



**HAL**  
open science

## Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques. Contribution aux services systèmes

Benoit Robyns, Aymeric Ansel, Arnaud Davigny, Christophe Saudemont,  
Gabriel Cimuca, Mircea Radulescu, Jean-Michel Grave

### ► To cite this version:

Benoit Robyns, Aymeric Ansel, Arnaud Davigny, Christophe Saudemont, Gabriel Cimuca, et al.. Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques. Contribution aux services systèmes. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2005, La Revue de l'électricité et de l'électronique, 5, pp.77-85. 10.3845/REE.2005.049 . hal-04439804

**HAL Id: hal-04439804**

**<https://hal.univ-lille.fr/hal-04439804v1>**

Submitted on 5 Feb 2024

**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.

# Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques. Contribution aux services système.

Par Benoît Robyns<sup>1</sup>, Aymeric Ansel<sup>1</sup>, Arnaud Davigny<sup>1</sup>, Christophe Saudemont<sup>1</sup>, Gabriel Cimuca<sup>2</sup>, Mircea Radulescu<sup>2</sup>, Jean-Michel Grave<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP), Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI)

<sup>2</sup>Small Electric Motors and Electric Traction Group, Technical University of Cluj-Napoca, Roumanie

<sup>3</sup>Forclum Ingénierie, Verquin

## L'essentiel

Le problème majeur induit par l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans les réseaux est dû à leur source primaire difficilement prévisible et très fluctuante qui rend difficile leur participation aux services système (réglage de la tension et de la fréquence, black start, fonctionnement en îloté,...).

L'augmentation du taux de pénétration des éoliennes sera donc conditionnée par leur participation à ces différents services, ce qui nécessitera de leur associer des systèmes de stockage de l'énergie électrique.

Dans cet article, après une brève synthèse des techniques de stockage de l'énergie adaptées aux réseaux électriques, trois exemples d'étude montrant l'intérêt d'associer du stockage inertiel à des éoliennes sont présentés. Il s'agit d'un couplage éolien-diesel, d'un émulateur temps réel d'une éolienne à vitesse variable associé à du stockage inertiel et de la participation aux services système d'une petite ferme d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage. Différents apports du stockage sont illustrés par des simulations numériques ou des essais expérimentaux : le lissage de puissance, le réglage de la fréquence et de la tension et l'îlotage.

## Synopsis

The main problem induced by the integration of numerous wind generators in electrical networks is due to a primary source foreseeable with difficulty and very changeable, which refrains their participation to the ancillary services (voltage and frequency control, black start, working in islanding mode,...). The penetration level increasing of wind generators will then depends on their participation to the ancillary services, which will need the association of electrical storage systems.

In this paper, after a brief synthesis on the energy storage system adapted to electrical networks, three examples showing the interest to associate flywheel energy storage system with wind generators are developed: an association wind-diesel generators, a real time emulator of a variable speed wind generator associated with a flywheel energy storage system and the participation to the ancillary services of a small farm including variable speed wind generators associated with storage systems. Different

contributions of the storage are shown with the help of numerical simulations and experimental results: power smoothing, frequency and voltage control and the islanding.

## 1. Introduction

La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée induisent de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Ces problèmes sont liés évidemment aux nouveaux types de sources, distribuées géographiquement et se développant rapidement, mais ils concerneront aussi à l'avenir la gestion, voire la structure des réseaux d'énergie [1,2].

Le problème majeur associé aux sources d'énergie décentralisées est qu'elles ne participent en général pas aux services système (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome ou black start, possibilité de fonctionner en îlotage,...). Le fait de ne pas participer aux services système amène ce type de source à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique. Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques. Le taux de pénétration de la production décentralisée, c'est-à-dire la puissance qu'elle génère par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables [2]. Ceci est particulièrement vrai pour les sources à énergie renouvelable dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante, comme c'est le cas de l'éolien pour lequel certains retours d'expérience indiquent que pour des taux de pénétration supérieurs à 20 ou 30% des problèmes de stabilité peuvent apparaître [2]. La figure 1 montre un enregistrement de la puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300 kW (ancien site éolien de Dunkerque) soumis à un vent moyen de 12 m/s. Cet enregistrement, qui illustre le caractère très fluctuant de la puissance générée par ce type d'éolienne, montre que cette puissance peut subir des variations de plus de 100 kW en 3 secondes.

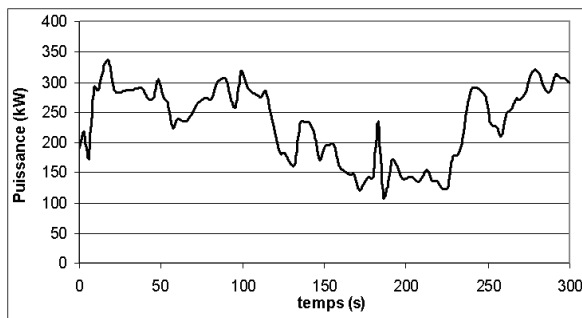


Figure 1. Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300 kW.

La grande sensibilité de la production décentralisée aux perturbations du réseau, tels que les creux de tension ou les variations de fréquence, entraîne souvent une déconnexion de la production lors d'incidents sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production-consommation et par effet domino accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau. Il peut dès lors être demandé à la production décentralisée de rester connectée au réseau (par exemple durant 600 ms) lors d'un creux de tension induisant une tension résiduelle dégradée (par exemple 30% de la tension nominale).

La possibilité de fonctionner en îloté permettrait à la production décentralisée de continuer à alimenter des consommateurs isolés du réseau suite à un défaut sur celui-ci, et ainsi à limiter le nombre de clients affectés par ce défaut. L'îlotage reste cependant interdit actuellement pour des raisons de sécurité des personnes et du matériel. Permettre l'îlotage nécessitera de revoir les stratégies de contrôle-commande de ces productions, voire l'ajout de systèmes de stockage de l'énergie électrique lorsque la source primaire est aléatoire, et pourrait également nécessiter de revoir la structure des réseaux de distribution.

L'augmentation du taux de pénétration de la production décentralisée sera donc conditionnée par la participation aux services système de cette production.

La participation au réglage de la tension en absorbant ou en injectant de la puissance réactive tend à se développer, car elle est actuellement imposée par des arrêtés et décrets [3].

Dans le cas d'unités de production connectées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance (éolienne moderne de grande puissance, photovoltaïque, turbine à gaz dérivée d'un réacteur d'avion), la participation au réglage de la fréquence comme dans les centrales classiques n'est pas immédiate. En effet, le réglage primaire de la fréquence dans les centrales classiques est basé sur le

lien naturel existant entre les variations de puissance active générées par un alternateur et sa vitesse de rotation déterminant la fréquence des tensions et courants générés. Un tel lien n'existe évidemment pas lorsque la puissance est contrôlée via un convertisseur électronique de puissance puisque la fréquence de fonctionnement de ce convertisseur est totalement déterminée par la commande. Cette fréquence est généralement synchronisée sur celle du réseau. Les variations de fréquence du réseau peuvent donc être perçues au niveau de l'interface électronique de puissance et un réglage de la puissance générée par la source amont est donc envisageable. Mais ceci suppose que le réseau inclut des alternateurs classiques qui influent sur la fréquence en fonction des variations de la consommation. Cette contrainte entraînera de toute façon une limitation du taux de pénétration des sources interfacées avec l'électronique de puissance et ce mode de fonctionnement empêchera ce type de source d'alimenter des consommateurs isolés en cas d'îlotage.

