

Gestion d'énergie avec entrées incertaines : quel algorithme choisir ?

Benchmark open source sur une maison solaire

Pierre HAESSIG, Jesse James PRINCE AGBODJAN,
Romain BOURDAIS, Hervé GUÉGUEN

CentraleSupélec – IETR

SGE, Nancy, 4 juillet 2018

Plan de la présentation

1. Introduction
2. Maison solaire
 - Modèle et objectif d'optimisation
 - Dimensionnement de la maison solaire
3. Méthodes de gestion d'énergie
 - Règle heuristique simple
 - Optimisation déterministe anticipative
 - Commande prédictive (MPC)
4. Résultats
 - Simulations temporelles
 - Analyse des résultats
5. Conclusion
 - Accès au banc de test open source
 - Conclusion & Perspectives

Plan de la présentation

1. Introduction

2. Maison solaire

3. Méthodes de gestion d'énergie

4. Résultats

5. Conclusion

Enjeu : démocratiser les méthodes de gestion d'énergie

Pour la gestion optimale des systèmes énergétiques :

- il existe de **nombreuses méthodes** : optimisation dynamique, stochastique, prédictive...
- avec chacune ses **difficultés** potentielles :
 - cadre théorique à apprendre (optimisation convexe...)
 - implémentation numérique non-triviale
 - temps de calcul long
 - ...sans garantie de résultats avant d'avoir essayé!

Enjeu : démocratiser les méthodes de gestion d'énergie

Pour la gestion optimale des systèmes énergétiques :

- il existe de **nombreuses méthodes** : optimisation dynamique, stochastique, prédictive...
- avec chacune ses **difficultés** potentielles :
 - cadre théorique à apprendre (optimisation convexe...)
 - implémentation numérique non-triviale
 - temps de calcul long
 - ...sans garantie de résultats avant d'avoir essayé!

Le cumul de ces difficultés (e.g. pour les méthodes a priori les plus performantes) peut rebuter les novices.

→ choix d'une méthode par défaut, basé sur des préjugés.

Enjeu : démocratiser les méthodes de gestion d'énergie

Pour la gestion optimale des systèmes énergétiques :

- il existe de **nombreuses méthodes** : optimisation dynamique, stochastique, prédictive...
- avec chacune ses **difficultés** potentielles :
 - cadre théorique à apprendre (optimisation convexe...)
 - implémentation numérique non-triviale
 - temps de calcul long
 - ...sans garantie de résultats avant d'avoir essayé!

Le cumul de ces difficultés (e.g. pour les méthodes a priori les plus performantes) peut rebuter les novices.

→ choix d'une méthode par défaut, basé sur des préjugés.

Notre proposition

Un banc de test open source pour faciliter la comparaison objective, multi-facette, des méthodes de gestion d'énergie.

Plan de la présentation

1. Introduction

2. Maison solaire

- Modèle et objectif d'optimisation
- Dimensionnement de la maison solaire

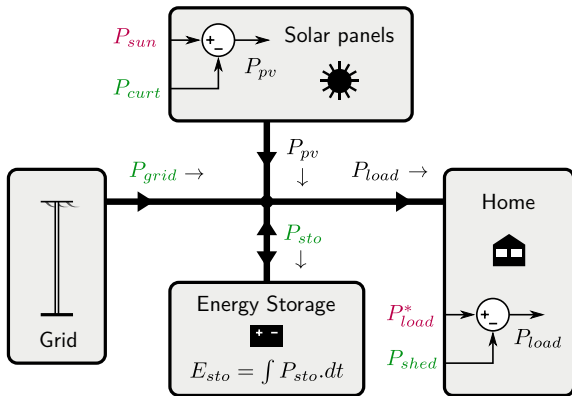
3. Méthodes de gestion d'énergie

4. Résultats

5. Conclusion

Modèle de la maison solaire : flux d'énergie

“un exemple simple et représentatif de problème de gestion d'énergie avec incertitude”



