

1 > Une énergie particulière

En chinois, l'idéogramme représentant le mot « crise » est la composition de deux autres idéogrammes, le premier signifie « danger », et le second « opportunité ».

John F. Kennedy

Un défi mondial sans précédent est lancé aujourd'hui aussi bien sur le front des ressources énergétiques que sur celui du changement climatique. Dans ce contexte, l'énergie éolienne est réapparue et prend peu à peu une place qui n'est plus négligeable au niveau des réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous évoquerons tout d'abord la place des principaux types de production d'électricité à ce jour, et celle de l'éolien de demain.

Nous verrons de quelle façon ce dernier peut représenter l'un des outils pour contrer l'épuisement des ressources énergétiques mondiales, et pour participer à la lutte contre le changement climatique.

Nous examinerons brièvement la question de l'intégration de l'éolien au réseau.

Enfin, nous donnerons un aperçu de l'ensemble des corps d'études et de techniques dont relève une démarche « éolienne ».

Généralités sur l'énergie éolienne

Le vent est une force de la nature expérimentée par l'Homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris

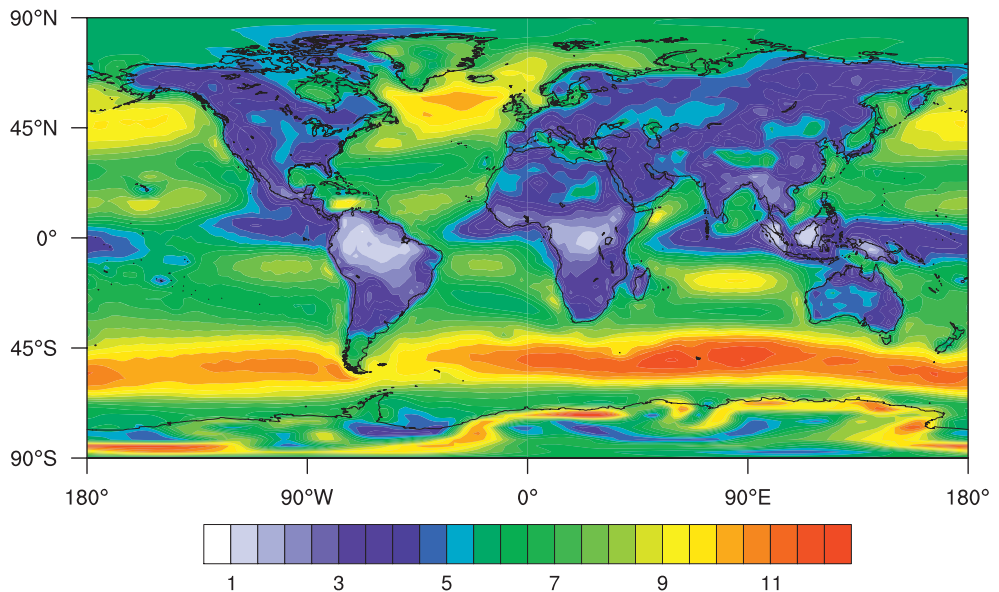
sa source physique et ses lois fondamentales. Les bateaux à voile, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stokes ou les ordinateurs.

Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ces caractéristiques à sa nature même : le vent naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini.

D'où vient le vent ?

