

# Quelle importance du choix de la loi de gestion pour dimensionner un système de stockage d'énergie ?

Pierre Haessig, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Stéphane  
Lascaud

EDF R&D LME, ENS Rennes SATIE  
[pierre.haessig@ens-rennes.fr](mailto:pierre.haessig@ens-rennes.fr)

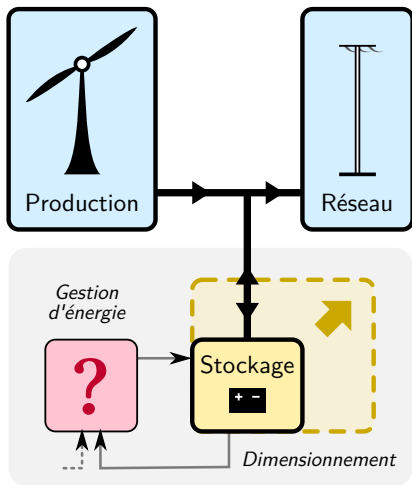
SGE, Cachan, 10 juillet 2014

# Plan de la présentation

1. Contexte
2. Démarche
3. Résultats

# Dimensionnement & gestion d'un système

contexte éolien-stockage



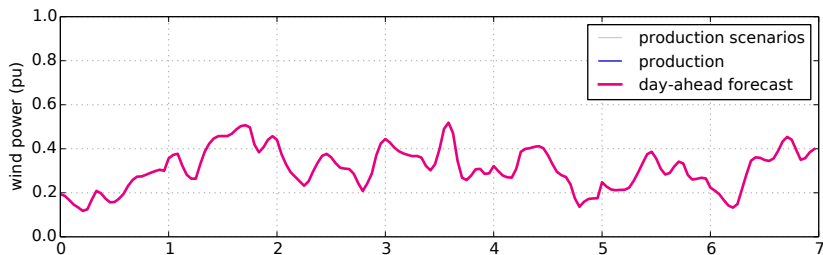
**Dimensionnement & gestion**  
d'un système de stockage  
(pour atténuer la variabilité de  
production éolienne)

Nature du problème  
d'optimisation :

- entrée incertaines →  
optimisations **stochastiques**  
(minisation de coûts *en*  
*espérance*)
- 2 optimisations **couplées**

# Entrées incertaines

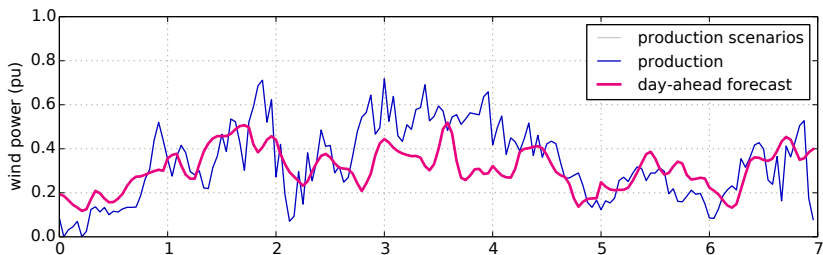
Exemple d'entrée incertaine dans un contexte éolien (ferme en Guadeloupe)



Production éolienne *prévue* la veille

# Entrées incertaines

Exemple d'entrée incertaine dans un contexte éolien (ferme en Guadeloupe)



Production éolienne *réalisée* le lendemain

# Dimensionnement & gestion d'un système

autres contextes

De nombreux systèmes **avec entrées incertaines** nécessitent un dimensionnement et une gestion d'énergie

Exemples avec stockage :

- micro-réseau avec EnR-stockage : incertitudes de production et de consommation
- véhicule hybride : incertitude sur le profil de mission

Exemples sans stockage :

- micro-réseau avec EnR
- récupération de l'énergie des vagues par un système oscillant : incertitude sur les sollicitations à venir

# Cooptimisation

La cooptimisation du *dimensionnement* d'un stockage et de la *gestion* de son énergie est un **impératif théorique**...

Solution typique : l'optimisation *imbriquée*

- pour *chaque* dimensionnement,
- optimiser la gestion

# Cooptimisation

La cooptimisation du *dimensionnement* d'un stockage et de la *gestion* de son énergie est un **impératif théorique**...

