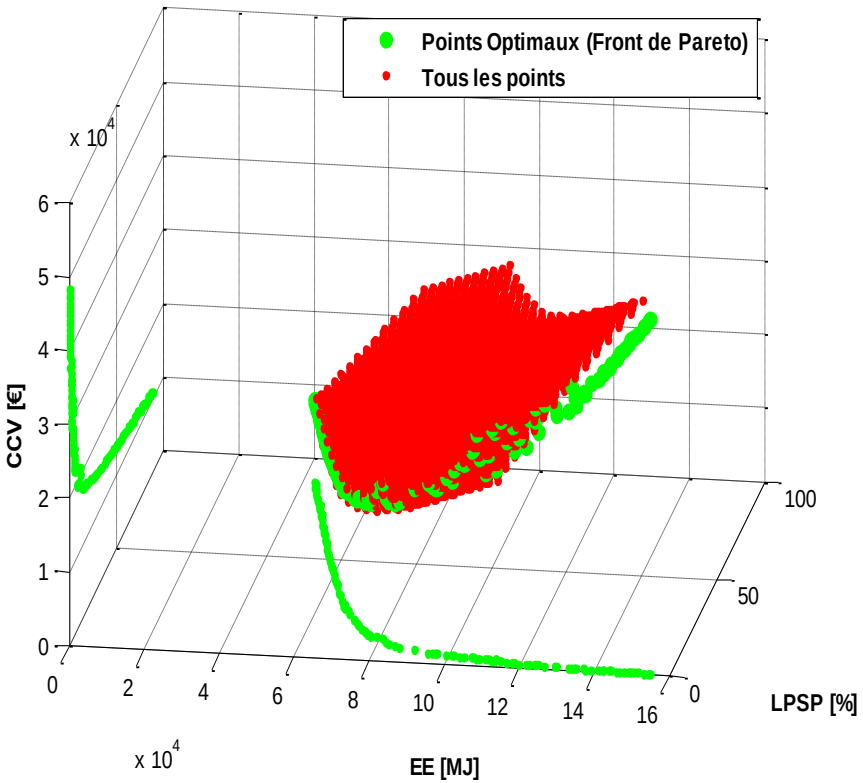
- $Apv_{opt}[m^2] = 15\ m^2$,
- $Awt_{opt}[m^2] = 3,378\ m^2$,
- $Cn_{opt}[Ah] = 169,217\ Ah$.

Optimisation du dimensionnement d'un système hybride

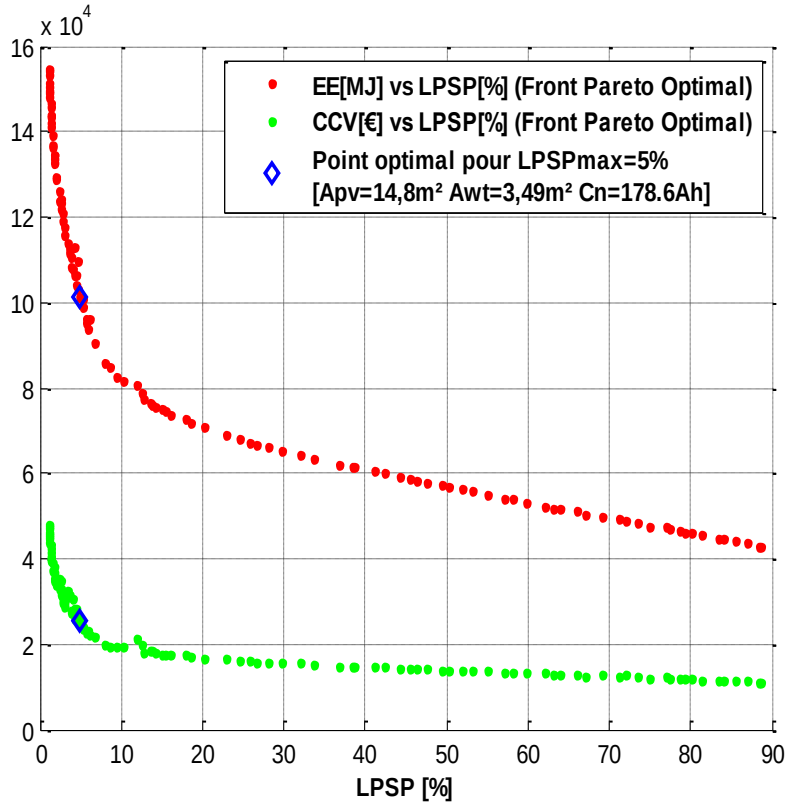
Résultats d'optimisation et interprétations

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
+ Rapide	- Lente
- Une seule solution	+ Plusieurs solutions (Fronts de Pareto)
- Fixation d'un LPSPmax	+ Ne pas avoir besoin de fixer un LPSPmax