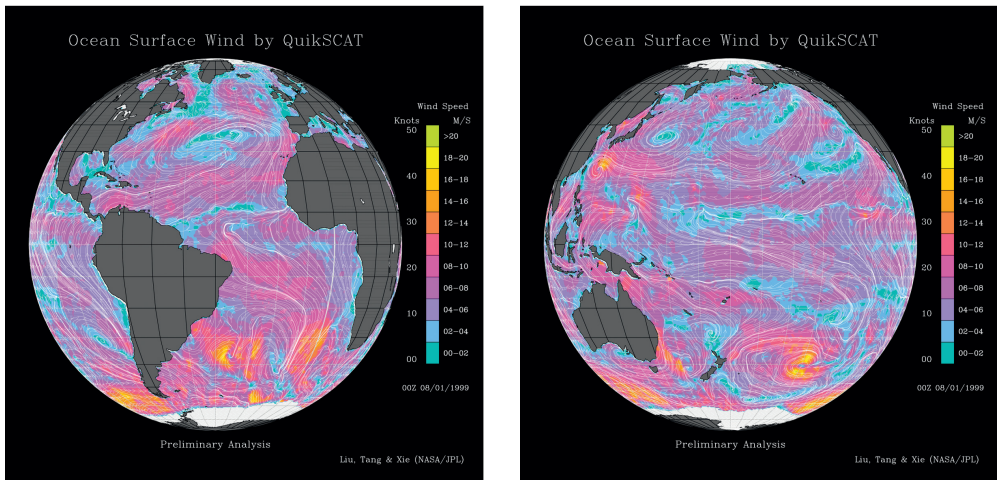
Comme nous le verrons en chapitre 2, le vent est une masse d'air en mouvement dont le déplacement est provoqué par des différences de températures entre différents points de la Terre. Il y a de grandes convections bien connues des météorologues, et des convections plus locales dues à la topographie et aux effets de gradients thermiques locaux (en bord de mer par exemple). Certaines régions sont donc soumises à des vents plus ou moins violents de façon plus régulière que d'autres.

Fig. 1.1 – L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (en m/s, à 10 m).



Les vallées, lorsque le vent souffle dans leur axe, peuvent aussi connaître des vents violents. Un des plus connus est le Mistral. Ce phénomène se retrouve également dans les déserts : les importantes différences de température qui apparaissent sont à l'origine de tempêtes de sable. De même, sur les océans, l'absence d'obstacle permet au vent d'atteindre des vitesses élevées et régulières. On citera aussi les zones des Westerlies (vent d'ouest) dans l'hémisphère Nord, les quarantièmes rugissants et les cinquantièmes hurlants dans l'hémisphère Sud.

Fig. 1.2 – Les vents marins du monde, vus par la NASA.



© NASA/JPL

Les différents moyens de production de l'électricité

Le but est ici de resituer les ordres de grandeur des différentes sources d'énergie qui permettent de produire de l'électricité. Il ne s'agit donc pas de traiter de l'énergie en général, qui est un concept beaucoup plus large, englobant les énergies utilisées pour le transport, le chauffage (non électrique), la cuisson des aliments, etc.

Quel que soit le monde de demain, une majeure partie des êtres humains consommera de l'électricité. Nous allons donc examiner les sources primaires de l'énergie électrique et leur durée de réserve estimée à ce jour.

Les chiffres clefs de la production d'électricité (IEA 2008)

Il est parfois ardu de se représenter les ordres de grandeur dans le monde des chiffres de l'électricité. De plus, on peut trouver des valeurs très divergentes dans la presse.

Les chiffres ci-après sont ceux fournis par l'IEA (ou AIE en français : Agence internationale de l'énergie). Il est aussi possible d'en trouver à l'IFP (Institut français du pétrole) ou bien auprès de RTE (Réseau de transport d'électricité) pour la France – ou leurs équivalents dans d'autres pays.

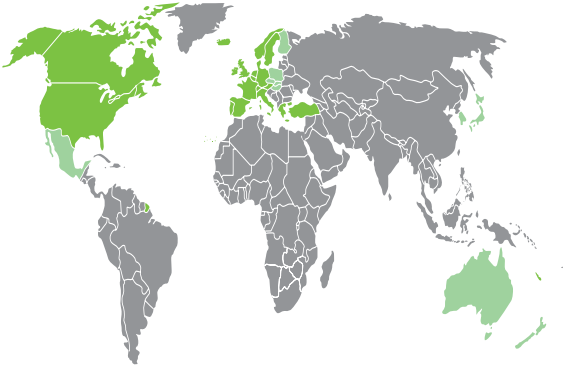
Les chiffres sont toujours à considérer à une date donnée pour un cadre donné, ce particulièrement en matière d'éolien, qui est une technologie « jeune ».

Sources primaires brutes de la production électrique mondiale en 2006 en gigawattheures (rappel : 1 GWh = 1 000 MWh = 1 000 000 kWh)

	Nucléaire	Hydro	Géothermie	Éolien / solaire	Tous combustibles fossiles	Cycles combinés et déchets
Monde	2 792 540	3 119 230	59 240	144 740	12 659 090	239 380
OCDE	2 355 570	1 361 520	38 090	129 120	6 445 940	204 760
Hors OCDE	436 970	1 757 720	21 160	15 620	6 213 140	34 620

L'IEA fournit régulièrement les détails de ces informations pour l'ensemble des pays de l'OCDE, et de temps à autre pour des pays hors zone OCDE.

