

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

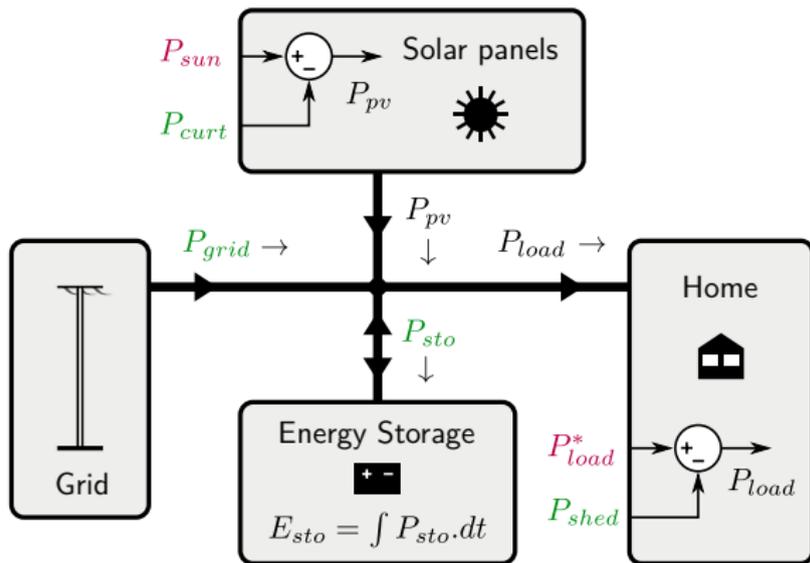
3. Méthodes de gestion d'énergie

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”



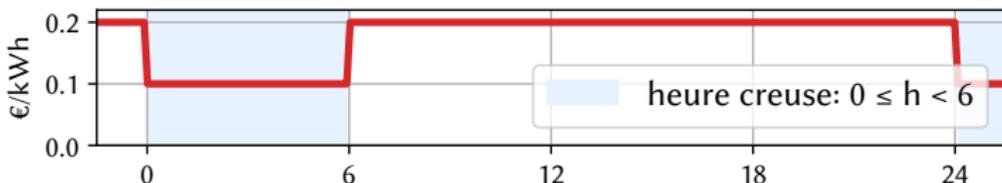
- Alimentation :
 - Panneaux PV
 - Réseau
- Charge non flexible (mais délestable si nécessaire)
- Batterie pour la flexibilité

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.

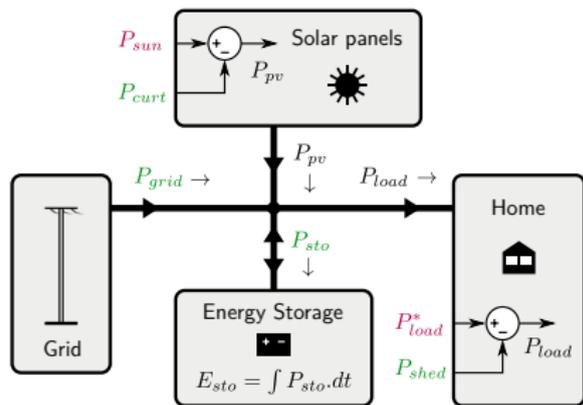
Objectif de pilotage de la maison solaire : les variables

Données d'entrées (**incertaines**) :

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

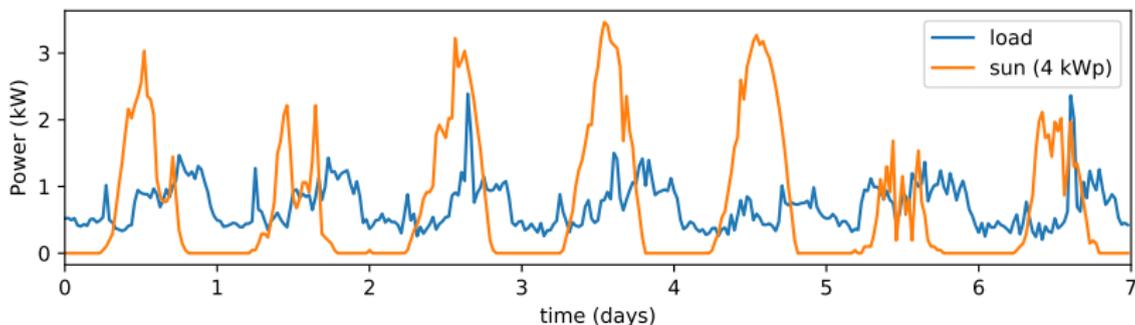
Variables de décision :

- 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) :