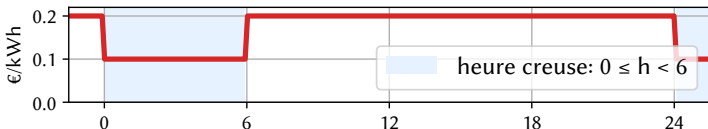
- Alimentation :
 - Panneaux PV
 - Réseau
- Charge non flexible (mais délestable si nécessaire)
- Batterie pour la flexibilité

Objectif de pilotage de la maison solaire : critère

Objectif d'optimisation : **minimiser la facture** d'électricité :

$$C_{grid} = \sum_{k=1}^n c_{grid}(k) P_{grid}(k)$$

Le prix dépend de l'heure du jour (heure pleine/heure creuse)
avec un écart jour/nuit vraiment incitatif :



→ intérêt de la batterie pour déplacer la consommation soit en heure creuse, soit en période de production solaire.

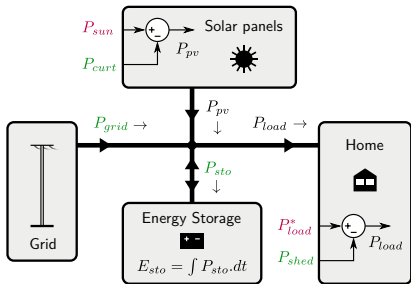
Objectif de pilotage de la maison solaire : les variables

Données d'entrées (**incertaines**) :

- Productible des panneaux PV : P_{sun}
- Consommation de la maison : P_{load}

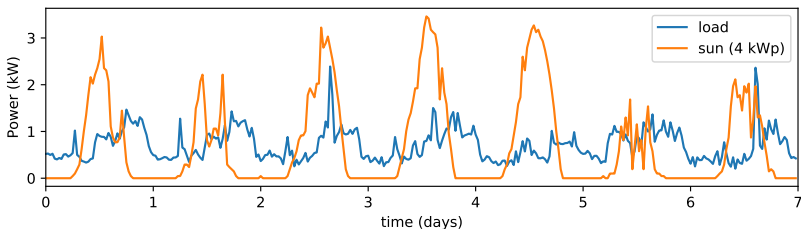
Variables de décision :

- Consommer sur le réseau : $P_{grid} > 0$
- Stocker dans la batterie : P_{sto}
- Écrêter la production solaire : $P_{pv} = P_{sun} - P_{curt} \in [0, P_{sun}]$



Données d'entrées (solaire et charge)

Les données d'entrées incertaines (P_{sun} , P_{load}) proviennent d'un jeu de **données réelles** (opérateur Ausgrid, Sidney, Australie)



Période de test : 30 jours consécutifs (30 oct. → 28 nov. 2011),
pas de temps 30 min.

Moyennes statistiques sur la période :

- consommation : 17,0 kWh/jour
- productible solaire : 15,6 kWh/jour (panneaux 4 kW_c)

Dimensionnement : coût total sur cycle de vie

Dimensionnement par **minimisation du coût global sur cycle de vie** (investissement + fonctionnement) :

$$C_{tot} = \underbrace{c_P P_{PVp} + c_E E_{rated}}_{\text{investissement}} + \underbrace{T_{life} \times \langle c_{grid} \cdot P_{grid} \rangle}_{\text{fonctionnement}}$$

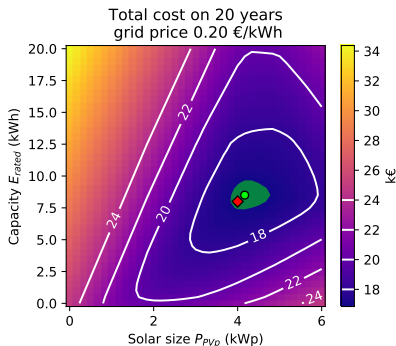
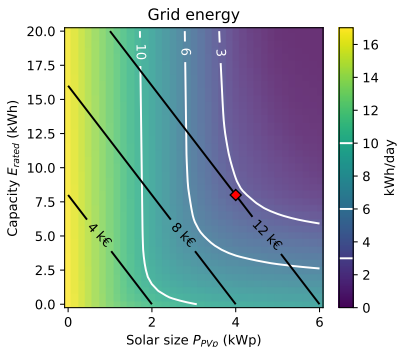
Résultat :