Solution typique : l'optimisation *imbriquée*

- pour *chaque* dimensionnement,
- optimiser la gestion

...mais une **quasi-impossibilité pratique** :

la gestion optimale stochastique (par programmation dynamique stochastique SDP) est très coûteuse (en temps de cerveau & de temps calcul)



# Cooptimisation

La cooptimisation du *dimensionnement* d'un stockage et de la *gestion* de son énergie est un **impératif théorique**...

Solution typique : l'optimisation *imbriquée*

- pour *chaque* dimensionnement,
- optimiser la gestion

...mais une **quasi-impossibilité pratique** :

la gestion optimale stochastique (par programmation dynamique stochastique SDP) est très coûteuse (en temps de cerveau & de temps calcul)

Conséquence : le dimensionnement se fait souvent avec une *gestion simplifiée* (non SDP).

# Gestion simplifiée pour le dimensionnement

## petit panorama des alternatives à la SDP

Au lieu de l'optimisation dynamique stochastique, on peut utiliser :

1. une **gestion empirique** (sous optimale) : très large choix parmi beaucoup de familles différentes :
    - règles heuristiques simples
    - heuristique optimisée : contrôleur flou, réseau de neurones, ...
    - Model Predictive Control (MPC)
- *Non anticipatives*, donc utilisables en ligne (comme SDP).

# Gestion simplifiée pour le dimensionnement

## petit panorama des alternatives à la SDP

Au lieu de l'optimisation dynamique stochastique, on peut utiliser :

1. une **gestion empirique** (sous optimale) : très large choix parmi beaucoup de familles différentes :
  - règles heuristiques simples
  - heuristique optimisée : contrôleur flou, réseau de neurones, ...
  - Model Predictive Control (MPC)→ *Non anticipatives*, donc utilisables en ligne (comme SDP).
2. l'**optimisation dynamique déterministe** (hors-ligne)  
par exemple par *programmation dynamique*, ou programmation linéaire/quadratique si applicable.  
→ *Anticipative*, donc *surestime la performance*.

# Problématique

Du point de vue *théorique*, la non-utilisation de la gestion optimale stochastique (SDP) entraîne un *dimensionnement "dégradé"*.  
Mais qu'en est il du point de vue *pratique et quantitatif*?

Quelle est la sensibilité du dimensionnement  
du système de stockage  
au choix de la loi de gestion ?

- sensibilité sur le dimensionnement
- sensibilité sur le critère de dimensionnement (coût, performance, ...)

# Problématique

Du point de vue *théorique*, la non-utilisation de la gestion optimale stochastique (SDP) entraîne un *dimensionnement "dégradé"*.  
Mais qu'en est il du point de vue *pratique et quantitatif*?

Quelle est la sensibilité du dimensionnement  
du système de stockage  
au choix de la loi de gestion ?

- sensibilité sur le dimensionnement
- sensibilité sur le critère de dimensionnement  
(coût, performance, ...)

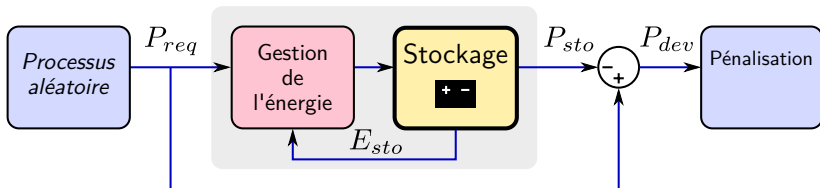
→ (*tentative de*) réponse à l'aide de l'exemple  
d'un système de stockage (très) simple

# Plan de la présentation

1. Contexte
2. Démarche
  - Système et cadre étudié
  - Évaluation de la performance
3. Résultats

# Système étudié

Stockage “abstrait”, avec sollicitation stochastique  $P_{req}$  :



