

## AVANT-PROPOS

### **Hans van Steen**

Chef de l'Unité, Politique Réglementaire et Promotion de l'Energie Renouvelable,  
Direction Générale des Transports et de l'Energie (DG TREN), Commission Européenne



C'est un plaisir pour moi que d'introduire la nouvelle édition de *L'énergie éolienne : les faits*, produite par l'Association Européenne de l'Energie Eolienne (EWEA) et soutenue par la Commission Européenne dans le cadre du programme Intelligent Energy Europe.

Au niveau de l'Union Européenne (UE), les défis liés à l'énergie et au changement climatique font partie des priorités de l'agenda politique, et plus que jamais, l'énergie éolienne est un élément crucial de la solution. Par sa contribution concrète à une production électrique propre et sûre, le vent permet de produire une quantité croissante d'électricité sans utiliser de combustibles fossiles, sans épuiser la

précieuse ressource que constitue l'eau à des fins de refroidissement, et sans émettre de gaz à effet de serre ou de polluants nocifs.

Le développement de l'énergie éolienne poursuit sa « success story » dans l'UE. Des Etats Membres sans cesse plus nombreux ont rejoint les précurseurs initiaux, et le vent continue d'être l'une des formes de production électrique bénéficiant de la croissance la plus rapide en Europe. Les améliorations apportées à la technologie éolienne se poursuivent. Des technologies à plus grande échelle et plus efficaces sont mises en œuvre, et les applications off-shore se développent.

La Commission Européenne est persuadée qu'un vaste potentiel d'énergie renouvelable est encore inexploité en Europe. Ainsi, l'objectif convenu d'une part de 20 % d'énergie renouvelable dans la production énergétique de l'UE en 2020 est à la fois ambitieux et réalisable. Néanmoins, cet objectif ne sera pas atteint sans engagement énergétique à tous niveaux, y compris celui des gouvernements nationaux et celui de l'industrie des renouvelables elle-même. L'intégration à grande échelle de l'éolien sur les réseaux électriques et les marchés de l'électricité lance à ce secteur des défis majeurs : défis qui vont nécessiter une étroite collaboration entre les chercheurs, les opérateurs de systèmes de transmission, les producteurs d'énergie, les instances de régulation, les responsables politiques, et les autres parties prenantes, afin d'envisager de manière constructive des solutions appropriées.

Cette publication fournit une excellente présentation, très lisible et complète, des divers problèmes que pose l'énergie éolienne. Compte tenu de l'importance croissante du vent dans le secteur énergétique européen, elle constitue un document de référence utile, non seulement pour ce secteur lui-même dit, mais aussi et plus généralement pour les responsables et les décideurs politiques.

## AVANT-PROPOS DE L'EWEA

**Arthouros Zervos**

Président de l'Association Européenne pour l'Energie Eolienne



Cinq années se sont écoulées depuis que j'ai écrit l'avant-propos de l'édition 2004 de *L'énergie éolienne – les faits*. Or, au cours de cette brève période, des changements positifs significatifs se sont produits au sein de l'industrie éolienne européenne. La plupart des questions environnementales, réglementaires, technologiques, financières et politiques qui se posaient à l'industrie en 2004 ont désormais trouvé des réponses satisfaisantes.

La capacité éolienne installée totale est peut-être la preuve la plus éloquente de cette étonnante « success story ». Fin 2003, l'UE des 15 avait installé plus de 25.000 mégawatts (MW) de capacité éolienne. Fin 2007, l'UE élargie à 27 disposait d'une capacité supérieure à 56.000 MW.

Ces 56.000 MW répondaient à 3,7 % de la demande en électricité totale de l'UE, fournissaient une énergie équivalente aux besoins de 30 millions de foyers européens moyens, et permettaient d'éviter 91 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone. En outre, des milliards d'euro ont été économisés sur les coûts des combustibles d'importation en 2007, tandis que plus de 11 milliards d'euro ont été investis dans les éoliennes en Europe.

Les préoccupations politiques se sont également aggravées au cours de ces cinq dernières années en matière de changement climatique et d'énergie. Les hommes politiques sont en quête de solutions viables et performantes pour relever les défis lancés par l'explosion des prix du pétrole, l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, la dépendance vis-à-vis de sources énergétiques étrangères et les ravages potentiels du réchauffement planétaire. A présent, et plus que jamais, nos dirigeants sont à la recherche de solutions à ces problèmes complexes et d'importance cruciale.

Il s'ensuit que l'UE a fixé un objectif contraignant : d'ici 2020, 20 % de son offre d'énergie proviendra du vent et d'autres ressources renouvelables. Pour atteindre cet objectif, plus du tiers de la demande électrique européenne proviendra des énergies renouvelables, et il est prévu que l'énergie éolienne fournisse entre 12 et 14 % (180 GW) de la demande totale. Ainsi, cette énergie jouera un rôle de premier plan dans la fourniture d'un approvisionnement stable en énergie électrique « verte » indigène.

Nous estimons que l'heure est venue d'actualiser *L'énergie éolienne - les faits* afin d'aborder les changements ultérieurs que va connaître cette industrie en expansion rapide, tant en Europe que dans le monde entier. Tant la taille des marchés que celle des turbines ont augmenté de manière incommensurable depuis 2003, ce qui a incité à examiner une série de considérations entièrement inédites. Avec la création de toute cette puissance supplémentaire, des questions telles que l'accès aux réseaux, les lignes de transport nouvelles et renforcées, et l'exploitation des systèmes, doivent être abordées de manière équitable, efficace et transparente. Relativement récente, l'industrie éolienne offshore a un potentiel d'une richesse stupéfiante, mais a besoin qu'on lui mette le pied à l'étrier ; et il reste à remédier aux tensions sur la chaîne de production que cette croissance rapide a créé.

J'espère que cette toute dernière édition de *L'énergie éolienne - les faits* aidera à ouvrir la voie d'un avenir vraiment durable. J'ai toute confiance dans l'industrie éolienne pour surmonter les défis qu'elle affronte, et qu'elle remportera encore plus de succès.

A black ink signature of Arthouros Zervos, written in a cursive, stylized script.

Arthouros Zervos  
Président d'EWEA



# REMERCIEMENTS

L'Association Européenne de l'Energie Eolienne (EWEA) tient à remercier chaleureusement tous les auteurs qui ont contribué à cette nouvelle édition de *L'énergie éolienne : les faits*.

## Partie I

Paul Gardner, Andrew Garrad, Lars Falbe Hansen, Peter Jamieson, Colin Morgan, Fatma Murray et Andrew Tindal, de Garrad Hassan and Partners, Royaume-Uni ([www.garradhassan.com](http://www.garradhassan.com)); José Ignacio Cruz et Luiz Arribas du CIEMAT, Espagne ([www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)); Nicolas Fichaux, l'Association Européenne de l'Energie Eolienne (EWEA) ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)).

## Partie II

Frans Van Hulle, d'EWEA, et Paul Gardner, de Garrad Hassan and Partners.

## Partie III

Poul Erik Morthorst, de Risø DTU National Laboratory, Université Technique du Danemark ([www.risoe.dk](http://www.risoe.dk)); Hans Auer, du Energy Economics Group, Université de Vienne; Andrew Garrad, de Garrad Hassan and Partners; Isabel Blanco, de l'UAH, Espagne ([www.uah.es](http://www.uah.es)).

## Partie IV

Angelika Pullen, du Conseil Mondial de l'Energie Eolienne (GWEC) ([www.gwec.net](http://www.gwec.net)); Keith Hays, de Emerging Energy Research ([www.emerging-energy.com](http://www.emerging-energy.com)); Gesine Knolle, de EWEA.

## Partie V

Carmen Lago, Ana Prades, Yolanda Lechón et Christian Oltra, de CIEMAT, Espagne ([www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)); Angelika Pullen, de GWEC; Hans Auer, du Energy Economics Group, Université de Vienne.

## Partie VI

Arthouros Zervos, de l'Université Technique Nationale d'Athènes, Grèce ([www.ntua.gr](http://www.ntua.gr)); Christian Kjaer, d'EWEA.

## Coordonné par

Zoé Wildiers, Gesine Knolle et Dorina Iuga, EWEA

## Edité par

Christian Kjaer, Bruce Douglas, Raffaella Bianchin et Elke Zander, EWEA

## Editeurs linguistiques

Rachel Davies, Sarah Clifford, Chris Rose

Pour leurs précieuses données et leurs adjonctions pertinentes à ce texte, nous tenons à remercier les organisations citées ci-dessous et beaucoup d'autres membres d'EWEA qui nous ont apporté leur soutien et ont proposé leurs suggestions.

Association des Producteurs d'Energie Renouvelable (APPA, Espagne)

Association Autrichienne de l'Energie Eolienne

Association Britannique de l'Energie Eolienne (BWEA)

Association Bulgare de l'Energie Eolienne

Institut Chypriote de l'Energie

Société Tchèque de l'Energie Eolienne

Association Danoise de l'Energie Eolienne

ECN, Pays-Bas

Ente Per Le Nuove Tecnologie, l'Energia e

l'Ambiente-Centro Ricerche (ENEA, Italie)

Association Estonienne de l'Energie Eolienne

Association Finnoise de l'Energie Eolienne

Agence Française de l'Environnement et de la

Maîtrise de l'Energie (ADEME, France)

Association Allemande de l'Energie Eolienne

#### IV L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - REMERCIEMENTS

General Electricity Wind Energy, Allemagne  
Association Grecque de l'Energie Eolienne  
Horvath Engineering, Hongrie  
Instituto de Engenharia Mecanica e Gestao Industrial  
(INEGI, Portugal)  
Association Irlandaise de l'Energie Eolienne  
KEMA Power Generation and Sustainable, Pays-Bas  
Association Lituanienne de l'Energie Eolienne  
Association Roumaine de l'Energie Eolienne  
Association Slovaque de l'Energie Eolienne  
Agence Suédoise de Recherche sur la Défense  
Vestas Wind Systems, Danemark

VIS VENTI Association for Supporting Wind Energy,  
Pologne

Finalement, l'EWEA tient à remercier la Direction Générale des Transports et de l'Energie de la Commission Européenne (DG TREN) pour le précieux soutien accordé et les suggestions faites sur ce projet (n° EIE/07/230/SI2.466850).

Les informations contenues dans *L'énergie éolienne : les faits* ne reflètent pas forcément la position formelle d'EWEA ou de la Commission Européenne.





L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS

# RÉSUMÉ EXÉCUTIF



## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

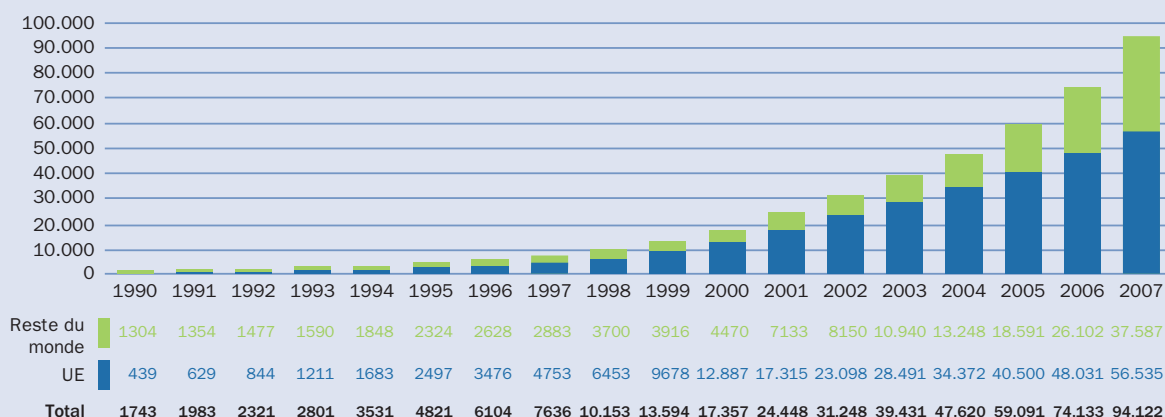
Depuis la publication en février 2004 de la dernière édition de *L'énergie éolienne - les faits*, le secteur de éolien s'est développé à une vitesse étonnante, et il est désormais classé parmi les priorités de l'agenda politique. Avec la menace de crise énergétique qui plane, on entend des appels de plus en plus pressants pour qu'une solution immédiate et concrète soit apportée aux nombreux défis énergétiques et climatiques que le monde est actuellement amené à relever : et c'est précisément cette solution qu'offre l'énergie éolienne.

Afin de permettre de faire des choix et de prendre des décisions politiques en meilleure connaissance de cause, il faut comprendre clairement et à fond le secteur de l'énergie éolienne. Ce volume se veut une contribution à la diffusion de cette connaissance, en fournissant des informations détaillées sur le secteur de l'énergie éolienne. *L'énergie éolienne - les faits* fournit un aperçu complet des questions cruciales qui se posent aujourd'hui concernant l'énergie éolienne : estimation de la ressource éolienne, technologie, conception des parcs d'éoliennes, énergie éolienne offshore, recherche et développement, intégration aux

réseaux électriques, industrie et marchés, avantages pour l'environnement, scénarii et objectifs.

Depuis 2004, le déploiement de l'énergie éolienne s'est accéléré de manière spectaculaire. La capacité mondiale installée est passée de 40.000 mégawatts (MW) fin 2003 à 94.000 MW fin 2007, avec un taux de croissance annuel de près de 25 %. L'Europe est le leader mondial incontesté en matière de technologie éolienne. A la fin de 2007, 60 % de la capacité mondiale était installée en Europe, et les entreprises européennes détenaient 66 % du marché mondial. Dans le secteur de l'électricité, les niveaux de pénétration ont atteint 21 % au Danemark, et environ 7 % et 12 % respectivement en Allemagne et en Espagne. Au niveau régional, les succès sont encore plus impressionnants: au Nord de l'Allemagne, l'Etat du Schleswig-Holstein, par exemple, détient une capacité éolienne installée supérieure à 2500 MW, suffisante pour répondre à 36 % de la demande totale en électricité de la région, tandis qu'en Navarre, région d'Espagne, quelque 70 % de la consommation sont satisfaits par l'énergie éolienne.