Fig. 1.3 – Les pays de l'OCDE.



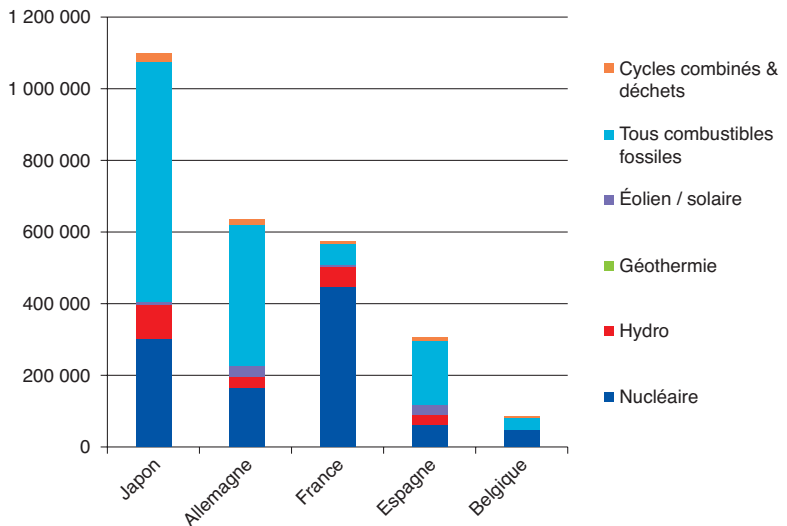
L'OCDE

L'OCDE, Organisation de coopération et de développement économique, comprend des pays aussi divers que la Corée du Sud, l'Australie, la France, les États-Unis... mais ni la Russie ni la Chine. Elle regroupe des pays au mode de vie occidental et – plus ou moins – libéral.

Les bouquets énergétiques nationaux varient considérablement d'un pays à l'autre.

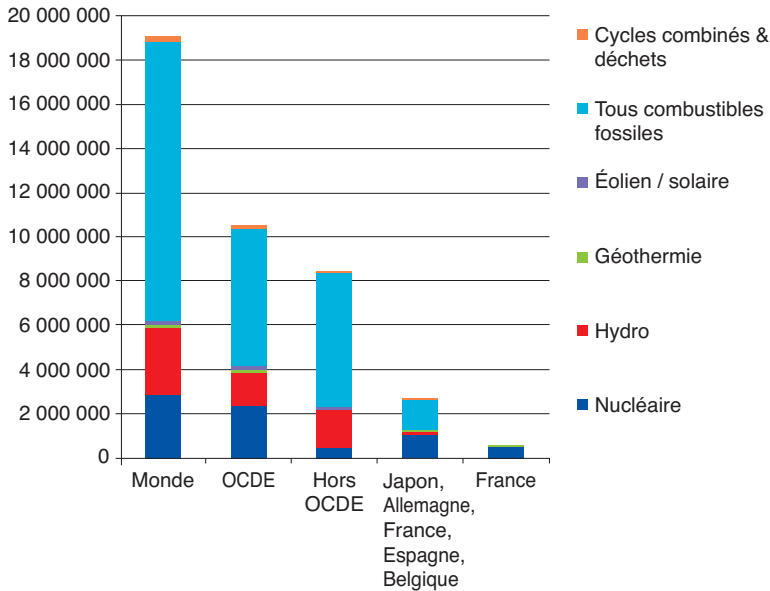
Sur la figure 1.4 sont représentés les bouquets énergétiques de cinq différents pays de l'OCDE. Il en ressort, entre autres, que le modèle français est une réelle exception en la matière.

Fig. 1.4 – Bouquet énergétique de cinq pays ciblés, selon les données de l'IEA 2006, en gigawattheures par an.



Le graphique 1.5 permet quant à lui de visualiser ce que représente la production de ces pays en proportion de la production mondiale.

