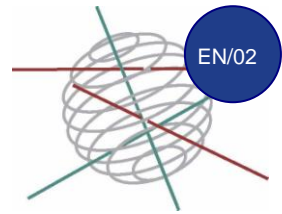


# WindBalance - Résultats



## Equilibrage de l'énergie éolienne dans le réseau électrique : une approche intégrée, technico-économique et coordonnée

DURÉE DU PROJET  
15/12/2006 - 31/01/2011

BUDGET  
789.067 €

### MOTS CLES

Equilibrage, intégration au réseau, intégration au marché, énergie éolienne.

### CONTEXTE

Considérant les objectifs de la politique énergétique européenne en termes de développement durable, sécurité d'alimentation et amélioration de la compétitivité, la part des sources d'énergie renouvelable (SER-E) est en croissance rapide. Le plan d'action national belge pour l'énergie renouvelable, pour respecter la directive sur l'énergie renouvelable CE (2009/28/CE), estime la capacité installée de puissance éolienne à 4320 MW à l'horizon 2020. Ceci est attendu pour obtenir une production annuelle de 10,5 TWh, soit 9 % de la demande électrique dans le scénario de référence pour 2020.

### OBJECTIFS

L'objectif général de ce projet est d'étudier le potentiel d'intégration massive d'éolien en Belgique. Les frontières techniques, économiques et réglementaires pour une intégration fiable et efficace dans le système électrique sont identifiées, en même temps que les mesures nécessaires pour les dépasser.

### CONCLUSIONS

#### Phase 1 : Valeur de marché de l'énergie éolienne

Dans la première phase du projet, un simulateur de marché est développé pour déterminer les coûts et les revenus pour un générateur éolien. Ce simulateur sert d'outil pour calculer la valeur de marché que cette énergie éolienne apporte dans différents marchés, sous différentes conditions de marché et en dépendant de la prédictibilité de la puissance éolienne fournie. Le simulateur de marché développé calcule la valeur de l'énergie éolienne quand elle est vendue sur une bourse d'énergie locale, par exemple le marché BELPEX J+1 (Day-Ahead). Les erreurs en temps réel de prédiction de la puissance éolienne sont réglées par les tarifs de déséquilibre imposés par le TSO. On fait abstraction des revenus additionnels des certificats verts qui s'établissent actuellement à des prix minimums compris entre 90-107 €/MWh. La valeur de l'éolien est exprimée comme le « prix fixe OTC équivalent » et est comparé au prix fixe négocié dans les contrats OTC (Over The Counter).

Ce simulateur est donc un bon support pour évaluer les investissements en puissance éolienne ou pour négocier des contrats OTC. De plus, cet outil fournit une base pour une analyse objective de la valeur réelle de marché de l'énergie éolienne sous différentes conditions de marché et est dès lors également un outil utile pour les décisions politiques.

Le simulateur est validé pour différentes configurations de production d'énergie éolienne : pour une simple turbine et un prix moyen du marché BELPEX J+1 de 75.3 €/MWh, la valeur fixe OTC pour 2009 est déterminée à 66.3 €/MWh. La prédictibilité limitée du vent conduit dès lors à une perte de revenu de 18 % due au règlement du déséquilibre. On a trouvé que cette valeur OTC peut être augmentée de 18 % lorsque l'on agrège la production éolienne sur une grande zone et que l'on soumet celle-ci à une nomination (Cfr. Allemagne).

Deuxièmement, différentes stratégies de nominations sont recherchées incluant la valeur de l'amélioration en précision concernant la prévision. Pour une ferme éolienne de 8 MW, la valeur OTC arrive à 68.6 €/MWh en incluant des pertes de déséquilibre de 14 % lorsque l'on utilise les outils de prédiction actuels. Cette valeur s'accroît de 5.5 % lorsque l'on utilise les marchés intra D pour adapter les nominations aux nouvelles prédictions.