Il est cependant possible d'introduire un lien « artificiel » entre les variations de puissance demandées par les consommateurs et la fréquence de fonctionnement des interfaces électroniques de puissance [4,5]. En poussant ainsi l'analogie avec le fonctionnement d'un alternateur classique, on peut espérer pouvoir à l'avenir assurer un taux de pénétration élevé de ce type de source et lui permettre de fonctionner en îlotage. Ceci reste néanmoins prospectif.

Pour permettre aux unités de production basées sur des sources aléatoires (éolien, photovoltaïque) de participer pleinement aux services système, il faudra leur associer des systèmes de stockage de l'énergie électrique. L'électricité ne se stocke cependant pas facilement, et nécessite sa transformation sous une autre forme énergétique (chimique, mécanique, thermique,...). Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable. Les concepts permettant le stockage à long et court terme existent [6,7]. Il faut les mettre en oeuvre à grande échelle afin d'en réduire les coûts. Des réalisations récentes montrent que du stockage conséquent est possible. En 2003, un accumulateur électrochimique pouvant fournir 40 MW sur 7 minutes (ou 27 MW durant 15 minutes) a été installé en Alaska afin de soutenir le réseau [8]. Un système de stockage inertiel pouvant fournir 1 MW pendant 15 minutes est proposé par une firme américaine [9]. Cette dernière forme de stockage semble particulièrement bien adaptée à une association avec des éoliennes, du fait de sa grande dynamique, de son bon rendement et de sa durée de vie similaire à celle des éoliennes [10]. Ce type de stockage à court terme permet de lisser la puissance générée par

l'éolienne [11,12], et pourrait même permettre aux éoliennes de participer au réglage primaire de la fréquence du réseau auquel l'éolienne est connectée [4,5]. L'association de systèmes de stockage aux sources à énergie renouvelable constitue évidemment un surcoût qui devrait à l'avenir être compensé par la valorisation financière par le gestionnaire du réseau des services système fournis par le producteur [13,14].

Dans la première partie de cet article, une brève synthèse des techniques de stockage de l'énergie adaptées aux réseaux électriques est présentée.

Trois exemples d'étude montrant l'intérêt d'associer du stockage inertiel à des éoliennes sont ensuite présentés. Il s'agit d'un couplage éolien-diesel, d'un émulateur temps réel d'une éolienne à vitesse variable associé à du stockage inertiel et de la participation aux services système d'une petite ferme d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage. Différents apports du stockage sont illustrés par des simulations numériques ou des essais expérimentaux : le lissage de puissance, le réglage de la fréquence et de la tension ainsi que l'aptitude à l'ilotage.

## 2. Le stockage de l'énergie dans les réseaux électriques

Les techniques permettant le stockage de l'énergie dans des applications fixes telles que celles concernant la production et la distribution de l'énergie électrique sont décrites en détail dans les références [6,7]. Une brève synthèse de ces techniques, en distinguant les stockages à long et court terme, est présentée ci-dessous.

Techniques permettant un stockage à long terme d'énergie d'origine électrique, sur une durée supérieure à la dizaine de minutes et pouvant atteindre plusieurs mois :

- Pompage hydraulique, stockage gravitaire utilisé à grande échelle dans les réseaux électriques ;
- Stockage thermique, sous forme de chaleur sensible (sans changement d'état) ou de chaleur latente (avec changement d'état) ;
- Stockage sous forme d'énergie de pression au moyen d'air comprimé ;
- Batteries d'accumulateurs électrochimiques se déclinant sous différentes variantes ;
- Stockage d'hydrogène obtenu par électrolyse et utilisation d'une pile à combustible pour restituer l'électricité.

Techniques permettant un stockage à court terme d'énergie d'origine électrique, de la seconde à quelques dizaines de minutes :

- Stockage d'énergie cinétique dans une masse tournante appelée volant d'inertie ;

- Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES) ;
- Stockage d'énergie électrique dans des supercondensateurs.

Le stockage par pompage hydraulique est largement utilisé dans les réseaux électriques. En France, 4200 MW de stockage de ce type sont installés. Ce stockage de masse à long terme nécessite cependant un espace important et n'est envisageable que dans des régions montagneuses. Le stockage par batteries électrochimiques est le plus répandu dans un nombre varié d'applications. Ce type de stockage s'accommode cependant mal des cycles de charge et décharge à fréquence élevée qui réduisent considérablement sa durée de vie, et de ce fait n'est donc pas bien adapté à une association avec de l'éolien. Le stockage d'air comprimé semble une solution prometteuse pour l'avenir, mais il nécessite d'importantes cavités souterraines pour stocker cet air comprimé. Il est envisageable d'utiliser à cet effet d'anciennes galeries de mines désaffectées. Le stockage de l'hydrogène apparaît également comme une solution d'avenir, mais le coût élevé des piles à combustible constitue encore un obstacle important.

Parmi les techniques de stockage à court terme, les stockages d'énergie magnétique et électrique ont des capacités de temps de fourniture de leur puissance nominale limitées à quelques secondes. Le stockage inertiel présente une capacité pouvant atteindre plusieurs dizaines de minutes. De plus cette technologie est actuellement mûre et commercialisée par plusieurs entreprises. L'association de ce type de stockage à des éoliennes est donc techniquement intéressante et réalisable, et peut être valorisée économiquement.

## 3. Le stockage inertiel associé à des générateurs éoliens

L'énergie stockée dans une masse tournante dépend du moment d'inertie  $J$  de cette masse et de sa vitesse angulaire  $\omega$  suivant la relation (1).

$$E = \frac{J\omega^2}{2} \quad (1)$$

Afin de limiter sa masse, la relation (1) montre que, pour une énergie donnée, ce volant doit tourner à des vitesses élevées. On distingue les volants basse et haute vitesse suivant que celle-ci est inférieure ou supérieure à 10 000 tours/min. Lorsque la vitesse est élevée, des paliers magnétiques doivent être utilisés afin de limiter les pertes par frottement dépendant de la vitesse. Pour cette raison, il est aussi souhaitable que le volant soit placé dans une enceinte sous vide. Ces contraintes rendent le système de stockage inertiel coûteux, mais permettent d'en réduire le volume et le

poids, le rendant ainsi adapté à des applications embarquées [10]. Dans les applications fixes telles que celles rencontrées dans les réseaux, les contraintes de volume et de poids ne sont pas nécessairement critiques, ce qui permet d'envisager des volants fonctionnant à basse vitesse [15] entraînés par des machines électriques classiques.

Il est montré dans [6] que le système de stockage actuellement le plus économique dans des applications fixes est le stockage inertiel, et ce pour des durées de stockage d'une dizaine de minutes.