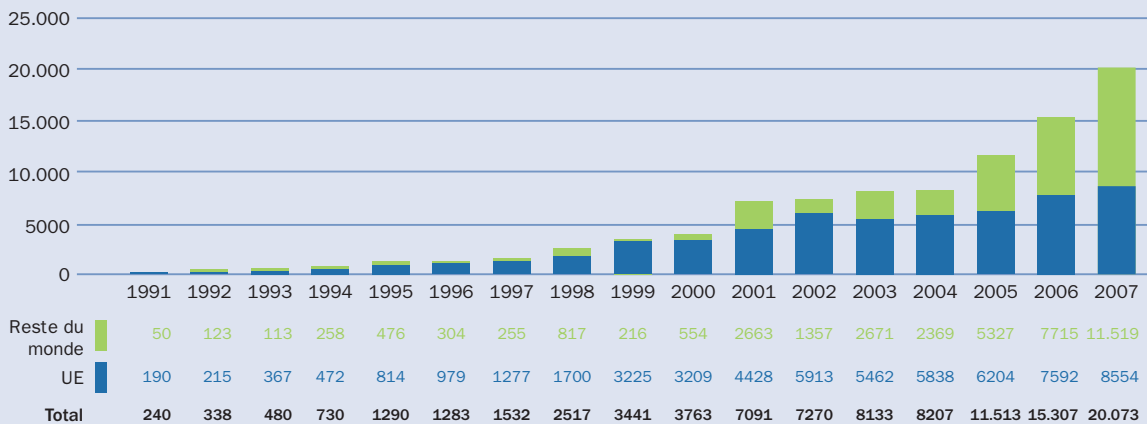
Figure S.1: Capacité éolienne mondiale cumulée, 1990–2007 (en MW)



Source : GWEC/EWEA (2008)

## 4 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Figure S.2: Capacité éolienne mondiale annuelle, 1991–2007 (en MW)



Source : GWEC/EWEA (2008)

Un énorme pas en avant a été franchi en mars 2007 lorsque les chefs d'Etat de l'UE ont adopté un objectif contraignant aux termes duquel 20 % de l'énergie doit provenir de sources renouvelables d'ici 2020. Par ailleurs, en janvier 2008, la Commission Européenne a publié un projet de législation sur les énergies renouvelables proposant au niveau de l'UE un cadre stable et souple qui devrait garantir une expansion massive de l'énergie éolienne en Europe. Si ce soutien politique favorable se poursuit, EWEA prédit une capacité éolienne installée de 80.000 MW dans l'UE d'ici 2010, ce qui représenterait une contribution globale de 5 % à l'offre d'électricité. A l'horizon 2020, on s'attend à voir ce chiffre passer à 12-14 %, l'énergie éolienne produisant alors une quantité d'énergie équivalente à la demande de 107 millions de foyers européens moyens.

### Partie I : Technologie

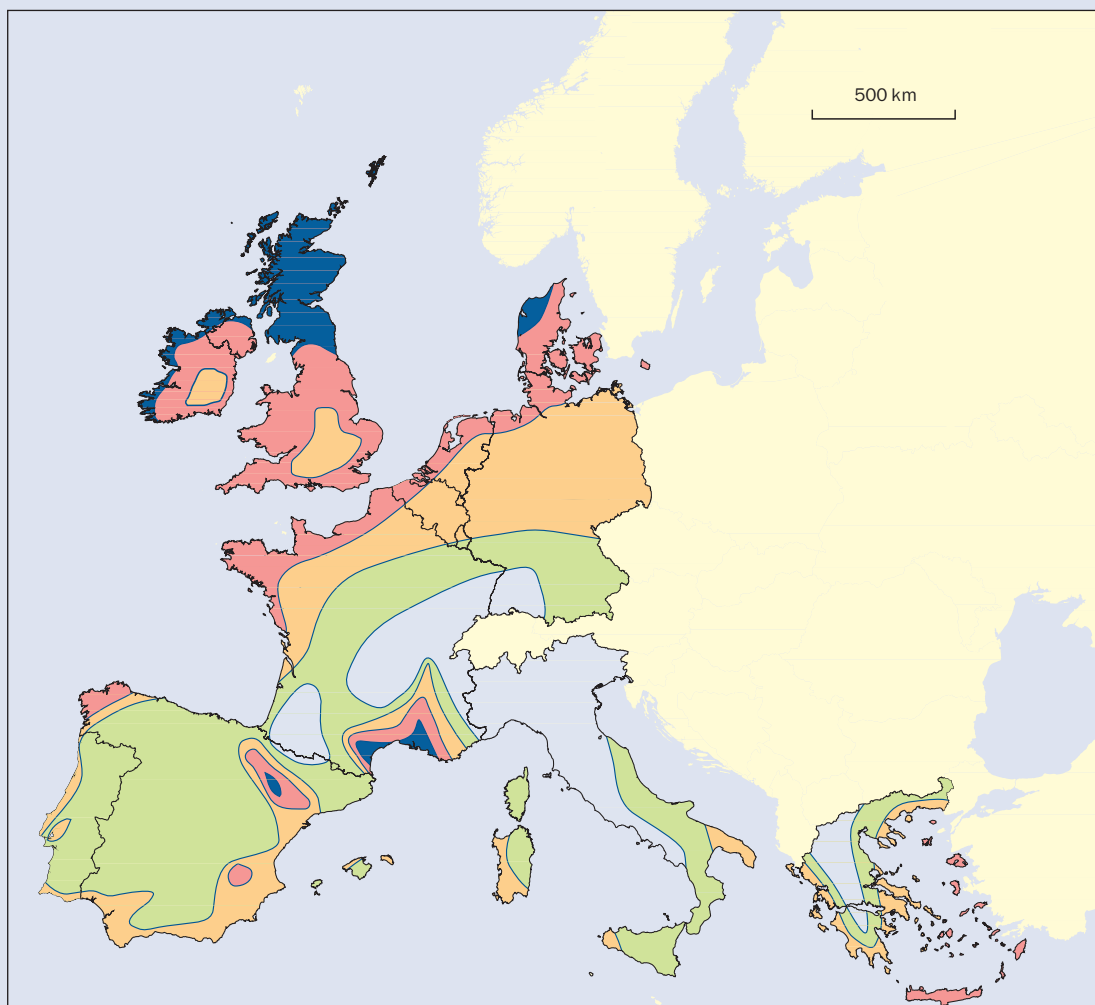
La Partie I couvre tous les aspects de la technologie, qui a réalisé des progrès rapides dans tous les domaines. On a beaucoup appris, mais il reste beaucoup à découvrir, à la fois en météorologie fondamentale, en aérodynamique et en science des matériaux, d'une

part, et dans des domaines hautement appliqués tels que les stratégies de maintenance, la conception des parcs éoliens et la planification des réseaux électriques, d'autre part. Il reste de plus à tester des concepts de turbines qui peuvent mériter un examen attentif. Cette partie décrit les fondements de la technologie éolienne, la situation actuelle et les tendances futures.

### ESTIMATION DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE

Les méthodes permettant l'estimation de la ressource éolienne sont bien établies. Le chapitre I.1 décrit les modalités d'estimation de la ressource éolienne sur de vastes zones, qui est réalisée afin de déterminer à la fois les ressources disponibles et les zones les plus favorables d'une région. Il traite également de l'estimation de la ressource éolienne et de la production d'énergie de sites spécifiques. La précision de l'estimation de la production d'énergie revêt une importance cruciale à la fois pour le maître d'ouvrage du projet et pour les organisations qui le financent, et ce chapitre explique les nombreux facteurs susceptibles d'influer sur la production d'énergie.

Figure S.3: Atlas éolien d'Europe, à terre



Ressources éoliennes à 50 m au-dessus du niveau du sol pour cinq états topographiques différents

|                                                                                     | Terrain abrité   |                  | Plaine ouverte   |                  | Sur la côte maritime |                  | Pleine mer       |                  | Collines et crêtes |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|
|                                                                                     | ms <sup>-1</sup> | Wm <sup>-2</sup> | ms <sup>-1</sup> | Wm <sup>-2</sup> | ms <sup>-1</sup>     | Wm <sup>-2</sup> | ms <sup>-1</sup> | Wm <sup>-2</sup> | ms <sup>-1</sup>   | Wm <sup>-2</sup> |
|  | >6,0             | >250             | >7,5             | >500             | >8,5                 | >700             | >9,0             | >800             | >11,5              | >1800            |
|  | 5,0–6,0          | 150–250          | 6,5–7,5          | 300–500          | 7,0–8,5              | 400–700          | 8,0–9,0          | 600–800          | 10,0–11,5          | 1200–1800        |
|  | 4,5–5,0          | 100–150          | 5,5–6,5          | 200–300          | 6,0–7,0              | 250–400          | 7,0–8,0          | 400–600          | 8,5–10,0           | 700–1200         |
|  | 3,5–4,5          | 50–100           | 4,5–5,5          | 100–200          | 5,0–6,0              | 150–250          | 5,5–7,0          | 200–400          | 7,0–8,5            | 400–700          |
|  | <3,5             | <50              | <4,5             | <100             | <5,0                 | <150             | <5,5             | <200             | <7,0               | <400             |

Source : Risø DTU

## 6 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

On y aborde également le domaine de la prévision, au Chapitre I.2, car celui-ci joue désormais un rôle important pour l'industrie éolienne. En fonction de la structure du marché de l'électricité, le maître d'ouvrage du projet ou l'acheteur d'énergie peuvent être en mesure de tirer des avantages financiers significatifs de la précision avec laquelle les prévisions de production éolienne sont faites. Les opérateurs de systèmes de production et de distribution d'électricité à fort taux de pénétration éolienne ont également besoin de prévisions afin d'optimiser le fonctionnement de leurs systèmes.

### TECHNOLOGIE ÉOLIENNE

Les rapides progrès techniques sont particulièrement visibles pour la technologie éolienne. Le Chapitre I.3 montre avec quelle rapidité les dimensions, la puissance et la complexité des éoliennes se sont développées, ce que démontre on ne peut mieux l'accroissement de taille des éoliennes commerciales, qui a été multipliée par un facteur 100 en 20 ans (Figure S.4). En dépit de leur apparente simplicité, les éoliennes sont soumises à

certaines exigences fondamentales qui rendent unique en son genre cette branche de l'ingénierie.

- La machine doit fonctionner comme une centrale électrique, sans personnel, la production qu'elle doit fournir au réseau électrique ne se limite pas à l'énergie.
- Du fait que le vent varie sur une échelle de temps qui va des secondes aux années, tout est soumis à incertitude, depuis les charges mécaniques jusqu'à la production d'énergie.
- En matière de coûts énergétiques, la technologie doit faire face à la concurrence d'autres sources d'énergie renouvelable et celle de la production conventionnelle.

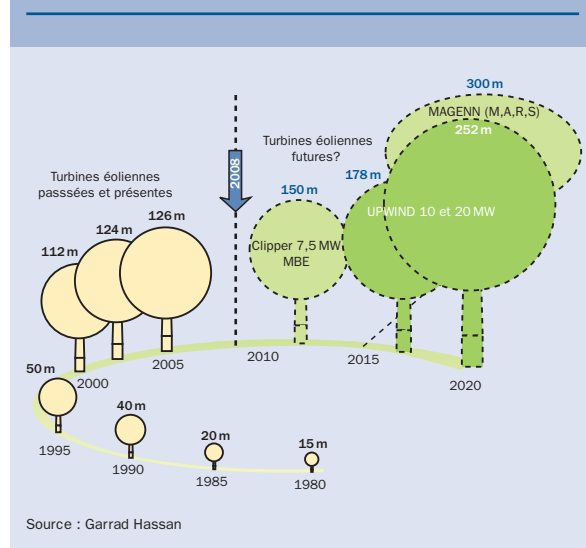
Le Chapitre I.3 aborde l'évolution de la conception des éoliennes, et explique les raisons de la prépondérance actuelle des éoliennes à trois pales orientées face au vent fonctionnant à une vitesse variable et régulées par pas variable. Leur conception obéit aux motivations principales suivantes : compatibilité avec les réseaux électriques, coût de l'énergie (fiabilité incluse), émissions acoustiques, aspect visuel et adaptation aux conditions locales.

Néanmoins, de nombreux problèmes techniques restent à résoudre. Par exemple, les éoliennes de grande taille actuellement en production comprennent :

- Des concepts faisant appel à des générateurs de grand diamètre et à rotation lente.
- Des concepts faisant appel à des générateurs à rotation rapide et à boîte de vitesse ; et :
- Des montages intermédiaires faisant appel à des générateurs à vitesse de rotation moyenne et à des étages de réduction peu nombreux.

De même, il peut être surprenant que la taille optimale d'une éolienne destinée aux parcs "standard" à terre ne soit pas encore évidente. Ce chapitre explique certains de ces aspects techniques, et s'achève en passant en revue quelques concepts alternatifs radicaux.

Figure S.4: Accroissement de la taille de conception des éoliennes commerciales





## CONCEPTION DES PARCS ÉOLIENS

Le Chapitre I.4 décrit les modalités selon lesquelles les éoliennes sont regroupées en parcs, les facteurs qui influent sur leur implantation, et leur mode de construction. La conception des parcs éoliens est un domaine crucial pour la réduction des coûts et la disposition du public à les accepter, tant sur terre qu'en mer, d'autant que certains d'entre eux sont à présent plus puissants que les grandes centrales électriques classiques.

La disposition des éoliennes à l'intérieur du parc a des incidences évidentes non seulement sur la production d'énergie, mais aussi sur leur perception visuelle et sonore par le voisinage. Ce chapitre explique comment on peut optimiser leur agencement de manière à tenir compte de ce type de contraintes, en utilisant des logiciels spécifiquement conçus pour l'industrie éolienne.

Ce chapitre aborde également les questions importantes qui se posent dans le cadre de l'équilibre de l'installation, par exemple les ouvrages de génie civil et d'électricité. Au fur et à mesure que l'industrie éolienne gagne en expérience en réalisant des projets dans différentes conditions, on acquiert une compréhension claire des coûts et des autres questions majeures qui se posent, et les risques ne devraient pas être plus grands que pour des projets similaires de génie civil ou de construction de centrales électriques.

## L'ÉNERGIE ÉOLIENNE OFFSHORE

Le Chapitre I.5 traite de l'énergie éolienne offshore, et élargit en particulier au cas de l'offshore la discussion des problèmes posés à terre, tels qu'abordés dans les chapitres I.2–I.4. Bien que sa taille soit à l'heure actuelle sensiblement inférieure à celle de l'éolien terrestre, ce marché constitue à présent un élément fondamental des politiques énergétiques de plusieurs nations, et les attentes sont vives. Le marché éolien offshore se caractérise par des projets dont la taille



est sensiblement plus importante, et qui font courir plus de risques que la plupart des projets entrepris à terre, et il apparaît vraisemblable que l'étude et la réalisation de ces projets seront confiées à d'autres entreprises. Des bateaux spéciaux et des techniques spéciales de construction des éoliennes ont été mis au point, et les moyens d'accéder aux éoliennes offshore se sont avérés constituer une question primordiale qui a des incidences en matière de coûts, de disponibilité et de sécurité.

La technologie des éoliennes est elle aussi différente pour les projets offshore : pour de bonnes raisons, les dimensions individuelles de ces turbines sont sensiblement plus importantes, et les machines destinées à ce marché ont une puissance égale ou supérieure à 5 MW. On voit également apparaître des différences technologiques plus subtiles en raison de la diversité des environnements et des exigences accrues en

## 8 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

matière de fiabilité. La probabilité paraît plus grande de voir apparaître des conceptions authentiquement novatrices sur le marché de l'offshore que sur le marché des éoliennes terrestres, et le chapitre se conclut sur une revue de concepts novateurs essentiels tels que celui des turbines flottantes.