Comme l'outil a été développé avec des données allant jusqu'à décembre 2008, les valeurs et les prix résultants sont assez élevés comparés aux valeurs actuelles (2009-2011) (effet de la crise économique globale). Les résultats ci-dessus peuvent dès lors se comparer au mieux de manière relative.

#### Phase 2 : Limites techniques supérieures pour l'énergie éolienne en Belgique

Dans la deuxième phase de ce projet, des contraintes concernant le back up de la puissance éolienne en Belgique sont étudiées. Un modèle en simulation, représentant les opérations court terme du parc de production belge, est développé et utilisé pour déterminer les limites de vent dans la zone de contrôle d'Elia (Belgique et Luxembourg). Toutes les unités de production de puissance sont supposées être utilisées avec un coût optimal pour couvrir la demande dans la zone contrôlée. Dans ce premier pas, les contraintes du réseau et les congestions potentielles ne sont pas considérées.



## WindBalance - Résultats

### Équilibrage de l'énergie éolienne dans le réseau électrique : une approche intégrée, technico-économique et coordonnée

En considérant ces hypothèses, les barrières pour la production éolienne sont déterminées par la capacité des autres unités de production disponibles à couvrir les erreurs de prédiction de production éolienne. Une surestimation de la production éolienne nécessite d'être équilibrée par une capacité flexible. Ces réserves peuvent être activées pour combler les différences entre la demande et la production. Les sous estimations nécessitent les mêmes besoins mais peuvent être résolues par des coupures de production éolienne si nécessaire. Les résultats montrent des coupures allant jusqu'à 7800 MWh pour 24 heures avec une capacité éolienne installée de 3000 MW, dépendant de la demande et du profil de production éolienne. En plus des barrières techniques pour intégrer une part plus large de capacité éolienne dans le système, l'impact des coûts d'exploitation et des émissions des gaz à effet de serre sont déterminés.

En Belgique, le potentiel de production pour équilibrer la production variable des fermes éoliennes est limité. Cette barrière peut être levée en considérant l'ensemble de l'Europe, tout en faisant abstraction des congestions potentielles du réseau. Combiner les systèmes électriques réduit les réserves nécessaires lorsque des systèmes séparés de déséquilibre montrent des corrélations limitées ou opposées. La littérature montre que les fluctuations de puissance éolienne et les erreurs de prédictions peuvent être lissées lorsqu'on les agrège sur des régions plus larges.

L'hypothèse qu'il n'y a pas de congestion de transmission présente sur les réseaux belge et européen est clairement une énorme simplification de la réalité. Dès lors, un des livrables du projet se concentre sur des méthodologies pour inclure des simulations détaillées du réseau. A cause de contraintes pratiques, on a choisi de travailler avec un modèle de DC load flow comme simplification des simulations de load flow AC.

#### **Phase 3 : Équilibrage de larges variations de puissance éolienne en Belgique**

La phase finale du projet se concentre sur la facilitation des scénarios d'intégration massive d'énergie éolienne dans le système électrique belge à l'horizon 2020. L'accent est mis sur les technologies et les mécanismes de marché permettant de prendre en compte cette variabilité de puissance éolienne.

#### *Technologies d'équilibrage*

4 technologies principales ayant un potentiel d'équilibrage sont étudiées et évaluées : tout d'abord, les grandes centrales électriques de pompage hydraulique sont une option très attractive pour maîtriser la variabilité de puissance éolienne puisque cette technologie est caractérisée par une grande flexibilité et de faible coût d'exploitation. Cependant, à cause des contraintes géographiques, leur potentiel est limité en Belgique. 2 centrales d'accumulation de pompage sont actuellement installées en Belgique avec une capacité de 1164 MW (Coo) et 224 MW (Plate Taille). De nouveaux concepts innovants sont actuellement investigués par exemple les 'îles d'énergie' offshore pompant de l'eau d'un réservoir avec le résultat d'une production d'électricité lorsqu'on permet au flux hydraulique de repasser dans les alternateurs

hydrauliques. Cependant, des unités de production d'électricité à cycle combiné (CCGT) moins flexibles ou des unités de production de pointe sont en général évaluées comme ayant des capacités significatives pour l'équilibrage de la production éolienne. Les unités CCGT peuvent être démarrées en 40-150 minutes, atteignent des taux de mise en charge et des rendements raisonnables. Les unités de production de pointe (turbo jets, turbines à gaz et moteurs diesel) sont caractérisées par une flexibilité plus grande (démarrage, montée en puissance) mais de plus faible efficacité. Les turbines à gaz commencent à produire de la puissance après 3 minutes et atteignent leur pleine capacité en 6 minutes.

