



**HAL**  
open science

## Gestion et valorisation d'un stockage à air comprimé adiabatique intégré dans un réseau électrique

Benoit Robyns, Thang Do Minh, Merdassi Asma

► **To cite this version:**

Benoit Robyns, Thang Do Minh, Merdassi Asma. Gestion et valorisation d'un stockage à air comprimé adiabatique intégré dans un réseau électrique. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065288

**HAL Id: hal-01065288**

**<https://hal.science/hal-01065288v1>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Gestion et valorisation d'un stockage à air comprimé adiabatique intégré dans un réseau électrique

Thang DO-MINH<sup>1,2</sup>, Asma MERDASSI<sup>1,2</sup>, Benoît ROBYNS<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP), Lille , France

<sup>2</sup>Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), Lille , France

## 1. Introduction

La technique du stockage de l'électricité sous forme d'air comprimé en caverne souterraine (CAES) apparaît à l'heure actuelle en France comme une des rares alternatives crédibles, dans la gamme des puissances de plusieurs centaines de MW, aux stations de pompage – turbinage installées en régions montagneuses, et pour lesquelles la plupart des sites disponibles sont déjà exploités. Cependant, cette technique nécessite des investissements importants et a l'inconvénient d'un rendement énergétique faible.

L'objectif de cette étude intégrée dans le projet ANR SACRE (Stockage par Air Comprimé pour le Réseau Electrique) est d'analyser la valorisation économique et l'intérêt, donc les usages, pour le réseau électrique, de dispositifs de stockage de moyenne et forte puissance (15-30 MW et 100-300 MW) de type CAES (Compressed Air Energy Storage System) adiabatique [1], [2]. La Figure 1 illustre le principe de ce type de stockage.

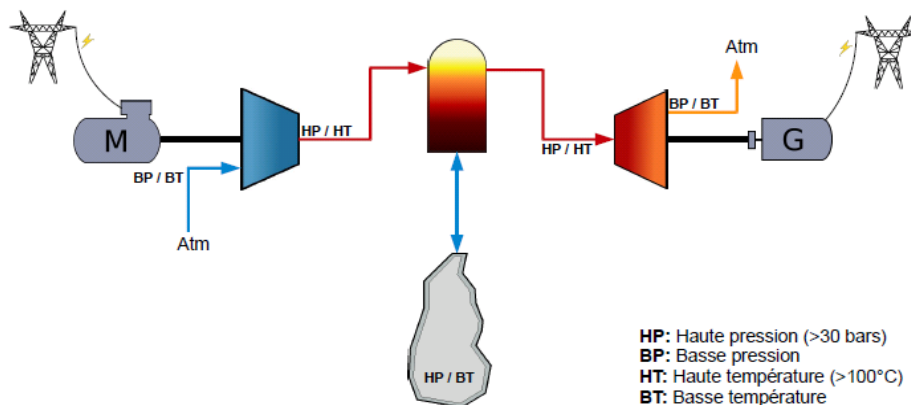


Figure 1. Stockage d'air comprimé adiabatique (Source : EDF)

Les technologies CAES existantes sont clairement à la limite de la rentabilité dans le système électrique actuel quand sont prises en compte les seules valorisations traditionnelles liées à l'offre et la demande. La maximisation des services rendus et de la rentabilité du système de stockage ne seront obtenues qu'à travers la localisation et le dimensionnement optimal du système de stockage dans le réseau électrique et à travers sa gestion temporelle optimale [3], [4]. Cette supervision se décline sur différente échelle de temps : long terme (la veille pour le lendemain), moyen terme (entre 1 h et 30 min à l'avance) et court terme (temps réel).

Cette étude porte sur le développement d'une stratégie de supervision temps réel du stockage afin d'en maximiser les services rendus et la rentabilité, suivant un pré-dimensionnement et une pré-localisation. Une méthode de construction du superviseur basée sur la logique floue est mise en œuvre [5], [6], [7]. Le réseau de test 14 nœuds IEEE a été choisi à titre d'exemple pour illustrer l'application de la méthode.

## 2. Les services

Avec la contribution du stockage, plusieurs services peuvent être proposés aux acteurs du système électrique. Dans le cadre de cette étude, seuls les services obligatoires et les services dont l'avantage économique est important seront considérés : le service de réglage de fréquence, le service de gestion des congestions et le service de la production renouvelable. Les services seront détaillés dans l'article final.