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

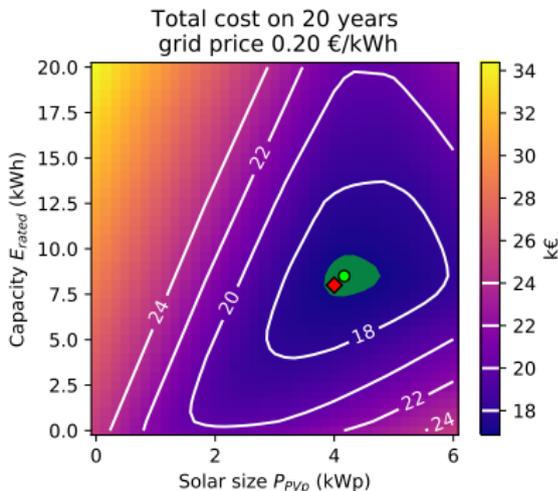
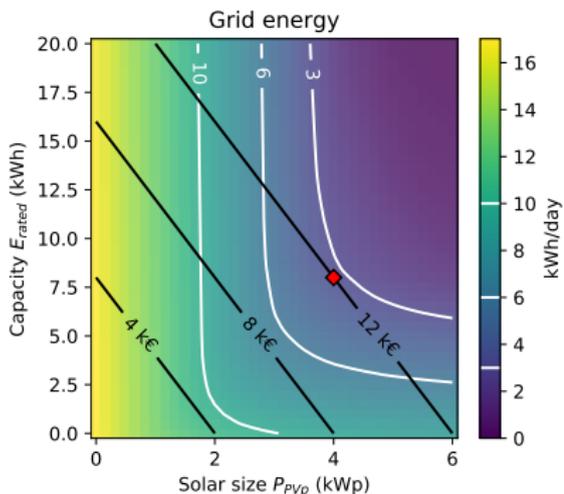
Résultat :

- 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”

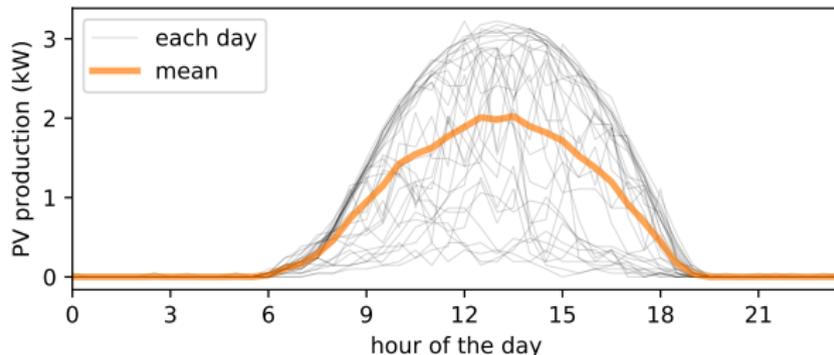
L'horizon glissant permet d'utiliser à chaque pas de temps les *informations les plus à jour* sur les entrées incertaines.

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 :

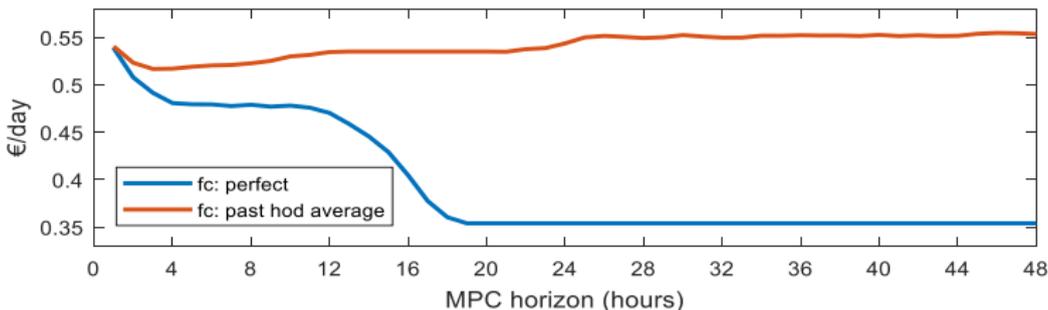
- prévision **anticipatrice** : connaissance parfaite du futur sur l'horizon H
- prévision **réaliste simple** : moyenne à chaque heure du jour ($hod = 0, 0.5, \dots, 23.5$) sur des données d'apprentissage (30 jours précédents le test)



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

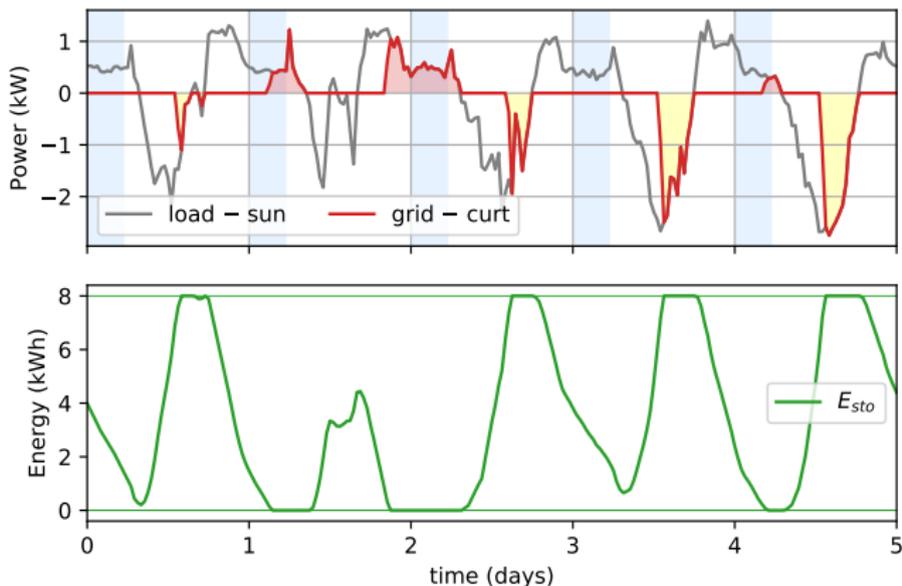
- Simulations temporelles
- Analyse des résultats