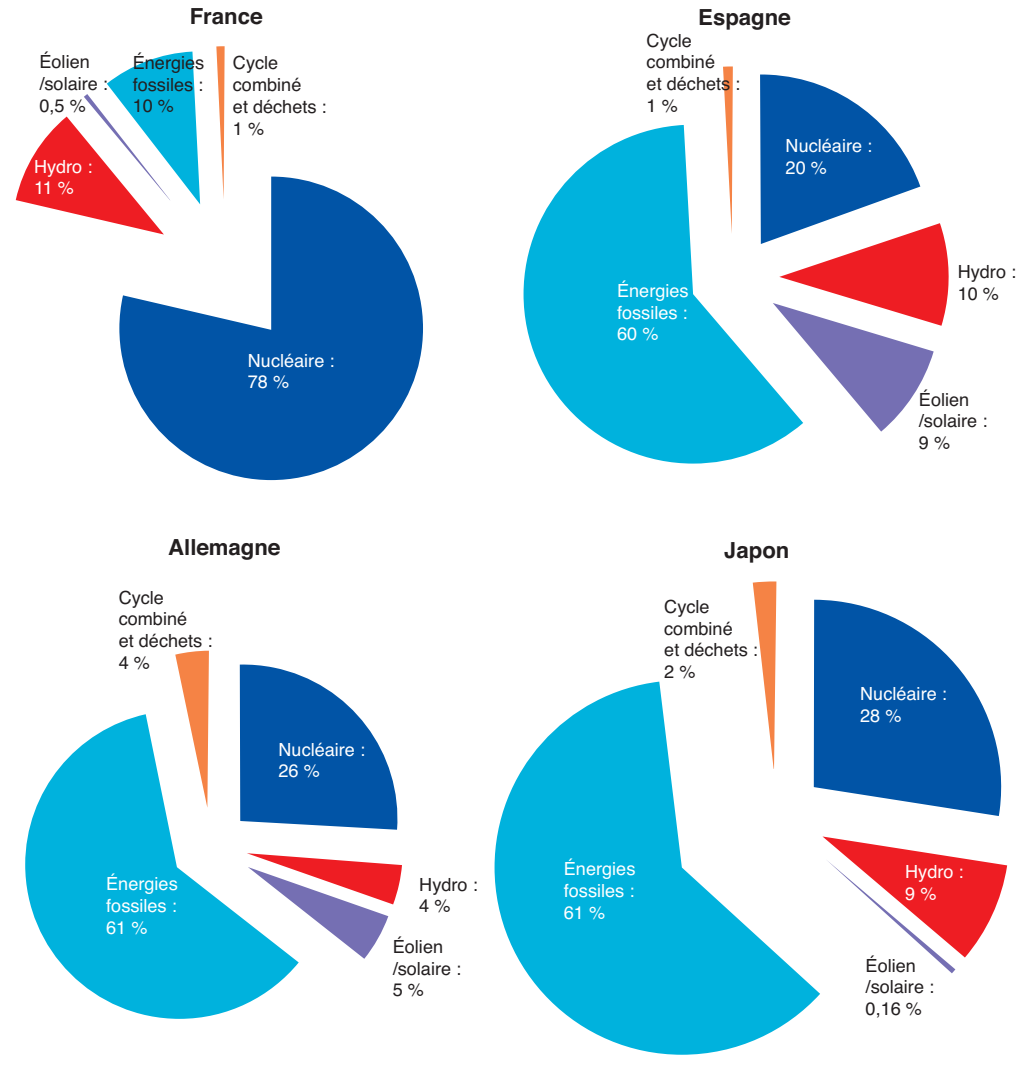
Fig. 1.5 – Bouquets énergétiques globaux et comparés, selon les données de l'IEA (2006), en gigawattheures par an.



Cet aperçu du poids relatif des acteurs nationaux à l'échelle mondiale montre l'impact de leurs choix énergétiques : en l'occurrence, les cinq pays étudiés sont avant tout tournés vers les combustibles fossiles et le nucléaire.

Les graphiques présentés dans la figure 1.6 mettent en évidence les différences substantielles des bouquets énergétiques de quatre de ces pays, qui ont pu être induites par leur propre politique.

Fig. 1.6 – Détail des bouquets énergétiques de la France, de l'Espagne, de l'Allemagne et du Japon, selon les données de l'IEA (2006).



Ainsi, en 2006, la position de l'éolien dans ces bouquets variait de l'état de traces (France, Japon) à une proportion de 5 à presque 10% (Allemagne, Espagne).