### 3.1 Couplage éolien-diesel : lissage de la puissance

Sur sites isolés, l'énergie électrique est souvent produite par des groupes électrogènes. Cependant, nombre de ces sites possèdent un potentiel éolien exploitable et il est alors intéressant d'associer aux groupes électrogènes quelques éoliennes, car l'électricité produite par un groupe électrogène est plus chère que celle produite par une éolienne [16]. Pour réduire la consommation de carburant et les variations de puissance que subit le groupe électrogène, il est intéressant de coupler au système éolien – diesel un système de stockage d'énergie. De plus, les variations de puissance (figure 1) dues aux fluctuations de la vitesse du vent entraînent une diminution de la durée de vie du moteur diesel. En collaboration avec Forclum Ingénierie (Verquin), une étude montrant l'intérêt de l'association d'un système de stockage inertiel au couplage éolien–diesel a été réalisée [11]. Le système de stockage inertiel à vitesse lente considéré est représenté à la figure 2. Il est composé d'une machine asynchrone à cage d'écureuil reliée au réseau par un système à double convertisseur entièrement commandé.

Le schéma global du système étudié est représenté à la figure 3. Pour contrôler l'échange de puissance entre

le réseau et le système de stockage, un superviseur à logique floue a été proposé avec pour but de diminuer les variations de puissance que subit le groupe électrogène [11]. Les performances intéressantes du superviseur ont été montrées au moyen de simulations numériques dans lesquelles une éolienne à vitesse fixe de 300 kW et un groupe électrogène de 600 kVA ont été considérés. La puissance de la machine asynchrone couplée au volant d'inertie ( $J = 105,2 \text{ kg.m}^2$ ) est de 90 kW [17]. Les valeurs des puissances nominales choisies pour l'éolienne et le groupe électrogène résultent de l'objectif d'augmenter le taux de pénétration de l'éolien dans des sites isolés.

Pour diminuer les variations de puissance que subit le groupe électrogène, le système de stockage doit compenser les variations de puissance générées par l'éolienne. Si  $P_{reg}$  est la puissance que l'on souhaite obtenir de l'association système de stockage - éolienne et  $P_{wg}$  la puissance générée par l'éolienne, la puissance de référence que le système de stockage devra échanger avec le réseau se détermine de la façon suivante :

$$P_{ref} = P_{reg} - P_{wg} \quad (2)$$

Pour déterminer  $P_{reg}$ , on utilise une mesure filtrée de la puissance de l'éolienne  $P_{wg}$ . Mais comme la vitesse du volant d'inertie est maintenue entre 3000 et 6000 tours/min, il est nécessaire d'en tenir compte pour déterminer  $P_{reg}$  afin d'éviter une saturation du système de stockage d'énergie. Un superviseur à logique floue a été proposé pour déterminer  $P_{reg}$ . La figure 4 montre les entrées de ce superviseur. L'algorithme flou est développé en appendice. La figure 5 représente l'évolution non linéaire de  $P_{reg}$  en fonction de la puissance générée par l'éolienne et de la vitesse du volant.

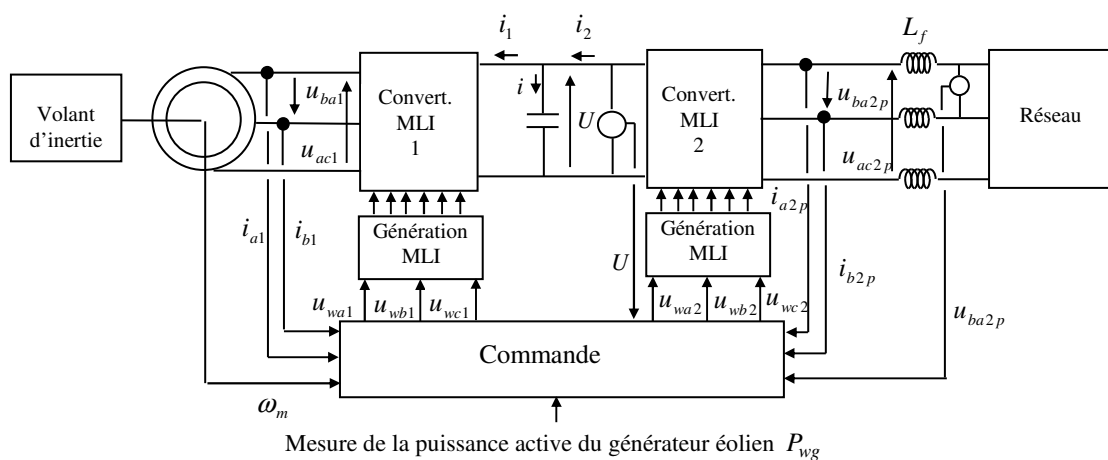


Figure 2. Système de stockage inertiel.

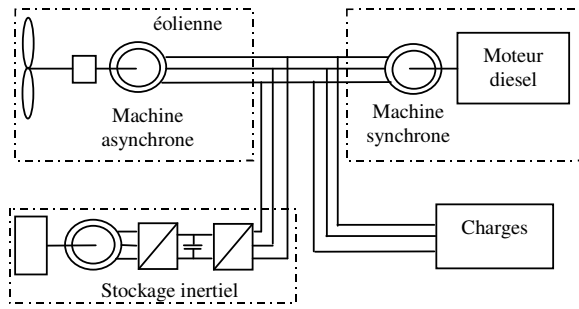


Figure 3. Schéma global du réseau éolien - diesel incluant le système de stockage d'énergie.

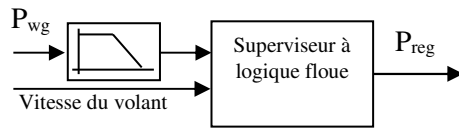


Figure 4. Superviseur à logique floue.

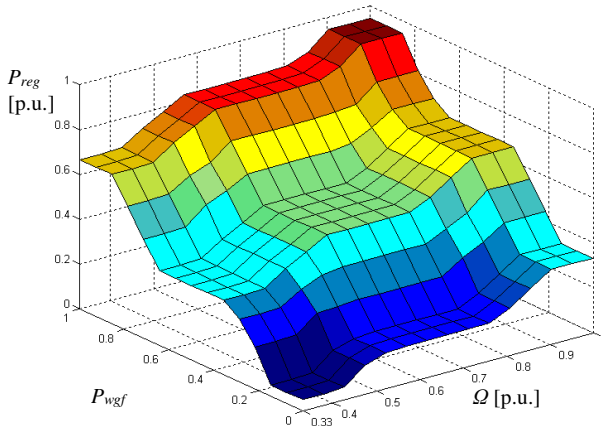


Figure 5. Evolution de la puissance de réglage de l'association éolienne-stockage déduite par logique floue en fonction de la puissance générée par l'éolienne et de la vitesse du volant.

La puissance de référence (2) permet de déterminer la vitesse de référence du volant d'inertie contrôlée par le convertisseur 1 (figure 2) avec l'aide d'une commande vectorielle classique. La puissance échangée avec le réseau est contrôlée via le convertisseur 2 [18].

Pour simuler la turbine éolienne, des mesures ont été réalisées par Forclum Ingénierie sur une éolienne à vitesse constante de 300 kW installée à Dunkerque. La figure 6 montre la vitesse du vent mesurée dans le cas d'une vitesse moyenne (environ 10 m/s) suivie d'une vitesse faible (environ 6,3 m/s). Dans la simulation, la puissance active consommée par la charge est de 300 kW et sa puissance réactive est de 120 kVAR. Initialement, la vitesse de rotation du volant d'inertie

couplé à la machine asynchrone est de 3500 tours/min.

