



Le Journal des Ingénieurs

Belgique - België
PP.
CHARLEROI X
BC 1781

Photo : Source C-Power

Mensuel - Avril 2009 - Bureau de dépôt : CHARLEROI X



Éoliennes

Page 4

Étude
Offshore
Estinnes

Page 8

Page 15

Page 18



Dans notre supplément gratuit :



Vos communications, events
& news, infos techniques et
commerciales & high level jobs

Assemblée Générale FABI 2009
Samedi 25 avril 2009 à 9h00 à Mons



Nous laissons les ingénieurs
en quête d'innovation élargir leur horizon.

www.travaillerchezelectrabel.be

Nous cherchons des cadres techniques férus d'innovation, à l'esprit pratique, qui aiment le travail en équipe et prendre les projets en mains. Si, en plus, vous avouez une passion pour l'environnement, vous serez ravi d'apprendre qu'Electrabel et ses collaborateurs s'engagent à tout mettre en œuvre pour réduire les émissions de CO₂ de 21% d'ici 2010. Un défi que vous aurez certainement à cœur de relever avec nous.

Vous avez l'énergie.

Electrabel
GDF SUEZ

Le Journal des Ingénieurs

Mensuel N°120
Avril 2009



Rue Hobbema 2 - 1000 Bruxelles
Tél. 02 734 75 10 - Fax 02 734 53 15
info@fabi.be - www.fabi.be

ÉDITEUR

Ir. Maximilien Le Begge

Tous droits réservés. Reproduction
et diffusion interdite par quelque
moyen que ce soit, sans autorisation
préalable écrite de l'éditeur. Les
textes et illustrations sont publiés
sous la responsabilité de leur auteur.

COMITÉ DE RÉDACTION

Ir. Maximilien Le Begge

(rédacteur en chef)
Pascal-Pierre Delizée
(secrétaire de rédaction)
Marie Montes
(coordination)

RÉDACTION

Philippe Crêteur
Pascal Delizée
Ir. Olgan Durieux
Ir. Vincent Gobbe
Ir. Jean Lambelé
Ir. Christian Legrand
Ir. Régine Merz
Ir. Alison Vincent

AVEC LA COLLABORATION DE :

Ir. Guido Van Velthoven
Ir. Luc Ponet
Hilde Fredrickx

Tirage : 10 000 ex.

Distribution : personnalisée

Édition : mensuelle,
sauf janvier, juillet et août

Format : 210 x 297 mm full quadri



Edition & Communication

PRODUCTION

MARKETING - PUBLICITE
ABONNEMENTS SOCIÉTÉ

Abonnement 9 N° par an :
50€ HTVA

Contact : Lydia De Lutis

DEADLINE POUR MATERIEL PUBLICITAIRE :

le 15 de chaque mois précédant la
date d'édition

Route de Mons 27e - 6000 Charleroi

Tél. +32 71 31 50 00

Fax +32 71 32 74 19

mkt@delta7.be



Dans quelques jours la
FABI tiendra son
assemblée générale à
Mons. À cette date se
terminera mon mandat
de président et notre
ami Luc Minne sera
mon successeur.
Que dire et que penser
de ces trois années ?
Quel chemin avons
nous parcouru ?

Plusieurs objectifs que nous nous étions fixés
ont été atteints. Je rappelle les principaux :

- mise sur pied et développement du site ingénieur-Métiers afin de promouvoir les études d'ingénieur auprès des jeunes avec une action spécifique vers les jeunes filles ;
- intégration de notre informatique avec celle des associations permettant une mise à jour continue de nos fichiers ;
- développement du Journal des Ingénieurs avec neuf numéros par an ;
- collaboration avec les doyens des facultés des sciences appliquées et des sciences agronomiques ;
- défense du titre d'ingénieur civil dans le cadre de « Bologne » ;
- enquête bisannuelle sur les salaires de tous les ingénieurs complétée par une enquête annuelle sur les ingénieurs des deux dernières promotions ;
- édition sans discontinuité de l'annuaire ;

- représentation des ingénieurs dans les différentes fédérations d'ingénieurs nationales (KVIV) et internationales (CLAIU et FEANI). Si l'on peut se réjouir de ces réalisations, une ombre reste au tableau : le nombre d'affiliés diminue dans la plupart des associations et ce malgré les grands efforts réalisés par toutes pour remédier à cette tendance qui dure depuis de nombreuses années. Ceci ayant pour conséquence des difficultés de plus en plus fréquentes pour boucler les budgets en équilibre. Dès lors, la nécessité de réduire tous les coûts se fait pressante et la tentation est grande pour les associations de diminuer le financement de la FABI. Et pourtant, celui-ci est déjà mis à mal par un nombre de membres moins élevé et, si cette voie était suivie, cela signifierait l'étranglement de notre fédération et son affaiblissement.

Les associations doivent dire clairement au conseil d'administration de la FABI ce qu'elles attendent de leur fédération. À ce moment nous pourrions prendre les mesures qui s'imposent pour répondre à leurs nouvelles exigences mais je reste convaincu qu'un repli sur soi-même n'est pas la bonne solution et surtout en période de crise.

C'est en unissant nos forces et en renforçant notre collaboration, FABI et Associations, que nous pourrions espérer retrouver la croissance et promouvoir avec éclat le métier de l'ingénieur.

Ir. Charles Médart, Président

Sommaire

Édito	P. 3
Éoliennes	P. 4
Le souffle d'Éole : une source d'énergie naturelle inépuisable	
Assemblée générale de la Fabi : 25 avril 2009	P. 7
Étude	P. 8
L'éolien industriel en Belgique : tentative d'évaluation globale	
Offshore	P. 15
La ferme offshore d'éoliennes du Thorntonbank : un défi technologique inédit à 30 km de la côte	
Estinnes	P. 18
Le parc d'éoliennes d'Estinnes : une première mondiale !	



Dans notre supplément «Ingénieurs Magazine»

Vos communications, events & news, infos techniques et commerciales
& high level jobs
Ingénieurs, universités, hautes écoles, associations : contactez imag@delta7.be

Membres de la FABI :



www.airbr.be



www.aimontefiore.org



ag.ovl@ovl.kviv.be



www.aims.fpms.ac.be



www.aillg.be



www.aia.rma.ac.be



www.aillv.ucl.ac.be



www.aigx.be



www.aialv.be

Le souffle d'Éole : une source d'énergie naturelle inépuisable

Les hommes utilisent l'énergie du vent, depuis la nuit des temps. Grâce à la voile, les marins ont rapidement conquis les mers et l'invention du moulin à vent a permis de moudre facilement le grain, des siècles durant. Et l'on utilise encore le vent pour pomper l'eau des puits.

Qu'on les trouve belles ou non, les grandes éoliennes modernes ont acquis une valeur de symbole, le mouvement lent de leurs pales animant les grandes étendues, comme en Hollande, où les vieux moulins sont devenus des attractions touristiques. À l'heure où les éoliennes fleurissent aux quatre coins du monde – et que la construction des plus grands moulins à vent de notre royaume est bientôt achevée (à Estinnes, tout près de Binche) –, de plus en plus de maisons individuelles ou collectives, ainsi que des usines, sont alimentées par l'énergie renouvelable résultant de la force du vent et de gigantesques autant que fascinantes hélices.

« Le Journal des Ingénieurs » vous offre un dossier aérodynamique à vous couper... le souffle !

Figure 1 : Moulin à vent à Sønderho sur l'île de Fanø au Danemark. De type hollandais, ce moulin a été construit en 1895 en remplacement d'un moulin plus ancien détruit par un incendie l'année précédente. © Cnyborg



Dans le monde, le vent serait en mesure de remplacer largement l'atome, et même beaucoup plus. Ces vingt dernières années, il s'est révélé être une ressource renouvelable extrêmement intéressante pour produire du courant électrique. En Europe, en 2001, le parc éolien a produit 40 000 GWh, soit la production de plus de cinq grandes centrales nucléaires. La Suisse, relativement peu ventée, semble restée, momentanément, à l'écart de ces changements importants.

Qu'est-ce que l'énergie éolienne ? D'où vient le vent ?

Les vents sont l'un des effets du rayonnement solaire. Ils prennent naissance en raison des écarts de température qui s'établissent entre masses d'air différentes. Dans les zones tropicales, l'air se réchauffe et atteint des températures élevées. Il se dilate, sa densité diminue et un courant ascendant s'amorce. Ces importantes masses d'air chaud, parvenues en haute altitude, cherchent, alors, à s'écouler en direction des pôles où elles iront se refroidir. Dans l'hémisphère nord, ce mouvement est accompagné de courants d'ouest. Près de l'équateur, en effet, les masses d'air qui ont acquis grâce à la rotation de la terre une vitesse tangentielle élevée, vont être frein-

nées en se dirigeant vers les pôles, où la vitesse de rotation est nulle (grandes brises d'ouest). De là, elles reviennent à faible altitude sous la forme de vents d'est arctiques froids. En pratique, ce n'est pas un seul grand courant qui agit de manière uniforme. Il se divise en mouvements circulaires partiels plus ou moins stables. Sous nos latitudes, ce sont tantôt les courants de sud-ouest ou d'ouest qui « gagnent » (vent ou fœhn), tantôt les vents du nord-est froids (bise). L'énergie éolienne a la particularité de trouver ses sources, à la fois, dans le rayonnement solaire et dans la rotation de la terre. À basse altitude, on observe aussi des vents locaux dus aux différences de températures entre le jour et la nuit. Ces brises de vallée ou de montagne dépendent fortement du relief.

De l'antique moulin persan aux éoliennes « high tech »

Pour la plupart d'entre nous, le vent est un élément capricieux, invisible, qui se manifeste pour nous inquiéter, nous rafraîchir ou nous déranger, si ce n'est pas pour nous glacer les os ou tout détruire sur son passage. Il frappe notre imagination car nous pouvons aussi bien nous le représenter sous la forme de grandes volutes que d'un courant rectiligne et rapide. Pour capter ces forces imprévisibles, les idées les plus folles sont nées : turbines, hélices de toutes sortes, ailes battantes et autres trains à voile.

Avant l'invention du moteur à vapeur, les animaux domestiques, puis le vent et la force hydraulique étaient les seuls moyens qui pouvaient, quelque peu, soulager l'homme des tâches harassantes de la mouture du grain ou de l'irrigation des cultures. Les navigateurs également ont appris, très tôt, à utiliser le vent pour se déplacer et transporter des marchandises. On peut imaginer qu'à l'avenir il soit, à nouveau, utilisé pour les transports à longue distance en mer, ou en altitude, en tirant profit des courants rapides qui y règnent : les jet-streams.

Le plus ancien modèle d'éolienne connu est le moulin persan, daté de 644 avant J.-C. C'était un bâtiment ouvert conduisant l'air sur le côté d'une turbine verticale dont les aubes étaient constituées de gros ballots. La meule à grain, entraînée directement, se trouvait au-dessous.

On suppose, d'autre part, que Chinois et Égyptiens ont utilisé, très tôt, le vent pour la mouture ou le pompage, semble-t-il vers 3600 avant J.-C. Il s'agissait de « panémons » de bambou : rotors à axe vertical équipés de voilures. C'est vers l'an 1000 qu'elles se sont largement développées, en Chine. En Europe, c'est aussi depuis cette période qu'ont été mis au point les modèles hollandais à voilure de toile et de bois (figure 1), dont la technique s'est améliorée au XV^e siècle. D'abord destinés au pompage et à la mouture, leur

emploi s'est étendu au pressage de l'huile, à la fabrication du papier, au sciage du bois ou de la pierre, au martelage des métaux. Les vents étant imprévisibles par nature, les moulins devaient être surveillés et réglés en permanence, tout comme la voilure des bateaux. La technologie moderne a réussi progressivement à rendre le fonctionnement des éoliennes indépendant de cette surveillance et fiable, enfin. À la fin du siècle dernier, le « moulin américain », roue à pales multiples destinée au pompage (figure 2), était fort répandu.