Dynamique de l'énergie :  $E(k + 1) = E(k) + P_{sto}(k)\Delta_t$

avec contraintes de capacité :  $0 \leq E(k) \leq E_{rated}$

→ capacité  $E_{rated}$  à dimensionner

Écart :

$$P_{dev} = P_{req} - P_{sto}$$

qui est pénalisé en moyenne quadratique :  $\|P_{dev}\|^2$

# Procédure de dimensionnement

## une optimisation dégradée “en deux temps”

La procédure de dimensionnement dégradé considérée se base une optimisation “en deux temps” :

1. **Dimensionnement du système**, contrôlé par la loi de gestion “*de dimensionnement*” choisie.  
(ex : gestion empirique, optim. stochastique, ou optim. déterministe)



# Procédure de dimensionnement

## une optimisation dégradée “en deux temps”

La procédure de dimensionnement dégradé considérée se base une optimisation “en deux temps” :

1. **Dimensionnement du système**, contrôlé par la loi de gestion “*de dimensionnement*” choisie.  
(ex : gestion empirique, optim. stochastique, ou optim. déterministe)
2. **Optimisation de la performance**, à dimensionnement *fixé*, en remplaçant la loi de gestion choisie pour le dimensionnement par la loi de gestion *optimale* (SDP).

# Méthode de calcul

## Méthode d'estimation de la performance :

Pour une sollicitation d'entrée  $P_{req}$  d'écart-type 1 MW à pas d'une heure ( $\Delta_t = 1$  h), nous effectuons des **simulations temporelles** d'une durée de 60 jours.

Elles sont répétées  $50\times$  pour estimer la performance moyenne :  $\|P_{dev}\|$ , écart-type de la sortie (attendu plus petit que 1 MW).

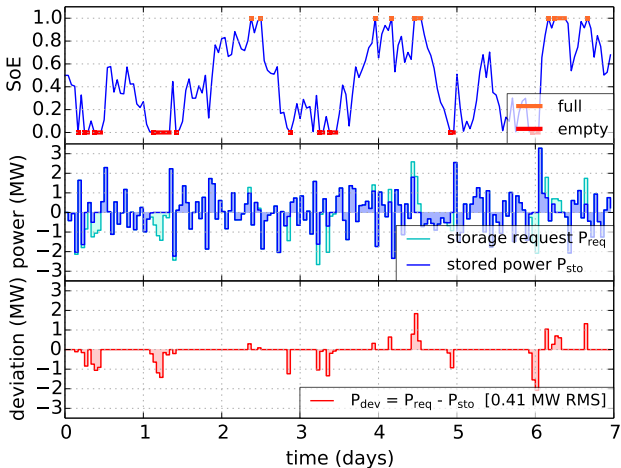
## Conditions de l'études :

- Calcul réalisé pour chacune des trois lois de gestion étudiées
- Plage de dimensionnement :  $E_{rated} = 0 - 10$  MWh.

→ *Observons des extraits des simulations temporelles pour chacune des trois lois de gestion étudiées.*

# Simulations temporelles

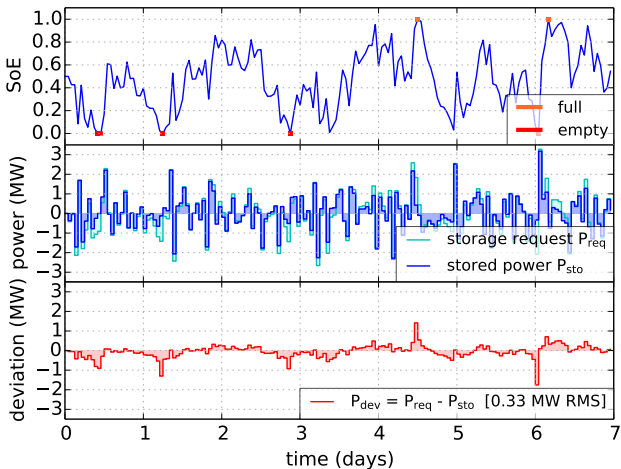
## Gestion empirique



Gestion empirique " $P_{sto} = P_{req}$  tant que possible"