### EOLIENNES DE PETITE TAILLE

A l'autre extrémité de l'échelle, le Chapitre I.6 décrit les éoliennes petites et très petites qui font leur apparition en réponse à plusieurs besoins spécifiques. De même que dans les domaines traditionnels de l'électrification rurale et de la fourniture d'électricité aux foyers isolés, des équipements destinés aux navires et aux télécommunications, les perspectives qui laissent entrevoir une demande significative en « microgénération » dans les zones urbaines stimulent l'évolution technique dans le domaine de la conception des éoliennes de petite taille, ce qui pourrait améliorer leur rentabilité. Qui plus est, l'augmentation du coût des combustibles encourage l'évolution dans le domaine techniquement exigeant des systèmes éoliens-diesel à taux de pénétration élevé. La vaste gamme des marchés, dont chacun est spécifique, implique que le domaine des éoliennes de petite taille est plus varié que celui des éoliennes classiques de grande taille. Un grand nombre de ces marchés recèlent un fort potentiel de croissance.

### RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Le Chapitre I.7 donne un aperçu des efforts les efforts menés en matière de recherche et développement (R & D) dans le domaine de la technologie éolienne. Une idée reçue consiste à considérer l'énergie éolienne comme une technologie mûre, cet argument étant susceptible de conduire à une réduction des efforts de R&D. Par ailleurs, l'objectif de 20 % fixé en Europe pour la promotion de la production d'énergie à partir de sources renouvelables lance de nouveaux défis. Dans son récent Agenda Stratégique de la Recherche,

TPWind, la plateforme technologique européenne de l'énergie éolienne, propose pour l'Europe une vision ambitieuse. Cette vision prévoit la mise en œuvre de 300 GW d'énergie éolienne d'ici 2030, ce qui représenterait jusqu'à 28 % de la consommation électrique en Europe. De plus, la vision de TPWind inclut un objectif annexe concernant l'énergie éolienne offshore, qui devra it représenter environ 10 % de la consommation d'électricité dans l'UE d'ici 2030. Une étape intermédiaire consisterait à développer 40 GW en mer d'ici 2020, chiffre à comparer à seulement 1 GW installé aujourd'hui.

La R&D est nécessaire pour garantir la mise en œuvre efficace de la vision qu'à TPWind pour l'énergie éolienne, afin de soutenir la réalisation des objectifs énergétiques européens, et TPWind a défini les priorités de R&D pour concrétiser sa vision du secteur de l'énergie éolienne pour 2030.

Quatre domaines thématiques ont été identifiés :

1. les conditions liées au vent ;
2. la technologie des éoliennes ;
3. l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques;
4. la mise en œuvre et l'exploitation des éoliennes offshore.

Afin de concrétiser la vision TPWind pour 2030 et de permettre le déploiement à grande échelle de l'énergie éolienne, il faut absolument qu'on puisse s'appuyer





sur un marché, des politiques et un environnement réglementaire stables et bien définis. La stratégie de déploiement sur le marché inclut, entre autres objectifs visés, la réduction des coûts et l'intégration effective de l'éolien à l'environnement.

L'effort de financement de la R&D constitue l'une des principales préoccupations. En effet, l'effort total actuellement consacré à la R&D pour l'énergie éolienne est insuffisant pour permettre la réalisation des objectifs européens relatifs à la part des sources d'énergie renouvelables dans la production d'énergie, et pour répondre aux objectifs fixés à Lisbonne en matière de croissance et d'emploi.

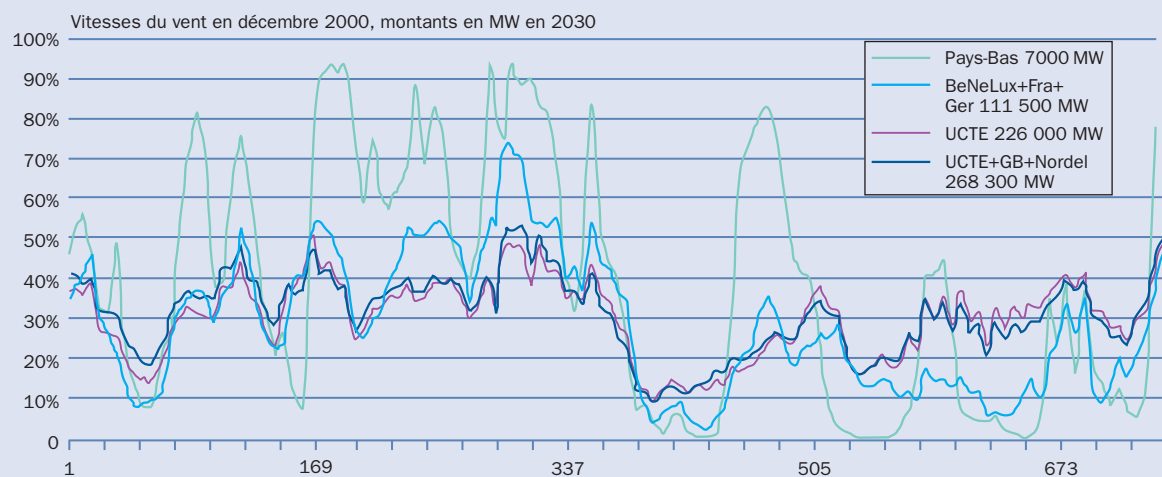
Le composant le plus critique est la contribution européenne. Le Plan stratégique pour la technologie de l'énergie (Plan SET) propose une série d'instruments destinés à remédier à cette situation, tels que les Initiatives Industrielles Européennes, qui comprennent l'Initiative européenne pour l'énergie éolienne.

## Partie II : Intégration au Réseau

La puissance éolienne varie au fil du temps, principalement sous l'influence des fluctuations météorologiques, selon des échelles de temps qui vont des secondes aux années. Il importe au plus haut point de comprendre ces variations et leur prévisibilité si l'on veut intégrer l'énergie éolienne au système énergétique, et en optimiser l'utilisation. Ces questions sont abordées aux Chapitres II.1 et II.2. La variabilité est inhérente aux systèmes électriques, que ce soit en termes de demande ou d'offre. Or, ils sont conçus de manière à maîtriser efficacement ces variations grâce à leur configuration, leurs systèmes de contrôle et leur interconnexion.

Afin de réduire la variabilité, la production des installations d'éoliennes devra être groupée autant que possible. Tout en permettant de réduire les fluctuations, le groupage géographique de la production des parcs d'éoliennes entraîne un accroissement de la capacité d'énergie éolienne permanente dans le système. La

Figure S.5: Exemple d'effet de lissage produit par la dispersion géographique



**Nota :** La figure compare la production horaire de la capacité éolienne dans quatre situations, calculée à partir d'une puissance éolienne simulée. Les simulations reposent sur les vitesses des vents en décembre 2000 et sur la capacité en puissance éolienne estimée pour 2030.

Source : [www.trade-wind.eu](http://www.trade-wind.eu)

## 10 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

prévisibilité est la clé de la gestion de la variabilité de l'énergie. Plus la zone est vaste, mieux on peut prévoir dans l'ensemble la puissance éolienne groupée, ce qui a des effets bénéfiques sur la quantité des réserves de compensation qui sont requises, en particulier lorsque les heures de « gate closure » des marchés électriques prennent en compte les éventuels niveaux de précision de la prévision de puissance éolienne.

Outre qu'il a pour avantage de réduire les fluctuations, le regroupement géographique de la production des parcs d'éoliennes a pour effet d'accroître en volume la capacité de puissance électrique permanente disponible dans le système.

L'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne est envisagée dans le contexte où une part significative de la demande en énergie européenne sera fournie par l'énergie éolienne. Tandis que l'énergie éolienne a couvert environ 4 % de la demande en électricité en 2008, l'EWEA vise pour 2020 et 2030 des niveaux de pénétration respectifs de 12–14 % et 21–28 %, en fonction de la demande future en électricité.

### CONCEPTION ET EXPLOITATION DES SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les méthodes de contrôle établies et les réserves des systèmes disponibles pour faire face à une demande et à une offre variables sont suffisants pour traiter le surcroît de variabilité qui intervient à des niveaux de pénétration de l'énergie éolienne allant jusqu'à 20 %, bien que le niveau précis dépende du système étudié. L'estimation des exigences en réserves supplémentaires est d'environ 2–4 % de la capacité de puissance éolienne installée pour 10 % de pénétration de l'énergie éolienne, en fonction de la flexibilité des systèmes de électriques, de la qualité des prévisions à court terme, et des heures de « gate closure » des marchés énergétiques. A des niveaux de pénétration plus élevés, il peut être nécessaire d'apporter des modifications aux

systèmes et à leurs méthodes d'exploitation afin d'autoriser une plus grande contribution de l'énergie éolienne; cette question est abordée au chapitre II.3. Afin de réduire les efforts et les coûts d'intégration, la conception des systèmes de génération d'électricité doit être plus souple. On peut y parvenir par une combinaison d'unités de production flexibles, de systèmes de stockage, de flexibilité de la demande, de disponibilité de capacités d'interconnexion et par l'adoption de règles plus souples sur le marché de l'énergie.

Le tableau S1 fournit un aperçu détaillé et une répartition par catégories des effets de l'énergie éolienne sur le système d'électricité.

Une présentation graphique générale des divers impacts de l'énergie éolienne sur les réseaux électriques est fournie par la Figure S.6, qui met clairement en évidence à la fois les effets locaux systémiques, et les effets à court et long terme sur les éléments concernés du système électrique, y compris l'infrastructure des réseaux, les réserves des systèmes et leur équilibre.

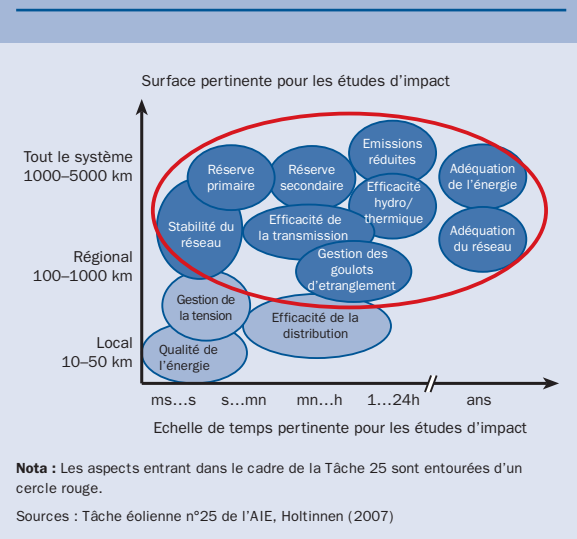
### MISE À NIVEAU DES INFRASTRUCTURES DES RÉSEAUX

L'énergie éolienne, en tant que source de génération distribuée et à production variable, nécessite des investissements en infrastructures, ainsi que la mise en œuvre de concepts nouveaux en matière de technologie et de gestion des réseaux ; ces concepts sont présentés dans la Chapitre II.4. L'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne nécessite une augmentation sensible de la capacité de transport de l'énergie, ainsi que d'autres mesures de mise à niveau, tant au sein de chaque Etat membre de l'UE qu'entre les divers Etats. Des améliorations significatives peuvent être obtenues en optimisant les réseaux et en recourant à d'autres mesures « douces », mais il sera également nécessaire de construire de nouvelles lignes. Au même moment, il convient de développer des procédures adéquates

**Tableau S.1: Incidences sur le système de génération électrique de l'énergie éolienne, ce qui fait encourir des coûts d'intégration**

|                      | Effet ou élément affecté                                           | Zone              | Echelle de temps                    | Contribution de l'énergie éolienne                                                                                                                                                                                               |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Effets à court terme | Gestion de la tension                                              | Locale/régionale  | Secondes/minutes                    | Les parcs d'éoliennes peuvent apporter un soutien (dynamique) au maintien de la tension (en fonction de leur conception).                                                                                                        |
|                      | Efficacité des équipements thermiques et hydrauliques              | Système           | 1-24 heures                         | Les impacts dépendent du mode d'exploitation du système et de l'utilisation de prévisions à court terme                                                                                                                          |
|                      | Efficacité du transport et de la distribution                      | Système ou locale | 1-24 heures                         | En fonction du niveau de pénétration, les parcs éoliens peuvent faire encourir des coûts d'investissements supplémentaires ou être avantageuses. L'énergie éolienne spatialement répartie peut réduire les pertes sur le réseau. |
|                      | Réserves de régulation                                             | Système           | Plusieurs minutes à quelques heures | L'énergie éolienne peut contribuer en partie au contrôle primaire et secondaire.                                                                                                                                                 |
|                      | Capacité éolienne déconnectée                                      | Système           | Heures                              | A des taux de pénétration très élevés, l'énergie générée peut dépasser le volume que le système peut absorber                                                                                                                    |
| Effets à long terme  | Fiabilité du système (adéquation de la production et du transport) | Système           | Années                              | L'énergie hydraulique peut contribuer (crédit de capacité) à l'équilibre du système électrique                                                                                                                                   |

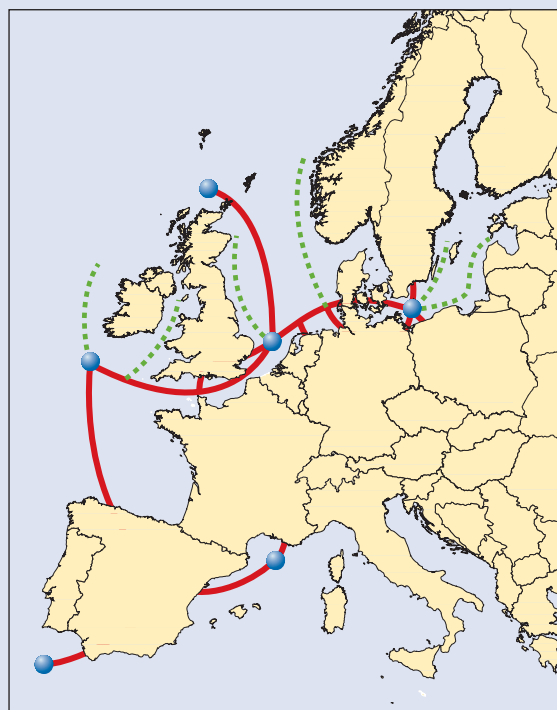
Source : EWEA

**Figure S.6: Incidences sur le système de l'énergie éolienne**

et équitables pour rendre les réseaux accessibles à l'énergie éolienne, même lorsque la capacité des réseaux est limitée. Un réseau offshore transnational permettrait non seulement d'accéder aux immenses ressources offshore, mais aussi d'améliorer les échanges transfrontaliers entre les pays et de soulager la saturation des lignes d'interconnexion existantes. L'amélioration des réseaux européens exige une coordination renforcée pour la planification des réseaux électriques européens, ainsi qu'une coopération plus étroite entre toutes les parties concernées, en particulier les opérateurs des systèmes de transport d'énergie (TSO). Au niveau de la distribution, il faut gérer les réseaux de manière plus active. L'amélioration de l'aptitude des réseaux à transporter davantage d'électricité d'un pays à un autre et d'une région à l'autre sert à la fois les intérêts de l'industrie éolienne et ceux du marché intérieur de l'électricité.

