

## Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé

H. Ibrahim<sup>1\*</sup>, R. Younès<sup>2</sup>, A. Ilinca<sup>1</sup> et J. Perron<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE),  
Université du Québec à Rimouski, Canada

<sup>2</sup> Laboratoire 3M, Faculté de Génie,  
Université Libanaise, Beyrouth, Liban

<sup>3</sup> Laboratoire International des Matériaux Antigivre,  
Université du Québec à Chicoutimi, Canada

**Résumé** - *Le stockage représente la clé de la pénétration de l'énergie éolienne sur le réseau électrique. Il permet d'éviter un délestage en cas de surproduction, d'assurer en temps réel l'équilibre production-consommation et d'améliorer, également, la robustesse du réseau électrique. Le CAES (Compressed Air Energy Storage) est une technologie mature qui permet de stocker à longue ou courte durée une quantité d'énergie suffisante pour soutenir le nombre de cycles demandés. Le système éolien-CAES-gaz naturel et d'autres hybridations seront traités plus en détails par la suite dans cet article.*

**Mots clés:** Énergie éolienne – Stockage - Air comprimé – Diesel – Suralimentation - Turbine à gaz.

### 1. INTRODUCTION

L'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette parmi toutes les énergies renouvelables avec un potentiel mondiale de  $30 \cdot 10^{15}$  kWh/an [1]. La croissance rapide de cette production décentralisée rend difficile la stabilisation du réseau électrique, en raison du déséquilibre entre production - consommation. La puissance éolienne produite au fil du temps est caractérisée par sa fluctuation due à sa source primaire imprévisible et très intermittente [2]. Ceci limite l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans le réseau et rend difficile leur participation aux services systèmes. L'augmentation du taux de pénétration des parcs éoliens, conditionnée par leur participation à ces différents services, sera favorisée en associant ces parcs au réseau de distribution haute tension et à des systèmes de stockage d'énergie.

### 2. IMPORTANCE DU STOCKAGE POUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Le stockage d'énergie (SE) offre une gestion plus efficace pour les ressources éoliennes disponibles en assurant, en temps réel, l'équilibre production - consommation. Il permet également de les utiliser au mieux en évitant un délestage en cas de surproduction. Ceci augmente le taux de pénétration de l'énergie éolienne (TPE)<sup>†</sup> dans le réseau. De plus, un système de (SE), bien placé, augmente la qualité de l'énergie fournie en assurant un meilleur contrôle de la fréquence et de la tension et réduit l'impact de sa variabilité en apportant de la valeur au courant fourni surtout si l'électricité est livrée durant les périodes de pointe (Fig. 1).

### 3. STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉOLIENNE SOUS FORME D'AIR COMPRIME (CAES)

Le (CAES), déjà utilisé en Alabama et en Allemagne pour des centrales mixtes éolien-gaz, permet une augmentation significative du TPE. A titre d'exemple, le fait d'augmenter la puissance éolienne à un niveau 2.5 fois plus élevé que celui de la charge maximale permet de

---

\* 300 allée des Ursulines, G5L3A1, Qc, Canada, [houssein.ibrahim@uqar.qc.ca](mailto:houssein.ibrahim@uqar.qc.ca)

<sup>†</sup> TPE est le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge.

passer à une valeur près de 60 % du taux de pénétration en puissance de l'énergie éolienne (TPP)<sup>‡</sup>, le CAES assurant le reste (Fig.2) [3]. L'hybridation éolien-CAES permet de transférer l'énergie éolienne produite durant les périodes venteuses (TPP > 1) aux périodes de pointe ou moins venteuses (TPP < 1), en utilisant seulement une fraction du carburant consommée par la machine thermique standard de production. Un classement des hybridations possibles éolien-CAES, peut se faire, selon la nature d'application, en 3 catégories : à grande échelle, à moyenne échelle et à petite échelle. Les principales configurations de stockage par air comprimé utilisées dans les systèmes hybrides seront analysées par la suite.