# Simulations temporelles

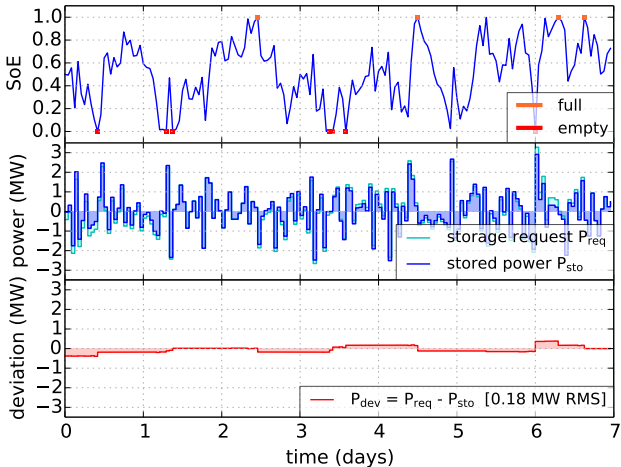
## Gestion optimale stochastique (SDP)



Loi de contrôle optimale :  $P_{sto} = \mu^*(E_{sto}, P_{req})$

# Simulations temporelles

## Optimisation déterministe



Optimisation hors-ligne, connaissant toute les sollicitations  $P_{req}(k)$

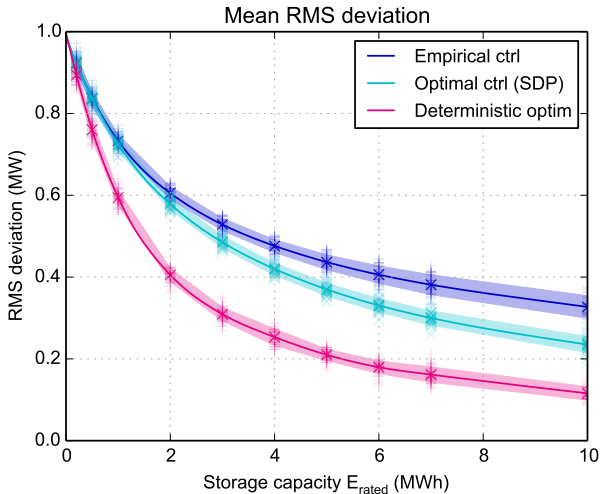
# Performance fonction du dimensionnement

À partir de ces simulations temporelles, on évalue la performance du système :

- pour chacune des trois lois de gestion étudiées,
- et pour plusieurs dimensionnements :  $E_{rated} = 0 - 10$  MWh.

# Performance fonction du dimensionnement

Effet de la capacité et de la loi de gestion



Constats :

1. L'écart diminue avec la capacité (attendu)
2. gestion *SDP* meilleure que *empirique*
3. *optim. déterministe* (artificiellement) meilleure que *SDP* et *empirique*

# Plan de la présentation

1. Contexte

2. Démarche

3. Résultats

- Dimensionnement basé sur une contrainte
- Dimensionnement par optimisation d'un coût total
- Conclusion



## Dimensionnement basé sur une contrainte

Le critère de dimensionnement pour cette procédure est une limite sur la moyenne quadratique (RMS) de l'écart  $P_{dev}$ .

La capacité choisie est la plus petite vérifiant cette condition :