→ **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 ?**

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 m²,
- **une éolienne de type Aeromax Engineering** (Lacota S, SC) (900 W à 13 m/s) de 3,43 m² de surface,
- **4 batteries en série de type Numax Gel SLG180-12 ,12V/ 180Ah** VRLA à cyclage profond

Récapitulatif de la 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

Conclusions

- Une contribution significative à l'analyse des ressources en énergie renouvelable,
- Obtention de lois comportementales pour évaluer les coûts des systèmes éoliens et photovoltaïques de petite puissance,
- Une méthode originale pour la conception des systèmes hybrides,
- Une approche pertinente visant à optimiser simultanément les trois critères : le coût sur cycle de vie, la probabilité d'insatisfaction et l'énergie primaire,
- Un nombre de scénarios de simulation élevé validant la méthode d'optimisation proposée,
- Validation d'une stratégie de supervision différente sur un banc d'essai expérimental.

→ Une étude qui va de la phase de conception jusqu'à la mise en œuvre,

→ Un sujet susceptible de développements ultérieurs importants, dans une thématique de grande actualité.

Perspectives

- Possibilité de développer un outil automatisant la méthodologie proposée avec des interfaces conviviales pour l'utilisateur,
- Des commandes plus élaborée des convertisseurs,
- Test d'autres architectures,
- Ajout d'autres sources (Générateur diesel…),
- Ajout de supercapacités.

Plan général

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Exemple de projets et applications**

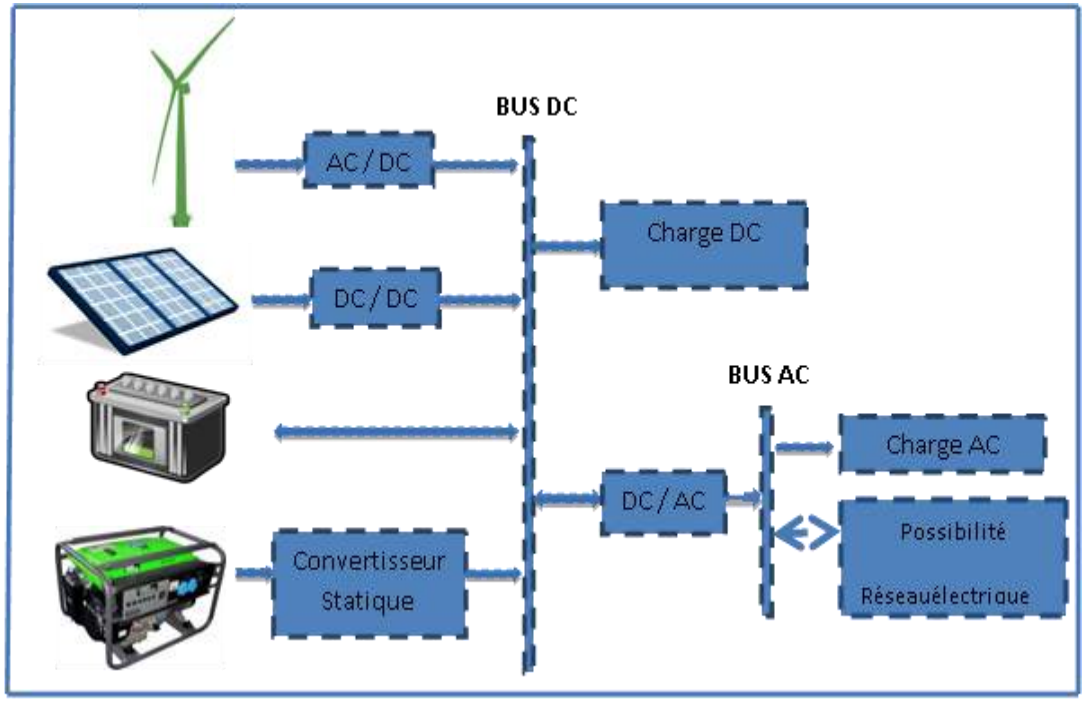
  I- Optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque avec batteries

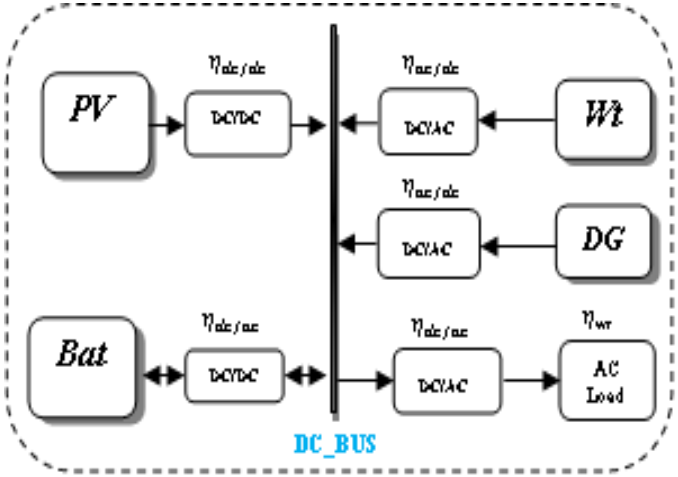
  II- Dimensionnement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque avec groupe diesel et batteries) pour une électrification utilisant une simulation dynamique