- Puissance des panneaux solaires P_{PVp} : 4 kW_c
→ couvre 91% de la consommation
- Capacité batterie E_{rated} : 8 kWh
≈ moitié de la consommation/production journalière.

et choix $P_{grid}^{max} = 3$ kW (= pratiquement illimité)

Dimensionnement de la maison solaire

Méthode de dimensionnement : simulation du système sur les 30 j de test, sur la grille de paramètres (P_{PVp} , E_{rated})



Dimensionnement optimal pour c_{grid} entre 0,16 et 0,21 €/kWh, avec durée de vie $T_{life} = 20$ ans.

Plan de la présentation

1. Introduction

2. Maison solaire

3. Méthodes de gestion d'énergie

- Règle heuristique simple
- Optimisation déterministe anticipative
- Commande prédictive (MPC)

4. Résultats

5. Conclusion

Formulation de la gestion heuristique simple

Définition : “charge nette” (“net load”)

$$P_{nl} = P_{load}^* - P_{sun}$$

Stratégie de gestion de l'énergie heuristique

Tant que possible, la batterie compense la charge nette :

$$P_{sto} = -P_{nl}$$

(= absorbe le surplus solaire)

et sinon, $P_{sto} = 0$ et :

- *si batterie pleine* et $P_{nl} < 0$: écrêtage de la production solaire pour suivre la consommation
- *si batterie vide* et $P_{nl} > 0$: appel au réseau pour compenser la charge nette

Formulation de l'optimisation déterministe anticipative

Méthode “*très attrayante*” : optimisation de la trajectoire des variables de décision sur **tout l'horizon** du problème (30 jours) :

$$\min_{\{P_{grid}(k), P_{sto}(k), P_{curt}(k)\}_{k=1\dots n}} C_{grid} = \sum_{k=1}^n c_{grid}(k) P_{grid}(k)$$

Formulation de l'optimisation déterministe anticipative

Méthode “*très attrayante*” : optimisation de la trajectoire des variables de décision sur **tout l'horizon** du problème (30 jours) :

$$\min_{\{P_{grid}(k), P_{sto}(k), P_{curt}(k)\}_{k=1\dots n}} C_{grid} = \sum_{k=1}^n c_{grid}(k) P_{grid}(k)$$

Complexité : problème du type “programme linéaire”, donc solution optimale obtenue très rapidement (< 1 s, malgré les $30 \times 48 = 1440$ pas de temps).

La performance obtenue est “**suroptimale**”, car basée sur une connaissance parfaite des données incertaines, c.-à-d. en pratique un pilotage qui **anticipe le futur** !

Formulation de la commande prédictive (MPC)

Méthode : à chaque instant de décision k , calcul d'une trajectoire optimale qui minimise le coût *tronqué sur un horizon H* :

$$J(k) = \sum_{i=k}^{k+H} c_{grid}(i) P_{grid}(i)$$

- seul le premier instant de la trajectoire optimisée ($P_{sto}(k)$, $P_{grid}(k)$...) est appliqué
- à l'instant de décision suivant, la trajectoire est réoptimisée sur la période $k + 1$ à $k + 1 + H$. (*horizon glissant*).

Propriété du MPC : la robustesse de la “boucle fermée”

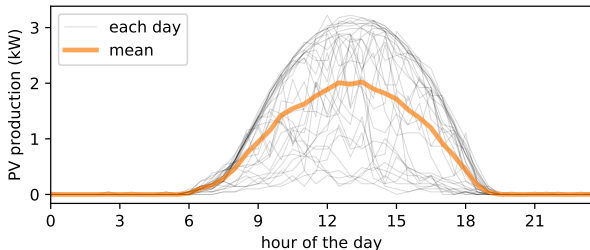
L'horizon glissant permet d'utiliser à chaque pas de temps les *informations les plus à jour* sur les entrées incertaines.