Vers une plus grande surface de balayage

Vers 1890, les premières éoliennes à génératrice électrique ont été réalisées. Dès les années 1930, des machines de grande taille furent construites en URSS et dans les pays industrialisés. Plus de trois cent sociétés se mirent, alors, à fabriquer des aérogénérateurs utilisant les dernières connaissances de l'aérodynamique. En effet, on se rendit compte que, pour capter un maximum d'énergie, il n'était plus nécessaire d'utiliser des pales de grande surface. Une plus grande vitesse de balayage dans l'air faisait gagner en poids et en rendement. L'éolienne rapide était née. Mais, dès l'après-guerre, l'utilisation du pétrole à bon marché pour la production énergétique fit disparaître presque complètement cette industrie, ne lui laissant qu'une petite place dans l'alimentation de phares, de balises, d'installations de communication ou bien encore de fermes isolées.

Pourtant, ses partisans restaient convaincus que cette énergie renouvelable et décentralisée pouvait répondre à de nombreux besoins dans le monde. Mais, l'imagination des constructeurs s'est souvent heurtée aux dures lois de la physique, pas seulement de l'aérodynamique, mais aussi de la résistance de matériaux soumis à des efforts imprévisibles et violents, les plus tenaces se brisant sous l'effet de la fatigue.

Comment capter la puissance du vent ?

Contrairement à l'énergie solaire, le vent présente l'avantage de souffler la nuit aussi, par mauvais temps et, chez nous, plus fort en hiver qu'en été.

Comment capter la puissance du vent ? Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, il s'agit de ralentir l'air qui traverse l'hélice en transformant les forces agissant sur les pales en puissance de rotation. Pour cela, les pales se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. La théorie (théorème de Betz) montre que, pour récolter une puissance de rotation maximum, l'hélice doit réduire de trois fois la vitesse du vent, et non



Figure 2 : Un moulin à vent pompe l'eau dans une ferme de l'Oklahoma © 2005 Oklahoma Farm Bureau

pas l'arrêter. L'énergie récoltée dépend du cube de la vitesse et de la surface balayée par l'hélice, donc du carré de son diamètre. La densité intervient également : de l'air humide ou froid, une haute pression atmosphérique (basse altitude) seront des facteurs favorables.

Formule de Betz donnant la puissance maximale qu'il est possible de capter :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v^3$$

avec : ρ : densité de l'air, environ 1,3 kg/m³
 S : surface balayée par l'hélice en m²
 v : vitesse du vent en m/s
 P : puissance en Watts

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen :

$$P = 0,2 D^2 v^3$$

avec : D : diamètre de l'hélice en mètres
 v : vitesse du vent en m/s.



Figure 3 : Éolienne de type Darrieus de la firme Dornier
© Bundesverband WindEnergie

Les éoliennes se répartissent en quatre catégories principales, selon que leur axe de rotation est horizontal ou vertical, et qu'elles sont dites lentes ou rapides.

La régularité du vent joue aussi un rôle important : une hélice ne s'adapte pas facilement à des sauts de vitesse ou de direction trop rapides. Au niveau du sol, l'écoulement de l'air est perturbé et ralenti par les obstacles rencontrés. Un arbre, une maison laissent un sillage de perturbation d'une longueur équivalant à dix fois leur hauteur. C'est pourquoi le lieu d'implantation devra être choisi soigneusement. Une grande machine aura l'avantage de se placer au-dessus des obstacles, là où le vent est plus fort et régulier.

Les éoliennes se répartissent en quatre catégories principales, selon que leur axe de rotation est horizontal ou vertical, et qu'elles sont dites lentes – la vitesse des pales restant du même ordre que celle du vent – ou rapides. Dans ce cas, la vitesse de l'extrémité de leurs pales peut atteindre dix fois la vitesse du vent.

Les éoliennes lentes

Les plus connues sont les roues de pompage multipales. Les pales occupent la plus grande partie de la surface du cercle décrit par l'hélice. On obtient un fort couple de démarrage qui permettra par exemple d'entraîner une pompe. Elle est orientée par une queue. En cas de tempête, un mécanisme permet à la roue de se placer parallèlement.

Le rotor de type Savonius est aussi une éolienne lente, mais à axe vertical, constitué le plus souvent de deux demi-tonneaux décalés. Grâce à leur forme, la traînée que le premier présente au vent est plus élevée que celle du second qui remonte à contre-courant. Il en résulte un couple de rotation qui permet l'entraînement de l'axe quelle que soit la direction du vent. La puissance récoltée reste faible. Des versions plus élaborées permettent la production d'électricité.

Hélices rapides

Grâce à la finesse de leurs pales, au nombre de deux ou trois, ces hélices modernes sont destinées à produire de l'électricité. Elles parviennent à capter l'énergie disponible avec un bon rendement, qui atteint environ 70 % de la limite théorique. Leurs pales sont profilées en forme d'aile afin de réduire les pertes, alors que la portance du profil assure le couple de rotation. Le démarrage et la protection sont obtenus en ajustant l'angle d'attaque des pales au moyen d'un servomécanisme. La génératrice électrique est couplée à l'hélice, le plus souvent par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. La turbine est orientée face au vent par un moteur commandé par une girouette.

L'éolienne de type Darrieus (figure 3), à axe vertical – dont une est installée à proximité de Martigny, en Suisse –, se présente souvent sous la forme d'un fuseau vertical à deux ou trois pales. Leur géométrie ne leur permet pas de démarrer seules.

Éoliennes en site isolé

Dans le monde, seule une petite partie de la population est reliée au réseau électrique. Dans de nombreuses fermes ou habitations isolées, des groupes électrogènes diesel ou à essence produisent du courant avec un mauvais rendement, une importante pollution et des coûts élevés. Combinées entre elles, les énergies renouvelables ont, là, un rôle important à jouer : éolienne couplée à des panneaux solaires ou à une petite turbine hydraulique, cogénération au biogaz ou au bois, etc. Pour le stockage du courant, on utilise des batteries dont la capacité doit couvrir les périodes creuses. Une bonne complémentarité entre les différentes ressources et le contrôle de l'instant d'enclenchement des consommateurs permettent de limiter au minimum l'énergie à stocker.

Mesure des vents

Pour évaluer l'énergie disponible, il faut disposer de données sur les vents de la région et, de manière plus précise, sur le lieu d'implantation exact de la machine. La puissance récupérable étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, une erreur dans l'estimation de celle-ci peut conduire à des résultats très différents.

Dans le monde, les régions terrestres les mieux ventées se trouvent en zone côtière des continents. Sans entrer dans les détails, c'est le cas de l'Ouest africain et européen, de l'Amérique du Nord et du Sud, de l'Inde, du Japon, de la Chine, de la Sibérie, des îles de l'Océanie ou bien encore de l'Australie.

La mise au point de machines de plus en plus puissantes et fiables a permis le développement d'une industrie importante aux États-Unis, comme en Europe. Cette nouvelle situation a provoqué, en vingt ans, un changement complet d'attitude car cette ressource était, auparavant, considérée comme négligeable.

La spectaculaire expansion du parc éolien européen

En 1995, une puissance de 540 MW était installée au Danemark et de 630 MW en Allemagne. L'Europe, avec 1,75 GW, dépassait les États-Unis (1,7 GW), avec une production de 4 TWh, équivalent à la consommation de trois millions de ménages. Six ans plus tard, cette puissance avait été multipliée par cinq au Danemark, par 14 en Allemagne et plus que doublé aux États-Unis ! L'Allemagne est le plus grand producteur européen : 8,75 GW installés y ont produit 12 TWh, en 2001.

En Espagne, 6 400 machines étaient installées fin 2001, soit 3,6 GW. En 2010, 15 GW sont

prévus et 29 % de l'électricité espagnole sera renouvelable. Les constructeurs espagnols fournissent actuellement 18 % du marché mondial. Dans ce pays, les coûts d'installation, environ 850 euros par kW installé, ont été divisés par deux, en l'espace de 15 ans.

La France, bien ventée mais suréquipée en nucléaire, ne comptait que 100 MW, début 2002. Il est prévu de rattraper ce retard pour atteindre, entre 7 et 14 GW, en 2010. L'Europe disposait de 17 GW en 2001, son parc aura probablement triplé, en 2010.

Aux États-Unis, la progression est très forte, après une pause qui a suivi l'installation de grands champs en Californie, dans les années 1980. Dans le monde, 24,5 GW étaient installés, au début de 2002. On prévoit plus de 60 GW, en 2010, dont les trois quarts en Europe.

Dossier coordonné par Pascal Delizée

Bibliographie

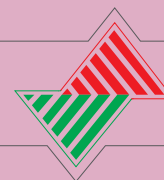
- Le Gourières D., « Énergie éolienne » éd. Eyrolles 1982
- Le Chapellier P., « Le vent, les éoliennes et l'habitat » Eyrolles 1981
- Meteonorm vent
- Office fédéral de l'énergie Éoliennes et protection du paysage, déc. 1996
- Office fédéral de l'énergie Systèmes Solaires, n° 135 et 147, 146 rue de l'Université, 75007 Paris
- Wind turbine market, SunMedia GmbH, Querstr. 31 D-30519 Hannover

Un avenir très prometteur

L'énergie théoriquement disponible est énorme, surtout dans l'hémisphère Nord. Elle a même été évaluée à 30 milliards de GWh, soit plus de 100 fois la consommation actuelle de pétrole. Le potentiel estimé, dans le cadre d'un développement équilibré des différentes ressources renouvelables, est de 210 TWh, soit environ 100 GW installés. Mais, ce sont d'autres considérations que la technique seule qui vont déterminer l'importance de l'exploitation de cette ressource : les choix politiques en relation avec l'émission de gaz à effet de serre, la sauvegarde des paysages, l'adéquation de la production avec la demande, les équipements et la stabilité des réseaux, sans négliger la lutte entre les différents lobbies qui voient déjà d'un mauvais œil ce nouveau concurrent.

Assemblée Générale

Samedi 25 avril 2009 à 9h00



fabi

ORDRE DU JOUR

1^{ère} partie : Assemblée Statutaire

- 09h00 – Accueil des participants
- 09h15 – Rapport d'activité de l'exercice 2008
Approbation des comptes de l'exercice 2008 et décharge aux Administrateurs
Approbation du Budget 2009
Fixation de la cotisation 2010
Élections statutaires
- 10h15 – Pause-café

2^e partie : Séance Académique

- 10h45 – Monsieur Ir. Jean-Pol Poncelet, ancien Ministre, Senior Vice-President AREVA, Sustainable Development and Continuous Improvement nous entretiendra sur le thème :
Climat, Développement, Énergie :
quelles convergences ?
- Question time
- 12h00 – Cocktail apéritif

BULLETIN D'INSCRIPTION à l'Assemblée Générale FABI 2009

Faculté Polytechnique de Mons - Salle Académique (1^{er} étage) - Boulevard Dolez 31 - 7000 Mons
Par e-mail : fabi@fabi.be, par fax : 02 734 53 15 - Par courrier à la FABI - Rue Hobbema 2 - 1000 Bruxelles

Nom et Prénom : AE :

Société :

Adresse :

Tél. : Fax : E-mail :

assistera

Date :

sera accompagné(e) de personne(s)

n'assistera pas

Signature :

L'éolien industriel tentative d'évaluat

« Le vrai peut
quelquefois n'être
pas vraisemblable »
(Boileau)

Définissons l'éolien industriel par l'ensemble des usines éoliennes envoyant le courant produit vers le réseau de distribution, en excluant dès lors l'éolien individuel ou desservant une collectivité locale.