  III- Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)
- **Publications**

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

Travaux de Thèse de Toufik Ayadi (Avec LIAS Poitiers)





Configuration système multi-source

Modélisation du générateur diesel

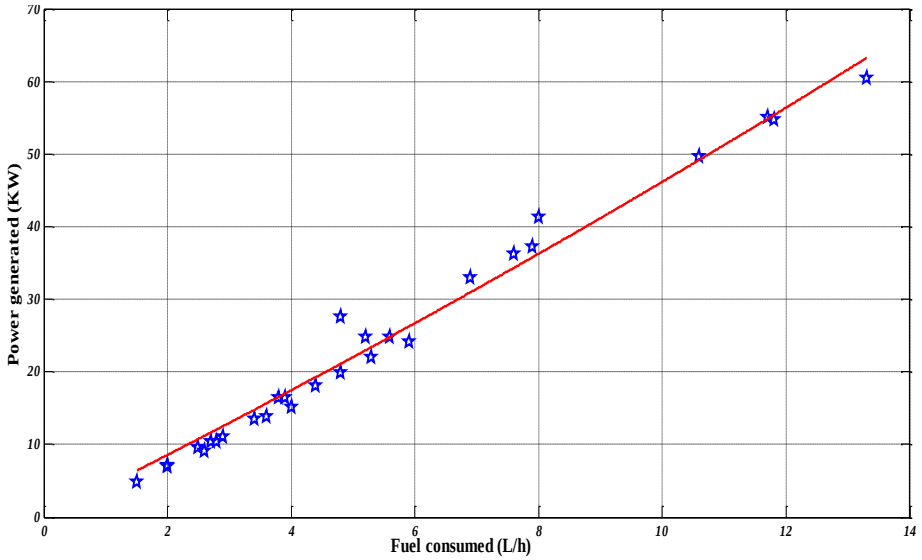
Le modèle de puissance du générateur diesel en fonction du carburant est présenté par l'expression suivante :

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

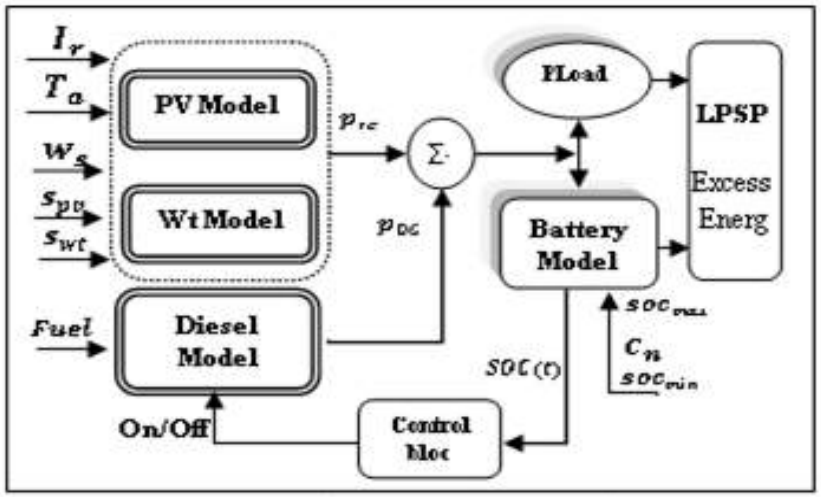
Où

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 ΔP (t).