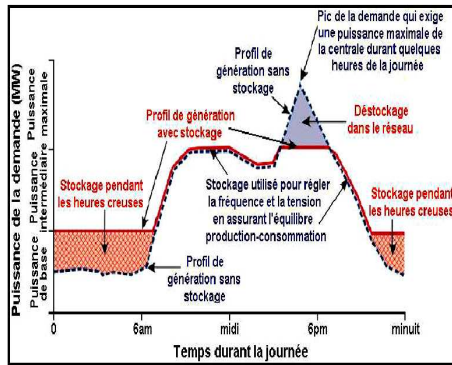


Fig. 1: Elimination des centrales de crête [4]

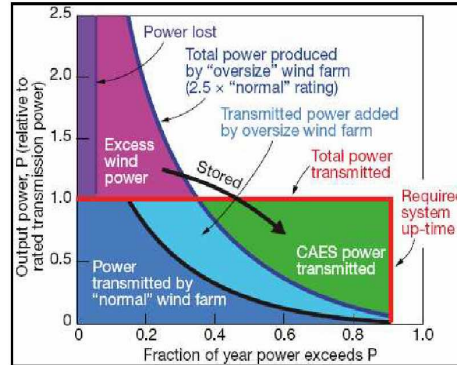


Fig. 2: Effet d'augmenter la puissance éolienne

### 3.1 Application à grande échelle : Eolien - CAES (centaines de MW)

C'est le cas des grands parcs éoliens raccordés au réseau d'électricité (Fig. 3). Le surplus de l'énergie éolienne quand (TPP > 1) est utilisé pour comprimer l'air via un compresseur et le stocker à 40 - 70 bars. Quand la puissance éolienne ne suffit pas à la charge (TPP < 1), l'air comprimé sera réchauffé dans une chambre de combustion avant de le détendre dans une turbine à gaz. Des grandes cavernes souterraines (mines de sel, champs pétroliers épuisés, etc.) sont utilisées pour stocker l'air comprimé en bénéficiant de pressions géostatiques [2].

### 3.2 Application à moyenne échelle : Eolien - Diesel - Air Comprimé (centaines de kW)

C'est le cas des régions éloignées non reliés au réseau d'électricité et qui sont alimentées par le diesel. Cela a des coûts prohibitifs en raison du prix élevé du transport du carburant [2]. L'utilisation du jumelage éolien - diesel avec stockage d'air comprimé (JEDSAC) permet de profiter de l'excès de l'énergie éolienne disponible quand (TPP > 1) pour comprimer l'air et le stocker dans des tuyauteries souterraines à 20 - 100 bars. Cette méthode élimine le critère de la géologie favorable et rend le système plus simple à être exploité (Fig. 4) [5]. L'air comprimé sert ensuite à suralimenter le moteur diesel qui fonctionnera quand (TPP < 1).

### 3.3 Application à petite échelle : Eolien - Diesel - Air Comprimé (dizaines de kW)

C'est le cas, par exemple, des stations de télécommunications ou des sites isolés alimentés par diesel. L'idée consiste à implanter une centrale éolienne comme source d'énergie d'appoint couplée à un moteur d'air comprimé équipé de 2 machines pneumatique (moto-compresseur) et électrique (moto-alternateur). Lorsque TPP > 1, l'énergie éolienne excédentaire est utilisée par l'alternateur pour entraîner le compresseur afin de recharger d'air comprimé des tuyauteries souterraines ou des réservoirs superficiels (340 litres à 300 bars). En l'absence de l'énergie éolienne (TPP < 1), l'air comprimé est détendu dans le moto-compresseur qui entraîne l'alternateur pour fournir de l'électricité. Le moteur diesel sera utilisé seulement en l'absence totale de l'énergie éolienne et du dispositif du stockage (Fig. 5).

<sup>‡</sup> TPP est le rapport entre la puissance éolienne instantanée et la puissance instantanée de la charge alimentée.