minimiser

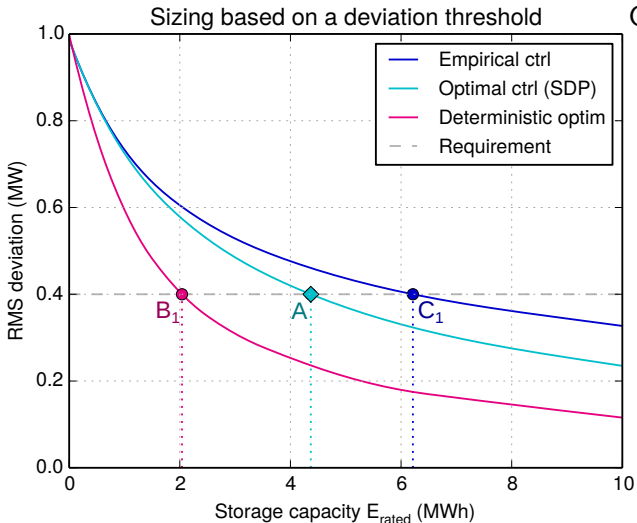
$E_{rated}$

tel que

$\|P_{dev}\|(E_{rated}) < \text{seuil}$

# Dimensionnement basé sur une contrainte

Exemple pour un seuil à 0,4 MW

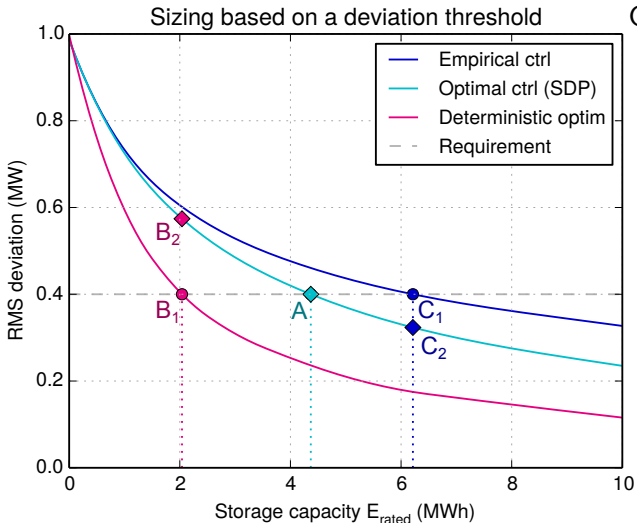


Constats :

1. Résultats très sensibles au choix de la loi de gestion de dimensionnement

# Dimensionnement basé sur une contrainte

Exemple pour un seuil à 0,4 MW



Constats :

1. Résultats **très sensibles** au choix de la loi de gestion de dimensionnement
2. gestion *empirique* → sur-dimensionnement, sur-performance (0,32 MW).
3. *optim. déterministe* → sous-dimensionnement, sous-performance (0,57 MW).

# Dimensionnement par optimisation d'un coût total

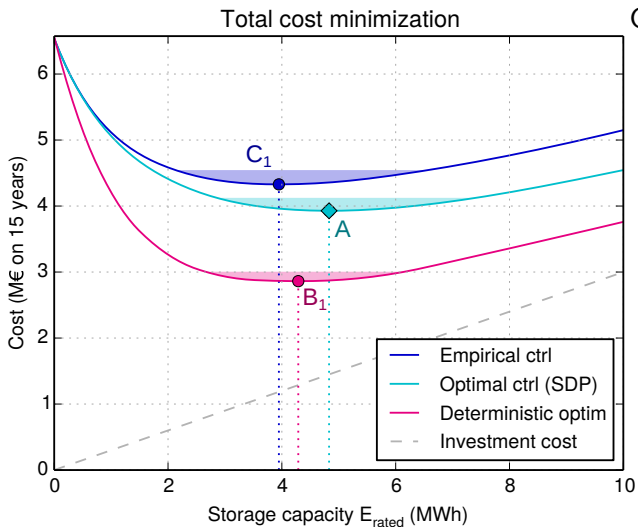
Le critère de dimensionnement pour cette procédure considère un coût total où s'additionnent :

- le coût d'investissement du stockage  $c_{batt} E_{rated}$ .  
(choix :  $c_{batt} = 300$  k€/MWh, environ le prix d'une batterie Sodium-Soufre, hors surcoûts)
- une pénalité proportionnelle à l'écart RMS, calculée sur la vie du système,  $c_{dev} \|P_{dev}\| t_{life}$ , avec  $c_{dev} = 50$  €/MWh et  $t_{life} = 15$  ans.

Le critère à minimiser est donc :

$$C_{tot}(E_{rated}) = c_{batt} E_{rated} + c_{dev} \|P_{dev}\| (E_{rated}) t_{life}$$