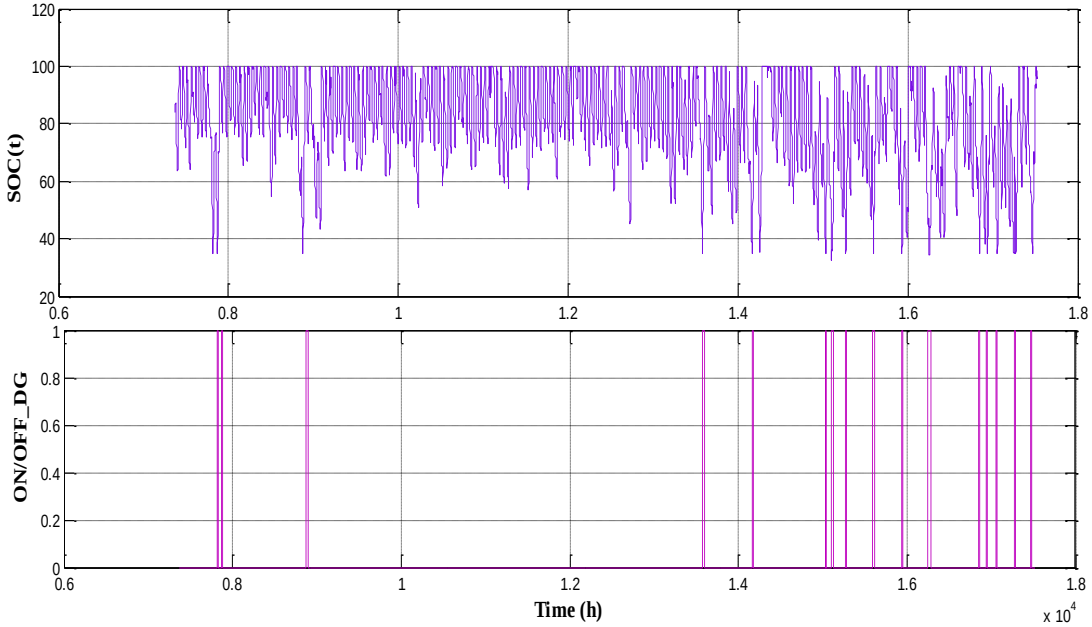
Nous distinguons deux cas:

- Dans le cas où ΔP (t) ≥ 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 *SOCDmin=35% et SOCDmax=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

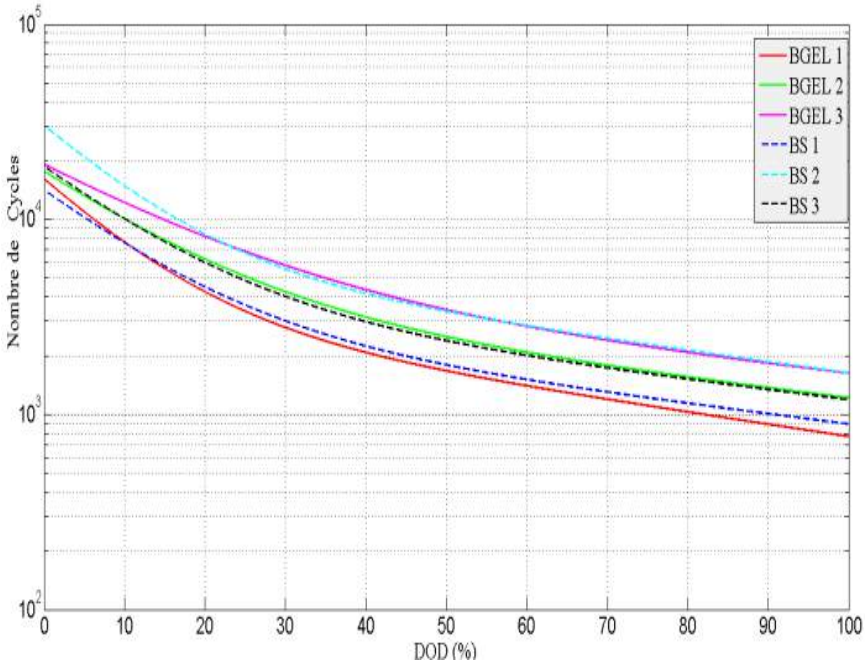


Opération du générateur diesel en fonction de l'état de charge des batteries.

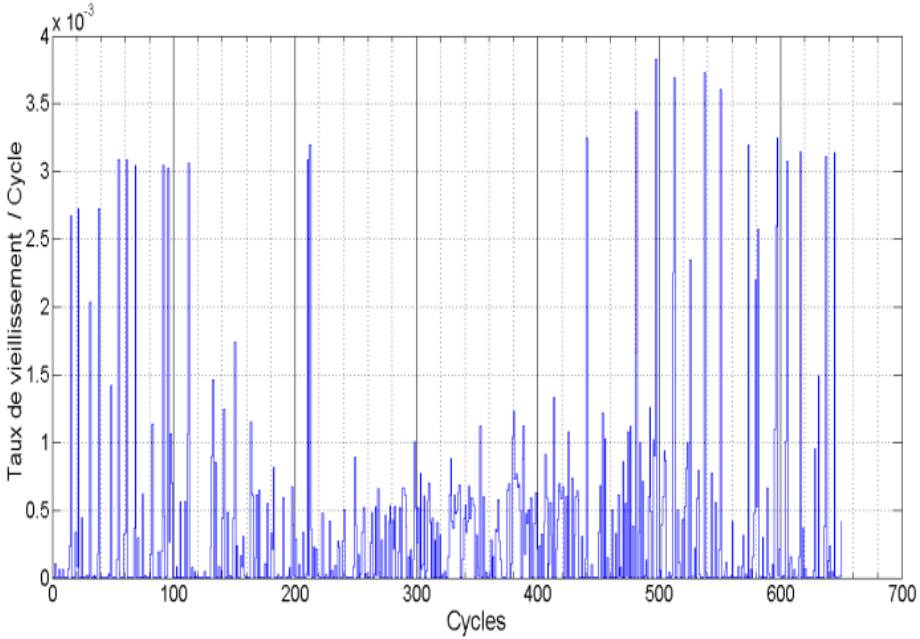
Le vieillissement est défini à partir de la caractéristique du cycle de vie de la batterie ($N_{c(DOD)}$). Par exemple, un *DOD=100%* correspond à 770 cycles pour la durée de vie de la batterie. C'est à dire, le vieillissement pour un cycle avec un *DOD*=100% correspond à 1/770 de vie. Ainsi, un taux de vieillissement par cycle se calcule en fonction du *DOD* ($T_{v/C(DOD)}$) en étant l'inverse de ($N_{c(DOD)}$). La relation s'écrit sous la forme suivante :