Quel est le rôle de l'éolien face au défi climatique, quel est sa contribution en tant que vecteur de production d'énergie renouvelable, quel est l'enjeu économique, de quels aspects techniques doit-on tenir compte lors de la comparaison avec le photovoltaïque ou la biomasse, quelle est l'acceptation sociologique, quelle est la charge

environnementale ? Sans analyser ces aspects d'une manière approfondie, nous proposons une évaluation globale au moyen d'une méthodologie simple, voire simpliste, mais qui permettrait une comparaison avec les autres sources centralisées de production d'énergie électrique.

Rappels techniques

Le vent qui souffle transporte une certaine énergie cinétique que l'on peut capturer, partiellement, pour la transformer en énergie mécanique, qui elle, peut faire tourner des générateurs d'électricité (figure 1). Si l'on note v_1 , la vitesse du vent avant le plan du rotor et v_2 , la vitesse après le plan du rotor, la puissance maximale du vent extraite en 1 seconde, P_0 (correspondant à $v_2 = 0$), correspond à :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_1^3$$

avec ρ = masse spécifique de l'air et πR^2 = surface du plan du rotor. Comme cette extraction maximale est impossible et que dès lors $v_2 \neq 0$, la loi de Betz démontre que le maximum de la puissance mécanique qui peut être extraite du vent est égal à $0,59 P_0$. Cela implique que l'éolienne permet de réduire la vitesse du vent à un tiers de la vitesse initiale ($v_1 = 3v_2$). L'architecture des pales et leur angle d'orientation tendent à réaliser ce brassage optimum pour une vitesse moyenne du vent donnée. À partir de la formule

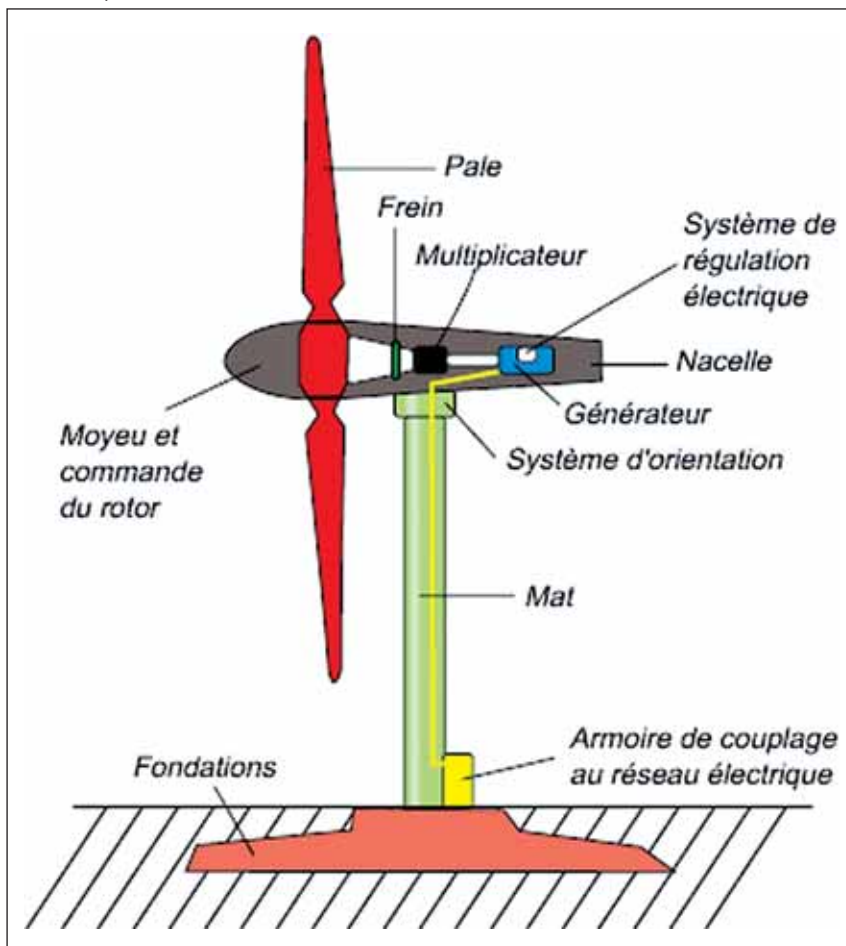
$$P = \frac{1}{2} 0,59 \rho \pi R^2 v_1^3$$

trois remarques peuvent être formulées :

- la puissance dépend la masse spécifique de l'air, ce qui veut dire, *a contrario*, que si le fluide avait été de l'eau, la puissance aurait été mille fois plus élevée ;

- l'accroissement relatif $\left(\frac{dP}{P}\right)_v = 3 \frac{dv}{v}$ implique que si la vitesse du vent chute de 9 mètres par seconde (m/s) à 3 m/s, la puissance chute de 90 %. Ces fluctuations, souvent chaotiques, compliquent considérablement la continuité de la fourniture en électricité ;

Figure 1 : Représentation schématique d'une éolienne



en Belgique : ion globale

Par Ir. G. Van Velthoven

• l'accroissement relatif $\left(\frac{dP}{P}\right)_R = 2 \frac{dR}{R}$

implique qu'un doublement de la puissance se paie nécessairement par une augmentation de 50 % de la taille des pales. Une éolienne de 2 MW comme la populaire ENERCON E82, a des pales de 41 mètres et une hauteur de moyeu de 108 mètres¹. Une éolienne de 6 MW devra donc nécessairement avoir des pales de 82 mètres, ce qui explique sa hauteur totale un peu démesurée (190 mètres). Il est difficile d'imaginer l'effet sur l'environnement d'un ensemble de 12 aérogénérateurs de la sorte, comme c'est pourtant le cas dans la commune d'Estinnes.

La transformation de l'énergie mécanique en courant alternatif s'opère dans des alternateurs à inducteur (stator) multipolaire et un induit (rotor) triphasé. Les fluctuations de la vitesse de rotation Ω ont pour effet une fluctuation de la fréquence f qui s'exprime selon l'expression suivante :

$$f_{\text{généré}} = \frac{n}{2} (\text{nombre de pôles du stator}) \times \Omega \text{ (vitesse du rotor en t/min)}$$

ce qui explique que les éoliennes actuelles ont une tendance à présenter une vitesse lente et un nombre de pôles élevé. Pour $n = 100$ et $\Omega = 1$ t/s, on a exactement la fréquence de 50 Hz du réseau et les corrections de phase seront moins énergétiques. Nous ne nous arrêtons pas aux multiples régulations électrotechniques nécessitées par l'intermittence éolienne ; citons par exemple le démarrage (et la coupure) avec des thyristors à refroidissement, pour assurer la connexion graduelle au réseau pour $v = 4$ m/s ou la déconnexion pour $v > 25$ m/s (figure 2), et l'électronique de puissance pour remédier aux phénomènes de flicker, d'ilotage, etc.

Ces trois aspects doivent être analysés ensemble.

Par le phénomène de l'intermittence (les caprices du vent ont pour effet que la production éolienne n'est pas continue mais intermittente), toute nouvelle insertion éolienne ne peut fonctionner seule pour produire de l'électricité sur une base régulière : il lui faut un *backup* de même puissance pour assurer la continuité de l'approvisionnement. C'est également la conséquence de la

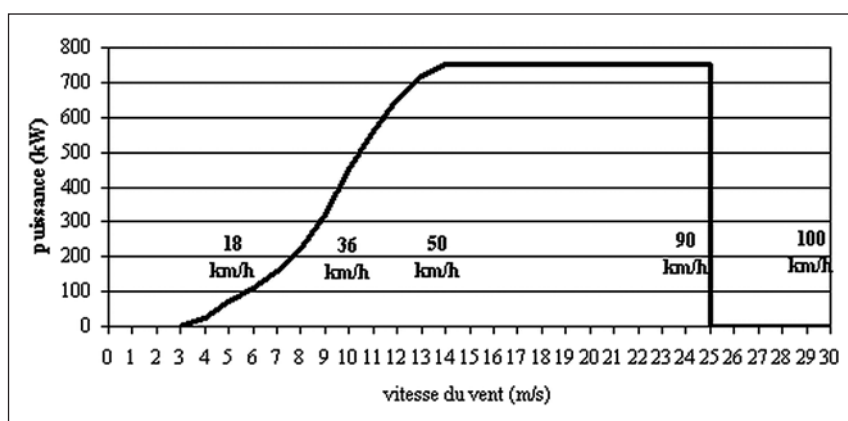


Figure 2 : Courbe de puissance type d'une éolienne

quasi-impossibilité de stocker l'énergie éolienne.

La production moyenne européenne *onshore*, pour une éolienne de 2 MW, est de 3,85 GWh/an. Comme une année compte 8 760 heures, une éolienne de 2 MW, qui produirait en permanence à sa puissance nominale, fournirait 17,52 GWh/an. Si elle n'en produit que 3,85 GWh/an, cela correspond à un taux de charge de $3,85/17,52 = 22\%$. C'est comme si, sur une année, l'éolienne n'avait fonctionné que 1 928 heures à pleine puissance. En Belgique, le dernier taux de charge moyen connu est de 15 %. On peut augmenter considérablement le taux de charge en installant les éoliennes en pleine mer (28 %).

C'est ainsi qu'une éolienne de 2 MW, qui, compte tenu de son faible taux de charge, fournit sa puissance nominale pendant 2 000 heures sur une année (ce qui donne 4 GWh/an) a besoin d'un régulateur thermique suffisamment souple (par exemple, une turbine gaz-vapeur (TGV) de même puissance) pour fournir immédiatement, et d'une manière plutôt chaotique, l'électricité qui fait défaut pendant les 6 760 heures restantes de l'année. Ensemble, elles produiront donc bien les 17,52 GWh/an correspondant à une production continue d'un vecteur de puissance de 2 MW à taux de charge de 100 %.

Suivant en cela le raisonnement de notre éminent climatologue André Berger², on peut

En Belgique, le taux de charge moyen onshore est de 15 % et de 28 % pour l'offshore.

¹ cf. <http://www.enercon.de/www/fr/e82.nsf/mainView/1?OpenDocument>

² BERGER A. (2005) « Éoliennes, Énergie et CO₂ en Belgique ». Note de travail. Louvain-la-Neuve, 26/12/05.5

estimer que comme la régulation thermique est polluante (pour une TGV : 456 g_{CO₂}/kWh), et qu'elle doit intervenir à raison du complément du taux de charge, toute insertion éolienne est donc caractérisée par un taux de pollution de 456 g_{CO₂}/kWh x (100 % - 22 %) = 356 g_{CO₂}/kWh. On peut se poser la question de savoir si, en cas de taux de pénétration éolien plus important, la puissance éolienne installée devrait avoir un *backup* identique.

Parmi les éléments de réponse à la question, il faut citer la dispersion géographique (le foisonnage, en cas de non-corrélation des vitesses du vent, sur un grand territoire, permet d'économiser du thermique et d'envisager de l'autorégulation) et la qualité des prévisions à court terme (comme l'éolien sert à la demande de pointe, si les prévisions sont bonnes, on peut programmer la période de pointe avec de l'éolien en économisant le thermique).