Finalement, deux concepts innovants montrant le potentiel d'équilibrage des variations des futures éoliennes sont introduits : le stockage décentralisé et la demande active. Les systèmes de stockage d'énergie, caractérisés par une réponse rapide et un temps de déploiement limité, peuvent offrir des capacités additionnelles d'équilibrage au système électrique. Une grande variété de technologies de stockage est actuellement disponible et en développement offrant une large gamme de caractéristiques techniques et économiques. En contraste, la réponse d'une demande active crée de la capacité d'équilibrage au moyen d'un transfert de la demande des consommateurs. En Belgique, les premières estimations conduisent à un potentiel de 358 MW, seulement pour les contrats de fourniture domestique. Ce nombre est basé sur un niveau minimum d'acceptance par les consommateurs. Avec l'intégration future et attendue des véhicules électriques rechargeables, la consommation domestique annuelle peut doubler, en offrant un potentiel futur important, à la fois pour le stockage et la demande active.

#### *Mécanismes de marché pour équilibrer l'éolien*

Dans la plupart des réseaux électriques européens, par exemple en Belgique, l'énergie éolienne fait face à un contexte de marché impliquant des responsabilités d'équilibre. Le responsable final de l'équilibrage du système électrique global est l'opérateur du réseau de transmission (TSO) (dés)activant la capacité de réserve pour restaurer en temps réel l'équilibre entre consommation et production. Les coûts de ces services d'équilibre sont transférés vers les participants responsables du marché au moyen de tarifs de déséquilibre. Ceci implique des coûts additionnels pour les générateurs éoliens qui font face à une prédictibilité limitée de leur fourniture. Cette responsabilité d'équilibre pour une SER-R variable est toujours une discussion politique. De façon à se couvrir de l'incertitude dans leur portefeuille, les acteurs du marché en Belgique sont capables d'appliquer différents mécanismes de marché. Si la précision des prédictions augmente avec des horizons de prédiction plus rapprochés, les coûts d'équilibre peuvent être réduits en autorisant des possibilités d'adapter en intra D les nominations. Les mécanismes de marché sont conçus pour autoriser ce marché intra D et ses échanges de puissance. Les marchés intra D ont été introduits en Belgique dès 2008 et ont été étendus aux allocations de capacités frontières. Cependant, ces marchés restent caractérisés par une faible liquidité. On s'attend à ce que ceci soit amélioré avec une intégration plus forte





## WindBalance - Résultats

### Equilibrage de l'énergie éolienne dans le réseau électrique : une approche intégrée, technico-économique et coordonnée

des marchés, des environnements compétitifs et la disponibilité physique de nouvelles capacités flexibles. Une attention spéciale doit être portée à une régulation belge particulière exemptant partiellement les éoliennes offshore de ce mécanisme existant de règlement. Les déviations de production à l'intérieur d'une marge de 30 % de la capacité nominée bénéficient d'une exemption de tarif de déséquilibre. Une étude préliminaire confirme une erreur de prédiction (RMSE) qui est de - 6% plus élevé pour les localisations offshore. Bien que cette régulation peut être défendue car elle s'attaque directement au coût de déséquilibre, ce mécanisme de support est complexe et non transparent. Limiter les tarifs de règlement de déséquilibre affaiblit le lien entre le marché de la réserve et le tarif de déséquilibre, ce qui est un prérequis pour le bon fonctionnement des marchés d'équilibre. Dès lors, ce mécanisme de support devrait plutôt être remplacé par une augmentation du prix minimal des certificats verts. Cette augmentation est estimée à 1.4 - 1.7 €/MWh.