$$T_{V/C(DOD)} = 1/N_{C(DOD)}$$

Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources



Variation de nombre de cycle en fonction de DOD

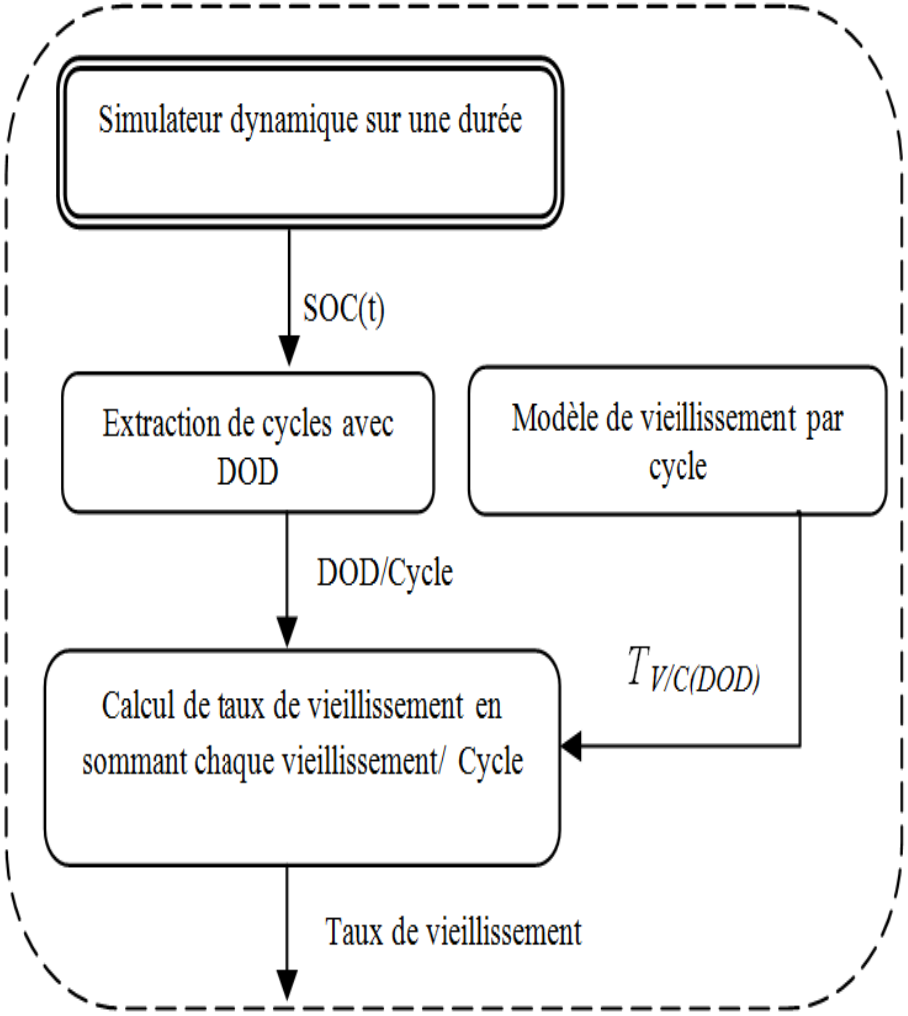


Evolution du taux de vieillissement en fonction des cycles

Pour calculer le vieillissement sur une période de fonctionnement d'un an, il faut faire la somme des vieillissements de chaque cycle déterminé par l'algorithme Rainflow en prenant en compte la profondeur de décharge. Ainsi, La formule du taux de vieillissement sur une durée donnée se met sous la forme suivante :

$$T_v = \sum_{Nc=1}^{651} \left(T_{V/C(DOD)}\right)$$

Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources



Modèle de vieillissement de la batterie

DOD (%)	20	30	45	60	70
$T_{v(DOD)/an}$ (%)	9.28	9.52	9.83	9.96	10.30
Durée de vie (année)	10.8	10.5	10.17	10	9.7
Nombre de M/A du GD	195	79	40	26	21
Nombre de cycles	785	691	668	656	651

Taux de vieillissement pour plusieurs profondeurs de décharge avec une capacité *C*=220 Ah

Plan général

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Exemple de projets et applications**

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

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

III- Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides).