Comme nous examinons le cas de la Belgique, où le taux de pénétration de l'éolien est limité (il est de 2 % actuellement et pourrait monter à 6 % en 2020), nous n'examinerons pas les problèmes assez épineux de surcharge de réseau et de nécessaire renforcement des câbles de haute tension (HT). Rappelons tout de même qu'une ligne HT de 110 kV ne peut transporter (eu égard à un coefficient de sécurité de 30 %) que 30 MW. Un parc de 12 éoliennes de 3 MW peut produire des pointes de 36 MW, ce qui présente un risque sérieux de provoquer une panne par surcharge.

Dans sa thèse doctorale, J. SOENS³ estime que, pour la Belgique, la limite de l'apport de l'éolien industriel à la potentielle réduction des GES⁴ est de 4 %, correspondant à une puissance installée de 700 MW. Ce scénario correspond à une réduction moyenne de CO₂ de 567 g_{CO₂}/kWh. Pour tout éolien supplémentaire, la valeur ajoutée en terme de réduction de CO₂ est négligeable.

Une étude allemande⁵ conclut que pour les 36 GW éoliens qui seront installés en 2015 (29 % de la puissance totale installée en 2002), l'électricité non produite par les centrales au charbon sera de 12 à 19 TWh/an à partir de 2003. Si on estime la production de ces 36 GW éoliens à 72 TWh/an, on se rend compte que l'éolien industriel ne permet pas de se substituer aux centrales classiques à raison de 100 % comme on l'admet souvent, mais seulement à raison de 16 % à 26 %. La réduction moyenne de CO₂ grâce à l'éolien est donc seulement de 96 à 156 g_{CO₂}/kWh, si on admet que le potentiel de régulation thermique par le charbon est caractérisé par un taux d'émission de CO₂ de 600 g_{CO₂}/kWh. Ceci va dans le sens des résultats de SOENS³ : plus il y a de l'éolien au-delà d'une valeur optimale, moins il y a de réduction de CO₂. L'étude DENA⁵ donne également une

idée de la puissance thermique de régulation : 8 à 19 % du potentiel éolien installé. Au Royaume-Uni, les calculs de Dale⁶ montrent que pour un taux de pénétration de 20 %, le potentiel de régulation nécessaire est de 5 %.

Quant aux gains en matière de réduction de CO₂, les études montrent une décroissance plus ou moins forte si le taux de pénétration de l'éolien augmente. La situation change de pays à pays et dépend également du commerce des droits d'émission et des coûts marginaux des vecteurs de production. Si le gaz augmente, l'apport du régulateur charbon va augmenter et le gain diminuer plus fortement.

Coûts

Pour le producteur éolien, d'après les données et hypothèses du ministère fédéral de l'économie⁷, le coût (investissement, entretien, assurance, précompte immobilier, intérêts) varie de 45 à 88 €/MWh. Appliqué à une éolienne de 2 MW, avec un taux de charge de 2 000 h par an, cela revient à 85 €/MWh. Or, en Belgique, le coût de l'électricité (coût total de production basé sur les coûts fixes + coûts marginaux) est de 48,5 €/MWh (très proche du prix « *base load* » du marché de gros)⁸.

Ceci prouve à suffisance que l'éolien n'est rentable que moyennant une aide financière. En 2008, le quota du renouvelable dans la distribution d'électricité doit être de 8 % ; à défaut, une amende relativement élevée de 100 €/MWh est appliquée. Le système wallon étant du type « certification » plutôt que « *feed-in* », le producteur éolien reçoit, par MWh produit, un certificat vert, qu'il injecte dans le marché correspondant. Comme la part éolienne dans la production d'électricité est de loin inférieure aux 8 % précités, le prix du certificat vert avoisinera le montant de la pénalité (le prix actuel pour le marché wallon est de 92 €). Ce surcoût de 92 €/MWh, appliqué à la consommation actuelle (85 TWh/an)¹⁰, représente dès lors 782 M€/MW, à charge de la collectivité (cf. la cotisation appliquée sur la facture d'électricité et qui varie entre les régions).

Pour le distributeur, le coût revient donc à 51,8 €/MWh, compte tenu du fait que le surcoût ne concerne que 8 % de sa distribution. Il semble donc logique que les producteurs classiques se tournent de plus en plus vers l'éolien. Il est généralement admis que le seul investissement dans l'éolien revient à 1 M€/MW. Pour une période d'amortissement de 15 ans (durée actualisée des certificats verts), le coût d'investissement est donc de 1 M€/30GWh, soit 33 €/MWh. Avec les données d'input financier précitées, la marge brute est donc d'environ 15 (prix du marché pour 1 MWh éolien suite aux problèmes liés à l'intermittence) + 92 (CV) - 33 (amortissement) = 74 €/MWh. Pour une éolienne de

³ SOENS J. (2005) Impact of wind power in a future power grid. PhD.Thesis. KU Leuven, Belgium. URL : <https://repository.libis.kuleuven.be/dspace/handle/1979/161>

⁴ GES : gaz à effet de serre

⁵ Deutsche Energie-Agentur (DENA) (2005). Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Off-shore bis zum Jahr 2020. Endbericht. Köln.

⁶ DALE L. Milborrow D. Slark R. Strbac G. (2003). A Shift to Wind is not unfeasible. Power UK 109, p17.

⁷ SPF Économie « Éolien - Prix » URL : http://mineco.fgov.be/energy/renewable_energy/wind/wind_fr_004.htm#on-shore 8 CAMPS G. (CREG) (2006). Le prix de l'électricité par composante tarifaire. Conf. Presse, 5 juillet 2006.

⁸ <http://www.creg.be/pdf/Presse/2006/confpresEP05072006fr.pdf>

⁹ Dans le système « *feed-in* », le distributeur est obligé d'acheter le MWh éolien à un prix fixé légalement ; dans le système « certification », le distributeur doit faire la preuve d'un taux d'électricité verte distribuée sinon il est pénalisé.

¹⁰ CREG (2005). Programme indicatif des moyens de production d'électricité 2005 - 2014. (C)050120- CREG-388 du 20 janvier 2005, p25. URL : <http://www.creg.be/pdf/Propositions/C388FR.pdf>

2 MW, avec un taux de charge de 25 %, et sur l'horizon économique de 15 ans, cela représente à peu près 5 M€. Il y a peu d'équipements industriels qui garantissent un tel revenu brut sur investissement avec un risque financier quasi-nul. En France (système *feed-in*), le distributeur est obligé d'acheter le courant éolien au tarif légalement fixé (82 €/MWh)¹¹.

Aspects planologiques

Impact spatial : 31 875 ha en 2020 ?

Rares sont les projections à moyen terme, pour la Belgique, en matière de renouvelable. Une étude de 2004¹² envisage, pour la Belgique, un scénario éolien proactif pour 2025 de 4 582 MW de puissance installée pour une production de 12 091 GWh, représentant 11,3 % de la consommation totale. Ce scénario, qui constitue un maximum qu'on peut atteindre, est évidemment très médiocre sur le plan des émissions de CO₂ eu égard aux hypothèses et conclusions de la thèse de SOENS⁴ précitée. À noter que ce scénario implique donc 2 291 éoliennes de 2 MW.

La densité de puissance nominale installée dans un champ d'éoliennes *onshore* est de l'ordre de 8 MW par km², en moyenne¹³. La Belgique s'est engagée (provisoirement ?) à consommer 13 % de renouvelable en 2020. Quelle sera la part de l'éolien industriel ? Des études menées sur le plan européen, il résulte qu'en 2020, l'éolien représentera avec son potentiel de 180 GW sur les 380 GW, 47 % des E-SER¹⁴. Dans l'hypothèse où l'on peut extrapoler ce taux pour la Belgique, l'éolien devra alors réaliser 6,1 %. Malgré les efforts de réduction de la consommation, une extrapolation prudente de la consommation actuelle (85 TWh/an) donne au moins 100 TWh/an en 2020 (voir également la référence 6). À cela, correspondent 6 110 GWh, c'est-à-dire 1 525 éoliennes de 2 MW fournissant 4 GWh/an chacune et occupant un espace de 38 125 ha, ce qui semble exclure une poursuite du développement *onshore*, mais pas de l'*offshore*.

Aspects procéduraux : « ZDE inopportuns »

En Belgique, il n'y a pas de ZDE (zones de développements éoliens) comme en France. En Wallonie, tout promoteur éolien peut introduire une demande de permis unique pour un projet *onshore* sans obligation aucune quant à la localisation¹⁵. Deux documents de travail (sans valeur normative) devraient le guider. Tout d'abord le Cadre de Référence¹⁶ (un document semblable existe en Région flamande¹⁷). Ce document comprend un certain nombre de directives, par exemple concernant les distances interéoliennes, les distances par rapport aux habitations, etc. Comme ce document n'a pas de valeur légale et que les décideurs en tiennent



© EUROPA, Source : Site de la Présidence française du Conseil de l'Union européenne 2008

compte ou non, l'octroi du permis est caractérisé par un certain degré d'arbitraire.

Ensuite un document intitulé « Cartographie du champ de contraintes paysagères et environnementales comme base de détermination des zones d'exclusion à la transcription au plan de secteur de la politique des éoliennes à l'échelle de l'ensemble du territoire wallon¹⁸ ». Ce document comme son nom l'indique, est du type « exclusion », et ne produit donc pas de carte « positive » concernant l'implantation d'éoliennes. Dans une question parlementaire récente¹⁹, le Ministre wallon des Transports et du Développement territorial a déclaré « Aujourd'hui, l'idée d'élaborer une planification et une programmation des éoliennes au moyen d'un document cartographique ou, comme chez nos voisins français, de créer des zones de développement éolien (ZDE), ne me paraît pas opportun ». De là à prétendre que, compte tenu de l'attrait du gain, la Wallonie vit une époque de prolifération anarchique de projets éoliens *onshore*, il n'y a qu'un pas.

Aspects légaux

En plus des normes procédurales, le développement de l'éolien *onshore* est également conditionné par un certain nombre de règles de droit de portée plus générale. Une règle constitutionnelle²⁰ dispose que chacun a le droit de mener une vie conforme à la dignité humaine et à la protection d'un environnement sain. Une interprétation large du principe de précaution, de plus en plus fréquemment rencontré en jurisprudence du droit de l'environnement, permettrait en effet de soutenir qu'une usine éolienne près des riverains ou dans un beau paysage viole la norme de « l'environnement sain ». De plus en plus, la jurisprudence administrative met en balance les obligations résultant de la Convention de Kyoto et de celle de Florence. Cette Convention européenne du Paysage (CEP, Florence), ratifiée par la Région wallonne le 20 décembre 2001, a donné lieu à un revire-

¹¹ Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent telles que visées au 2o de l'article 2 du décret no 2000-1196 du 6 décembre 2000.

¹² PALMERS G. (2004). Renewable Energy Evolution in Belgium 1974 – 2025. Project report CP/23, SPSD II for the Belgian Science Policy, Brussels, Belgium, June 2004.

¹³ HUART M. (2005). Conférence « Les énergies renouvelables, des technologies en pleine évolution » Actes du Colloque « Avenir de l'énergie et énergies de l'avenir ? » organisé par l'A.Ir.Br. et l'A.I.Ms.

¹⁴ EREC (European Renewable Energy Council) (2006) "Renewables Energy Target for Europe – 20% by 2020". URL : http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Documents/Publications/EREC_Targets_2020_def.pdf.

¹⁵ cf. Décret du 11 mars 1999 concernant le permis d'environnement.