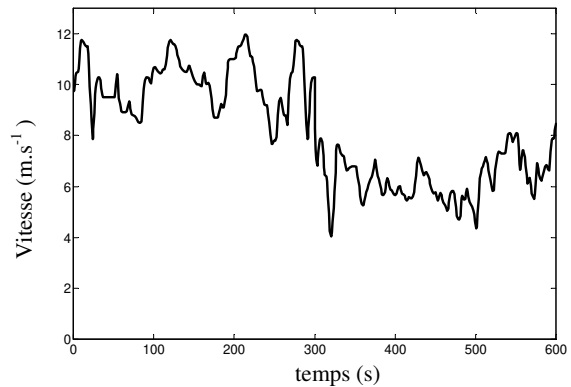


Figure 6. Vitesse du vent considérée dans la simulation.

La figure 7 montre la puissance active générée par le groupe électrogène avec et sans système de stockage respectivement en trait continu et en pointillés. Cette figure confirme que le système de stockage proposé permet de réduire considérablement les variations de puissance du groupe électrogène. Durant les brutales variations de la vitesse du vent, des variations significatives de puissance subsistent. Ceci est dû à la puissance de la machine asynchrone couplée au volant d'inertie qui est limitée à 90 kW.

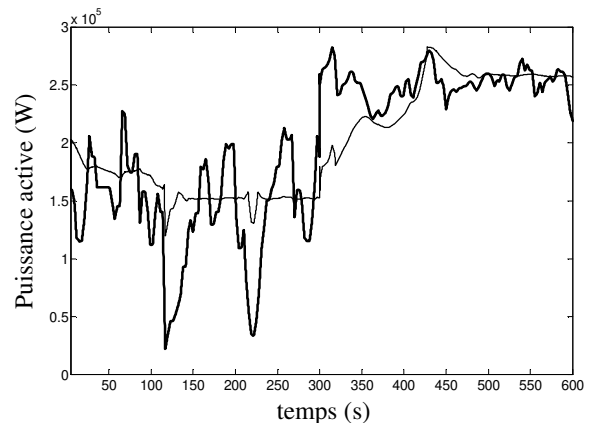


Figure 7. Puissance active générée par le groupe électrogène avec et sans système de stockage respectivement en trait continu et en pointillés.

### 3.2 Stockage associé à une éolienne à vitesse variable : développement d'un émulateur temps réel

Dans le cas d'éoliennes à vitesse variable, la connexion du système de stockage à la génératrice éolienne peut être réalisée au niveau d'un bus de tension continue (figure 8). Ainsi connecté, le dispositif de stockage inertiel est chargé du contrôle de la tension du bus continu (absorbant ou restituant le

différentiel de puissance entre la production éolienne d'une part, et la consommation au niveau du réseau d'autre part). Le convertisseur de puissance connecté au réseau est, quant à lui, chargé d'assurer le réglage de l'amplitude et de la fréquence des tensions au point de connexion au réseau.

Afin d'évaluer la capacité des générateurs éoliens à assurer des services système, nous considérons un dispositif de génération capable d'alimenter des charges isolées ou d'être intégré à un réseau alimenté par des alternateurs classiques. Le passage de la seconde à la première de ces deux situations correspondant à un flottage. Ces contraintes supposent un générateur capable de fonctionner sans source auxiliaire, de participer à l'équilibre consommation-production et capable de régler l'amplitude ainsi que la fréquence des tensions qu'il fournit. C'est pourquoi nous considérons une machine synchrone à aimants permanents fonctionnant en génératrice à vitesse variable et un système de stockage inertiel relié au bus de tension continue [12,19,20].

Un banc d'essai reproduisant en temps réel et à échelle réduite (3 kW) le comportement du système présenté à la figure 8 est développé au sein du L2EP, sur le site de HEI. Ce banc est décrit en détail dans [20]. Les résultats expérimentaux présentés dans cet article montre l'importance de la stratégie de supervision en se fixant comme objectif le lissage de la puissance envoyée au réseau. La stratégie de supervision considérée est déduite du superviseur à logique floue présenté dans la section précédente et développé en appendice. Afin de réduire le temps de calcul de l'application temps réel, la surface obtenue en sortie du superviseur (présentée à la figure 5) est approchée par des surfaces simplifiées présentées aux figures 9 et 10.

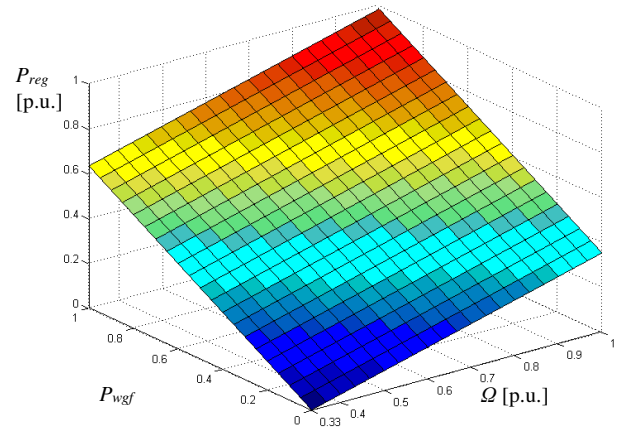


Figure 9. Evolution simplifiée de la puissance de réglage de l'association éolienne-stockage en fonction de la puissance générée par l'éolienne et de la vitesse du volant.

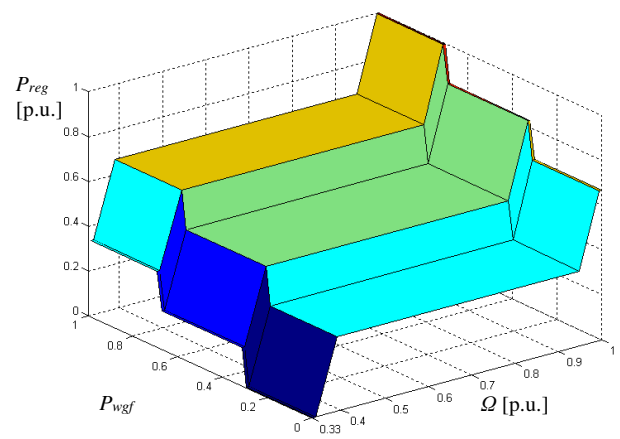


Figure 10. Evolution simplifiée de la puissance de réglage de l'association éolienne-stockage fonction de la puissance générée par l'éolienne et de la vitesse du volant.