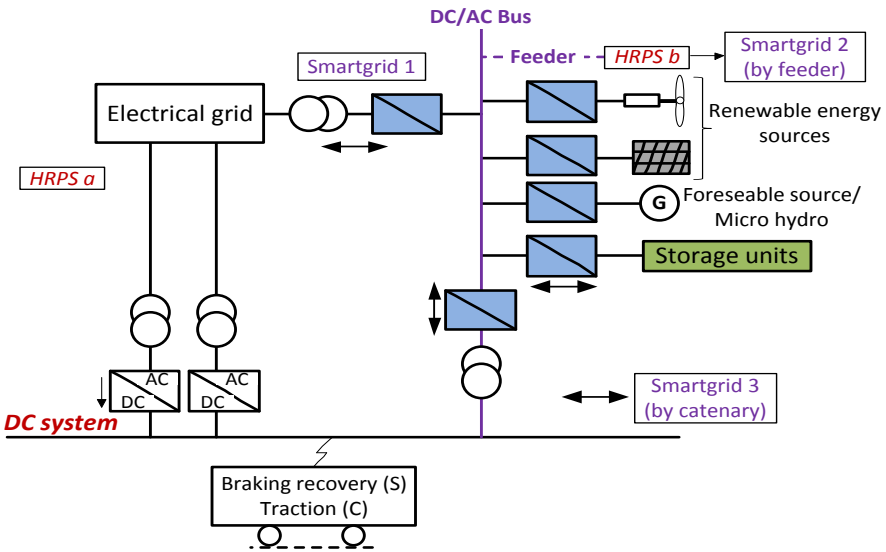
- **Publications**

Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides)

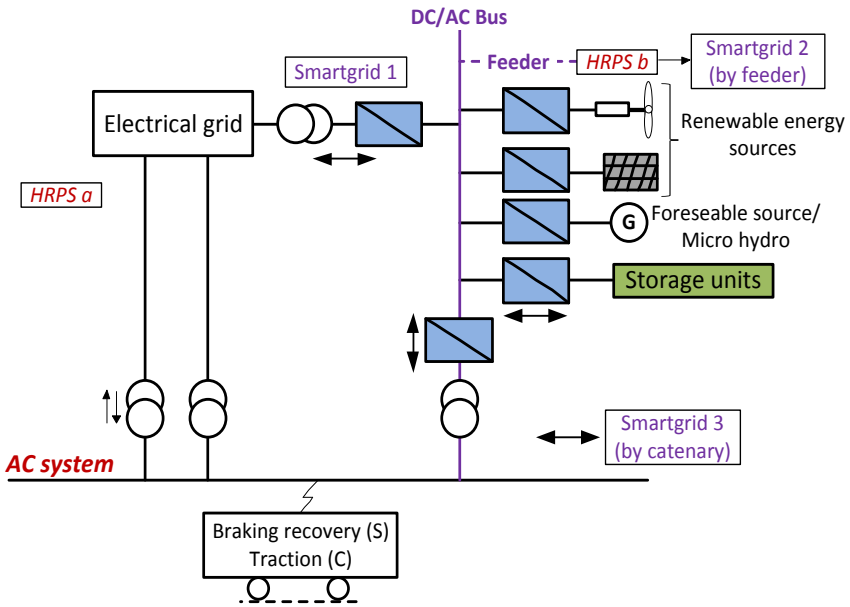
(Travaux de Thèse de Petronela-Valeria PANKOVITS)

Objectif du projet :

Conception d'outils innovants pour un réseau électrique intelligent appliqué au ferroviaire.