MPC : méthode de prévision des entrées incertaines

Le MPC a besoin d'une prévision des entrées incertaines

Comparaison de la performance du MPC avec deux méthodes :

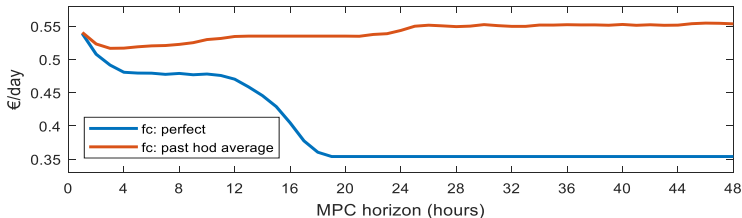
- prévision **anticipatrice** : connaissance parfaite du futur sur l'horizon H
- prévision **réaliste simple** : moyenne à chaque heure du jour ($hod = 0, 0.5, \dots, 23.5$) sur des données d'apprentissage (30 jours précédents le test)



Réglages du MPC : horizon de prédiction

Effet de l'horizon de prédiction H :

- si prév. parfaite, MPC avec $H > 24$ h équivalent à une optimisation globale sur toute la durée du scénario.
- si prév. réaliste, augmenter l'horizon *dégrade la performance!!!*



Choix : 24 h

Plan de la présentation

1. Introduction

2. Maison solaire

3. Méthodes de gestion d'énergie

4. Résultats

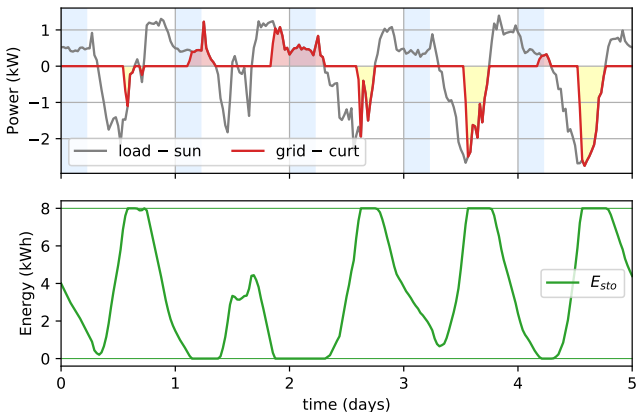
- Simulations temporelles
- Analyse des résultats

5. Conclusion

Comparaison qualitative : simulations temporelles

méthode 1/3 : gestion heuristique simple

Appel au réseau : désynchronisés des heures creuses

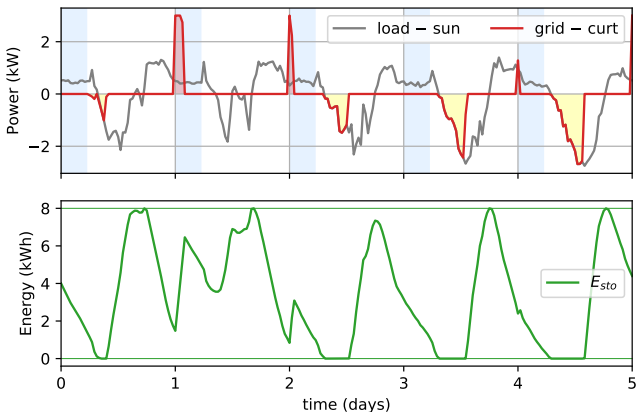


Comparaison qualitative : simulations temporelles

méthode 2/3 : optimisation déterministe anticipative

Appel au réseau : prioritairement aux heures creuses.

Recharge nocturne : **anticipation parfaite** du productible solaire de la journée qui suit.

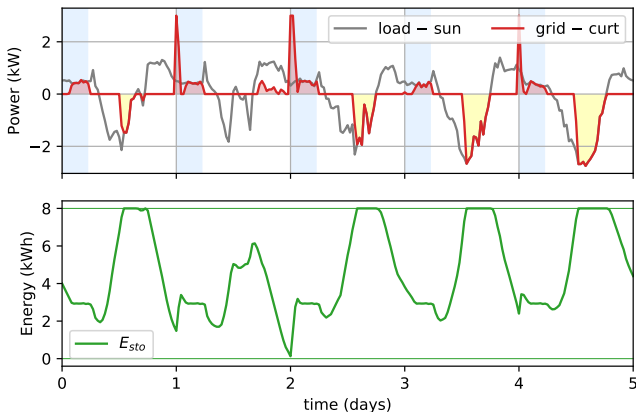


Comparaison qualitative : simulations temporelles

méthode 3/3 : MPC avec prévision réaliste simple

Appel au réseau : prioritairement aux heures creuses.