### 3. Superviseur flou et méthode

Cette section décrit la structure du superviseur temps réel basée sur la logique floue. Le superviseur long terme est supposé avoir défini la veille pour le lendemain une consigne de puissance pour le stockage prenant en compte le marché de l'électricité et la planification du réseau. Les objectifs du superviseur flou multi-objectifs peuvent être divisés en trois groupes : les objectifs économiques, les services obligatoires et les services supplémentaires.

La construction du superviseur flou sera présentée en se basant sur la méthodologie présentée dans [5], [6] et sera détaillée dans la version finale de l'article. La structure du superviseur sera organisée de manière à réaliser les trois principaux objectifs définis dans le Tableau 1. Les contraintes de la supervision sont également présentées.

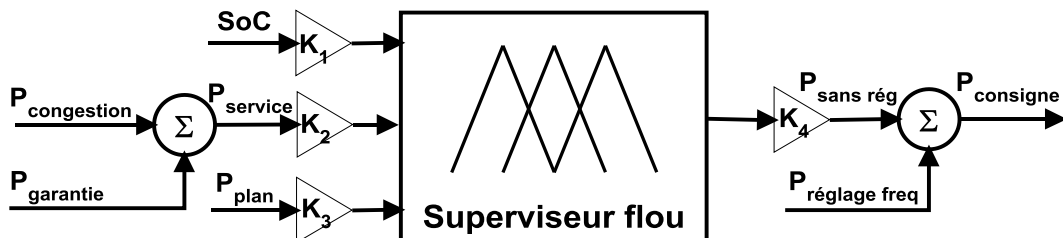
**Tableau 1. La stratégie du superviseur**

Objectifs	Contraintes	Moyens d'action
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximiser le gain économique en respectant la courbe de planification</li> <li>- Fournir les services supplémentaires au système</li> <li>- Assurer la disponibilité du stockage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les limites du stockage</li> <li>- La capacité de transit de la ligne</li> <li>- La variation de la puissance éolienne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La consigne de puissance du stockage</li> </ul>

À ce stade, les entrées nécessaires au superviseur pour atteindre ses objectifs peuvent être définies :

- Afin d'assurer la disponibilité du stockage pour le réglage de fréquence et les autres services, l'état de charge du stockage doit être considérée comme une entrée (SoC).
- La deuxième entrée est la consigne des services non obligatoires ou supplémentaires (la gestion de congestion ( $P_{congestion}$ ) [8], [9] et la garantie de la production renouvelable ( $P_{garantie}$ )) ( $P_{service}$ ).
- Afin de maximiser le gain économique, la 3ème entrée du superviseur sera la puissance planifiée du stockage ( $P_{plan}$ ). La planification du stockage est faite un jour avant le jour considéré en se basant sur la courbe de prix et les besoins du réseau.

La Figure 2 montre la structure du superviseur temps réel.  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  sont les coefficients de transformation en per unit. À la sortie, le superviseur fournit la consigne de puissance du stockage sans réglage de fréquence ( $P_{sans\ régl}$ ). Cette consigne est, ensuite, ajoutée la partie dédiée au réglage de fréquence ( $P_{réglage\ freq}$ ), qui constitue un service obligatoire, et on obtient en sortie une nouvelle consigne de puissance ( $P_{consigne}$ ).



**Figure 2. Entrées et sortie du superviseur temps réel**

## 4. Application

### 4.1. Le réseau de test IEEE 14 nœuds

Le réseau de test IEEE-14 nœuds [10] représente une partie du système électrique américain du Midwest en 1962. Il se compose de deux niveaux différents de tension (33kV et 132kV). La structure du réseau sera présentée dans la version finale de l'article.

Le réseau se compose de 11 charges ayant une consommation totale de 259 MW et de 73,5 MVar. Le générateur au nœud 1 (132kV) est séparé en deux pour assurer la sécurité N-1 du système. La puissance de chacun des générateurs est de 160 MW. Le générateur au nœud 2 a une puissance de 60 MW. Trois compensateurs synchrones sont respectivement raccordés aux nœuds 3, 6 et 8. Par rapport au réseau initial de 1962, trois fermes éoliennes sont ajoutées aux nœuds 12, 13 et 14 en 33kV [11].