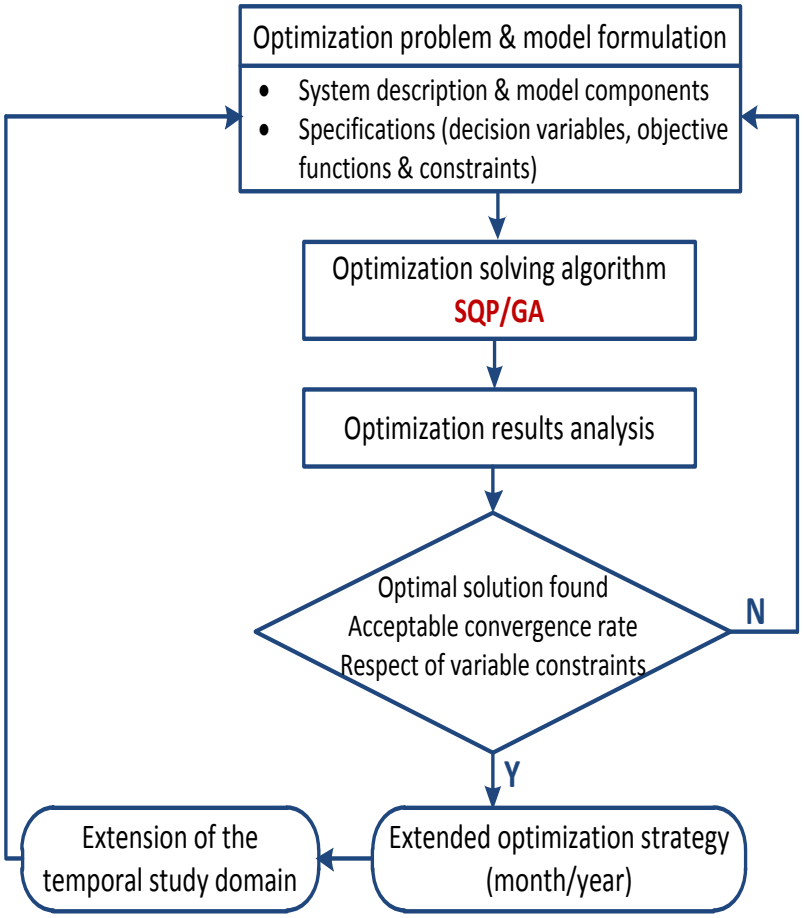


Architecture HRPS avec bus continu



Architecture HRPS avec bus alternatif

Optimisation du dimensionnement



Organigramme de la méthode d'optimisation du dimensionnement d'IFTEH (**Collaboration avec l'équipe Optimisation**)

Optimisation du dimensionnement

Description du problème d'optimisation avec l'algorithme SQP

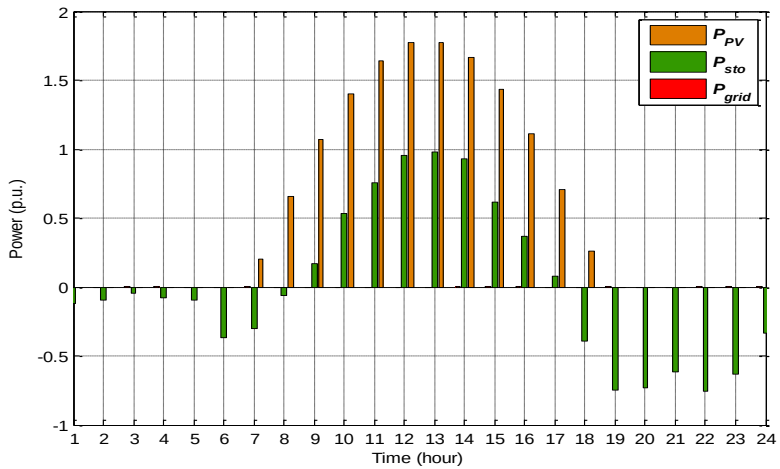
Variables	Constraints	Objective function
S_{PV}, with $0 < S_{PV} < S_{PV_max}$ S_w, with $0 < S_w < S_{w_max}$ P_{max_sto}, with P_{sto_i}, $i = 1..24$ $-P_{max_sto} \leq P_{sto_i} \leq P_{max_sto}$ E_{max_sto}	$E_0 = E_f$ $E_{min_sto} > 0$	Minimizing total cost Min(C)

Description du problème d'optimisation avec l'algorithme génétique

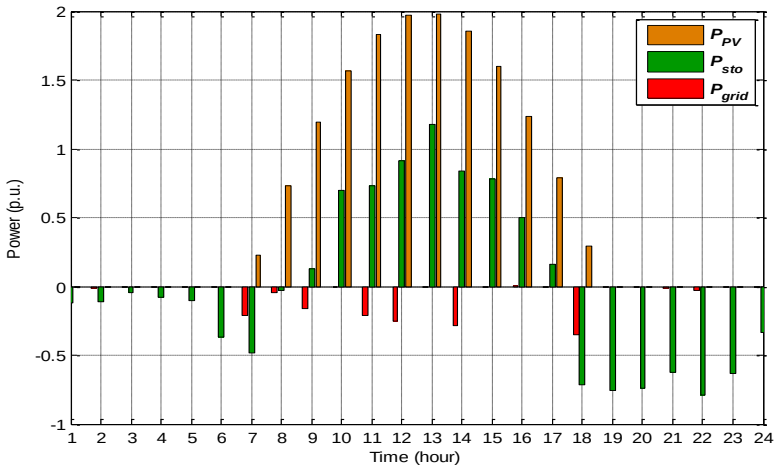
Variables	Objective function
S_{PV}, with $0 < S_{PV} < S_{PV_max}$ S_w, with $0 < S_w < S_{w_max}$ P_{sto_i}, $i = 1..23$ with $P_{sto_24} = -\sum_{i=1}^{23} P_{sto_i}$ and $-P_{max_sto} \leq P_{sto_i} \leq P_{max_sto}$	Minimizing total cost Min(C)