¹⁶ Cadre de Référence pour l'implantation d'éoliennes en Région wallonne. 18 juillet 2002.

¹⁷ Afwegingskader en randvoorwaarden voor de inplanting van windturbines. Omzendbrief: EME/2006/01-RO/2006/02.

¹⁸ Convention DGATLP/DOH/LOG/GD/AB/03.44732 financée par le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et de l'Environnement, mai 2004.

¹⁹ FOURNY D. (2008) Question écrite au Ministre du Logement, des Transports et du Développement territorial. Actes du Parlement Wallon, 25/02/2008.

²⁰ Constitution belge Art. 23 4°



© Communautés européennes, 1995-2008

ment de la jurisprudence en matière de droit de l'environnement. Dans la réponse donnée par le Ministre Antoine à une question parlementaire de Bernard Wesphaël (Ecolo) publiée dans le compte rendu analytique de la séance publique de la Commission de l'Aménagement du Territoire, des Transports, de l'Énergie et du Logement en date du lundi 20 février 2006, on retrouve la même préoccupation. « Il y a, d'une part, les accords de Kyoto et le souhait de développer des énergies renouvelables et, d'autre part, une réflexion sur la transcription concrète de la Convention européenne du Paysage (CEP) en Région wallonne. Le territoire wallon doit accueillir des éoliennes, mais pas de manière

anarchique et avec un "coût paysage" en rapport avec une production maximisée sur les sites potentiels. Par leur gigantisme, les éoliennes ont un impact paysager sur plusieurs kilomètres et il y a lieu de préserver certains paysages encore caractéristiques de notre Région, en évitant d'y implanter des éoliennes. Si le développement éolien a de l'avenir sur le territoire wallon, il doit être mené de manière raisonnée ». Le Code wallon de l'Aménagement du territoire contient plusieurs articles imposant la protection de l'environnement²¹ ; la jurisprudence en matière du contentieux environnemental y réfère souvent. Dans un arrêté ministériel récent²², plusieurs considérations ont trait à cette matière. « *Considérant, quant à l'impact visuel du projet, qu'il convient de rappeler que l'article 1^{er} du CWATUP impose à la Région wallonne de veiller, dans le cadre de ses compétences, à la conservation et au développement du patrimoine culturel, naturel et paysager; que de plus, la Région a ratifié, le 20 décembre 2001, la Convention européenne du Paysage, laquelle impose également, notamment, de prendre en considération la dimension paysagère de toute demande de permis* » ; « *Considérant, en conclusion, que le parc projeté ne peut être autorisé du fait de la pression qu'il exercerait sur le paysage en cause, caractéristique du Condroz et de qualité ; que la condition de respect, structuration ou recomposition des lignes de force du paysage énoncée à l'article 127, § 3 du CWATUP n'est pas remplie en l'espèce et que la dérogation au plan de secteur ne peut dès lors être octroyée...* »

L'application de ces règles de droit freine le développement éolien *onshore* aussi bien en Wallonie qu'en Flandre.

Aspect nuisances

Nuisances sonores

Malgré tous les efforts de la part des constructeurs, les grandes éoliennes actuelles restent bruyantes. Le rapport de l'Académie française de Médecine²³ recommande fortement qu'aucune éolienne ne soit implantée à moins de 1 500 m d'une habitation (en Wallonie, la norme est toujours de 350 m).

Un rapport de la *UK Noise Association*²⁴ (Stewart, 2006) et qui intègre les résultats de la Première Conférence internationale de Berlin sur le Bruit éolien (octobre 2005), rejoint les conclusions de l'Académie française de Médecine et émet comme principale recommandation : « *It would be prudent that no wind turbines should be sited closer than 1 mile away from the nearest dwellings. This is the distance the Academy of Medicine in Paris is recommending, certainly for the larger turbines and until further studies are carried out. There may even be occasions where, a mile is insufficient depending on the scale and nature of the proposed development.* »

Une récente, mais fort médiatisée thèse de doctorat néerlandaise²⁵ sur les nuisances sonores d'origine éolienne explique scientifiquement l'importante augmentation du bruit nocturne des grandes éoliennes. Alors qu'au ras du sol, et à 10 m de hauteur, il n'y a pas de vent, des phénomènes météorologiques complexes font qu'il y en a à 100 m de hauteur, générant des nuisances sonores d'autant plus gênantes que le bruit ambiant diurne fait défaut. Ces bruits justifiaient les doléances des riverains jusqu'à deux km du parc. Parmi les conclusions de cette thèse, nous pouvons lire « ...eu égard au bruit des aérogénérateurs, on peut affirmer qu'un phénomène important a été ignoré : celui du changement du vent après le coucher du soleil. Ce phénomène sera de plus en plus important compte tenu de la taille croissante des éoliennes et de la multitude des projets de parcs éoliens. Si ce phénomène n'est pas reconnu et résolu, il risque d'entraver sérieusement le développement de l'énergie éolienne ».

Dévalorisation patrimoniale

Bien que cette matière soit contestée, force nous est de constater qu'aux Pays-Bas, en matière de OZB (*onroerende zaakbelasting*) c'est-à-dire une taxation immobilière communale, l'ordre judiciaire néerlandais reconnaît que la nuisance éolienne ouvre le droit subjectif à réparation à hauteur d'une réduction de plus ou moins 30 % (selon chaque cas), ce qui indique bien une dévalorisation de l'ordre de 30 %²⁶.

²¹ e.a. CWATUP art. 1, art. 127

²² Arrêté ministériel REC.PU/06.162 du 27 décembre 2006

²³ CHOUARD C.H. (2006). « Le retentissement du fonctionnement des éoliennes sur la santé de l'homme ». Rapport adopté le 14 mars 2006 (Séance ordinaire) - 14/03/2006.

²⁴ STEWART J. (2006). "Location, location, location". The UK Noise Association. Reports. July 2006. London. UK.

²⁵ van den Berg G.P. (2006). "The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound". PhD Thesis. Rijksuniversiteit Groningen. The Netherlands.

²⁶ ANONYME (2006). <http://www.ukna.org.uk/index.htm>

²⁷ FOLLIASSON M. (2007). Les éoliennes. Livre Blanc. Institut de France Académie des Beaux-Arts. Paris.

²⁸ (a) DUJIMOVIC J.J. (1975). "Extended Continuous Logic and the Theory of Complex Criteria". Publikacije Elektrotehnikog Fakulteta Beograd.Serija Matematika i Fizika, N°498-541. Serbia.

(b) ibidem. "Weighted Conjunctive and Disjunctive Means and their Application in Systems Evaluation". idem N°461-497 (1974).

Nuisances visuelles

L'esthétique, ou l'inesthétique, d'usines éoliennes reste avant tout une question strictement individuelle. L'Académie française des Beaux-Arts juge, dans un « Livre Blanc » remarquable (2007), après consultations, que les éoliennes sont en « contradiction avec la tradition française d'harmoniser l'architecture avec le paysage²⁷ ». Afin de « prendre part aux débats » sur les éoliennes, l'Académie a décidé de constituer un groupe de travail dirigé par Michel Folliasson, membre de sa section Architecture et composé d'Académiciens et d'experts français et étrangers. Elle conclut que « la confrontation de ces machines de 150 m de haut (...) avec les sites remarquables et les paysages de qualité est difficilement acceptable ». En Belgique, un projet de recherche interuniversitaire en cours, (SD/EN/01A), appelé « Capacité paysagère et attitudes sociales face à l'implantation de parcs éoliens en Belgique (LACSAWEP) », montre bien que le sujet est interpellant.

Méthodologie d'évaluation

L'objectif de cette évaluation est de déterminer un « score » d'utilité additive, comme, par exemple, pour une nouvelle voiture (par exemple 82/100) ou un vin. Ce modèle devrait permettre également l'évaluation des autres vecteurs de production d'électricité, afin de déterminer un bouquet optimal eu égard aux contraintes de la politique énergétique.

Agrégation non linéaire

Pour éviter les problèmes de « compensation » (ce qui devrait être évité pour des critères indépendants, voire conflictuels) d'une agrégation linéaire classique, on utilisera une approche généralisée. Pour illustrer, celle-ci, nous présentons l'exemple ci-dessous.

Exemple : Évaluation de deux candidats A et B, à un poste de cadre, pour les critères rendement (pondération convexe

$p = 0,65$) et intelligence (pondération convexe $p' = 0,35$) (voir tableau 1)

Nous constatons, à partir du tableau 1, que malgré la pondération beaucoup plus importante du critère rendement, A sera classé avant B, en vertu de l'utilité additive, ce qui peut ne pas être souhaité. En fait, aucune des trois « moyennes » n'est bonne, bien que dans l'exemple traité, l'idéal se trouverait quelque part entre la moyenne pondérée et la conjonction. C'est ce que va réaliser la moyenne conjonctive-disjonctive (moyenne généralisée)²⁸. La moyenne généralisée E de n évaluations X_i s'obtient comme suit, en passant par une fonction d'utilité f :

$E_i = f(X_i)$ avec $E \in [0,1]$.

Par définition, $E = 0$ pour la plus mauvaise évaluation possible et $E = 1$ pour la meilleure possible.

$$E = \left[\sum_{i=1}^n p_i \times E_i \right]^{\frac{1}{R}}$$

On démontre que pour :

- (1) $R = +1$, $E =$ moyenne arithmétique
- (2) $R = 0$, $E =$ moyenne géométrique
- (3) $R = -1$, $E =$ moyenne harmonique
- (4) $R = -\infty$, $E =$ minimum E_i
- (5) $R = \infty$, $E =$ maximum E_i

Une agrégation conjonctive ($R = -\infty$) correspond à l'indépendance la plus absolue entre les critères, de telle sorte que la moyenne E correspond à la note E_i la plus mauvaise. Une agrégation disjonctive ($R = \infty$) correspond à la dépendance la plus absolue entre les critères (redondance parfaite) de telle sorte que la moyenne E correspond à la note E_i la meilleure.

Dans la réalité, les critères ne sont ni parfaitement redondants, ni absolument indépendants de telle sorte que le besoin de nuance se fait sentir par le choix adéquat de R. Dans ses travaux (1975), Dujmovic a calculé les différentes valeurs de R en fonction du degré de conjonction et du nombre de critères. Pour la suite, nous admettrons, pour des raisons

de simplicité, que le taux de conjonction retenu est celui de sévérité moyenne (*medium quasi-conjunction*).

Critères

Le choix des critères permettant d'évaluer l'éolien est certes un peu arbitraire, mais il peut être affiné. Les considérations précédentes nous permettent de retenir les critères :

$$C_i \{i = 1 \dots 7\}.$$

L'évaluation de l'onshore sera notée E_i et celle de l'offshore E'_i .

$C_1 =$ sécurité d'approvisionnement

La continuité de l'approvisionnement correspond à $E_1 = 1$ (100%). C'est le cas pour la plupart des sources de production, l'aléatoire complet à $E_1 = 0$ (0 %) L'intermittence éolienne est à l'origine d'une note plutôt mauvaise sur ce critère. Eu égard à l'analyse précédente, on peut estimer que l'évaluation équivaut au taux de charge ($E_1 = 0,22$ pour l'onshore et $E'_1 = 0,30$ pour l'offshore).