## 12 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Figure S.7: Vision d'un « super-réseau » à haute tension destiné à transporter l'énergie éolienne à travers l'Europe



Source : Dowling & Hurley (2004)

Les Figures S.7–S.9 font apparaître trois exemples de configurations de réseaux « offshore » en mer du Nord.

### EXIGENCES APPLICABLES EN MATIÈRE DE CONNEXION AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

On assiste à une évolution des exigences techniques spécifiques énoncées par les codes régissant l'accès aux réseaux électriques (Code des Réseaux) en termes de tolérance, de contrôle de la puissance active et réactive, et de dispositifs de protection et de qualité de l'énergie, du fait d'une plus grande pénétration éolienne, d'une capacité accrue au contrôle actif et du nécessaire support aux réseaux électriques (Chapitre II.5).

Figure S.8: Proposition de réseau offshore par Statnett



Source : Statnett (2008)

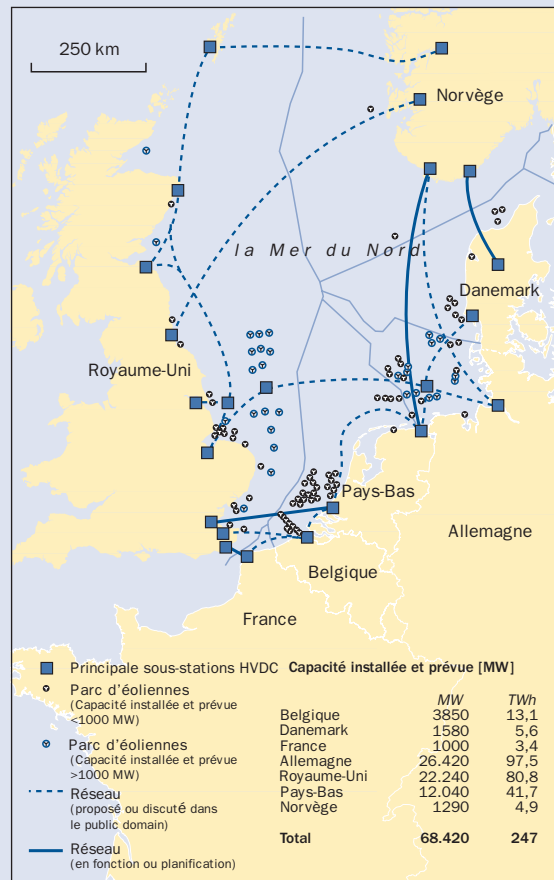
Il est aussi possible de créer un marché pour les services de contrôle, plutôt que de s'en tenir à des règles rigides. En principe, cela se justifierait économiquement, étant donné qu'un contrat serait signé avec le producteur le plus apte à fournir ces prestations.

Au fur et à mesure que la pénétration éolienne augmente, il y a un besoin accru d'harmonisation du Code des Réseaux, qui nécessiterait un effort concerté de la part de l'industrie éolienne et des opérateurs de systèmes.

### CONTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE À L'ÉQUILIBRE DES SYSTÈMES

A de faibles niveaux de pénétration de l'énergie éolienne, le crédit de capacité relatif de l'énergie éolienne (c'est-à-dire la fraction statistiquement garantie de la capacité installée totale) est proche de la production moyenne (facteur de charge) pendant la période considérée, qui est habituellement le moment où la demande est maximale. Pour les pays d'Europe du Nord, cette proportion est habituellement de 25 à

Figure S.9: Réseau offshore examiné dans l'étude de Greenpeace



Source : Statnett (2008)

30 % sur terre et peut atteindre 50 % en offshore. L'accroissement des niveaux de pénétration de l'énergie éolienne dans le système provoque une réduction de son crédit de capacité relatif. Néanmoins, comme le montre le chapitre II.6, cela ne veut pas dire qu'une proportion moindre de capacité de production classique peut être remplacée, mais plutôt que l'adjonction d'une nouvelle installation éolienne à un système où les taux de pénétration de l'énergie éolienne sont élevés aura

un effet de substitution moindre que la première installation dans le système.

## CONCEPTION DU MARCHÉ

Dans l'intérêt de l'intégration économique de l'énergie éolienne, il est nécessaire de modifier les règles du marché européen, afin de permettre aux marchés de fonctionner plus rapidement et selon des horaires de « gate closure » plus brefs (typiquement trois heures, ou moins). Cela permettra de minimiser l'incertitude des prévisions et les besoins de compensation de dernière minute. Des avantages économiques supplémentaires sont attendus de l'expansion géographique du marché et des zones de coordination, ainsi que l'établissement d'une réglementation appropriée du marché dans le cadre des échanges énergétiques transfrontaliers.

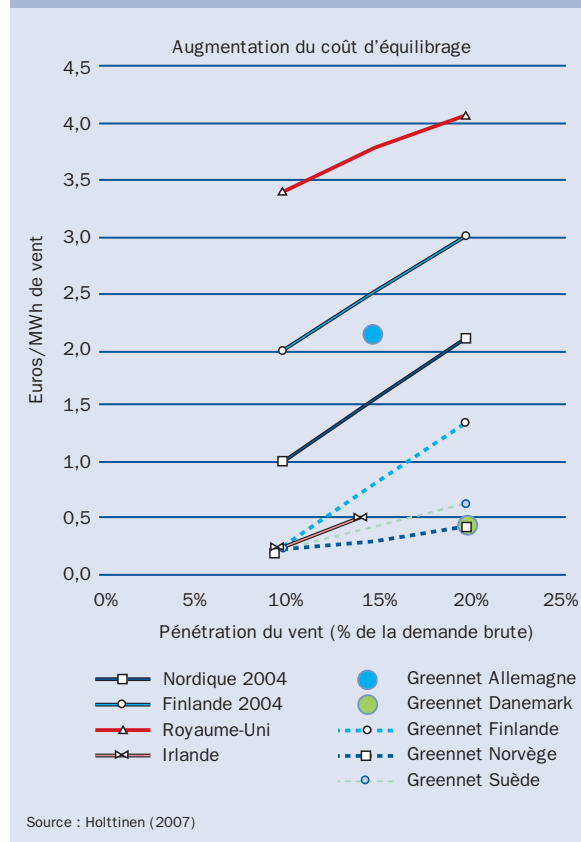
## ECONOMIE DE L'INTÉGRATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'intégration de volumes significatifs d'énergie éolienne dans le système électrique a une série d'impacts économiques à la fois positifs et négatifs. Deux facteurs principaux déterminent les coûts d'intégration de l'énergie éolienne : les besoins en équilibrage et l'infrastructure électrique (Chapitre II.7). Le coût d'équilibrage additionnel d'un système électrique est lié à la nature intrinsèquement variable de l'énergie éolienne, qui implique des modifications permettant aux autres producteurs de gérer les écarts imprévus entre l'offre et la demande. Comme l'indiquent certaines études nationales, ces coûts ne représentent qu'une faible fraction des coûts de production de l'énergie éolienne et des coûts totaux d'équilibrage du système de génération d'électricité.

La figure S.10 illustre les coûts fournis par plusieurs études, en fonction du taux de pénétration d'énergie

## 14 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Figure S.10: Résultats des estimations de la hausse des coûts d'équilibrage et d'exploitation due à l'énergie éolienne



éolienne. Les coûts d'équilibrage augmentent de manière linéaire avec la pénétration de l'énergie éolienne, mais les valeurs absolues sont modérées, et toujours inférieures à 4 €/MWh pour un taux de pénétration de 20 % (et elles sont le plus souvent inférieures à 2 €/MWh).

Les coûts de mise à niveau des réseaux électriques naissent du besoin de raccorder les installations éoliennes et de la capacité supplémentaire requise pour transporter les flux énergétiques accrus dans les réseaux de transport et de distribution. Les réseaux ont également besoin d'être adaptés pour améliorer la gestion de la tension, et il faut des capacités de

connexion supplémentaires entre les pays pour exploiter au mieux les avantages liés à la répartition continentale de la ressource. Toute amélioration des infrastructures répondant à ces besoins apporterait de multiples avantages au système, si bien que ses coûts ne seraient pas seulement imputés à la production éolienne.

Le coût de modification des systèmes électriques incluant des volumes significatifs d'énergie éolienne augmentent de manière quasi-linéaire avec son taux de pénétration. L'identification d'un « optimum économique » n'est pas chose aisée, étant donné que les coûts sont liés à des avantages. Concernant les avantages, on peut citer des réductions significatives de la consommation de combustibles fossiles, ou la réduction des coûts liée à la moindre dépendance énergétique. Ces avantages se constatent déjà sous la forme de prix plus bas sur les marchés des échanges d'énergie où des volumes significatifs d'électricité éolienne sont proposés. Des études menées jusqu'à présent, il ressort que lorsqu'on extrapole les résultats sur la base de niveaux de pénétration élevés, il est clair que l'intégration de plus de 20 % d'énergie éolienne dans le système de génération d'électricité de l'UE serait économiquement bénéfique.

L'expérience et les études prouvent manifestement la faisabilité de l'intégration de la capacité d'énergie éolienne attendue en Europe pour 2020, 2030 et au-delà, et l'existence de solutions pour y parvenir. Aujourd'hui, les questions immédiates portent principalement sur la manière la plus économique de régler les problèmes liés à la conception et à l'exploitation du système d'électrique, à leur mise à niveau, aux règles de connexion et à la conception des marchés de l'électricité.

L'un des défis est la création de règles de marché adaptées, y compris des incitations destinées à permettre le développement de la génération et du transport de l'énergie afin de leur permettre de s'adapter à une production variable et décentralisée,



principalement en devenant plus souples, et en fournissant une plus grande capacité d'interconnexion. Il faut entreprendre des études au niveau européen afin de doter la mise à niveau des réseaux et l'organisation du marché d'une base scientifique.

### Partie III : Aspects économiques liés à l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est en expansion rapide, tant au niveau européen qu'au niveau mondial. Au cours des 15 dernières années, la capacité mondiale installée est passée de 2,5 GW en 1992 à plus de 94 GW à la fin de 2007, soit une croissance moyenne annuelle supérieure à 25 %. En raison des améliorations constantes du rendement des turbines et de la hausse des prix des combustibles, l'énergie éolienne devient de plus en plus compétitive sur le plan économique par rapport aux modes de production énergétique classiques. Par ailleurs, sur les sites terrestres où la vitesse du vent est élevée, l'énergie éolienne est considérée aujourd'hui commercialement viable.

### L'ÉNERGIE ÉOLIENNE À TERRE

Le Chapitre III.1 aborde le sujet des coûts d'investissement des projets éoliens terrestres. Le coût de l'éolienne y est majoritaire. Le coût d'investissement total d'une éolienne moyenne installée en Europe est d'environ

1,23 million d'€/MW, y compris les coûts relatifs aux fondations, à l'installation électrique et à la sous-traitance (prix de 2006). La répartition des coûts principaux est la suivante (niveaux approximatifs) : turbine 76 %, raccordement au réseau 9 % et fondations 7 %. Les autres composants du coût, tels que les systèmes de commande et le terrain, représentent une part réduite des coûts totaux. Le coût total au kW de la capacité de puissance éolienne installée présente des différences significatives d'un pays à un autre, et varie approximativement entre 1000 €/kW et 1350 €/kW.

Ces dernières années, trois tendances principales ont dominé le développement des éoliennes raccordées au réseau.

1. Les machines sont plus grandes et plus hautes
2. Le rendement de la production par éolienne a été en constante augmentation, et :
3. En général, les coûts d'investissement par kW ont baissé, bien que l'on se soit écarté de cette tendance au cours des trois à quatre dernières années.

En 2007, les éoliennes de la classe MW (puissance supérieure à 1 MW) ont représenté une part de

**Tableau S.2: Structure des coûts d'une éolienne typique de 2 MW installée en Europe (€ de 2006)**

|                         | Investissement<br>(€1000/MW) | Part (%) |
|-------------------------|------------------------------|----------|
| Eolienne (départ usine) | 928                          | 75,6     |
| Fondations              | 80                           | 6,5      |
| Installation électrique | 18                           | 1,5      |
| Raccordement au réseau  | 109                          | 8,9      |
| Systèmes de commande    | 4                            | 0,3      |
| Sous-traitance          | 15                           | 1,2      |
| Terrain                 | 48                           | 3,9      |
| Frais financiers        | 15                           | 1,2      |
| Route                   | 11                           | 0,9      |
| Total                   | 1227                         | 100      |

**Nota :** Chiffres calculés par l'auteur sur la base de données sélectionnées d'installations éoliennes européennes.

Source : Risø DTU



## 16 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

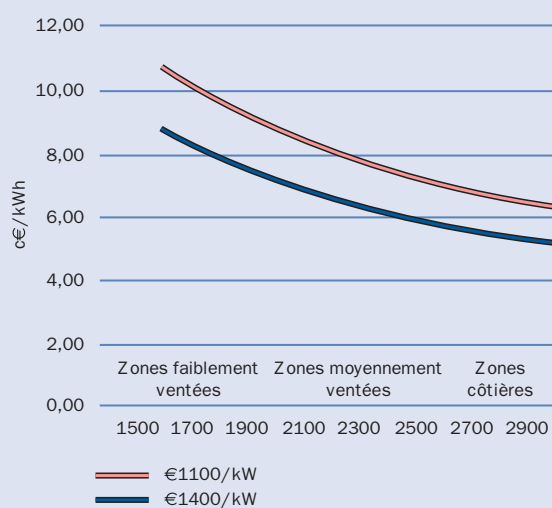
marché supérieure à 95 %, les machines de taille inférieure représentant les 5 % restants. Au sein du segment MW, les éoliennes d'une puissance égale ou supérieure à 2,5 MW ont une position croissante, même pour les implantations à terre. Le régime éolien sur le site choisi, la hauteur du moyeu de l'éolienne et le rendement de la production déterminent la production énergétique de la turbine. Ainsi, à elle seule, l'augmentation de la hauteur des éoliennes a eu pour résultat d'accroître la production d'énergie. De même, les méthodes de mesure et d'évaluation de la vitesse du vent sur un site donné ont bénéficié de progrès significatifs ces dernières années, améliorant ainsi les modalités d'implantation et les caractéristiques économiques des nouvelles éoliennes.

Du fait de l'amélioration des équipements, le rendement de la production électrique a lui aussi progressé de façon spectaculaire. De la fin des années 1980 jusqu'à 2004, les investissements totaux par unité de surface de rotor ont subi une baisse annuelle supérieure à 2 %. Cependant, en 2006, les coûts d'investissement ont augmenté d'environ 20 % par rapport à 2004, principalement en raison d'une augmentation significative de la demande mondiale en éoliennes, alliée à la hausse du prix des matières premières et aux contraintes qui pèsent sur l'offre. Les données préliminaires indiquent que la hausse des prix s'est poursuivie en 2007. A présent, le coût de production de l'énergie pour une éolienne de 2 MW vont de 5,3 à 6,1 c€/kWh, en fonction de la ressource éolienne disponible sur le site choisi. D'après l'analyse des courbes d'apprentissage, on s'attend à voir baisser les coûts à des valeurs comprises entre 4,3 et 5,5 c€/kWh à l'horizon 2015.