#### *Facilitation des scénarios de fort développement éolien en Belgique*

En vue de rencontrer les objectifs d'énergie renouvelable à l'horizon 2020, le plan d'action national belge d'énergie renouvelable vise une capacité installée de 4320 MW en 2020. L'impact de ce scénario est recherché au moyen de modèles de simulation représentant l'exploitation à court terme du parc de production belge. Le modèle est pour cela étendu à un réseau avec contrainte au travers d'un load flow DC. Le vent est intégré dans un modèle représentant le système électrique belge incluant les investissements planifiés jusqu'en 2020. En addition 4 cas sont conçus pour représenter différentes combinaisons de technologie d'équilibrage.

Les premières simulations révèlent des problèmes majeurs d'intégration car le modèle générique semble incapable d'autoriser les 4320 MW d'éolien distribué dans la zone de contrôle belge. Tout d'abord, certaines contraintes de réseau prennent naissance dans la région côtière, à cause des grandes capacités offshore, et dans le sud de la Belgique à cause d'un faible maillage. Une série de renforcements additionnels du réseau sont proposés et inclus dans le modèle. Une deuxième barrière a une large intégration d'énergie éolienne est la non flexibilité allégée du parc nucléaire tel qu'exploité actuellement (en charge de base). Une faible demande combinée avec une grande production éolienne peut entraîner une plus faible demande nette que la charge de base du parc nucléaire. Dès lors, cette étude propose d'augmenter la flexibilité du parc de production en exploitant les unités nucléaires en mode modulé (Cfr. France). Une dernière barrière a son origine dans les grands déséquilibres qui peuvent survenir à cause des erreurs de prévision du vent. Une capacité prédéfinie de 300 MW de réserves tournantes et 737 MW de réserves non tournantes peut se révéler inadéquate pour équilibrer la puissance éolienne. Augmenter la quantité des réserves de façon à pouvoir couvrir la plus large erreur de prévision possible peut être non réaliste dans le contexte de l'adéquation de la production.

Dès lors, en un dernier point, les importations et exportations sont autorisées en temps réel à des coûts artificiellement hauts. Ceci maintient les incitants à couvrir les déséquilibres à un niveau national.

Les résultats du scénario de référence révèlent que la régulation du nucléaire est principalement nécessaire quand une grande puissance éolienne est présente pendant une faible demande. De plus, les unités de pointes sont utilisées régulièrement dans tous les scénarios où seulement 300 MW de capacité de réserve tournante sont demandés au système électrique. Une importation est aussi nécessaire en vue d'équilibrer les erreurs de prévision les plus larges. D'un autre côté, l'exportation n'est pas utilisée parce que l'énergie nucléaire est supposée capable de réguler sa puissance produite en descendant jusqu'à 60 % de sa puissance nominale. Augmenter la quantité des réserves tournantes à 1055 MW réduit à la fois l'utilisation de puissance de pointe et les besoins d'importation conduisant par conséquent à un système électrique belge plus sûr.

Dans cette étude, l'accent est mis sur la capacité du système électrique d'équilibrer la puissance éolienne à partir des ressources nationales. L'utilisation de centrales de pointe et d'importation est vue comme un « problème » pour la sécurité d'alimentation et représente des capacités additionnelles de réserve. 3 cas de technologie, représentant le CCGT, le stockage décentralisé et la demande active, sont dès lors comparés avec le cas de base en ce qui concerne l'utilisation des capacités de réserve disponibles et l'importation. En plus, l'efficacité opérationnelle est investiguée.

Du fait que le modèle travaille dans une échelle de temps d'une heure et que les réserves tournantes sont maintenues constantes à 300 MW, ajouter des unités de productions CCGT supplémentaires n'aura aucun effet sur la flexibilité du réseau électrique belge dans l'équilibrage des erreurs de prévision. Ajouter dans un troisième cas des unités décentralisées de stockage au réseau électrique belge ne change pas les résultats de façon significative.