$C_2 =$ caractère d'énergie renouvelable

Sans le moindre doute, $E_2 = E'_2 = 1$. Il en serait de même pour l'hydraulique. Dans ce même ordre d'idées, on pourrait s'en inspirer pour les autres vecteurs de production d'électricité de la probabilité de réserves suffisantes à moyen terme. Le charbon obtiendrait 0,80 ; le gaz ou le fuel 0,50 et le nucléaire classique 0,60 (l'uranium devient rare, encore que les scientifiques balayent cette vision négativiste des réserves d'uranium disponibles en nous indiquant que les réserves actuelles sont suffisantes pour alimenter le parc existant pendant 60 ans. Bien sûr, il en faudra aussi pour alimenter les centrales en devenir mais il semblerait que la recherche de gisements d'uranium, totalement abandonnée depuis des décennies, est pleine de promesses et plusieurs mines dont certaines très importantes sont inexploitées).

$C_3 =$ réduction des GES

Avec comme indicateur le taux de production de GES/kWh produit, on pourrait s'inspirer de la valeur la plus mauvaise pour le charbon (600 gCO₂/kWh) et la meilleure pour l'hydraulique (30 gCO₂/kWh) et admettre une interpolation linéaire des 356 gCO₂/kWh, imputables à l'éolien, si la régulation est assurée par une TGV. Ceci donne une évaluation de l'utilité : $E_3 = E'_3 = 0,38$.

$C_4 =$ réduction des nuisances sonores

Par rapport à la norme de l'Académie française de Médecine qui aurait $E_4 = 1$,

Tableau 1 : Moyenne, conjonction, disjonction

	rendement $p = 0,65$	intelligence $p' = 0,35$	moyenne	conj.	disj.
A	0,45	0,90	0,6075	0,45	0,90
B	0,60	0,55	0,5825	0,55	0,60

Tableau 2 : Évaluations³⁰

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Onshore (E)	0,22	1	0,38	0,25	0,50	0,26
Onshore (E')	0,30	1	0,38	1	1	0,80

$$E_7(\textit{onshore}) = \left(\frac{1}{3} 0,22^{-0,7314} + \frac{1}{3} 1^{-0,7314} + \frac{1}{3} 0,38^{-0,7314} \right)^{\frac{1}{-0,7314}} = 0,38$$

$$E_7(\textit{offshore}) = \left(\frac{1}{3} 0,30^{-0,7314} + \frac{1}{3} 1^{-0,7314} + \frac{1}{3} 0,38^{-0,7314} \right)^{\frac{1}{-0,7314}} = 0,44$$

$$E_8(\textit{onshore}) = \left(\frac{1}{3} 0,25^{-0,7314} + \frac{1}{3} 0,50^{-0,7314} + \frac{1}{3} 0,26^{-0,7314} \right)^{\frac{1}{-0,7314}} = 0,31$$

$$E_8(\textit{offshore}) = \left(\frac{1}{3} 1^{-0,7314} + \frac{1}{3} 1^{-0,7314} + \frac{1}{3} 0,80^{-0,7314} \right)^{\frac{1}{-0,7314}} = 0,92$$

$$E_9(\textit{onshore}) = \left(\frac{1}{2} 0,38^{-0,7203} + \frac{1}{2} 0,31^{-0,7203} \right)^{\frac{1}{-0,7203}} = \frac{34}{100}$$

$$E_9(\textit{offshore}) = \left(\frac{1}{2} 0,44^{-0,7203} + \frac{1}{2} 0,92^{-0,7203} \right)^{\frac{1}{-0,7203}} = \frac{61}{100}$$

Tableau 3: Les formules



Ir. Guido VAN VELTHOVEN

est issu de la 111^e Promotion polytechnique de l'ERM (1961). Il est aussi ingénieur civil en gestion industrielle de la KULeuven (1973). À la suite d'une carrière d'administrateur militaire à la Défense, il a pu mettre à profit son expérience acquise comme chargé de cours en méthodes quantitatives de gestion à l'ICHEC-Saint-Louis jusqu'en 2003.

il y a lieu de pénaliser les 350 mètres du Cadre de Référence, sachant que l'on peut raisonnablement admettre que 100 mètres correspond à $E_4 = 0$ (maximum de bruit). L'*offshore* aura donc $E'_4 = 1$ et l'*onshore* (interpolation linéaire) $E_4 = 0,25$.

C₅ = réduction de la dépréciation patrimoniale

Aucune éolienne *onshore* n'augmentera la valeur patrimoniale des habitations voisines. Mais comme cette dépréciation semble contestée, il y a lieu d'opter pour une évaluation d'équiprobabilité. Dès lors, $E_5 = 0,5$ pour l'*onshore*, en revanche, il est clair que $E'_5 = 1$ pour l'*offshore*.

C₆ = réduction de la pollution visuelle

Il est clair que cette réduction sera plus grande pour l'*offshore*, sans être absolue. Disons $E'_6 = 0,8$. Pour l'*onshore*, on peut nuancer selon la localisation (friche industrielle ou paysage à préserver). Il semblerait que la probabilité d'implantation en friche ($p = 1/3$) est nettement inférieure, pour des raisons de rentabilité, à celle en zone rurale ou sur les crêtes ($p = 2/3$). Si la friche vaut l'*offshore* et la zone rurale 0, on obtient $E_6 = 0,26$.

C₇ = coût

Comme signalé ci-avant, en 2008, l'électricité, avec l'exigence de 8 % de renouvelable, coûte, au distributeur, 51,8 au lieu de 48,5, c'est-à-dire 7 % de plus. Mais l'éolien n'y représente actuellement que 10 %²⁹, ce qui permet d'ignorer temporairement ce critère (le surcoût actuel de l'électricité n'est influencé par l'éolien qu'à raison de 7 millièmes).

Agrégation

Les valeurs des critères C_1 à C_6 , pour l'*onshore* et l'*offshore*, sont repris au tableau 2. Comme Dujmovic (1975) démontre que la méthode est associative et qu'il calcule les constantes d'agrégation pour un maximum de 5 critères, il faut agréger en deux fois, par

exemple les trois premiers (E_7), les trois derniers (E_8) et puis le résultat de l'agrégation E_7 et E_8 (E_9). Les formules sont données au tableau 3.

Analyse des résultats

L'évaluation globale *offshore* est quasi le double de l'évaluation globale *onshore*.

L'évaluation globale *offshore* est plus fortement pénalisée, par la sévérité de l'agrégation (*medium quasi-conjunction*), que celle de l'*onshore* dont les évaluations étaient déjà médiocres. Une agrégation neutre (compensatoire) donne pour l'*offshore* 0,68 (nettement supérieur à 0,61) et pour l'*onshore* 0,345 (très voisin de 0,34).

Cette méthodologie simpliste avait pour objectif de déterminer un score, pas de constituer une analyse multicritère des différents vecteurs de production d'électricité. Il serait intéressant d'appliquer cette méthode simpliste aux autres vecteurs, et ensuite d'utiliser ces scores dans un modèle de détermination de bouquet énergétique optimal soumis aux différentes contraintes (techniques, politiques) fixées.

Conclusion

La médiocrité de l'évaluation globale de l'*onshore* vis-à-vis de l'*offshore* est frappante. Comme l'*offshore* est plus rentable, plus capacitaire et présente moins de nuisances, on pourrait se poser la question de l'opportunité de continuer le développement *onshore* eu égard à ses nuisances multiples. D'aucuns évoqueront l'argument du coût. À ce sujet, il convient de se reporter aux conclusions du rapport final de la Commission d'Analyse des Modes de Production de l'Électricité et du Redéploiement des Énergies en Belgique, en abrégé AMPERE³¹, au Secrétaire d'État à l'Énergie et au Développement durable :

« L'électricité produite par les éoliennes, tant sur terre qu'en mer, se caractérise par des coûts externes peu élevés (qui sont limités principalement aux coûts externes liés aux émissions pour réaliser et entretenir les éoliennes). L'inconvénient de ce moyen de production se situe toutefois dans le coût de production plus élevé. Ce coût de production varie entre 1,85 BEF/kWh (0,046 €/kWh) pour les éoliennes installées le long de la côte belge et 3,26 BEF/kWh (0,081 €/kWh) pour les éoliennes installées à l'intérieur du pays. »

En ce qui concerne l'éolien industriel en Belgique, il n'a jamais été démontré qu'il existerait une quelconque complémentarité fonctionnelle ou technique chiffrable, entre l'*onshore* et l'*offshore* ; à partir d'un certain potentiel installé les investissements en matière de raccordement au réseau, ou au renforcement de celui-ci, sont semblables. C'est sans doute la raison pour laquelle les ingénieurs énergéticiens européens se tournent de plus en plus vers le seul développement *offshore*.

²⁹ Voir http://ec.europa.eu/energy/climate_actions/doc/factsheets/2008_res_sheet_belgium_fr.pdf

³⁰ Comme pour la théorie de l'utilité multiattribut, tous les critères ont été libellés de façon à les maximiser.

³¹ Pauwels J.P., Streydio J.M. (2000) Conclusions et recommandations, résumé exécutif. URL : http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/Rapport_fr.htm

La ferme offshore d'éoliennes du Thorntonbank : un défi technologique inédit à 30 km de la côte

La société C-Power est le développeur de l'unique ferme éolienne complètement autorisée de la côte belge. Situé à 29 km des côtes belges, sur le banc de sable Thorntonbank, le futur parc devrait, à terme, totaliser 60 éoliennes, les profondeurs d'eau variant de 12 à 27,5 m. La première phase de ce projet est constituée de six éoliennes d'une puissance de 5 MW chacune et d'un premier câble de 150 kV, long de 37 km, reliant le Thorntonbank à la côte. S'il est réalisé dans son intégralité, le projet C-Power (maître d'ouvrage) totalisera une puissance installée de 300 Mégawatt, ce qui correspond à une production annuelle d'électricité de l'ordre de 986,1 GWh ou de 1 TWh, en chiffres arrondis.

Les six fondations de la phase I du projet Thornton Windfarm de C-Power ont été conçues pour servir de fondations à des éoliennes de 5 MW, avec une hauteur d'axe de 94 m au-dessus du niveau de la mer et un rotor de 126 m de diamètre. Dans leur position finale, les six éoliennes seront espacées de 500 m. L'achèvement de la première phase marque une étape majeure pour un projet d'éoliennes appartenant à la société belge C-Power. La base du concept a été développée par le bureau d'études belge Technum/IMDC, tandis que la conception a été réalisée par le bureau danois, COWI.

Un chantier titanesque, invisible depuis le littoral

Les éoliennes sont supportées par des tours d'acier raccordées à des fondations de base de gravité fabriquées en béton précontraint avec post-contrainte verticale. Chaque fondation se compose d'une structure en béton creux avec une partie conique et une partie cylindrique. Le diamètre du bloc de base est de 23,5 m, le diamètre de la partie conique se réduit de 17 à 6,5 m, se prolongeant par une forme cylindrique de 6,5 m de diamètre. La fondation en béton est haute de 42 m et pèse près de 3 000 tonnes, le poids total étant limité par la capacité maximum de levage du bateau-grue Rambiz. Les fondations ont été conçues en béton armé et renforcées grâce à la post-contrainte verticale. Une fois installée sur le fond de la mer, la structure creuse a été remplie de sable ou d'un minéral plus lourd. Ce sont les différentes conditions de sollicitation survenant pendant le remplissage et pendant le fonctionnement de l'éolienne qui ont déterminé la conception en béton. La construction des fondations a constitué un défi majeur, non seulement à cause de l'environnement

ronnement rude auquel elles sont supposées résister, mais également à cause de la méthode innovatrice utilisée pour les installer.