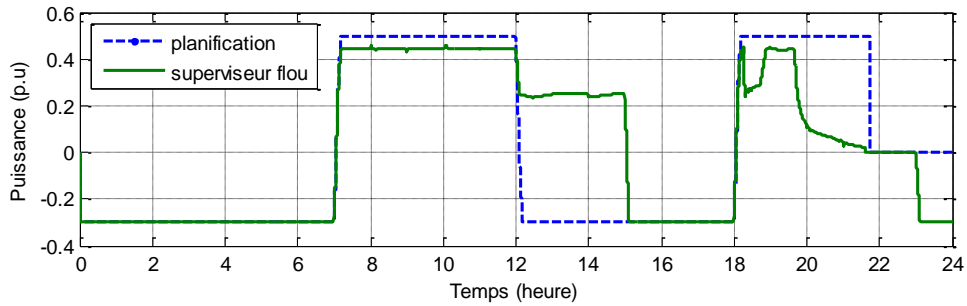
Par rapport au réseau initial de 1962, trois fermes éoliennes sont ajoutées aux nœuds 12, 13 et 14 en 33kV avec la puissance installée de 20, 50 et 70 MW.

Le stockage par air comprimé est installé au nœud 6. Il a la puissance maximale en décharge de 50 MW et la puissance maximale en charge de 30 MW. Sa capacité de stockage est de 500MWh.

## 4.2. Intérêt de la contribution du stockage aux services système

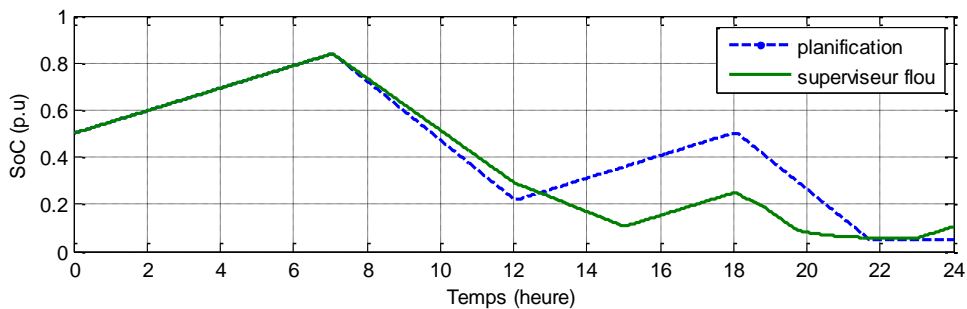
Dans cet exemple, nous considérons que le stockage a un rendement de 64%, et nous allons comparer le gain économique obtenu quand le stockage fonctionne suivant la planification avec celui fonctionnant suivant la consigne du superviseur temps réel.

La Figure 3 présente la courbe de puissance du stockage planifiée la veille pour le lendemain en traits discontinus, et celle obtenue avec le superviseur flou. Nous pouvons constater que sans la participation aux services système, la marge de réserve du stockage pour le réglage de fréquence n'est pas nécessaire, le stockage peut se décharger à sa puissance maximale. La courbe de puissance du stockage avec la consigne du superviseur flou est plus fluctuante.



**Figure 3. Courbe de puissance du stockage planifiée et obtenue avec le superviseur temps réel**

La Figure 4 illustre le niveau d'énergie dans le stockage sans et avec l'étage de supervision temps réel. Avec le superviseur flou, le stockage se décharge plus que dans le cas avec planification uniquement, car il doit participer également aux services système (dans notre cas le service de garantie de production renouvelable est le plus demandé, celui-ci demande au stockage de décharger). À la fin de la journée, quand le stockage est presque vide et que le prix de l'électricité n'est pas trop cher, le superviseur flou donne une consigne au stockage de charger. Pour cette raison, l'état de charge du stockage à la fin de la journée du scénario avec le superviseur flou est plus élevé par rapport à ce qui est obtenu avec la planification seul. Cette différence est égale à 0,0536 p.u, ce qui correspond à une quantité d'énergie de 26,8 MWh. Le bilan d'énergie du stockage dans les deux scénarios est présenté dans le Tableau 2.