### DÉVELOPPEMENT OFFSHORE

L'énergie éolienne offshore (Chapitre III.2) ne représente qu'environ 1 % de la capacité totale d'énergie éolienne installée dans le monde, et ce développement a eu lieu principalement autour de la Mer du Nord et de la Mer Baltique. A la fin de 2007, une capacité supérieure à

Figure S.11: Coûts calculés par kWh d'électricité éolienne générée en fonction du régime éolien sur le site choisi (nombre d'heures à pleine charge)

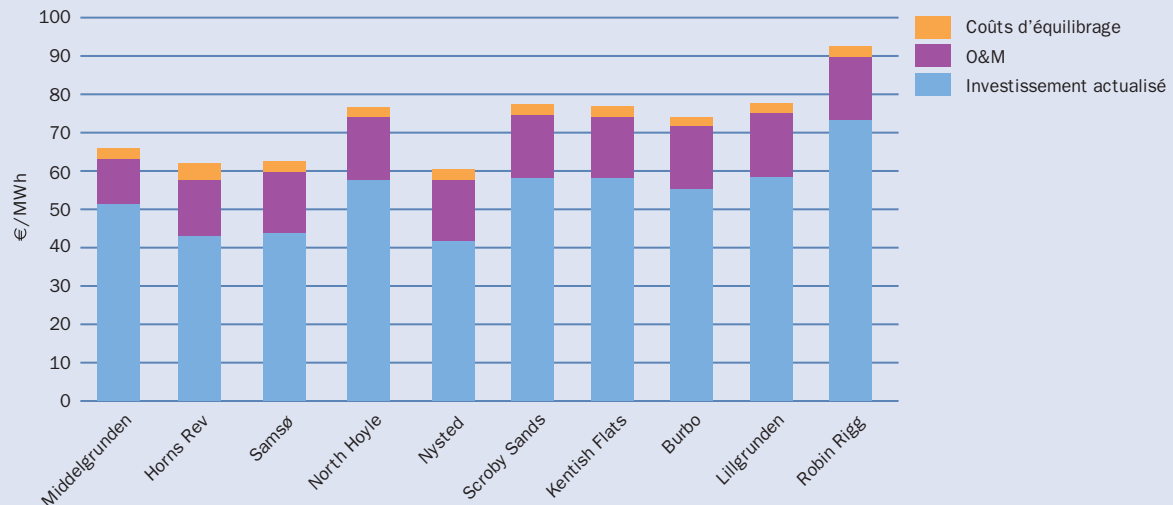


Source : Risø DTU

1000 MW était localisée en offshore dans cinq pays : Danemark, Irlande, Pays-Bas, Suède et Royaume-Uni. La plupart de cette capacité avait été installée dans des eaux relativement peu profondes (moins de 20 m), et à 20 km de la côte au maximum, de manière à minimiser les coûts des fondations et des câbles sous-marins.

Comme ceux des éoliennes implantées à terre, les coûts de l'éolien offshore ont augmenté ces dernières années. En moyenne, on s'attend à ce que les coûts d'investissement d'un nouveau parc offshore se situent dans une gamme comprise entre 2,0 et 2,2 millions d'€/MW pour une installation implantée près du bord de mer et en eaux peu profondes. Concernant la structure des coûts, les principales différences par rapport aux éoliennes terrestres ont trait au coût plus élevé des fondations, au poste de transformation et aux câbles de transport sous-marins. Le coût de l'électricité générée en mer varie d'environ 6 à 8 c€/kWh, variant en fonction de la profondeur, de

Figure S.12: Coûts de production calculés pour des parcs d'éoliennes offshore choisis, coûts d'équilibrage inclus (prix de 2006)



Source : Risø DTU

l'éloignement par rapport au rivage et des coûts d'investissement.

## ASPECTS FINANCIERS

Le secteur éolien est en pleine mutation. Bien qu'il existe encore de nombreux projets de faible taille appartenant à des investisseurs privés, on observe une évolution vers des projets à plus grande échelle appartenant à des prestataires de services publics : cette situation est étudiée au Chapitre III.3. Ce changement apporte de nouveaux capitaux à l'industrie, et réduit la dépendance à l'égard des banques pour les premières mises de fonds. On assiste également à l'entrée en scène de puissants sponsors. La taille des projets s'accroît, et l'activité offshore à grande échelle est en plein décollage; étant donné que les banques favorisent les gros projets, ce changement est bénéfique. Si le contexte économique global venait à se dégrader, le financement des projets pourrait en pâtir, mais la

vigueur du soutien apporté à l'énergie renouvelable par les milieux politiques et écologiques fait que le financement de l'énergie éolienne reste considérée comme une option très attractive.

## MÉCANISMES DE PRIX ET DE SOUTIEN

Lorsqu'on considère les divers types de mécanismes de soutien à la production électrique à partir d'énergies renouvelables (RES-E), on distingue les instruments politiques directs des instruments indirects (Chapitre III.4). Les mesures politiques directes tentent de stimuler l'installation immédiate des technologies RES-E, tandis que les instruments indirects sont axés sur l'amélioration des conditions globales à long terme. À côté des instruments réglementaires, on trouve également des approches volontaires de la promotion des technologies RES-E qui reposent principalement sur la disposition des consommateurs à payer l'électricité verte à un prix majoré. Parmi les autres

## 18 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

critères de classification essentiels, on peut mentionner les instruments politiques qui pèsent soit sur les prix, soit sur les quantités, ou qui soutiennent soit les investissements, soit la génération. Toute étude et toute évaluation des divers programmes de soutien RES-E (sources d'énergie renouvelable électrique) doit impérativement évaluer le succès des divers instruments politiques selon les critères suivants :

- Efficacité: les programmes de soutien RES-E ont-ils provoqué des augmentations significatives du déploiement des capacités RES-E en liaison avec le potentiel disponible ?
- Efficacité économique : quel a été le niveau de soutien absolu par rapport aux coûts de production actuels des unités RES-E, et quelle tendance a suivi ce soutien au fil du temps ?

Qu'il s'agisse d'un système de soutien national ou international, un instrument unique est habituellement insuffisant pour stimuler la croissance à long terme de la RES-E.

### INCIDENCES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE SUR LES PRIX « SPOT » DE L'ÉLECTRICITÉ

Dans un certain nombre de pays, la part de l'énergie éolienne dans la production totale d'électricité augmente (Chapitre III.5). Ce phénomène se constate particulièrement au Danemark, en Espagne et en Allemagne, où la contribution apportée par l'énergie éolienne à l'offre totale d'électricité représente respectivement 21 %, 12 % et 7 %. Dans ces exemples l'énergie éolienne devient un acteur important du marché de l'électricité, et elle peut avoir une influence significative sur les prix de l'électricité. En raison du très faible coût marginal de l'énergie éolienne (dû au coût nul du combustible), son incidence implique des prix de l'énergie plus bas, l'ampleur de la baisse des prix dépendant de l'élasticité des prix de la demande en électricité.

En règle générale, lorsque l'énergie éolienne représente une part significative de l'offre énergétique, le

prix de l'électricité a des chances d'être plus bas pendant les périodes où le vent souffle fort, et plus élevé pendant les périodes où le vent souffle plus rarement. Une étude menée au Danemark montre que le prix à la consommation de l'énergie (hormis les tarifs du transport et de la distribution, ainsi que la T.V.A. et les autres taxes) de 2004 à 2007 aurait été plus élevé d'environ 4 à 12 % si l'énergie éolienne n'avait pas contribué à la production d'électricité. Cela veut dire qu'en 2007, les consommateurs d'électricité ont économisé environ 0,5 c€/kWh grâce à la réduction des prix de l'électricité permise par l'énergie éolienne. Ceci doit être comparé au coût de l'éolien pour les consommateurs, qui sont d'environ 0,7 c€/kWh sous la forme de prix de rachat garantis (« feed-in tariffs »). Ainsi, bien que le coût de l'énergie éolienne soit plus élevé que les avantages, une réduction significative des dépenses nettes est garantie grâce à un prix « spot » moins élevé.

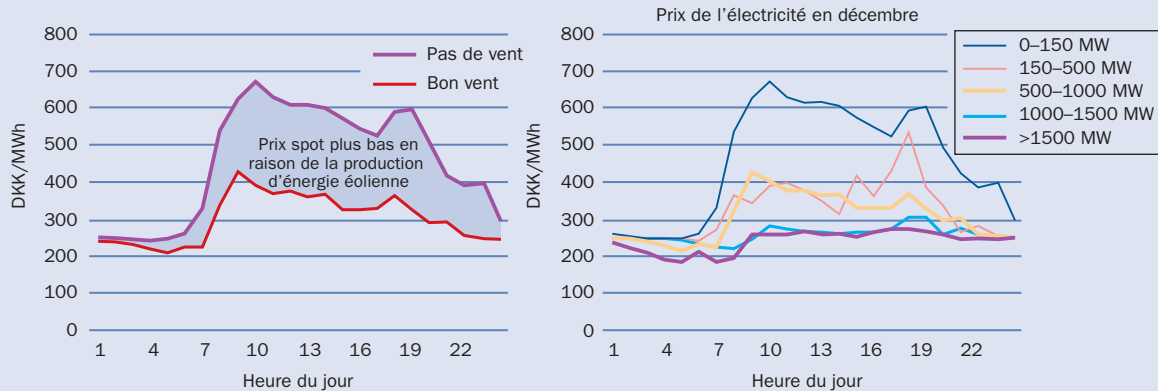
L'analyse évalue l'impact de l'éolien sur le marché «spot» à partir d'analyses structurelles. On fixe une référence qui correspond à une situation où l'énergie éolienne n'apporte aucune contribution au système de production électrique. Un certain nombre de niveaux sont identifiés où l'apport d'énergie électrique augmente, et on calcule par rapport à la référence les effets de la production d'énergie éolienne. Ceci est illustré dans le graphique de gauche de la Figure S.13, où la zone ombrée placée entre les deux courbes donne une valeur approchée à la valeur de l'énergie éolienne en termes de prix « spot » moins élevé.

### L'ÉNERGIE ÉOLIENNE PAR RAPPORT À L'ÉNERGIE CLASSIQUE

En général, le coût de la production d'électricité d'origine classique est déterminé par quatre facteurs de coûts :

1. le combustible ;
2. les émissions de CO<sub>2</sub> (telles qu'elles sont indiquées par le Système Européen d'Echanges de CO<sub>2</sub>) ;

Figure S.13: Incidences de l'énergie éolienne sur les prix « spot » de l'électricité dans l'Ouest du Danemark en décembre 2005



3. les coûts d'exploitation et de maintenance (O&M) ; et
4. le capital, y compris les études et les travaux relatifs au site.

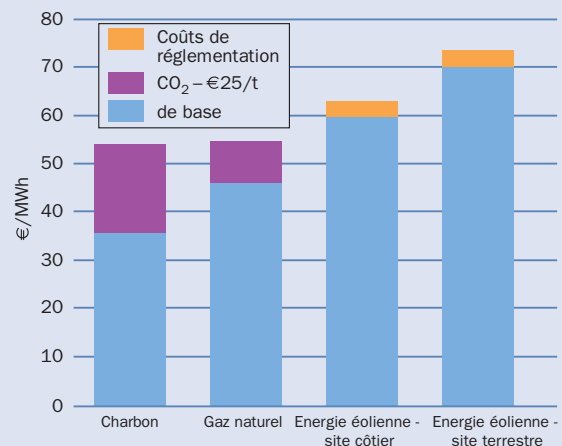
classiques est inférieur au coût de l'électricité éolienne, dans l'hypothèse de faibles coûts du combustible. Sur un site terrestre européen, le coût de l'électricité à génération éolienne dépasse d'environ

La mise en œuvre de l'énergie éolienne permet d'économiser les coûts de combustible et de CO<sub>2</sub>, ainsi qu'une part considérable des coûts d'exploitation et de maintenance des centrales électriques classiques. Le montant des coûts d'investissement évités dépend de la mesure dans laquelle l'énergie éolienne permet de réorienter les investissements consacrés aux nouvelles centrales électriques classiques, ceci dépendant de la façon dont les installations électriques éoliennes sont intégrées au système électrique.

Les études montrent que le coût d'intégration de l'énergie éolienne, qui est variable, représente environ 0,3 à 0,4 c€/kWh d'électricité éolienne produite, même à des taux assez élevés de pénétration (environ 20 %, selon les systèmes d'exploitation). La Figure S.14 fait apparaître les résultats du cas de référence, dans l'hypothèse où les deux centrales électriques classiques entreraient en service en 2010.

Comme on l'a vu dans le cas de référence, le coût de la puissance produite par les centrales électriques

Figure S.14: Coûts de l'énergie générée en comparant les centrales électriques classiques à l'énergie éolienne, 2010 (valeur constante, € 2006)



## 20 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

33-34 % celui de l'énergie produite à partir du gaz naturel et du charbon (Chapitre III.6).

Ce cas prend pour base les hypothèses du rapport World Energy Outlook concernant les prix des combustibles, y compris un prix du pétrole brut de 59 US\$/baril en 2010. A cette date (mi-2008), le prix du pétrole brut a culminé à 147 US\$/baril. Bien que le prix du pétrole se combine avec un faible taux de change du Dollar US, le prix actuel du pétrole est sensiblement supérieur au prix du pétrole prévu par l'AIE pour 2010. C'est pourquoi une analyse de sensibilité a été effectuée, dont les résultats sont présentés par ses la Figure S.15.