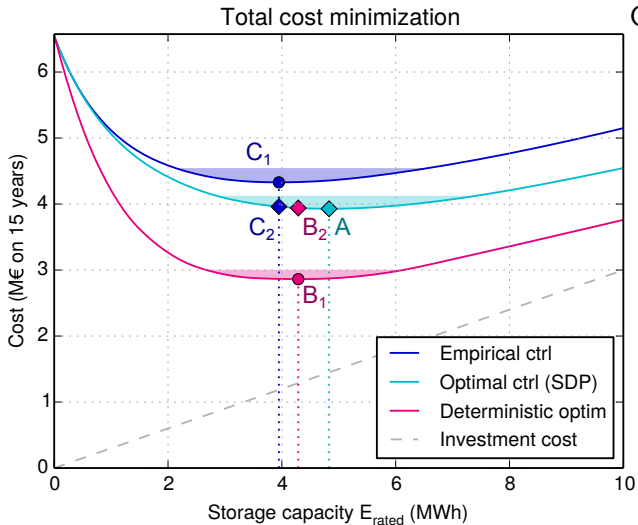
# Dimensionnement par optimisation d'un coût total



## Constats :

1. Résultats **peu sensibles** au choix de la loi de gestion de dimensionnement
2. dimensionnements proches à 20% près (4,0 – 4,8 MWh)

# Dimensionnement par optimisation d'un coût total



## Constats :

1. Résultats **peu sensibles** au choix de la loi de gestion de dimensionnement
2. dimensionnements proches à 20 % près (4,0 – 4,8 MWh)
3. performances indiscernables : coût total = 3,9 M€/15 ans.

## Conclusion et pistes d'améliorations

Effet du choix de loi de gestion : **“ça dépend !”**

- forte sensibilité pour un dimensionnement basé sur une contrainte de performance
- faible sensibilité pour un dimensionnement basé sur la minisation d'un coût total du système

# Conclusion et pistes d'améliorations

Effet du choix de loi de gestion : **“ça dépend !”**

- forte sensibilité pour un dimensionnement basé sur une contrainte de performance
- faible sensibilité pour un dimensionnement basé sur la minisation d'un coût total du système

Limites de l'étude :

- Un système-exemple très simplifié, très abstrait
- quelle **généralisation** pour un autre système, un autre contexte ? (ex : pénalisation différente des écarts, entrée autocorrélée, . . .)



# Conseil à ramener à la maison

(proposition subjective, ouverte à discussion)

## Choix de la loi de gestion

Quelle loi de gestion utiliser pour le dimensionnement ?  
*(pour des systèmes avec entrées incertaines)*

Candidats :

# Conseil à ramener à la maison

(proposition subjective, ouverte à discussion)

## Choix de la loi de gestion

Quelle loi de gestion utiliser pour le dimensionnement ?  
*(pour des systèmes avec entrées incertaines)*

Candidats :

- optim. déterministe hors-ligne : **dangereuse, car elle surestime la performance** (et aussi : assez coûteuse en calcul)

# Conseil à ramener à la maison

(proposition subjective, ouverte à discussion)

## Choix de la loi de gestion

Quelle loi de gestion utiliser pour le dimensionnement ?  
*(pour des systèmes avec entrées incertaines)*

Candidats :

- optim. déterministe hors-ligne : **dangereuse, car elle surestime la performance** (et aussi : assez coûteuse en calcul)
- gestion empirique : conservative, mais facile et sûre

# Conseil à ramener à la maison

(proposition subjective, ouverte à discussion)

## Choix de la loi de gestion

Quelle loi de gestion utiliser pour le dimensionnement ?  
*(pour des systèmes avec entrées incertaines)*

Candidats :

- optim. déterministe hors-ligne : **dangereuse, car elle surestime la performance** (et aussi : assez coûteuse en calcul)
- gestion empirique : conservative, mais facile et sûre
- optimisation dynamique stochastique (SDP) : parfait... mais rarement applicable !

# Conseil à ramener à la maison

(proposition subjective, ouverte à discussion)

## Choix de la loi de gestion

Quelle loi de gestion utiliser pour le dimensionnement ?  
*(pour des systèmes avec entrées incertaines)*

Candidats :

- optim. déterministe hors-ligne : **dangereuse, car elle surestime la performance** (et aussi : assez coûteuse en calcul)
- gestion empirique : conservative, mais facile et sûre
- optimisation dynamique stochastique (SDP) : parfait. . .  
mais rarement applicable !
- gestion empirique optimisée : **le bon compromis ?**  
(mais famille très/trop large)  
ex : loi de gestion paramétrique, de forme inspirée par la SDP