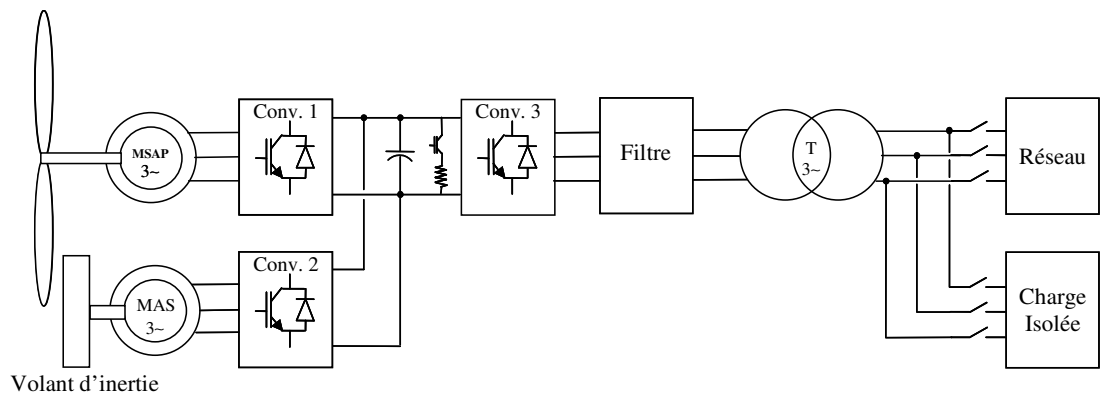


Figure 8. Eolienne à vitesse variable associé à du stockage en vue d'un fonctionnement sur réseau ou sur charges isolées

L'essai expérimental de la figure 11 représente la vitesse de la génératrice éolienne et la puissance générée sur le réseau sans système de stockage. Les essais représentés aux figures 12 et 13 ont été réalisés avec le même enregistrement de la vitesse du vent que celui de la figure 11, mais avec un système de stockage inertiel lissant la puissance au moyen des superviseurs respectivement des figures 9 et 10. Les figures 12 et 13 montrent, pour chaque essai, la puissance générée sur le réseau et la vitesse du volant d'inertie. L'évolution de la puissance générée sur le réseau est sensiblement différente dans les deux essais. En effet, la figure 13.a montre par moment une évolution constante de cette puissance, tandis que la figure 12.a montre une évolution filtrée de la puissance. L'exigence plus forte en terme de lissage dans le cas de l'essai de la figure 13 se solde par une saturation plus rapide de la vitesse du volant (comprise entre 1000 et 3000 tours/min.), entraînant par moment une absence totale de lissage de la puissance générée. Ceci est dû à la valeur limitée du moment d'inertie du volant ( $J = 0,22 \text{ kg.m}^2$ ), lequel est un produit commercial [20] qui n'est pas spécifiquement adapté à l'application considérée. D'autre part, on constate que les valeurs moyennes des puissances générées sur le réseau dans les essais des figures 12 et 13 sont sensiblement inférieures à la valeur moyenne de la puissance générée dans l'essai de la figure 11. Cette différence s'explique par la nécessité de fluxer la machine asynchrone entraînant le volant et par les pertes dans cette machine et dans les convertisseurs électroniques de puissance [21]. La machine asynchrone fonctionnant à une puissance nettement inférieure à sa puissance nominale du fait que l'on se contente de lisser la puissance, son rendement est relativement faible. Le choix de ce type de machine est justifié par sa simplicité et son faible coût, mais n'est pas le plus favorable du point de vue du rendement [22]. Les rendements des systèmes de stockage inertiel industriels atteignent des valeurs allant de 70 à 95%. Les premiers essais obtenus sur le banc d'essai de 3kW montrent néanmoins l'apport du stockage sur la qualité de la puissance générée par l'éolienne, ainsi que l'importance de la stratégie de supervision.

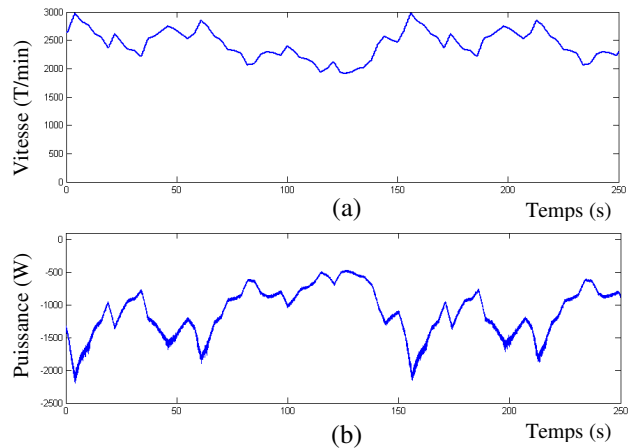


Figure 11. Vitesse de la génératrice éolienne (a) et puissance générée sur le réseau (b) en l'absence de stockage.

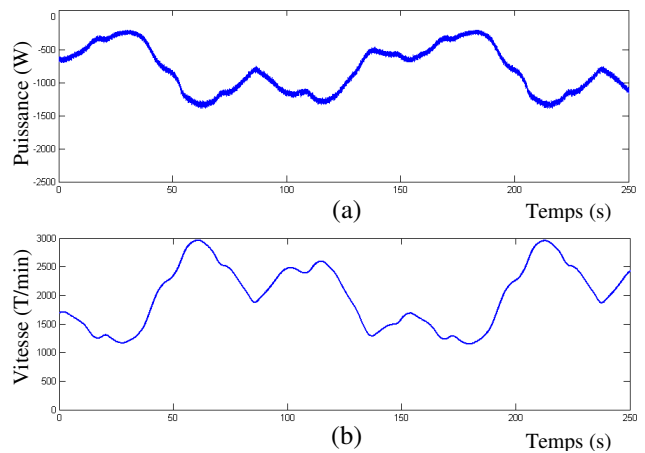


Figure 12. Puissance générée sur le réseau (a) et vitesse du volant d'inertie (b) en considérant le superviseur représenté à la figure 9.

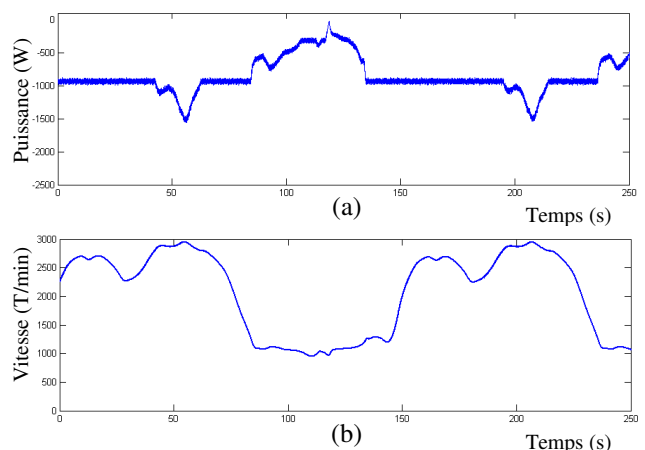


Figure 13. Puissance générée sur le réseau (a) et vitesse du volant d'inertie (b) en considérant le superviseur représenté à la figure 10.



### 3.3 Ferme d'éoliennes à vitesse variable : participation aux services système

Le réglage primaire de la fréquence dans les centrales classiques est basé sur le lien naturel existant entre les variations de puissance active générée par un alternateur et sa vitesse de rotation déterminant la fréquence des tensions et courants générés. Un tel lien n'existe évidemment pas lorsque la puissance est contrôlée via un convertisseur électronique de puissance. Dans le but d'amener la structure d'éolienne représentée à la figure 8 à participer aux services système et en particulier à pouvoir fonctionner en îloté, un lien artificiel est introduit entre la fréquence du convertisseur de puissance et la puissance qu'il génère [23]. Cette relation, représentée à la figure 14, s'inspire de stratégies de réglage appliquées à des alimentations de secours fonctionnant en parallèle [24,25], et permet aux différentes sources de se partager équitablement la puissance fournie aux charges. Les techniques proposées de réglage de la fréquence et de la tension, ainsi que la stratégie de supervision, sont développées dans [4,5]. Ces techniques ont été testées au moyen de simulations numériques sur le réseau de distribution 20 kV représenté à la figure 15.