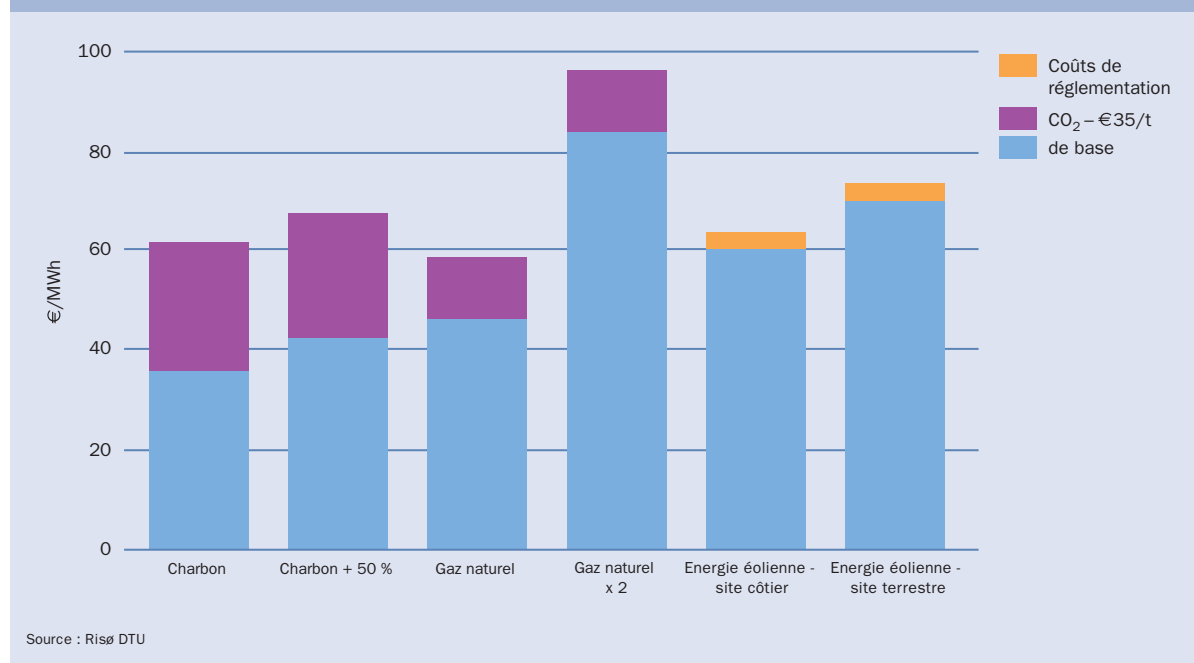
Dans la figure S.15, on part de l'hypothèse d'un doublement du prix du gaz naturel par rapport à la valeur de référence (qui équivaut à un prix du pétrole de 118 \$/baril en 2010), une augmentation de 50 % du prix du charbon, et une hausse de 35 €/t du prix du CO<sub>2</sub> comparé à 25 €/t en 2008. Comme présenté par la

figure, la compétitivité de l'électricité éolienne progresse de manière significative, les coûts du site terrestre devenant plus faible que ceux de la centrale à gaz naturel, et ne dépassant que d'environ 10 % ceux de la centrale thermique à charbon. Sur les sites côtiers, l'énergie éolienne produit l'électricité la moins chère.

### L'EMPLOI

Les entreprises du secteur éolien européen emploient à l'heure actuelle environ 108.600 personnes et, si l'on tient compte des emplois indirects, ce chiffre passe à 180.000 (chapitre III.7). Une partie significative des emplois directs liés à l'énergie éolienne (environ 77 %) est localisée dans trois pays, le Danemark, l'Allemagne et l'Espagne, dont la capacité installée combinée représente 70 % du total de l'UE. Cependant, le secteur est actuellement moins concentré qu'il ne l'était en 2003 en raison de l'ouverture de centres de fabrication et

Figure S.15: Analyse de sensibilité des coûts de l'électricité générée, en comparant les centrales classiques à l'énergie éolienne, dans l'hypothèse d'une hausse des prix des combustibles fossiles et du CO<sub>2</sub>, 2010 (valeurs constantes en € 2006)





**Tableau S.3: Emplois directs dans les entreprises spécialisées dans l'énergie éolienne dans différents pays européens**

| Pays               | Nombre d'emplois directs |
|--------------------|--------------------------|
| Autriche           | 700                      |
| Belgique           | 2000                     |
| Bulgarie           | 100                      |
| République Tchèque | 100                      |
| Danemark           | 23.500                   |
| Finlande           | 800                      |
| France             | 7000                     |
| Allemagne          | 38.000                   |
| Grèce              | 1.800                    |
| Hongrie            | 100                      |
| Irlande            | 1.500                    |
| Italie             | 2.500                    |
| Pays-Bas           | 2.000                    |
| Pologne            | 800                      |
| Portugal           | 800                      |
| Espagne            | 20.500                   |
| Suède              | 2000                     |
| Royaume-Uni        | 4000                     |
| Reste de l'UE      | 400                      |
| <b>TOTAL</b>       | <b>108.600</b>           |

Source : Estimations propres, basées sur des chiffres fournis par l'EWEA (2008a), l'ADEME (2008), l'AEE (2007), la DWIA (2008), le Ministère Fédéral de l'Environnement en Allemagne et le BMU (2008).

d'exploitation sur les marchés émergents, et du fait que de nombreuses activités liées à l'éolien, telles que la promotion, l'O&M, l'ingénierie et les services juridiques, sont réalisés localement. La majorité des emplois est concentrée chez les constructeurs et les fabricants de composants d'éoliennes (59 %).

## Partie IV : L'industrie et les marchés

En 2001, l'Union Européenne a adopté sa Directive pour la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité. Cette directive reste à ce jour le

texte législatif le plus important au monde en matière d'intégration de l'électricité produite par les énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne. Cette directive contient un objectif indicatif de 21 % de la demande d'électricité finale de l'UE fournie par des sources d'énergie renouvelables d'ici 2010, et elle régit les marchés de l'électricité où ces sources sont présentes. Elle a remporté un succès extraordinaire sur le plan de la promotion des énergies renouvelables, en particulier l'énergie renouvelable, et c'est le facteur déterminant qui explique le succès mondial remporté par l'industrie des énergies renouvelables en Europe, ainsi que la position de leadership mondial des entreprises européennes spécialisées dans l'énergie éolienne.

La mise en œuvre progressive dans les Etats membres de la Directive de 2001 sur l'électricité renouvelable, ainsi que la décision prise à l'unanimité par le Conseil de l'Europe lors de son Sommet de Printemps en mars 2007, de fixer une part obligatoire de 20 % d'énergie renouvelable dans l'UE d'ici 2020, sont des étapes qui vont dans la bonne direction, ainsi que des indicateurs d'un engagement politique accru. Une nouvelle Directive, basée sur une proposition de la Commission européenne de janvier 2008 fut adoptée par le Conseil européen en décembre 2008. Cette nouvelle directive augmente la part des énergies renouvelables dans l'Union européenne de 8.5% en 2005 à 20% en 2020, ce qui veut dire que plus du tiers de l'électricité de l'UE devra provenir de sources renouvelables en 2020, alors que cette proportion était de 15 % en 2007.

## LA COMBINAISON DES ÉNERGIES DANS L'UE

Tandis que la production thermique, soit plus de 430 GW au total, constitue depuis longtemps le cœur de la production d'énergie Européenne, en combinaison avec la grande hydraulique et le nucléaire, l'Europe renonce

## 22 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

progressivement aux sources d'énergie classiques pour se tourner vers les technologies qui font appel aux sources renouvelables (Chapitre IV.1). Entre 2000 et 2007, la capacité de production électrique totale de l'UE a augmenté de 200 GW, atteignant 775 GW à la fin de 2007. Les modifications les plus notables de la combinaison ont été le quasi-doublement de la capacité de génération au gaz, passée à 164 GW, et le développement de l'énergie éolienne, qui a plus que quadruplé en passant de 13 à 57 GW.

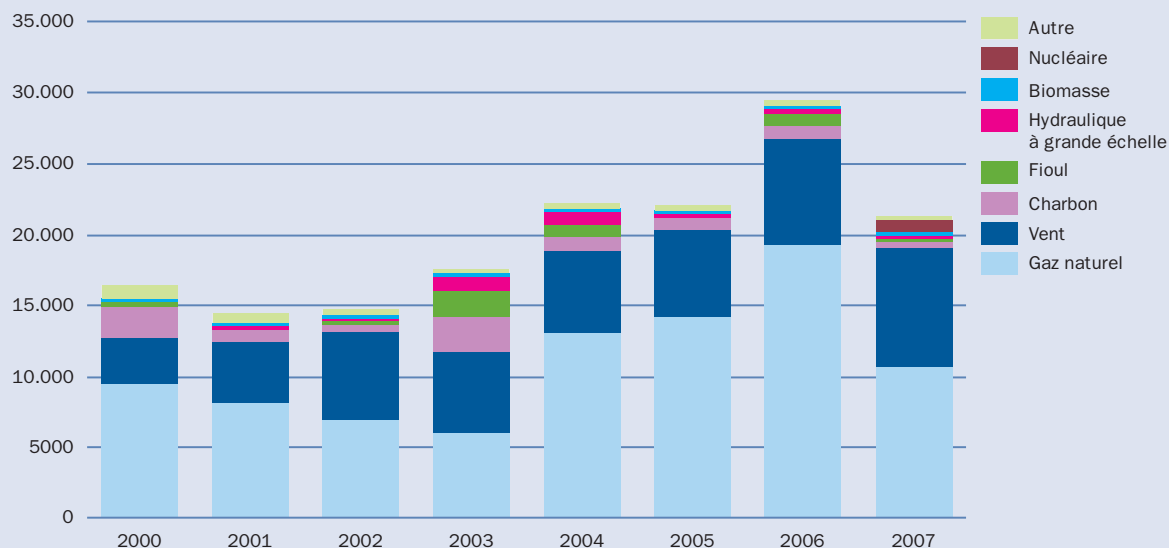
### L'ÉNERGIE ÉOLIENNE SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN DE L'ÉLECTRICITÉ

L'UE ouvre la voie en adoptant des mesures politiques destinées à faciliter le passage au déploiement des technologies à base de sources renouvelables. Avec un taux annuel de croissance supérieur à 20 % en MW installés entre 2000 et 2007 (Figure S.16), l'énergie

éolienne s'est clairement établie comme source d'énergie pertinente sur le marché européen de la production électrique. L'énergie éolienne a représenté 30 % de la capacité totale de production d'électricité dans l'UE au cours de cette période de 5 ans, ce qui fait de cette source d'énergie le deuxième contributeur en importance à l'installation des capacités dans l'UE au cours des dix dernières années, derrière le gaz naturel (55 %). En 2007, l'éolien représentait 40 % de la nouvelle capacité annuelle installée dans l'UE et son augmentation a été plus importante que toute autre technologie de production électrique, gaz naturel inclus.

La part de l'énergie éolienne est passée à plus de 10 % de la capacité installée totale, et à de 5 % de la demande nationale en électricité sur cinq marchés européens -Allemagne, Espagne, Danemark, Portugal et Irlande - en dépassant même 10 % tant en Espagne qu'au Danemark.

Figure S.16: Nouvelle capacité de production électrique, UE, 2000-2007 (en MW)



Sources : EWEA/Platts (2008)

## SITUATION ACTUELLE DU MARCHÉ DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE DANS L'UNION EUROPÉENNE

En UE, la capacité éolienne installée a progressé tous les ans de 25 % en moyenne au cours des 11 dernières années, en passant de 4.753 MW en 1997 à 56.535 MW en 2007 (Chapitre IV.2). En termes d'installations annuelles, le marché éolien européen a crû annuellement de 19 %, passant de 1.277 MW en 1997 à 8.554 en 2007. En 2007, l'Espagne était de loin le plus vaste marché éolien, suivie de l'Allemagne, de la France et de l'Italie. Huit pays – Allemagne, Espagne, Danemark, Italie, France, Royaume-Uni, Portugal et Pays-Bas - ont désormais plus de 1.000 MW de puissance installée. L'Allemagne, l'Espagne et le Danemark - les trois pays pionniers de l'énergie éolienne - hébergent 70 % de la puissance éolienne installée dans l'Union Européenne (voir Figures S.17 et S.18).

La capacité totale éolienne installée dans l'UE à la fin de 2007, supérieure à 56.000 MW, a produit 3,7 % de la demande en électricité de l'UE à 27 au cours d'une année à vent moyen.

Avec 1.080 MW fin 2007, l'éolien offshore représentait 1,9 % de la puissance totale installée dans l'UE, et 3,5 % de la production d'électricité provenant de l'énergie éolienne européenne. Le marché reste inférieur à son niveau de 2003, et s'est développé plus lentement que prévu.

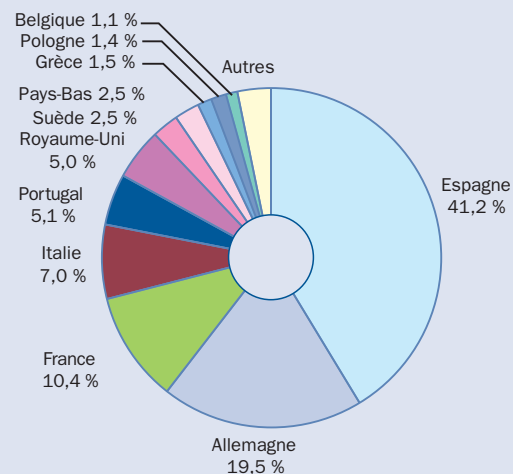
## L'INDUSTRIE ÉOLIENNE EUROPÉENNE : ACTEURS ET TENDANCES EN MATIÈRE D'INVESTISSEMENTS

La croissance spectaculaire de l'énergie éolienne est un moteur d'investissement dans de nouvelles capacités de production, et a attiré une vaste gamme d'acteurs d'un bout à l'autre de la chaîne de valeur industrielle (Chapitre IV.3). Des entreprises d'ingénierie locales axées sur les sites jusqu'aux prestataires

de services publics mondiaux verticalement intégrés, tous ont participé à l'histoire de la croissance de l'énergie éolienne européenne.

En tant que région responsable de l'émergence et la diffusion à large échelle de l'éolien, l'Europe est le théâtre de la concurrence la plus acharnée pour les parts de marché que se livrent une douzaine de fournisseurs environ. Sur le marché européen, la répartition des parts de marché a été extrêmement stable, peu de mouvements étant intervenus depuis la phase de consolidation qui s'est produite en 2003 et 2004 parmi les fournisseurs prédominants. Entre 2003 et 2007, trois acteurs ont chacun réalisé en moyenne une part de marché supérieure à 15 % des MW ajoutés

Figure S.17: Parts de marché des Etats Membres pour les nouvelles capacités (2007)



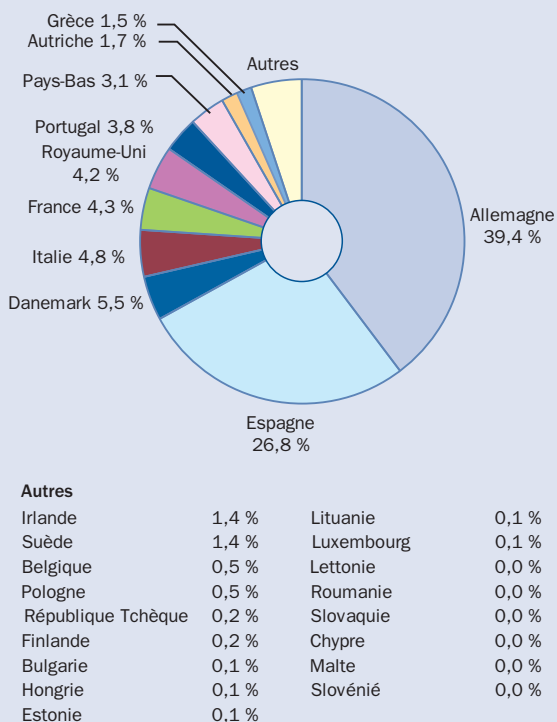
### Autres

|                    |       |            |       |
|--------------------|-------|------------|-------|
| République Tchèque | 0,7 % | Chypre     | 0,0 % |
| Irlande            | 0,7 % | Danemark   | 0,0 % |
| Estonie            | 0,3 % | Hongrie    | 0,0 % |
| Finlande           | 0,3 % | Lettonie   | 0,0 % |
| Bulgarie           | 0,4 % | Luxembourg | 0,0 % |
| Autriche           | 0,2 % | Malte      | 0,0 % |
| Lituanie           | 0,1 % | Slovaquie  | 0,0 % |
| Roumanie           | 0,1 % | Slovénie   | 0,0 % |

Source : EWEA (2008)

## 24 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

**Figure S.18: Parts de marché des Etats Membres pour la capacité totale à la fin 2007**



Source : EWEA (2008)

annuels, suivis par quatre acteurs dont chacun a réalisé une part de 5 à 10 %.