Recharge nocturne : SoE à 6h toujours identique, **anticipation imparfaite** le productible solaire de la journée qui suit.



Analyse des résultats

Gestion empirique : facilement implémentable, consommation énergétique optimale, mais facture sous optimale (0.563 €/j)

Optimisation déterministe : la meilleure facture (0.354 €/j), mais non implémentable (anticipation parfaite du futur)

Analyse des résultats

Gestion empirique : facilement implémentable, consommation énergétique optimale, mais facture sous optimale (0.563 €/j)

Optimisation déterministe : la meilleure facture (0.354 €/j), mais non implémentable (anticipation parfaite du futur)

MPC avec prévision réaliste simple : assez facilement implémentable. Facture décevante (0.543 €/j).

La contre-performance du MPC est-elle le fruit :

- de la mauvaise qualité de la prévision ?
- de l'absence de prise en compte intrinsèque du caractère stochastique de l'optimisation ?

Analyse des résultats

Gestion empirique : facilement implémentable, consommation énergétique optimale, mais facture sous optimale (0.563 €/j)

Optimisation déterministe : la meilleure facture (0.354 €/j), mais non implémentable (anticipation parfaite du futur)

MPC avec prévision réaliste simple : assez facilement implémentable. Facture décevante (0.543 €/j).

La contre-performance du MPC est-elle le fruit :

- de la mauvaise qualité de la prévision ?
- de l'absence de prise en compte intrinsèque du caractère stochastique de l'optimisation ?

Question qui reste à résoudre

Quelle est la meilleure performance *non anticipative*?

Proche de 0.543 (MPC) ou bien de 0.354 (anticipative) ?

Plan de la présentation

1. Introduction
2. Maison solaire
3. Méthodes de gestion d'énergie
4. Résultats
5. Conclusion
 - Accès au banc de test open source
 - Conclusion & Perspectives

Accès au banc de test open source : GitHub

Accès libre et gratuit dans un dépôt GitHub qui inclut :

- l'extrait des données Ausgrid nécessaires (P_{sun} , P_{load})
- l'implémentation des lois de gestion présentées ici (en Python, Matlab ou Julia)

The screenshot shows the GitHub repository page for 'solarhome-control-bench' by pierre-haessig. The repository is described as 'open testbench for control and optimization methods for the energy management of a simple solar home'. It has 39 commits, 1 branch, 0 releases, and 1 contributor. The repository is currently on the 'master' branch. A list of recent commits is shown, including 'make hd export of solar home diagram', 'fix spaces in README links', 'modify bootstrapped data to be from 30 days instead of 33', 'make hd export of solar home diagram', 'upgrade Matlab utils and the rule-based control example', 'add cross-validated mean patterns', and 'upgrade Matlab utils and the rule-based control example'. A 'Clone or download' dropdown menu is open, showing options to 'Clone with HTTPS' (https://github.com/pierre-haessig/solarhome-control-bench) and 'Download ZIP'.

<https://github.com/pierre-haessig/solarhome-control-bench>

Conclusion & Perspectives

- Un banc de simulation open source pour comparer des méthodes de gestion d'énergie
 - avec des premières méthodes de gestion d'énergie relativement simples
- premier résultat notable : grand écart de performance entre stratégies anticipatives et stratégies réalistes

Conclusion & Perspectives

- Un banc de simulation open source pour comparer des méthodes de gestion d'énergie
 - avec des premières méthodes de gestion d'énergie relativement simples
- premier résultat notable : grand écart de performance entre stratégies anticipatives et stratégies réalistes

Perspectives :

- implémentation de nouvelles méthodes de gestion d'énergie (MPC stochastique, programmation dynamique...)
- Étudier l'impact des lois de gestion sur le dimensionnement (cf. SGE 2014)