Les trois systèmes éolien-stockage (GS1, GS2 et GS3) sont soumis à trois profils de vent différents représentés à la figure 16. Ces systèmes, dont l'éolienne et le système de stockage ont chacun une puissance nominale de 600 kW, sont connectés au réseau puissant entre 0 et 150 s. A partir de 150 s, ces

systèmes fonctionnent en isolé, suite à la déconnexion du réseau, en alimentant des charges variant entre [400 kW; 100 kVAR] et [1200 kW; 300 kVAR]. La figure 17 montre la puissance active générée par chaque génératrice éolienne à pales orientables, tandis que la figure 18 montre la puissance active générée par chaque système éolien-stockage, qui est évidemment lissée grâce au stockage, et la puissance reçue ou fournie par le réseau. La figure 19 montre les vitesses des trois volants d'inertie qui sont maintenues entre 3000 et 6000 tours/min. Ces résultats de simulation montrent qu'une ferme éolienne pourrait fonctionner en mode interconnecté avec un réseau puissant et en mode isolé, en assurant en douceur le basculement brutal du premier mode au deuxième mode, c-à-d un îlotage, grâce à l'ajout d'un système de stockage, à l'intégration d'un statisme fréquence-puissance et à une stratégie de supervision adaptée.

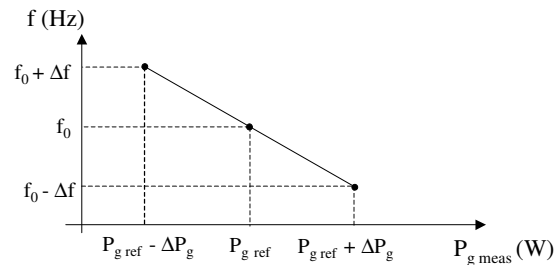


Figure 14. Statisme fréquence-puissance.

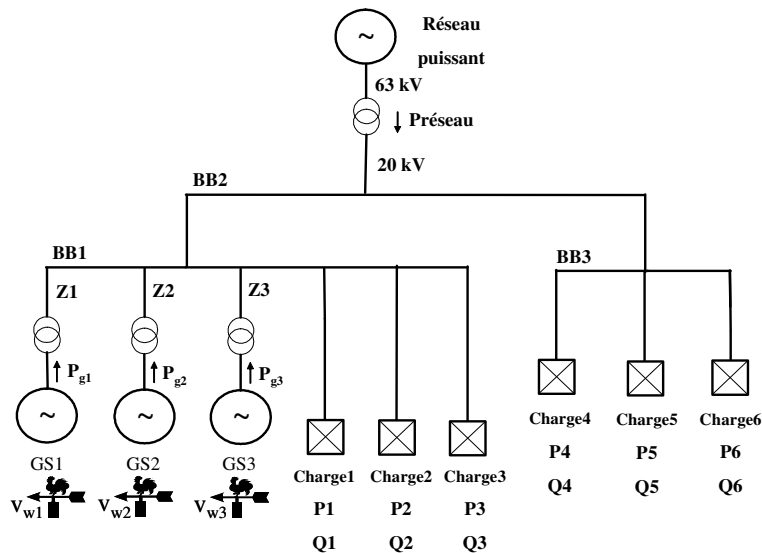


Figure 15. Portion de réseau 20 kV intégrant une ferme de 3 éoliennes.

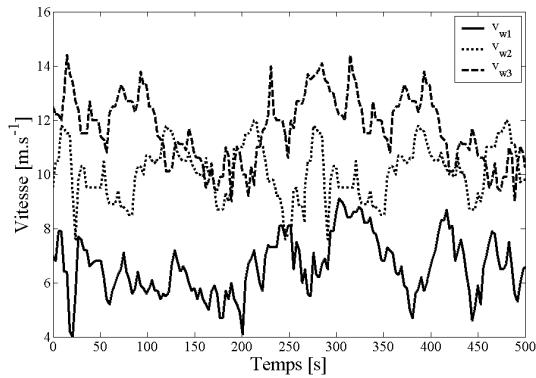


Figure 16. Evolutions de vitesse de vent appliquées aux différentes éoliennes.

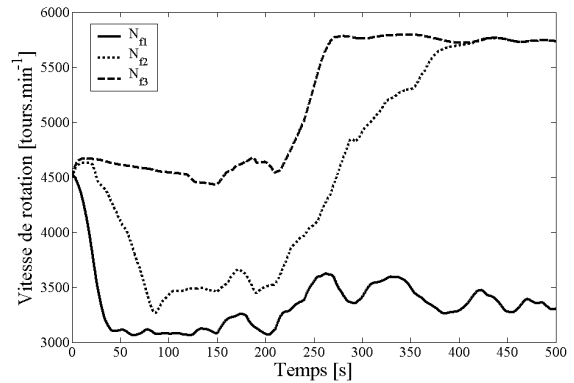


Figure 19. Vitesse des trois volants d'inertie.

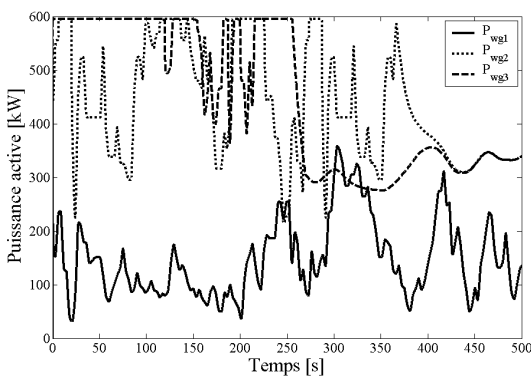


Figure 17. Puissance active générée par chaque génératrice éolienne.

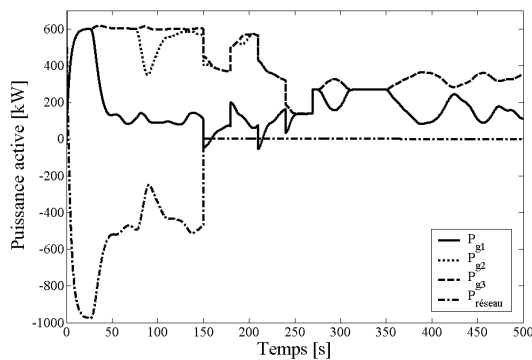


Figure 18. Puissance active générée par chaque système éolien-stockage et puissance reçue ou fournie par le réseau.

#### 4. Discussion et conclusion

Les besoins de stockage sont évidemment fonction du service à fournir au réseau. Si ce service se limite à un lissage de la puissance générée, une puissance de stockage d'environ 30% de la puissance nominale de l'éolienne est suffisante. Afin de participer aux services système et de permettre l'ilotage, la puissance de stockage devrait idéalement être similaire à la puissance nominale de l'éolienne. On peut cependant pressentir que dans le cas d'une ferme éolienne, le foisonnement des puissances générées, induit par le caractère irrégulier de la vitesse du vent, devrait permettre de réduire la puissance totale du stockage à court terme intégré à la ferme. Dans les cas d'étude présentés dans cet article, la durée du stockage considéré est de quelques minutes.