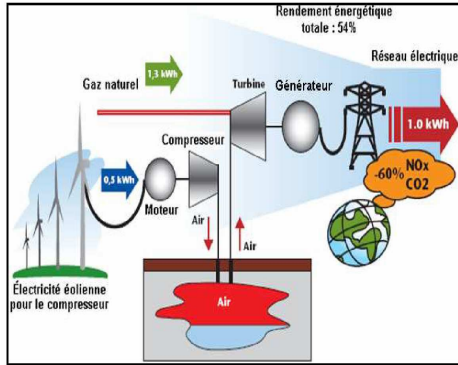


Fig. 3: Système éolien-CAES à grande échelle

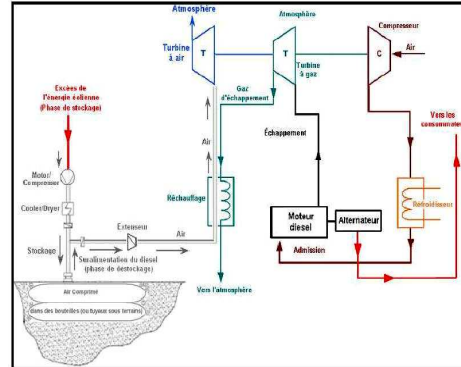


Fig. 4: Schéma de principe de JEDSAC [5]

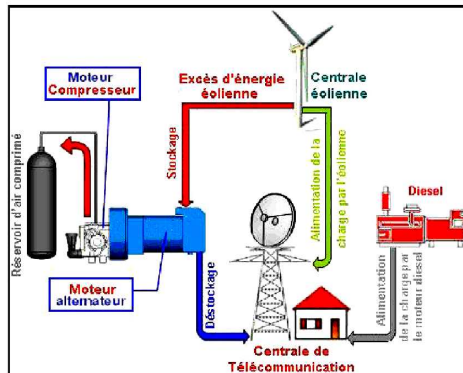


Fig. 5: Système de JEDSAC à petite échelle

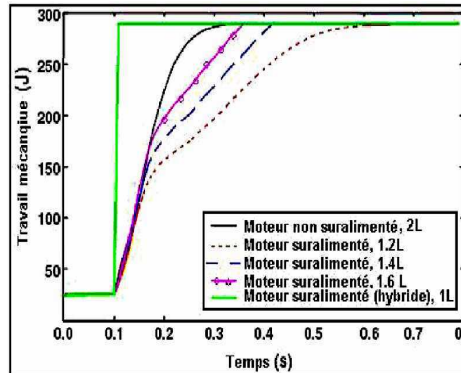


Fig. 6: Travail mécanique délivré [6]

#### 4. ANALYSE DES PERFORMANCES DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DE STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ

La première configuration (Fig. 3) n'est pas un système de stockage uniquement, elle est caractérisée par des émissions de gaz dues de la présence d'une chambre de combustion alimentée par du gaz naturel. La deuxième configuration (TACAS: Thermal and compressed air storage) permet d'accumuler en plus de l'air comprimé une certaine quantité d'énergie thermique. Ce système, plus proche du stockage, consomme en permanence une quantité d'énergie non négligeable pour maintenir la température du stockage thermique [7]. La troisième configuration (batterie oléopneumatique: BOP) permet de stocker de l'énergie à long terme sans pertes significatives à l'état chargé stationnaire et sans apport énergétique supplémentaire. Ce système a un rendement énergétique du cycle aller-retour similaire à celui d'un accumulateur électrochimique et présente des propriétés bien très intéressantes du point de la densité énergétique surtout dans sa deuxième version avec un cycle ouvert de gaz [7].

#### 5. ANALYSE DES PERFORMANCES DES DIFFÉRENTES HYBRIDATIONS ÉOLIEN-AIR COMPRIMÉ

Le système hybride éolien-CAES à grande échelle permet de passer d'une valeur TPE de 30% pour une simple centrale éolien-gaz naturel (sans stockage) à une valeur de TPE proche de 100 % [3]. Il produit une puissance 3 fois plus importante qu'une centrale conventionnelle pour la même consommation du gaz (Fig. 3) [2]. Ce système participe au réglage secondaire du réseau grâce à une possibilité de variation de puissance de l'ordre de 50 MW/min et à son bon rendement

conditionné par la récupération de la chaleur résiduelle de la fumée pour préchauffer l'air ou par l'association d'un (TACAS) [1]. L'humidification de l'air comprimé provenant du stockage permet d'améliorer le rendement et diminuer la consommation, où la vapeur produite dans les chambres de combustion sera utilisée pendant la détente dans une turbine à gaz à humidification de l'air pour augmenter la puissance électrique produite. Ce principe permet aussi de diminuer l'émission de GES et de  $\text{NO}_x$ .