5. Conclusion

Comparaison qualitative : simulations temporelles

méthode 1/3 : gestion heuristique simple

Appel au réseau : désynchronisés des heures creuses

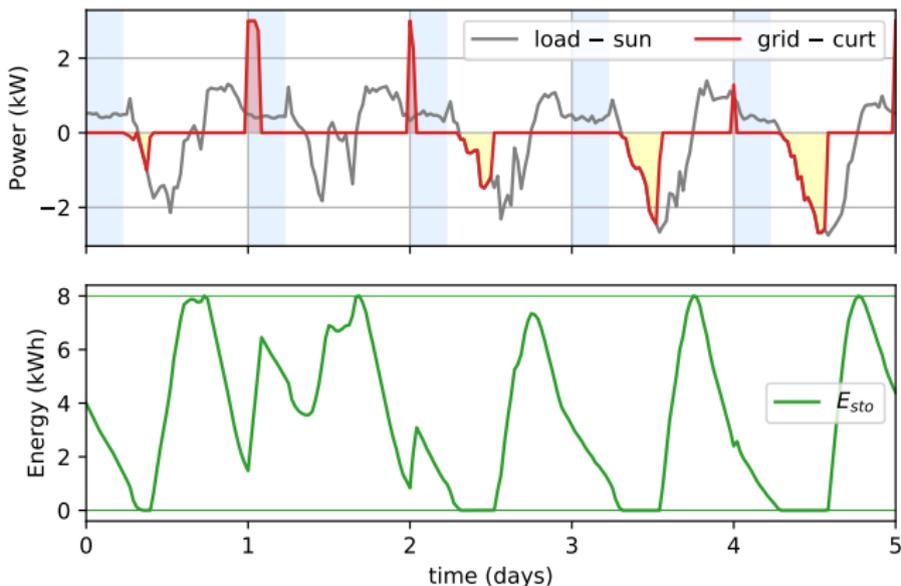


Comparaison qualitative : simulations temporelles

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.

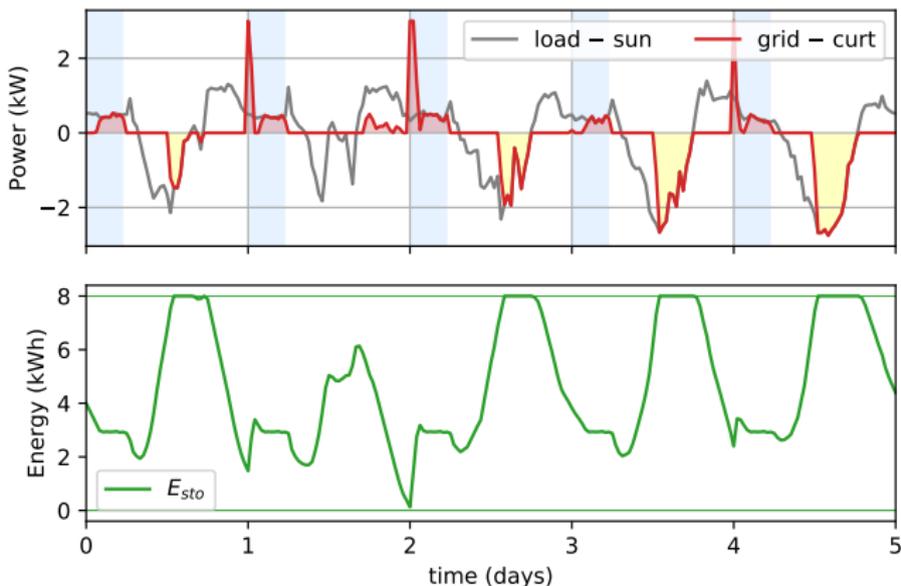


Comparaison qualitative : simulations temporelles

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 organized into folders: comparison, data, images, methods, modeling, and utils. A 'Clone or download' button is visible, with a dropdown menu showing 'Clone with HTTPS' and 'Download ZIP'.

| Folder | Description | Last Commit |
|------------|---|--------------|
| comparison | fix spaces in README links | |
| data | modify bootstrapped data to be from 30 days instead of 33 | |
| images | make hd export of solar home diagram | |
| methods | upgrade Matlab utils and the rule-based control example | 4 months ago |
| modeling | add cross-validated mean patterns | 3 months ago |
| utils | upgrade Matlab utils and the rule-based control example | a month ago |

<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)