Dans [6], il est montré que l'association de 300 kW de stockage inertiel avec une capacité d'au moins 10 minutes à une éolienne de 1 MW, connectée à un réseau rural avec une puissance de court-circuit relativement faible de 10 MVA au point de connexion, permet d'augmenter de 10% l'énergie pouvant être injectée dans le réseau grâce à l'amélioration de la qualité de la puissance générée. Les auteurs de [6] précisent que le stockage inertiel est la solution la plus économique dans ce type d'application, et qu'il devrait permettre une augmentation de revenu de 14000 € par an.

L'importance de la stratégie de supervision a été illustrée dans cet article. La supervision est bien sûr fonction du service souhaité, et l'optimisation de celle-ci doit permettre de réduire les besoins de stockage. La logique floue apparaît comme un outil intéressant pour développer le superviseur à partir d'études théoriques et expérimentales tout en intégrant l'expertise humaine, même si la simplification de celui-ci en vue d'une implantation temps réel est souhaitable. Les stratégies de supervision, relativement simples à ce stade, présentées dans cet article peuvent être

appliquées en considérant d'autres formes de stockage que le stockage inertiel.

Le service rendu par l'ajout de stockage à des éoliennes peut être l'amélioration de la qualité de la puissance par lissage de celle-ci, le réglage de la tension et de la fréquence et la possibilité de fonctionner en îlotage. Il est certain que pour permettre un fonctionnement en îloté sur de longues durées, et ce quelle que soit la vitesse du vent, il faut associer aux éoliennes du stockage à long terme, à défaut d'autres sources conventionnelles ne dépendant pas ou peu des conditions climatiques. La combinaison de différentes technologies de stockage, à long et court terme, pourrait être une solution intéressante en vue d'apporter plusieurs services au réseau. Si le stockage à long terme reste encore très coûteux, dans le cas d'une connexion au réseau, il peut être particulièrement valorisé en stockant l'électricité produite par les éoliennes durant les heures creuses (où l'électricité est la moins chère) et en restituant l'électricité durant les heures de pointe (lorsqu'elle est la plus chère) [6]. La valorisation financière des services rendus au réseau par le gestionnaire de celui-ci, et le développement à grande échelle des technologies de stockage devrait permettre à l'avenir de rendre le stockage de l'électricité économiquement compétitif.

### Appendice : superviseur à logique floue

*Fuzzyfication.* La fonction d'appartenance de la variable d'entrée est représentée à la figure 20. Trois états flous sont considérés : petite (S), moyenne (M) et grande (B).

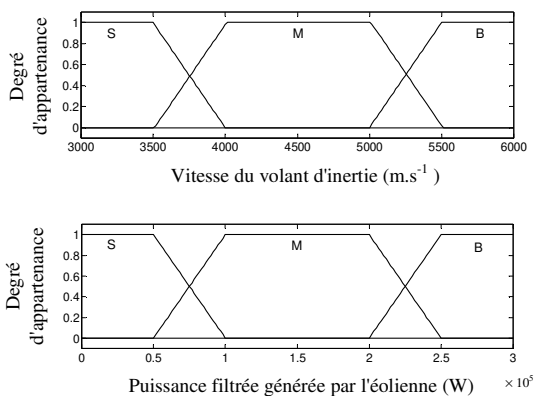


Figure 20. Fonctions d'appartenance des variables d'entrée.

*Inférence.* Les règles floues sont déterminées à partir du tableau 1. Sept états flous sont considérés pour la variable de sortie : très petit (VS), petit (S), petit moyen (SM), moyen (M), grand moyen (BM), grand (B) et très grand (VB).

		$P_{wg}$ filtrée		
		Petite (S)	Moyenne (M)	Grande (B)
Vitesse du volant	Petite (S)	VS	SM	BM
	Moyenne (M)	S	M	B
	Grande (B)	SM	BM	VB

Tableau 1. Table d'inférence.

*Defuzzyfication.* La fonction d'appartenance de la variable de sortie est représentée à la figure 21.

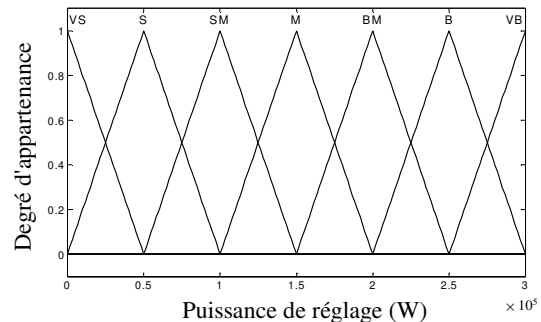


Figure 21. Fonction d'appartenance de la variable de sortie.

### Remerciements

L'étude sur le couplage éolien-diesel a été réalisée grâce à un financement de la Région Nord-Pas de Calais.

Le banc d'essais a été financé par Forclum Ingénierie, Innoelect, HEI, et dans le cadre du Centre National de Recherche Technologique (CNRT) Futurelec par la Région et la DRRT Nord-Pas de Calais, et par le FEDER.

Les études sur la participation aux services système d'une ferme éolienne ont été financées par la Région Nord-Pas de Calais, la Fondation Norbert Ségard et HEI.

### Références

- [1] M.Crappe, *Commande et régulation des réseaux électriques*, Hermès Science, Paris 2003.
- [2] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, *Embedded generation*, The Institution of Electrical Engineers (IEE), London, 2000.
- [3] Arrêtés du 17 mars 2003 et du 22 avril 2003 « Prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'une installation de production d'énergie électrique », Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie.
- [4] L.Leclercq, A.Davigny, A.Ansel, B.Robyns, *Grid connected or islanded operation of variable speed wind generators associated with flywheel energy storage systems*, Proceedings of the 11<sup>th</sup>