Deux sites de préparation

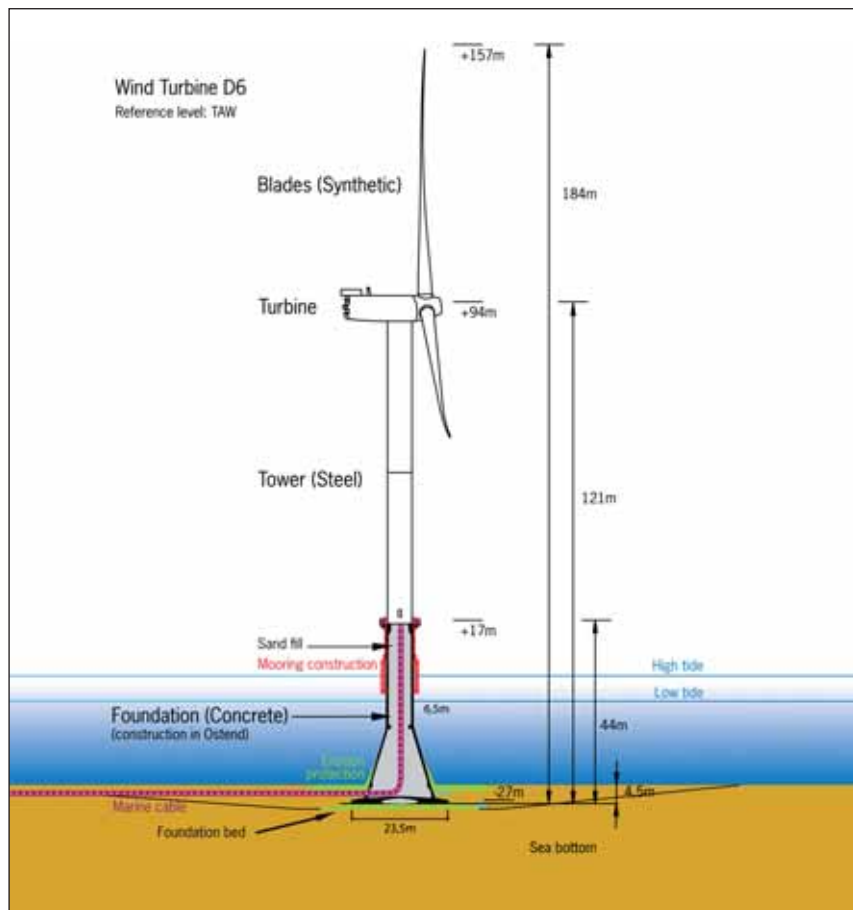
Il a fallu préparer deux sites pour la réalisation des fondations : un pour le chantier côtier de précontrainte et l'autre situé à l'emplacement final, en mer. Le chantier de précontrainte était situé dans un port, au lieu-dit « Halve Maan », à Ostende, où nous nous sommes rendus pour les besoins de ce reportage. Des fondations sur pieux de 460 mm de diamètre, supportant une plaque de béton renforcé et des blocs de béton de 1,3 m de haut ont été installés pour soutenir les fondations des éoliennes à construire. L'espace entre les blocs de béton était ouvert pour permettre aux transporteurs lourds de circuler sous les fondations terminées de l'éolienne, de les soulever et de les déposer à quai, avant leur transfert en bateau-grue flottante vers le site.

Des fondations inébranlables

Le site offshore a été préparé en commençant par le dragage d'une tranchée de 50 m de large sur le fond de la mer, afin de retirer de 4 à 5 m de sable de qualité meuble à dense et d'éva-

Éoliennes installées à environ 30 km des côtes et à une profondeur de 29 m (Source : C-Power)





Configuration et dimensions des éoliennes installées en mer (Source : C-Power)

Montage du rotor et des pales de l'éolienne (Source : C-Power)



300 et 800 mm. Le béton léger contenait du polystyrène expansé (PSE) de 6 mm de diamètre comme agrégat grossier et résistant à la compression de 4 MPa à 28 jours. Ce genre de mélange est couramment utilisé pour isoler des applications en béton. Tant l'isolation que le béton léger sont restés attachés aux fondations de la turbine, lorsqu'elles ont été installées et ont contribué à éliminer, ainsi, la pression de support au centre de la plaque de base.

La portion conique des fondations s'élève à 17 m au-dessus de la plaque de base et a un diamètre extérieur qui varie entre 17 m à la plaque de base et 6,5 m au sommet, où il touche la portion cylindrique. Les parois de la portion conique ont 500 mm d'épaisseur et ont été coulées en cinq phases séparées. Le coffrage grimpeur utilisé pour couler la portion conique a été fourni par Doka et était pourvu d'éléments habituels. Les sections des parois variant en hauteur ainsi qu'en pente intérieure. Aussi, a-t-il fallu recourir à des jeux différents de coffrages pour chaque phase. La section conique de chacune des six fondations de turbines étant identique, on a donc pu utiliser chaque jeu de coffrages six fois, pour cette phase du projet et les suivantes.

Bétons spécialement étudiés

Quatre mélanges différents de béton ont été utilisés pour les fondations des éoliennes. Chaque mélange ayant une résistance requise à la compression de 45 MPa pour les tests sur cylindre ou de 55 MPa pour les tests sur cube. En raison de la taille et de l'épaisseur de certains éléments en béton, la fissuration thermique a fait l'objet d'une préoccupation particulière, eu égard à la perméabilité au chlorure du béton. Pour répondre à ces préoccupations, tous les mélanges étaient constitués d'un ciment mélangé, contenant lui-même de 66 à 80 % de ciment de laitier et de 20 à 34 % de ciment Portland, qui présente une résistance faible aux alcalins et une résistance élevée aux sulfates. On a également utilisé de la cendre volante, dans tous les mélanges, pour augmenter la résistance à l'eau et la perméabilité au chlorure, ainsi que pour ralentir le taux de génération de chaleur interne.

Une nacelle de 300 tonnes !

Une fois les fondations de l'éolienne complétées, la tour en tube d'acier, la nacelle et le rotor ont été installés en trois étapes distinctes, associant la tour de 6 m de diamètre et 75 m de haut et la nacelle, qui abrite les engrenages et la génératrice, celle-ci mesurant 6 x 6 x 18 m et pesant 300 tonnes. Le centre du rotor est placé à environ 120 m au-dessus du fond de la mer. Chacune des trois pales du rotor mesure 61,5 m de long, pèse 16,3 tonnes et effectue jusqu'à 12 révolutions par minute. À ce régime, l'extrémité de

cuer les déversements et la sédimentation, afin de fournir une base stable. Ensuite, une couche de gravier de 30 x 30 m a été déposée dans la tranchée, afin d'élever cette dernière à la hauteur désirée. Un tuyau en pente avec ROV (*remote operated vehicle* - véhicule télécommandé) a été utilisé pour placer les pierres avec précision et dans les limites des tolérances autorisées.

Les fondations de l'éolienne ont alors été abaissées pour reposer sur cette couche de gravier et leur intérieur a été rempli avec plus de 2 000 m³ de sable, afin d'augmenter la masse des fondations et leur résistance au renversement. Un remblai de sable a, ensuite, été placé autour de la base, afin de ramener le fond de la mer à son niveau d'origine. Finalement, une couche de filtrage en gravier et une couche protectrice en pierres ont été déversées autour de la base pour servir de protection contre l'érosion.

Réalisation des fondations

Chacune des fondations des éoliennes se compose d'une plaque de base, d'une section conique tronquée et d'une section cylindrique. La plaque de base a un diamètre de 23,5 m et son épaisseur varie entre 0,7 m au bord extérieur et 1,27 m à la base de la portion conique. Un vide a été formé au centre de la plaque de base, dans une couche de 400 mm d'épaisseur d'isolation en laine de roche légère et perméable et une couche de béton léger, dont l'épaisseur varie entre

chaque pale se déplace à près de 285 km/h et la génératrice produit 5 MW d'énergie. La production de cette quantité d'énergie ne nécessite qu'une vitesse du vent légèrement supérieure à 40 km/h. L'énergie provenant des génératrices, au sommet de la tour, est transmise via un câble électrique situé à l'intérieur de la tour, qui sort de la paroi des fondations de l'éolienne, à proximité du fond de la mer. L'énergie parcourt, alors, 38,7 km jusqu'à la côte, le long d'un câble de 150 kVA, enterré dans le fond de la mer. Ce câble présente un diamètre de 220 mm et parcourt 3,8 km supplémentaires, sous terre, pour rejoindre le réseau électrique terrestre.

Transport de l'énergie

La construction du parc éolien de C-Power n'a pas nécessité la construction d'une ligne à haute tension aérienne. Pour l'arrivée sur le rivage de l'énergie électrique produite par les turbines éoliennes du Thorntonbank, C-Power a mis en place un réseau de 142,4 km de nouveaux câbles souterrains, une longueur équivalent à la distance entre Louvain et Ostende.

Dans la turbine éolienne Repower 5 MW, la tension de l'énergie électrique produite est élevée à 33 kV, les composants électriques se trouvant dans la partie postérieure de la nacelle.

Un réseau de câbles à 33 kV, d'une longueur totale de 50,75 km, aménagé entre les turbines éoliennes, assure le transport de l'énergie générée vers la plate-forme à transformateur offshore. La tension y est alors élevée à la tension de transport de 150 kV afin de limiter au maximum les pertes lors du transport de l'énergie. La distance totale séparant la plate-forme du transformateur en mer du point d'injection au réseau sur terre est, en effet, d'environ 40 km.

Deux câbles sous-marins (150 kV) relient la plate-forme du transformateur offshore au réseau électrique public de 150 kV et assurent le transport de l'énergie produite. Pour le trajet en mer (environ 36 km), les câbles sont enterrés au fond de la mer (- 2 m). L'arrivée sur le rivage des câbles à haute tension est réalisée au moyen de forages dirigés à grande profondeur, à une profondeur de 30 m sous la crête de la dune. On a évité, ainsi, de devoir creuser des tranchées sur la plage et à travers les dunes.

Le raccordement des câbles terrestres de 150 kV au réseau public d'électricité se fait au poste de sectionnement à haute tension « Slijkens » de Bredene.

La ferme offshore du Thorntonbank en quelques chiffres

- 60 éoliennes de type Repower 5 MW
- capacité totale : 300 MW

- profondeur : de 12 à 27,5 m
- distance jusqu'à la côte : de 27 à 30 km
- début des travaux : mai 2007
- commencement de la production : septembre 2008
- production annuelle : 1 000 GWh, suffisamment d'énergie pour la consommation annuelle de 600 000 habitants
- émission de CO₂ évitée : 450 000 tonnes/an (comparé aux centrales de gaz les moins polluantes), soit l'absorption de CO₂ annuelle d'une zone forestière de 87 668 ha (équivalent à une bande boisée de 15 km de large, tout le long de la côte belge ou à 20 fois la superficie de la forêt de Soignes)

État des lieux et poursuite du projet

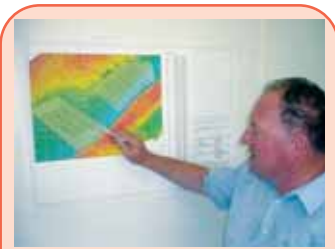
« En ce qui concerne la réalisation complète de notre projet C-Power, M. Filip Martens est toujours optimiste et est confiant pour la suite », nous confiait M^{me} Hilde Fredrickx, Communication Manager C-Power, en date du 4 mars dernier.

« Il est très probable que notre projet subisse l'impact de la crise économique mais, néanmoins, nous comptons sur un redémarrage des travaux de la phase 2, cette année-ci encore. Pour le moment, nous nous concentrons sur la finalisation de la première phase que nous comptons terminer d'ici fin juin 2009. Cette première phase a pris du retard dû aux incidents, pendant la phase de construction ».