La gestion de la chaîne de production constitue un élément compétitif majeur. La relation qui unit les constructeurs de turbines à leurs fournisseurs est devenue cruciale, et a été fortement sollicitée au cours des trois dernières années, car la forte augmentation de la demande a exigé d'accélérer la production, de réaliser des investissements significatifs et d'accroître la réactivité afin de gagner en valeur sur un marché en croissance rapide.

De plus, la chaîne de valeur de l'énergie éolienne en Europe connaît une évolution dynamique en raison de la redistribution de la propriété des actifs, de la recherche de croissance sur les marchés en maturation, et des

efforts entrepris par les acteurs pour passer à l'échelle paneuropéenne. La prolifération des acteurs cherchant à développer, acquérir ou exploiter des centrales éoliennes a intensifié la concurrence à un niveau sans précédent, en privilégiant les éléments clés que sont la connaissance des marchés locaux, le savoir-faire technique et la capacité financière comme éléments cruciaux de développement.

### POSITIONNEMENT DES ACTEURS CLÉS

La redistribution actuelle des actifs utilisés en Europe pour produire l'énergie éolienne illustre clairement les augmentations d'échelle et l'expansion géographique que connaît l'industrie. L'industrie éolienne qui, à la fin des années 1990, était concentrée au Danemark et en Allemagne et constituée d'éoliennes isolées appartenant à des agriculteurs, inclut maintenant des douzaines d'acteurs multinationaux qui possèdent plusieurs gigawatts de capacité installée. Cinq grands modes de propriété, qui constituent autant de blocs, caractérisent maintenant la structure du marché européen.

1. les services publics ;
2. les plus gros producteurs d'électricité indépendants européens (IPP ou partenariat public/privé) ;
3. les autres IPP espagnols ;
4. les investisseurs allemands ;
5. les autres investisseurs européens/IPP.

Au cours des cinq dernières années, la tendance la plus marquante a été la participation accrue des prestataires publics dans l'industrie. La part de la puissance éolienne installée totale détenue par les prestataires de services publics est passée de 17 % en 2002 à 25 % en 2007. Le bond le plus spectaculaire a eu lieu entre 2005 et 2006, lorsque les principaux prestataires publics régionaux ont connu une croissance annuelle d'installations éoliennes supérieure à 500 MW.

Tableau S.4: Installations cumulées de puissance éolienne dans l'UE et prévisions pour 2010 (en MW)

| País               | Installations cumulées |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 2000                   | 2001   | 2002   | 2003   | 2004   | 2005   | 2006   | 2007   | 2010   |
| Autriche           | 77                     | 94     | 140    | 415    | 606    | 819    | 965    | 982    | 1200   |
| Belgique           | 13                     | 32     | 35     | 68     | 96     | 167    | 194    | 287    | 800    |
| Bulgarie           |                        |        |        |        | 10     | 10     | 36     | 70     | 200    |
| Chypre             |                        |        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| République Tchèque |                        |        | 3      | 9      | 17     | 28     | 54     | 116    | 250    |
| Danemark           | 2417                   | 2489   | 2889   | 3116   | 3118   | 3128   | 3136   | 3125   | 4150   |
| Estonie            |                        |        | 2      | 2      | 6      | 32     | 32     | 58     | 150    |
| Finlande           | 39                     | 39     | 43     | 52     | 82     | 82     | 86     | 110    | 220    |
| France             | 66                     | 93     | 148    | 257    | 390    | 757    | 1567   | 2454   | 5300   |
| Allemagne          | 6113                   | 8754   | 11.994 | 14.609 | 16.629 | 18.415 | 20.622 | 22.247 | 25.624 |
| Grèce              | 189                    | 272    | 297    | 383    | 473    | 573    | 746    | 871    | 1500   |
| Hongrie            |                        |        | 3      | 3      | 3      | 17     | 61     | 65     | 150    |
| Irlande            | 118                    | 124    | 137    | 190    | 339    | 496    | 746    | 805    | 1326   |
| Italie             | 427                    | 682    | 788    | 905    | 1266   | 1718   | 2123   | 2726   | 4500   |
| Lettonie           |                        |        | 24     | 27     | 27     | 27     | 27     | 27     | 100    |
| Lituanie           |                        |        | 0      | 0      | 6      | 6      | 48     | 50     | 100    |
| Luxembourg         | 10                     | 15     | 17     | 22     | 35     | 35     | 35     | 35     | 50     |
| Malte              |                        |        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Pays-Bas           | 446                    | 486    | 693    | 910    | 1079   | 1219   | 1558   | 1746   | 3000   |
| Pologne            |                        |        | 27     | 63     | 63     | 83     | 153    | 276    | 1000   |
| Portugal           | 100                    | 131    | 195    | 296    | 522    | 1022   | 1716   | 2150   | 3500   |
| Roumanie           |                        |        | 1      | 1      | 1      | 2      | 3      | 8      | 50     |
| Slovaquie          |                        |        | 0      | 3      | 5      | 5      | 5      | 5      | 25     |
| Slovénie           |                        |        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 25     |
| Espagne            | 2235                   | 3337   | 4825   | 6203   | 8264   | 10.028 | 11.623 | 15.145 | 20.000 |
| Suède              | 231                    | 293    | 345    | 399    | 442    | 510    | 571    | 788    | 1665   |
| Royaume-Uni        | 406                    | 474    | 552    | 667    | 904    | 1332   | 1962   | 2389   | 5115   |
| Cumul UE*          | 12.887                 | 17.315 | 23.098 | 28.491 | 34.372 | 40.500 | 48.031 | 56.535 | 80.000 |

Nota : \* Données 2004 UE à 25 ; données 2007 UE à 27.

Source : EWEA (2008)

## PLANS D'INVESTISSEMENTS

Pour la période 2007 à 2010, les 15 premiers prestataires de services et IPP européens en termes de MW installés prévu de développer 18 GW d'éolien,

équivalent à plus de 25 milliards d'€ d'investissements dans des centrales éoliennes, sur la base des estimations de coûts actuelles par MW installé. Globalement, on s'attend à voir le marché éolien européen croître annuellement de plus de 9 GW

## 26 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

jusqu'à 2010 inclus, ce qui se traduit par des investissements annuels progressant de 10 milliards d'€ à près de 16 milliards d'€.

Dans l'ensemble, le marché européen arrive à maturité, avec l'intégration progressive de la technologie sur le marché électrique. Bien que l'énergie éolienne soit à présent une partie intégrante de la pyramide de production, aux côtés de sources d'énergie classiques sur des marchés tels que l'Allemagne, l'Espagne ou le Danemark, elle continue d'affronter le double défi de la concurrence avec les autres technologies renouvelables tout en s'avérant être un choix énergétique judicieux pour les principaux producteurs d'électricité en quête de croissance et de diversification de leur portefeuille.



### SITUATION DES MARCHÉS EOLIENS MONDIAUX

Dans sa meilleure année à ce jour, l'industrie éolienne mondiale, étudiée au Chapitre IV.4, a installé 20.000 MW en 2007. Ce développement mené par les Etats-Unis, la Chine et l'Espagne, a porté la capacité mondiale installée à 94.122 MW. Cela représenté une augmentation de 31 % par rapport au marché en 2006, et une augmentation de capacité installée totale mondiale d'environ 27 %.

Les cinq premiers pays en termes de capacité installée sont l'Allemagne (22,3 GW), les Etats-Unis

(16,8 GW), l'Espagne (15,1 GW), l'Inde (7,8 GW) et la Chine (5,9 GW). En termes de valeur économique, le marché éolien mondial représentait en 2007 environ 25 milliards d'€ (37 milliards d'US\$) de nouveaux équipements de production, et il a attiré 34 milliards d'€ (2 milliards d'US\$) d'investissements totaux.

L'Europe reste le premier marché éolien : en 2007, les nouvelles installations représentaient 43 % du total mondial, et les entreprises européennes fournissaient 66 % de la capacité éolienne mondiale.

### LES MARCHÉS CHINOIS ET AMÉRICAIN POURSUIVENT LEUR ESSOR

Les Etats-Unis ont annoncé une capacité record de 5.244 MW installés en 2007, soit plus du double de 2006, pour environ 30 % de la nouvelle capacité de production du pays en 2007. Aux Etats-Unis, la capacité éolienne totale a connu une croissance de 45 % en 2007, avec 16,8 GW installés. Tandis qu'en Europe, l'énergie éolienne représente environ 4 % de la demande électrique en 2008, les fermes éoliennes des Etats-Unis vont produire 48 milliards de kWh d'électricité en 2008, ce qui représente un peu plus d'1 % de l'offre électrique américaine.

Au cours de l'année 2007, la Chine a ajouté 3.449 MW de capacité éolienne, ce qui représente une croissance du marché de 156 % par rapport à 2006. Elle se classe maintenant au cinquième rang pour la capacité totale installée, avec plus de 6.000 MW à la fin de 2007. Néanmoins, les experts estiment qu'il ne s'agit que d'un début, et que la véritable croissance de la Chine est à venir. Les constructeurs européens sont bien positionnés pour saisir cette opportunité.

### BARRIÈRES ADMINISTRATIVES ET BARRIÈRES À L'ACCÈS AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

De nos jours, l'intégration des énergies renouvelables au marché européen de l'électricité se heurte à de



multiples barrières. Le Chapitre IV.5 adopte le point de vue d'un promoteur de projet, et examine les barrières qui surviennent au cours du processus d'acquisition du permis de construire, de licences d'aménagement du territoire et d'autorisations d'accès au réseau, en prenant l'exemple de quatre Etats Membres de l'UE.

Le porteur de projet se heurte à des barrières si les procédures qu'il doit respecter ne sont pas définies avec cohérence, ce qui inclut le manque de transparence ou les exigences administratives excessives. Chaque Etat Membre européen présente de telles barrières, mais leur incidence sur le déploiement des énergies renouvelables diffèrent selon les pays. Les barrières administratives, sociales et financières, ainsi que celles liées au raccordement au réseau, constituent un redoutable obstacle aux investissements et à la compétitivité de l'énergie éolienne sur les marchés européens et mondiaux.

## Partie V : Environnement

Toutes les sources d'énergie n'ont pas les mêmes effets sur l'environnement ou la même capacité d'épuisement des ressources naturelles. Les énergies fossiles épuisent les ressources naturelles et sont les principales responsables de la pollution de l'environnement, tandis que les énergies renouvelables en général, et l'énergie éolienne en particulier, ont peu d'impacts sur l'environnement, et ceux-ci sont sensiblement plus faibles que ceux qu'occasionnent les énergies classiques.

### AVANTAGES POUR L'ENVIRONNEMENT

Le Chapitre V.1 décrit la méthodologie d'évaluation du cycle de vie (LCA), qui sert à évaluer les émissions et les impacts environnementaux et, sur la base d'études européennes pertinentes, il met en évidence les résultats liés à la production d'électricité assurée par les parcs éoliens à terre et offshore durant leur cycle de vie. Les

émissions et les impacts évités par l'éolien, par rapport aux autres technologies de production électrique à partir de sources fossiles, sont également examinées.

### IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Bien que les impacts de l'énergie éolienne sur l'environnement soient bien plus faibles que celles qu'exercent les énergies classiques, il est nécessaire de les évaluer. Les éventuelles influences négatives sur la faune et les populations ont été analysées, tant pour les implantations terrestres qu'offshore. Les impacts spécifiques sur l'environnement, tels que le paysage, le bruit, les oiseaux et les populations d'organismes marins, ainsi que les interférences électromagnétiques, sont étudiées au Chapitre V.2.

L'énergie éolienne a un rôle clé à jouer dans la lutte contre le changement climatique en réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production électrique. L'émergence des marchés internationaux du carbone, qui ont été stimulés par les mécanismes souples instaurés par le Protocole de Kyoto, ainsi que l'amélioration des systèmes d'achat et de vente des droits d'émissions, tels que le Marché Européen des Droits d'Emissions ou European Trading System (ETS), pourraient fournir des incitations supplémentaires au développement et à la mise en œuvre des technologies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne.



MESURES POLITIQUES DESTINÉES À LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'énergie éolienne est capable de réduire de manière spectaculaire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur énergétique. Le Chapitre V.3 fournit un aperçu de l'évolution du marché international du carbone, évalue les incidences du Mécanisme de Développement Propre (Clean Development Mechanism) et de la Mise en œuvre commune (Joint Implementation) sur le secteur éolien, trace la voie des négociations climatiques post-2012. Il fournit également un aperçu des marchés des droits d'émission (ETS) de l'UE, en discutant les résultats obtenus, la méthode d'attribution des quotas d'émission et les propositions pour l'après 2012.

EXTERNALITÉS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE COMPARÉE AUX AUTRES TECHNOLOGIES

Actuellement, les marchés de l'électricité ne tiennent pas compte des externalités et des coûts liés à la pollution. Il importe donc d'identifier les externalités des diverses technologies de production électrique et de calculer les coûts associés. On peut ensuite comparer les coûts externes aux coûts internes de l'électricité, et les systèmes de production d'énergie concurrents, tels que les technologies classiques de production, peuvent être comparés à l'énergie éolienne (Chapitre V.4).

Les externalités de la production électrique ont commencé à être étudiées scientifiquement à la fin des années 1980, en particulier par l'étude des Effets Externes de l'Energie (ExternE), qui a tenté d'élaborer une méthodologie cohérente pour évaluer les effets externes des technologies de production électrique. Les travaux et les méthodologies du projet ExternE sont régulièrement actualisés. Selon les évaluations de ce projet, les coûts externes de l'énergie éolienne sont

inférieurs à 0,26 c€/kWh, tandis ceux de la production électrique classique sont sensiblement plus élevés.

Dans les Chapitres V.4 et V.5, *L'énergie éolienne - les faits* présente les résultats d'analyses empiriques des émissions et des coûts externes générés par le remplacement de la capacité de production d'électricité classique, basée sur les combustibles fossiles, par l'énergie éolienne dans chacun des Etats membres de l'UE en 2007, 2020 et 2030. L'énergie éolienne a permis d'éviter les coûts externes, qui étaient supérieurs à 10 milliards d'€ en 2007, et l'on s'attend à voir ce chiffre augmenter au fur et à mesure que sa pénétration augmente au cours des décennies à venir (Tableau S.5).