Ceci est dû à la petite quantité de stockage décentralisé ajoutée au réseau électrique belge et au fait qu'il y a une quantité importante de puissance éolienne intégrée dans le système belge (4320 MW) conduit en quelque sorte à un grand changement des puissances de sortie. Ces grands changements ne peuvent pas être couverts par un si petit addition de stockage décentralisé. Cependant, le stockage peut avoir malgré tout un impact économique important sur des situations journalières. Etendre la quantité de stockage décentralisé conduirait probablement à des résultats plus étendus, mais il semble difficile d'obtenir des résultats avant 2020. En dernier point mais non des moindres, le cas de base est étendu avec 1000 MW de demande dynamique : dans ce cas aussi la sortie du modèle ne montre pas de différence significative dans l'efficacité opérationnelle. L'utilisation de la capacité de réserve non tournante et de l'importation décroît cependant dans tous les scénarios considérés ce qui signifie qu'une demande dynamique est une bonne aide pour équilibrer des erreurs de prévision du vent.



# WindBalance - Résultats

Équilibrage de l'énergie éolienne dans le réseau électrique : une approche intégrée, technico-économique et coordonnée

## APPORT A UNE POLITIQUE DE DEVELOPPEMENT DURABLE

L'intégration d'une portion importante d'énergie éolienne est, à cause de la production variable et de la prédictibilité limitée, un challenge majeur pour le système électrique actuel. Cette intégration est limitée par des réalités technologiques, économiques et réglementaires basées sur un système composé d'unités de production conventionnelle et centralisées. La contribution de ce projet est d'identifier ces barrières et d'apporter des solutions. Le résultat de ce projet peut être utilisé par les décideurs politiques belges pour accroître le potentiel d'énergie éolienne.

Un des résultats prend la forme d'un simulateur de marché qui permet d'évaluer l'impact de la compétition sur la rentabilité de l'énergie éolienne. De plus, un modèle de simulation est développé pour évaluer l'impact de l'éolien sur le système entier. Finalement, les technologies et les mécanismes de marché sont proposés pour aider l'équilibrage de la production et de la demande avec la production variable de l'éolien. Ceci a été intégré dans les outils développés.

## COORDONNEES

### Coordinateur

#### **Ronnie Belmans**

Katholieke Universiteit Leuven  
(KULeuven)  
ESAT/ELEN Departement of  
Electrical Engineering  
Kasteelpark Arenberg 10  
B-3001 Heverlee  
Tel:+32 (0)16 32.10.20  
Fax:+32 (0)16 32.19.85  
Ronnie.Belmans@esat.kuleuven.ac.be  
<http://www.esat.kuleuven.ac.be/electa/>

### Promoteurs

#### **Geert Palmers**

3E nv  
Vaartstraat 61  
B-1000 Brussel  
Tel:+32 (02) 217 58 68  
Fax:+32 (02) 219 79 89  
geert.palmers@3E.be  
[www.3E.be](http://www.3E.be)

#### **William D'Haeseleer**

Katholieke Universiteit Leuven  
(KULeuven)  
Applied Mechanics and Energy  
Conversion (TME)  
Celestijnenlaan 300A  
B-3001 Heverlee  
Tel:+32 (0)16 32 25 10  
Fax:+32 (0)16 32 29 85  
William.Dhaeseleer@mech.kuleuven.be  
<http://www.mech.kuleuven.be/tme/>

#### **Jean-Claude Maun**

Université Libre de Bruxelles (ULB)  
Service de Génie Electrique (GENELEC)  
Avenue F.D. Roosevelt 50  
B-1050 Bruxelles  
Tel:+32 (0)2 650 26 62  
Fax:+32 (0)2 650 26 53  
jcmaun@ulb.ac.be  
[http://www.ulb.ac.be/rech/inventaire/  
unites/ULB358.html](http://www.ulb.ac.be/rech/inventaire/unites/ULB358.html)