Optimisation du dimensionnement

Solution found with SQP



Solution found with GA



Résultats d'optimisation du profil de charge considérée de la station de chemin de fer

	Optimization variable (Spv)	Cost function (C)	Evaluations
SQP	200000m²	39736k€	5351
GA	221500m²	42342k€	26100

Les résultats numériques de la procédure d'optimisation

Supervision et gestion énergétique

Methodology for HRPS energy management

STEP 1
Work specifications

STEP 2
Design of the supervisor

STEP 3
Chart representation of operating modes
- Functional graphs -

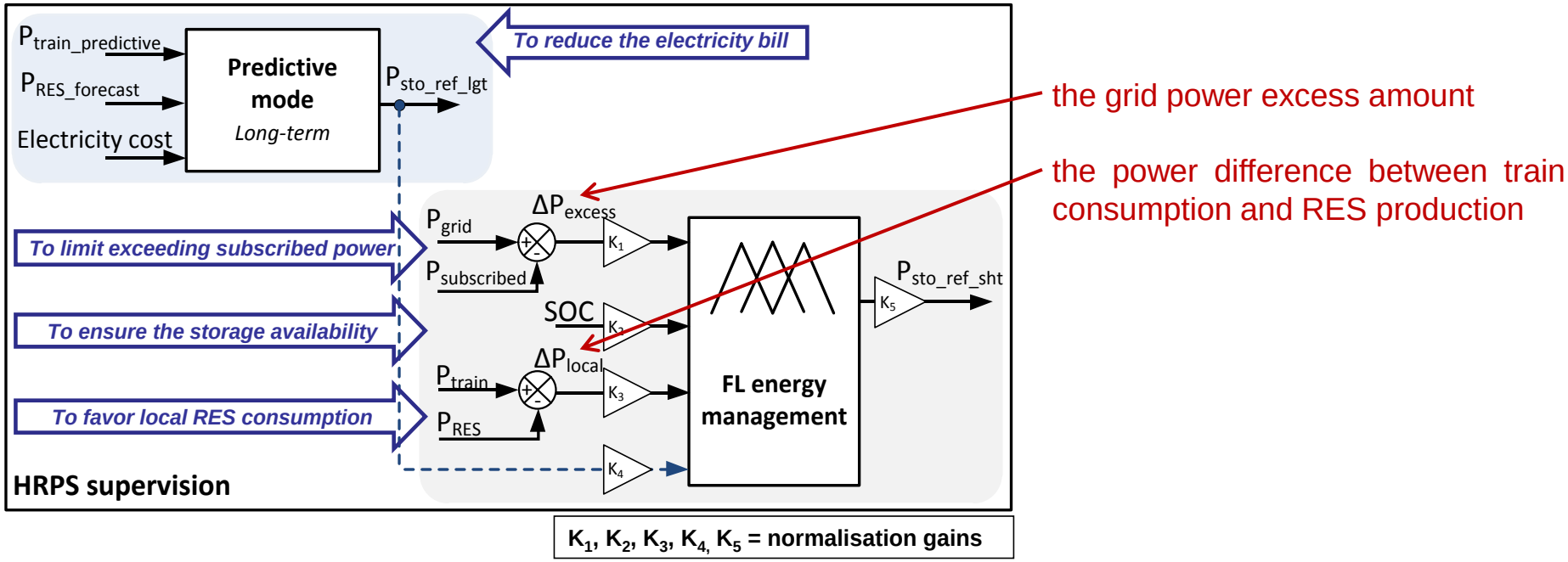
STEP 4
Determination of the membership functions

STEP 5
Chart representation of fuzzy operating modes
- Operational graphs -

STEP 6
Determination of the fuzzy rules

STEP 7
Determination of indicators to measure
the achievement of objectives

Supervision et gestion énergétique



Structure du superviseur développé par Petronela **au sein de l'équipe Réseaux**

Plan général

- **Introduction**
- **Problématique**
- **Exemple de projets et applications**

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

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

  III- Conception optimale et gestion énergétique des Installations Fixe de Traction Électrique Ferroviaire à production et stockage intégré (IFTE Hybrides).
- **Publications**

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 Moumniabdou; 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 pour votre attention !