NIVEAU D'ACCEPTATION SOCIALE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE ET DES PARCS ÉOLIENS

L'expérience de l'énergie éolienne dans l'Union Européenne démontre que l'acceptation sociale est cruciale pour qu'elle puisse se développer avec succès (Chapitre V.6). La recherche sociale sur l'énergie éolienne s'est concentrée sur trois points principaux :

1. Evaluation des niveaux d'adhésion du public à l'énergie éolienne (acceptation publique)
2. Identification et compréhension de la réaction sociale au niveau local (acceptation par la communauté), et :

Tableau S.5: Coûts énergétiques externes évités

|                                                                                            | 2007 | 2020<br>(estimation) | 2030<br>(estimation) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|----------------------|
| Contribution de l'énergie éolienne aux coûts externes évités (milliards d'€, prix de 2007) | 10,2 | 32,9                 | 69,2                 |

**Nota :** Une condition préalable à la mise en œuvre complète des avantages environnementaux estimés pour 2020 et 2030 est l'adaptation permanente des instruments de soutien financier et la disparition des barrières à l'intégration des marchés de l'énergie éolienne.

3. Analyse des paramètres clés entrant en jeu dans l'acceptation sociale par les principaux intéressés et les responsables politiques (acceptation par les parties prenantes).

Le mode de conception et de gestion des parcs éoliens, ainsi que la manière dont le public est impliqué dans leur développement peut être un facteur plus influant sur les réactions aux nouveaux projets que les caractéristiques purement physiques ou technologiques. Ce type de facteurs a des incidences significatives sur les relations entre les collectivités qui accueillent le projet, les promoteurs et les autorités. La gestion de l'acceptation sociale en matière technologique n'obéit pas à des règles établies, mais l'examen approprié de cette vaste gamme de questions peut aider les promoteurs et les autorités à tirer la leçon des expériences antérieures et à trouver des mécanismes permettant de préserver et de développer l'engagement du public pour le développement de l'énergie éolienne.

## Partie VI : Scénarii et objectifs

Le Livre blanc sur les sources d'énergie renouvelables publié par la Commission Européenne en 1997 a fixé comme objectif le doublement de la part des énergies renouvelables dans la pyramide de production européenne, cette part devant passer de 6 % à 12 % à l'horizon 2010. Cet objectif incluait une cible de 40.000 MW d'énergie éolienne implantée en Europe en 2010, permettant de produire 80 TWh et d'économiser 72 millions de tonnes (Mt) d'émissions de CO<sub>2</sub> par an. L'objectif de 40.000 MW a été atteint en 2005.

L'objectif de 40.000 MW fixé par le Livre blanc de la Commission Européenne a été critiqué par EWEA en 1997 ; mais trois ans plus tard, en raison de l'évolution considérable intervenue sur les marchés allemand, espagnol et danois, EWEA a relevé son objectif de

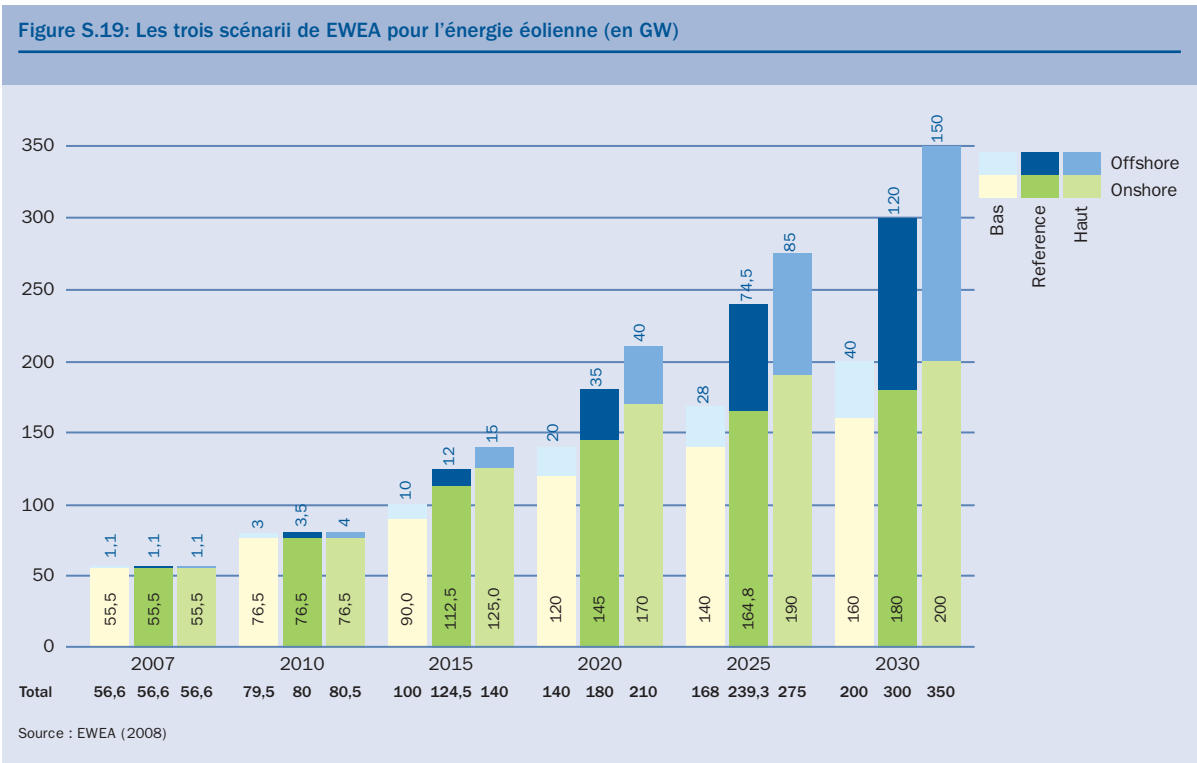
50 %, le portant à 60.000 MW à l'horizon 2010 et à 150.000 MW d'ici 2020 (Chapitres VI.1 et VI.2). En 2003, EWEA a une fois de plus relevé son objectif, cette fois de 25 %, en le portant à 75.000 MW à l'horizon 2010 et à 180.000 MW d'ici 2020. En raison de l'extension de l'UE suite à l'adhésion de 12 nouveaux Etats Membres, EWEA a porté à 80.000 MW son scénario de référence pour 2010, tout en maintenant pour 2020 son objectif de 180.000 MW, et en fixant un objectif de 300.000 MW pour l'horizon 2030 (Figure S.19).

Si le scénario de référence se réalise, la production d'électricité éolienne passera à 177 TWh en 2010, à 477 TWh en 2020 et à 935 TWh en 2030 (chapitre VI.3). Le scénario minimum de la Commission Européenne prévoit une augmentation de la demande d'électricité de 33 % entre 2005 et 2030 (4.408 TWh). Dans l'hypothèse où la demande en électricité de l'Union Européenne évolue selon les prévisions de la Commission Européenne, la part d'origine éolienne de la consommation d'électricité de l'UE atteindra 5 % en 2010, 11,7 % en 2020 et 21,2 % en 2030.

Par ailleurs, si les ambitions visant à accroître l'efficacité énergétique se réalisent, la part de l'énergie éolienne dans la future demande en électricité dépassera le scénario minimum. En 2006, la Commission Européenne a publié de nouveaux scénarii concernant l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables en 2030. Si la demande d'électricité de l'UE évolue selon les prévisions de la Commission Européenne sur "La combinaison des énergies hautement renouvelables et l'efficacité" « Combined high renewables and efficiency » ou RE&Eff), la part de l'énergie éolienne dans la demande en électricité atteindra 5,2 % en 2010, 14,3 % en 2020 et 28,2 % en 2030 (voir Tableau S.6).

Depuis 1996, la Commission Européenne a modifié cinq fois son scénario minimum. Au cours de cette période de 12 ans, les objectifs pour l'énergie éolienne en 2010 et 2020 ont été presque multipliés par dix, en

30 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF



passant de 8.000 MW à 71.000 MW (2010), et de 12.000 MW à 120.000 MW (2020) dans le plus récent scénario minimum de la Commission Européenne, publié en 2008.

Tableau S.6: Part de l'énergie éolienne dans la demande d'électricité de l'UE

|                                                                | 2000 | 2007 | 2010 | 2020  | 2030  |
|----------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Production éolienne (TWh)                                      | 23   | 119  | 177  | 477   | 935   |
| Demande en électricité de référence (TWh) *                    | 2577 | 3243 | 3568 | 4078  | 4408  |
| Demande en électricité de référence dans le cas RE&Eff (TWh) * | 2577 | 3243 | 3383 | 3345  | 3322  |
| Part de l'énergie éolienne (référence)                         | 0,9% | 3,7% | 5,0% | 11,7% | 21,2% |
| Part de l'énergie éolienne (cas RE&Eff)                        | 0,9% | 3,7% | 5,2% | 14,3% | 28,2% |

\*Sources : Eurelectric, EWEA et Commission Européenne

Il est quelque peu surprenant de constater que le scénario minimum publié en 2008 donnait des chiffres sensiblement plus faibles pour l'énergie éolienne que le scénario minimum de 2006. La prévision de 71.000 MW pour 2010 sous-entend une baisse d'environ 50 % du marché éolien en Europe au cours des trois prochaines années par rapport au marché actuel. A la lumière des réalisations actuelles du marché, des tendances à la croissance et des analyses menées de manière indépendante, le scénario minimum de la Commission Européenne semble déconnecté de la réalité actuelle, et sous-estime manifestement les perspectives à plus long terme du secteur.

Tant le scénario minimum de la Commission Européenne que celui de l'AIE prennent pour hypothèse un ralentissement significatif de la croissance du marché - la Commission Européenne va jusqu'à pré-supposer un ralentissement de 50 % (par rapport au scénario de l'EWEA), l'objectif de 71 MW devant être

atteint en 2010. Néanmoins, leurs scénarii développés sont en phase avec l'objectif 2010 de l'EWEA, tandis que le scénario de 2006 de la Commission Européenne dépasse même l'objectif de 180 GW fixé pour 2020 par l'EWEA.

Les prix des éoliennes ont augmenté depuis 2005 ; or, l'un des avantages significatifs de l'énergie éolienne, est la gratuité du combustible. Pour cette raison, le coût total de la production d'énergie sur la durée de vie d'une éolienne, qui est de 20 à 25 ans, peut être pronostiqué avec une grande précision. Ni les futurs prix du charbon, du pétrole ou du gaz, ni le prix du carbone n'auront d'incidences sur le coût de production de l'énergie éolienne. Comme le fait observer le Chapitre VI.4, ce fait constitue peut-être l'avantage concurrentiel le plus significatif de l'énergie éolienne sur le marché mondial de l'énergie.

Les investissements cumulés dans le secteur éolien au cours des décennies 2000 à 2030 représenteront 390 milliards d'€ au total. Conformément au scénario de référence d'EWEA, environ 340 milliards d'€ seront investis dans l'éolien en Europe entre 2008 et 2030.

Comme l'indique le Tableau S.7, si l'on modifie les hypothèses relatives au CO<sub>2</sub> et au prix du combustible, on trouve une influence spectaculaire sur les coûts résultant du combustible et du CO<sub>2</sub> évité par la production éolienne. Avec de faibles niveaux de prix pour le CO<sub>2</sub> (10 €/t) et le combustible (l'équivalent de 50 € par baril de pétrole), les investissements éoliens des 23 prochaines années permettront d'économiser 466 milliards d'€ de combustible et de CO<sub>2</sub> au lieu de dépenser 783 milliards d'€. Avec des niveaux de prix élevés pour le CO<sub>2</sub> (40 €/t) et pour le combustible (l'équivalent de 120 € par baril de pétrole), l'énergie éolienne permettrait d'éviter des coûts de combustible et de CO<sub>2</sub> dépassant 1 trillion d'€ au cours de la période 2000 à 2030.

Le Tableau S.7 fait apparaître les différentes économies réalisées en fonction du prix du pétrole (par baril) et du prix du CO<sub>2</sub> (par tonne).

Le Conseil Mondial de l'Energie Eolienne (GWEC) pronostique que le marché éolien mondial va connaître une croissance supérieure à 155 %, passant de 94 GW en 2007 à 240,3 GW de capacité installée totale à

**Tableau S.7: Economies (en milliards d'€) réalisées en fonction du prix du combustible et du prix du CO<sub>2</sub> (par tonne)**

| <b>Total (prix du combustible, équivalent pétrole à 90 \$ ; CO<sub>2</sub> 25 €)</b>   | <b>2008–2010</b> | <b>2011–2020</b> | <b>2021–2030</b> | <b>2008–2020</b> | <b>2008–2030</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Investissement                                                                         | 31.062           | 120.529          | 187.308          | 151.591          | 338.899          |
| Coûts de CO <sub>2</sub> évités                                                        | 21.014           | 113.890          | 186.882          | 134.904          | 321.786          |
| Coûts de combustible évités                                                            | 51.165           | 277.296          | 455.017          | 328.462          | 783.479          |
| <b>Total (prix du combustible, équivalent pétrole à 50 \$ ; CO<sub>2</sub> 10 \$)</b>  | <b>2008–2010</b> | <b>2011–2020</b> | <b>2021–2030</b> | <b>2008–2020</b> | <b>2008–2030</b> |
| Investissement                                                                         | 31.062           | 120.529          | 187.308          | 151.591          | 338.899          |
| Coûts de CO <sub>2</sub> évités                                                        | 8.406            | 45.556           | 74.753           | 53.962           | 128.714          |
| Coûts de combustible évités                                                            | 30.456           | 165.057          | 270.843          | 195.513          | 466.356          |
| <b>Total (prix du combustible, équivalent pétrole à 120 \$ ; CO<sub>2</sub> 40 \$)</b> | <b>2008–2010</b> | <b>2011–2020</b> | <b>2021–2030</b> | <b>2008–2020</b> | <b>2008–2030</b> |
| Investissement                                                                         | 31.062           | 120.529          | 187.308          | 151.591          | 338.899          |
| Coûts de CO <sub>2</sub> évités                                                        | 33.623           | 182.223          | 299.011          | 215.846          | 514.857          |
| Coûts de combustible évités                                                            | 67.002           | 363.126          | 595.856          | 430.128          | 1.025.984        |

Source : EWEA (2008)

## 32 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : LES FAITS - RÉSUMÉ EXÉCUTIF

l'horizon 2012 (Chapitre VI.5). On s'attend en particulier à voir les marchés Chinois et Nord-Américains se développer de manière spectaculaire.

En fonction de la hausse de la demande, l'électricité d'origine éolienne pourrait, selon GWEC, représenter

11,5 à 12,7 % de la consommation mondiale d'électricité en 2020, et jusqu'à 20,2 à 24,9 % - en d'autres termes, entre le cinquième et le quart - des besoins en électricité mondiaux en 2030 (Chapitre VI.6).

---

Copyright © European Wind Energy Association 2009

Tous droits réservés

Comme le secteur éolien est extrêmement dynamique et en croissance constante, les données et figures contenues dans ce volume, correctes en octobre 2008, pourront être sensiblement décalées en 2009. Les plus récentes données statistiques et informations sont disponibles sur le site internet de L'Energie Eolienne – les Faits, à l'adresse [www.windfacts.eu](http://www.windfacts.eu).

*Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité de son auteur et ne représente pas nécessairement l'opinion de la Communauté européenne. La Commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent.*