Le JEDSAC aura comme effet l'augmentation du (TPE), la puissance et le rendement du moteur diesel et ainsi diminuer la consommation en combustible. Il permet aussi à la boucle de suralimentation de fonctionner indépendamment du moteur grâce à l'énergie fournie par l'air comprimé détendu dans la turbine à air. Ce système est conçu pour répondre à la charge demandée en profitant au maximum de l'hybridation, ce qui revient à utiliser au mieux la puissance disponible au sein des deux turbines à gaz et à air pour améliorer le remplissage du diesel [5]. Le JEDSAC présente un potentiel commercial très important pour les régions isolées du Canada et ailleurs dans le monde car la technologie utilise des génératrices diesel déjà en place. Le délai de récupération de l'investissement, sur un site à bon potentiel éolien, varie de 2 à 5 ans, en fonction des coûts de transport du carburant. Ce délai peut descendre en dessous d'un an pour des sites accessibles seulement en hélicoptère [5].

L'hybridation à petite échelle éolien-diesel-moteur à air comprimé (Fig. 5) permet de diminuer la consommation en carburant et remplacer le démarrage intermittent du groupe électrogène ce qui diminuera l'usure du moteur diesel et les frais d'entretien. L'autonomie est directement liée à la capacité du réservoir d'air. La possibilité d'accoupler mécaniquement les moteurs à air comprimé permet de répondre à des besoins différents en termes de puissance sur des gammes allant jusqu'à une centaine de kilowatts. Les batteries oléopneumatiques peuvent remplacer le moteur à air comprimé. Ces dispositifs de stockage, de type 'tampon', permettent de stocker l'énergie à l'échelle locale et la mettre rapidement en disposition.

## 6. CONCLUSION

Les systèmes hybrides traités dans cet article ont des domaines d'application différents et la méthode de stockage d'air comprimé diffère selon l'hybridation et la puissance demandée. Cependant, le CAES présente, pour tous ces systèmes, une solution intéressante au problème des fortes fluctuations stochastiques de l'énergie éolienne car il permet une conversion à rendement élevé (60-70 % sur un cycle charge-décharge) et d'effectuer un nombre de cycles quasi illimité. Le JEDSAC à moyenne échelle, présente un intérêt économique, écologique et énergétique. Il permet d'utiliser des moteurs à petite cylindrée, de diminuer l'encombrement, la consommation en carburant et les émissions de GES. La suralimentation hybride met, aussi, en disposition, instantanément, un couple maximum ce qui compensera le retard du couple en transitoire et permettra au moteur de répondre plus rapidement aux besoins (Fig. 6) [6].

## REFERENCES

- [1] H. Ibrahim, 'Systèmes de Stockage de l'Energie pour les Eoliennes', International Conference Wind Energy and Remote Regions, Magdalen Islands, Canada, 19-21 Octobre, 2005.
- [2] H. Ibrahim, A. Ilinca and J. Perron, 'Energy Storage Systems - Characteristics and Comparisons', Renewable & Sustainable Energy Reviews, RSE405, (accepted 2007).
- [3] D. Robb, 'Making a CAES for Wind Energy Storage', North American Wind Power, June 2005.
- [4] [www.electricitystorage.org](http://www.electricitystorage.org)
- [5] H. Ibrahim, R. Younès and A. Ilinca, 'Optimal Conception of a Hybrid Generator of Electricity', CANCAM07-ETS-39, Toronto, Canada, 2007.
- [6] A. Charlet, L. Vasile et P. Higelin, 'Relance Turbocompresseur et Hybridation Pneumatique', L.M.E., Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, France, 2006.
- [7] A. Rufer and S. Lemofouet, 'Stockage d'Energie par Air Comprimé: un Défi pour les Circuits d'Electronique de Puissance', Laboratoire d'Electronique Industrielle, EPFL, Lausanne, Suisse.