**Figure 4. Etat de charge du stockage obtenue avec la puissance planifiée uniquement et obtenue avec le superviseur temps réel**

**Tableau 2. Bilan énergétique du stockage obtenu avec la puissance planifiée uniquement et obtenue avec le superviseur temps réel**

	Planification	Superviseur temps réel
SoC initiale	250MWh	250MWh
Charge	310,1MWh	262MWh
Décharge	535,1MWh	460,2MWh
SoC fin journée	25MWh	51,8MWh

Le gain économique du stockage dans la journée est plus grand s'il fonctionne suivant la consigne du superviseur temps réel. Avec le superviseur flou, le gestionnaire du stockage peut gagner jusqu'à 11646 euros à la fin de la journée au lieu de 8080 euros avec la planification, soit 144%.

Bien qu'étant un service obligatoire du stockage, la contribution du réglage de fréquence au gain économique total n'est pas élevée : seulement environ 860 euros sur la totalité de 11646 euros.

Le gain économique de l'opération achat/vente est de 6840 euros avec le superviseur flou, plus faible que les 8080 euros dans le scénario où le stockage fonctionne suivant la planification seule. En revanche, le niveau d'énergie du stockage à la fin de la journée est 26,8 MWh plus élevé.

Le gain économique rendu par les services supplémentaires prend un rôle important dans la totalité : 4000 euros. C'est l'ensemble des rémunérations que le gestionnaire du stockage peut recevoir pour la garantie de production renouvelable et la gestion de congestion.

## 5. Conclusions

Cet article propose une méthodologie de supervision temps réel permettant de maximiser les services rendus et la rentabilité du stockage. Un superviseur temps réel multi-objectifs basé sur la logique floue a été développé pour maximiser le gain économique du stockage en prenant en compte l'action achat/vente et les services (obligatoires et supplémentaires) du stockage comme le réglage de fréquence, la gestion des congestions et la garantie de la production renouvelable.

Le superviseur proposé a été testé sur un réseau de test IEEE 14 nœuds (sur une journée). Le résultat de la simulation a montré un gain économique nettement plus intéressant du stockage s'il participe aux services système nécessitant une gestion temps réel.

## 6. Références

- [1] B. Calaminus, "Innovative Adiabatic Compressed Air Energy Storage System of EnBW in Lower Saxony," in *2nd International Renewable Energy Storage conference (IRES II)*, Bonn, Germany, 2007.
- [2] C. Jakiel, S. Zunft, and A. Nowi, "Adiabatic compressed air energy storage plants for efficient peak load power supply from wind energy: the European project AA-CAES," *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 11, pp. 296-306, 6 August 2007.
- [3] A. Vergnol and B. Robyns, "Localization of storage by identification of weakness of power systems," in *MixGenera 2011*, Leganés, Madrid, Spain, November 17, 2011.
- [4] B. Robyns, A. Davigny, and C. Saudemont, "Energy management of storage systems based power sources and loads," *Electromotion Journal*, vol. 20, pp. 25-35, 2013.
- [5] J. Sprooten, V. Courtecuisse, B. Robyns, and J. Deuse, "Méthodologie de développement de superviseurs à logique floue de centrales multisources à base d'énergie renouvelable," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 553-583, Jun 2009.
- [6] V. Courtecuisse et al., "Methodology to build fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems," *Mathematics and Computers in Simulation, Elsevier*, vol. 81, pp. 208-224, Octobre 2010.
- [7] B. Robyns, A. Davigny, and C. Saudemont, "Methodologies for supervision of hybrid energy sources based on storage systems – A survey," *Mathematics and Computers in Simulation, Elsevier*, vol. 91, pp. 52-71, May 2013.
- [8] A. Vegnol, J. Sprooten, B. Robyns, V. Rioux, and J. Deuse, "Gestion des congestions dans un réseau intégrant de l'énergie éolienne," *Revue 3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle*, no. 59, pp. 63-72, Dec. 2009.
- [9] A. Vergnol, J. Sprooten, B. Robyns, V. Rioux, and J. Deuse, "Line Overload Alleviation through Corrective Control in Presence of Wind Energy," *Electric Power Systems Research, Elsevier*, vol. 81, pp. 1583-1591, July 2011.
- [10] IEEE, "IEEE Reliability Test System 1979," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, pp. 2047-2054, 1979.
- [11] T. Do-Minh, *Approche probabiliste pour l'évaluation de la fiabilité du système électrique intégrant des énergies renouvelables peu prévisibles*. Université Lille 1 – Sciences et Technologies: Thèse présentée le 5 décembre, 2012.