Aujourd'hui, les deux premières éoliennes sont déjà opérationnelles. Les quatre autres seront connectées aux câbles, dans les mois qui viennent. La pose des câbles entre les turbines a été interrompue durant les mois d'hiver. La reprise du chantier était prévue pour la fin mars 2009.

Après la pose des câbles entre ces turbines et au terme des tests, les quatre autres éoliennes commenceront à tourner. « Nous prévoyons que les six éoliennes seront opérationnelles au mois de juin prochain et, ainsi, pouvoir terminer la première phase », précise la porte-parole de C-Power.

Dossier réalisé par Pascal-Pierre Delizée, avec la collaboration d'Ir. Luc Ponet, Directeur de la première phase du projet et de Hilde Fredrickx, Communication Manager C-Power



Ir. Luc Ponet

Admis depuis peu à la retraite, notre confrère Luc Ponet est Ingénieur civil des Constructions, diplômé de l'Université de Gand, en 1968. Il a assuré la première phase de la réalisation du projet « Thorntonbank ». De 1968 à 1974, il fut au service du Ministère des travaux publics pour le compte duquel il réalisa de grands projets d'infrastructures. De 1974 à 1989, il œuvra au sein de l'entreprise de construction C.E.I. et y supervisa de grands travaux d'équipement : tunnels, métro, ponts, etc.

Depuis 1989 et jusqu'il y a peu, M. Ponet occupait la fonction de Manager à Dredging International au sein du groupe DEME de Zwijndrecht, où il a mené à bien plusieurs projets d'infrastructures portuaires, notamment.

Ce projet est mené par un groupement de sociétés, réunies au sein du consortium belge C-Power, regroupant : le groupe DEME, spécialiste mondial d'ingénierie maritime, ECOTECH FINANCE et SOCOFE sociétés financières spécialisées dans le développement de projets environnementaux et énergétiques, NUHMA, holding de participations dans le domaine de la production d'électricité, EDF ENERGIES NOUVELLES, acteur mondial sur le marché de production d'électricité verte.

Le parc d'éoliennes d'Estinnes : une première mondiale !

Onze éoliennes, considérées comme les plus hautes et les plus puissantes au monde, sont en construction sur la plaine dite du « Levant de Mons », non loin des villages de Bray et Vellereille-le-Sec, dans le Hainaut. Ce parc éolien permettra d'alimenter en électricité environ 50 000 ménages.

Caractéristiques techniques

- Type de machines : Enercon E-126/6 MW
- Production annuelle estimée : 187 000 000 kWh
- Équivalent en nombre de ménages : ± 50 000 ménages
- Poste de raccordement : Harmignies
- Distance par rapport au poste : 3 km
- Distance par rapport aux habitations : supérieure à 700 m
- Distance par rapport à Natura 2000 : aucun site à proximité
- Absence de zone d'aviation civile et militaire à proximité
- Balisage : une bande rouge sur le mât et en bout de pales

Les éoliennes qui sont installées sur la plaine du Levant de Mons ont été fabriquées par la société allemande Enercon. Ce sont de gigantesques moulins à vent de modèle E-126, d'une hauteur totale de 198 mètres et capables de produire chacun six mégawatts. Située au nord de la commune d'Estinnes-au-Mont, juste au sud de la N90 reliant Binche à Mons, la plaine du « Levant de Mons » est un vaste plateau de 2,5 sur 3 km qui offre un potentiel éolien particulièrement intéressant. En effet, son importante superficie, l'absence d'obstacle au vent, la proximité de la N90 qui facilite l'accès au site, ainsi que la distance par rapport aux habitations les plus proches – outre la courte distance la séparant du poste de raccordement au réseau haute tension – en font une plaine propice à l'installation d'éoliennes.

Ce parc est le tout premier projet au monde à être réalisé avec des éoliennes de la catégorie des 6 MW. De par cette particularité, le projet d'Estinnes représente un véritable challenge à différents niveaux, notamment en ce qui concerne le transport des composants des machines, les fondations des éoliennes ou bien encore la connexion au réseau haute tension.

Les innovations techniques et logistiques nées du chantier éolien d'Estinnes seront mises à disposition de l'Europe entière.

Vent favorable pour la Recherche

La société louvaniste WindVision, entourée par ses huit partenaires, avait signé, l'an dernier, un accord important avec la Commission européenne, selon lequel cette dernière finançait la moitié du programme de recherche mené en parallèle de la construction du site, soit trois millions d'euros sur un total de six. Ce programme porte sur les méthodes de transport des pales – dont certaines pèsent 56 tonnes ! –, par bateau et camion, mais aussi sur la mobilité des immenses grues Sarens employées sur le chantier, sur un nouveau système électronique destiné à stabiliser le réseau électrique, sur un logiciel de prévision des rendements énergétiques ou encore sur le transfert de savoir-faire avec des pays à faible production d'énergie éolienne : l'île de Chypre, en l'occurrence.

Calendrier respecté

La société WindVision, initiatrice du projet, avait prévu, dans un premier temps, que le transport des composants, depuis l'Allemagne, se ferait par voie fluviale, dès l'été 2008. Le transport par bateau s'est en fait arrêté à Westerlo, sur le canal Albert et le transport de Westerlo à Estinnes a continué par la route, en convoi exceptionnel.

Les travaux d'aménagement des routes destinées à transporter les composants et la pose de câbles électriques à haute tension souterrains ont été effectués en novembre 2008, quatre mois avant les premières fondations. Le raccordement au poste électrique d'Harmignies s'est opéré quelques semaines plus tard, seulement. Les premiers composants de la première éolienne sont arrivés à Estinnes en août de l'an dernier. L'automne dernier voyait la mise en service de la première des onze éoliennes. Et c'est en décembre 2010 que l'ensemble du parc éolien sera tout à fait opérationnel.

Pascal-Pierre Delizée



Montage sur site d'une des onze éoliennes E-126 à Estinnes
Source photos : Ir. Olgan Durieux et WindVision

CITE 09


innovatech
info@innovatech.be
www.innovatech.be

Formation au management de l'innovation technologique
Avec le soutien financier de la Région wallonne et du FSE



“UNLIMITED VIEWS”*

- Explorer
- Surveiller
- Partager
- Anticiper
- Communiquer
- Eduquer

*Un horizon sans limite

Leader européen dans les systèmes satellitaires et acteur majeur des infrastructures orbitales, Thales Alenia Space est une référence mondiale en matière de technologies avancées et d'applications innovantes, qui dessinent le futur de chacun de nous : de la navigation aux télécommunications, en passant par la météorologie et la surveillance environnementale, la défense et la sécurité, l'observation et la science. Partenaire des grands programmes spatiaux, nous n'avons qu'un seul objectif : vous offrir sur Terre le meilleur de nos compétences... depuis l'Espace.

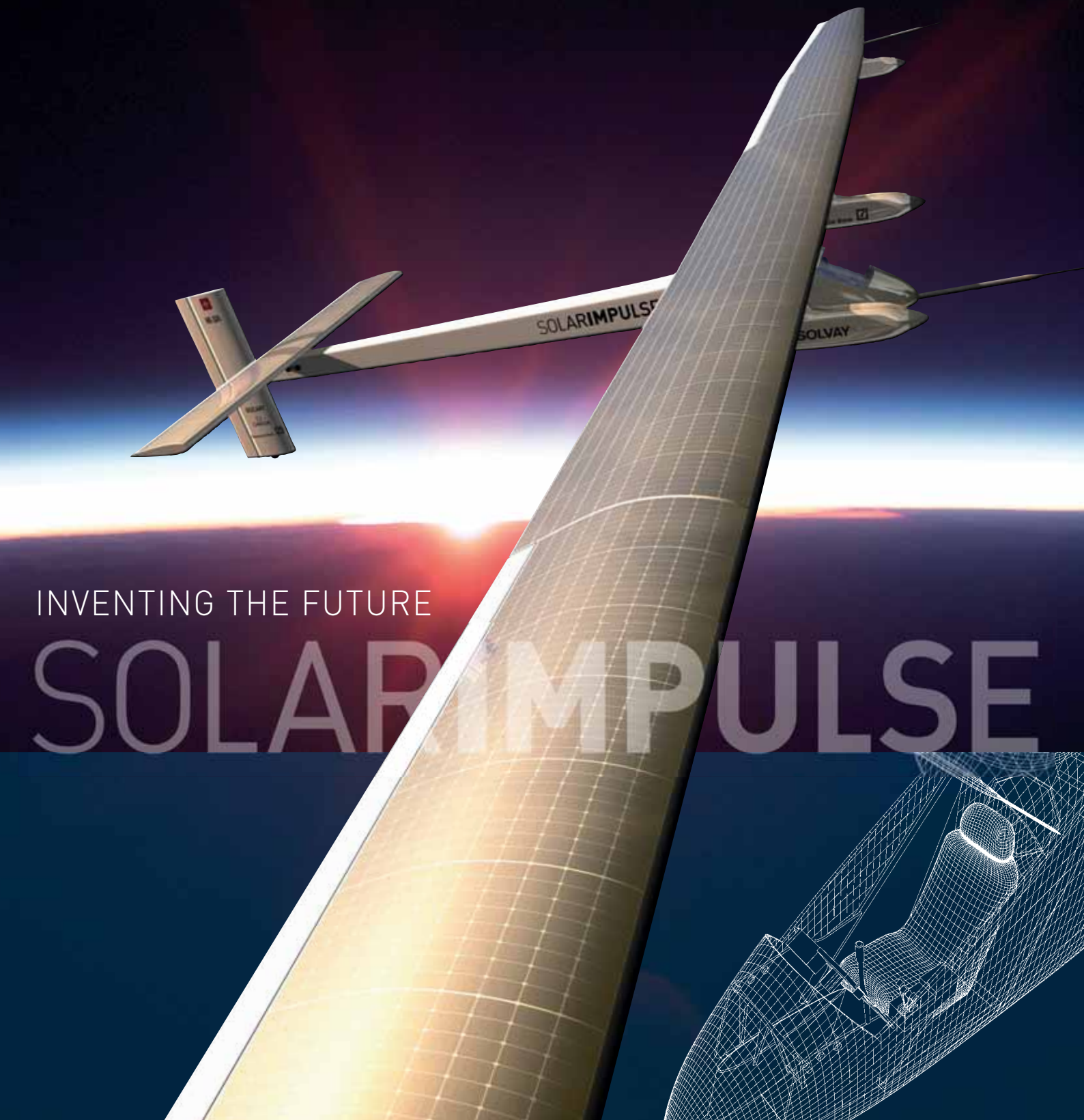
Thales Alenia Space est membre de la Space Alliance entre Thales et Finmeccanica.

Thales Alenia Space est très actif en Belgique via sa filiale Thales Alenia Space ETCA, leader européen en alimentations électriques pour satellites et le plus important fournisseur d'électronique pour le lanceur Ariane 5. Fondé il y a plus de 40 ans, Thales Alenia Space ETCA est aussi un expert en télécommunications.

ThalesAlenia
A Thales / Finmeccanica Company *Space*

Thales Alenia Space ETCA - Mont-sur-Marchienne - www.thalesaleniaspace.com





INVENTING THE FUTURE

SOLARIMPULSE

CHEMICAL AND PHARMACEUTICAL GROUP
ADVANCED MATERIALS SOLUTION PROVIDER

AROUND THE WORLD IN A SOLAR AIRPLANE

SOLVAY
MAIN PARTNER
SOLARIMPULSE