- International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2004, Riga, 2-4 septembre 2004.
- [5] A.Davigny, L.Leclercq, A.Ansel, B.Robyns, *Wind and storage system based dispersed generation contribution to power grid ancillary services and network reliability*, Proceedings of the 2<sup>th</sup> International Conference on Securing Critical Infrastructures, CRIS 2004, Grenoble, 25-27 octobre 2004.
- [6] J.P.Barton, D.G.Infield, *Energy storage and its use with intermittent renewable energy*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, n°2, juin 2004, pp.441-448.
- [7] A.Marquet, C.Levillain, A.Davriu, S.Laurent, P.Jaud, *Stockage d'électricité dans les systèmes électriques*, Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, mai 1998, D 4 030.
- [8] *Accumulateur : 40 MW pendant 7 minutes*, REE, n°10, novembre 2003, pp.8.
- [9] [www.beaconpower.com](http://www.beaconpower.com)
- [10] R.Hebner, J.Beno, A.Walls, *Flywheel batteries comme aroud again*, IEEE Spectrum, Avril 2002, pp.46-51.
- [11] L.Leclercq, B.Robyns, J.M.Grave, *Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators*, Mathematics and Computers in Simulation, 63, 2003, pp.271-280.
- [12] L.Leclercq, C.Saudemont, B.Robyns, G.Cimuca, M.Radulescu, *Flywheel energy storage system to improve the integration of wind generators into a grid*, Electromotion, vol.10, n°4, 2003, pp.641-646.
- [13] *Energy storage. A key technology for decentralized power, power quality and clean transport*, European Communities, 2001, ISBN 92-894-1561-4.
- [14] S.Serpu, Y.Bésanger, N.HadjSaïd, *Performance control for beter power systems security in a re-regulated environment: a survey*, Proceedings of the 2<sup>th</sup> International Conference on Securing Critical Infrastructures, CRIS 2004, Grenoble, 25 - 27 octobre 2004.
- [15] [www.piller.com](http://www.piller.com)
- [16] M.R.Patel, *Wind and solar power systems*, CRC Press, 1999.
- [17] F. Marmin, J. M. Grave, *Etude de faisabilité d'un stabilisateur cinétique de réseau pour génératrice éolienne*, Actes d'Innovect'99, Mons, 16 Décembre 1999, pp. 41-46.
- [18] L.Leclercq, B.Robyns, J.M.Grave, *Fuzzy logic based control of a flywheel energy storage system based on an induction machine associated with wind and diesel generators*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2002, Dubrovnik, 9-11 septembre 2002 (CD Rom).
- [19] L.Leclercq, A.Ansel, B.Robyns, *Autonomous high power variable speed wind generator system*, Proceedings of EPE 2003, Toulouse, 2 - 4 septembre 2003.
- [20] C.Saudemont, L.Leclercq, B.Robyns, G.Cimuca, M.Radulescu, *Développement d'un émulateur temps réel d'un système de génération éolienne associé à un stockage d'énergie*, REE, n°11, décembre 2004, pp. 49-59.
- [21] G.Cimuca, M.Radulescu, C.Saudemont, B.Robyns, *Performance Analysis of an Induction Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipment, OPTIM'04, Brasov, Roumanie, 20-23 mai 2004.
- [22] G.Cimuca, M.Radulescu, C.Saudemont, B.Robyns, *Losses and Efficiency of a Flywheel Energy Storage System with Permanent-Magnet Synchronous Machine Associated to a Variable-Speed Wind Generator*, Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Cracovie, 6-8 septembre 2004 (CD Rom).
- [23] A. Engler, *Applicability of droops in low voltage grids*, International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 1, n°1, pp. 3-15, Janvier - Mars 2005.
- [24] U. Borup, F. Blaabjerg, P. N. Enjeti, *Sharing of Nonlinear Load in Parallel-Connected Three-Phase Converters*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, n°6, pp. 1817-1823, Novembre/Décembre 2001.
- [25] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, P. F. D. Garcia, *Small-Signal Stability for Parallel-Connected Inverters in Stand Alone AC Supply Systems*, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 38, n°2, pp. 533-542, Mars/Avril 2002.

## Les auteurs

**Benoît Robyns** est diplômé "Ingénieur Civil Electricien" et "Docteur en Sciences appliquées" de l'Université Catholique de Louvain (UCL), Belgique, respectivement en 1987 et 1993. En 2000, il reçoit le diplôme d' "Habilitation à Diriger des Recherches" de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL). Il est responsable du Département Génie Electrique de l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI) de Lille. Il est aussi responsable de l'équipe Réseaux Electriques et Systèmes Energétiques (RESE) du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille.

**Aymeric Ansel** est né à Amiens, France, en 1974. Il est diplômé Ingénieur de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electrotechnique et Electronique d'Amiens (ESIEE-Amiens) en 1997. En 2001, il reçoit le grade de "Docteur en Génie Electrique" de l'Université d'Artois, Arras, France. Depuis Septembre 2001, Aymeric Ansel est Enseignant-Chercheur à l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI) de Lille, France, et Chercheur au sein du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille. Ses domaines d'intérêt sont la conception et la modélisation des

machines électriques ainsi que, depuis 2001, les énergies renouvelables et la production décentralisée d'électricité. Il est membre de la "Société française des Electriciens et des Electroniciens" (SEE).

**Arnaud Davigny** est né à Lens, France, en 1972. Il obtient en 1998 le « Diplôme d'Etudes Approfondies de génie électrique » de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), France. Il intègre le département Génie Electrique de l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI) de Lille, en 2001. Depuis septembre 2003, il est doctorant au sein de l'équipe RESE (Réseaux Electriques et Systèmes Energétiques) du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille. Son travail de thèse concerne la participation aux services systèmes de fermes d'éoliennes à vitesse variable associant du stockage inertiel d'énergie et se déroule sous la direction du Professeur B. Robyns. Il est membre de la « Société des Electriciens et des Electroniciens » (SEE) et de la « Société Française d'Energie Nucléaire » (SFEN).

**Christophe Saudemont** est né en 1971. Il est diplômé du Doctorat de Génie Electrique de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) en 1999. Il est Chercheur au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille, au sein de l'équipe RESE (Réseaux Electriques et Systèmes Energétiques). Ses travaux portent sur les énergies renouvelables, la production décentralisée d'électricité, et la connexion de ces sources au réseau électrique. Il est membre de la "Société française des Electriciens et des Electroniciens" (SEE).

**Gabriel Cimuca** est né le 22 décembre 1977 à Ocna-Mures, Roumanie. Il a reçu le Diplôme d'Etudes Approfondies en Génie électrique, d'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, en 2002. Depuis 2002, il est doctorant en cotutelle entre l'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, et le Laboratoire d'Electrotechnique et Electronique de Puissance (L2EP) de Lille, France. Son travail de thèse est orienté sur un système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens et se déroule sous la co-direction des Professeurs M.M. Radulescu et B. Robyns.

**Mircea M. Radulescu** est né le 4 septembre 1954 à Cluj-Napoca, Roumanie. Il a reçu le Diplôme d'Ingénieur Diplômé with honors d'Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, et le Diplôme de Docteur d'Université Polytechnique de Timisoara, Roumanie, tous les deux en Génie électrique, en 1978, respectivement en 1983. Depuis 1983, il travaille à la Faculté d'Electrotechnique, Université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie, étant, à présent, Professeur dans le Département de Machines électriques et le chef du Groupe de Petits moteurs électriques et Traction électrique. Ses activités d'enseignement et recherche incluent CAO des dispositifs électromécaniques, analyse de champ des structures électromagnétiques, conception et contrôle des petits moteurs électriques, conception, contrôle et CEM dans les systèmes de traction électrique.

**Jean-Michel Grave** est diplômé de l'École supérieure d'électricité en 1976. Entre 1982 et 1989, il est Directeur Technique du Département Énergie de SAFT. Entre 1995 et 2000, il est Directeur Technique Entreprise Norelec. Depuis 2000, il est Directeur de Forclum Ingénierie, filiale spécialisée dans les Grands projets de Forclum, groupe d'Installations Électriques et Electromécaniques: Centrales de Production d'énergie, Centrales éoliennes, Aéroport de Bâle Mulhouse, Viaduc de Millau, Tunnel ferroviaire du Perthus et LGV Perpignan Figueras.