Prospectives

L'Allemagne est souvent citée en référence pour l'éolien car, avec un gisement en vent ordinaire, ce pays a réussi à atteindre 5% de production électrique. Il n'apparaît donc pas techniquement impossible d'obtenir cette proportion de 5% en moyenne mondiale – et peut-être même plus selon certains experts de la profession, par exemple ceux du GWEC (*Global Wind Energy Council*).

Mais l'industrie éolienne pourrait-elle suivre telle une montée en puissance ?

Le graphique 1.7 représente la progression des puissances installées en éolien sur les quinze dernières années. Le graphique 1.8 illustre les prévisions de l'EWEA (*European Wind Energy Association*) au niveau de l'Europe, qui n'est qu'un « petit » marché par rapport au marché potentiel mondial.

Fig. 1.7 – Progression des puissances installées en éolien sur les 15 dernières années dans le monde.

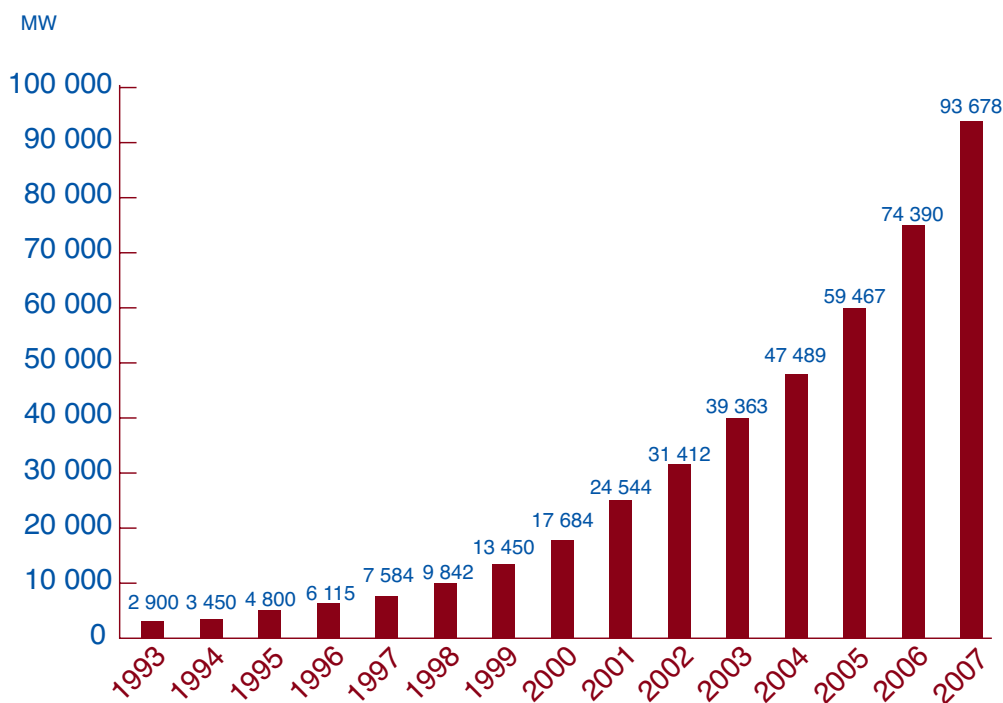
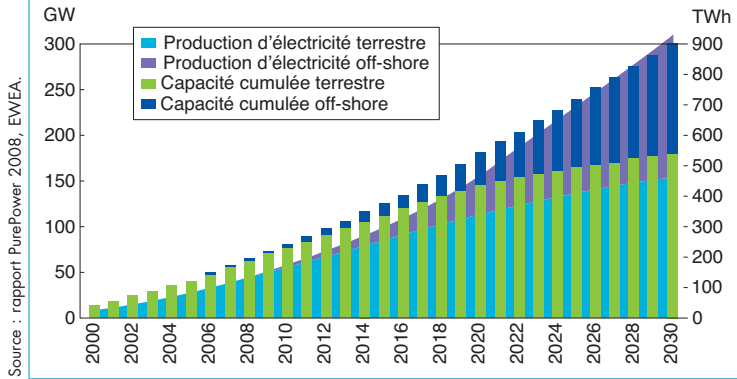
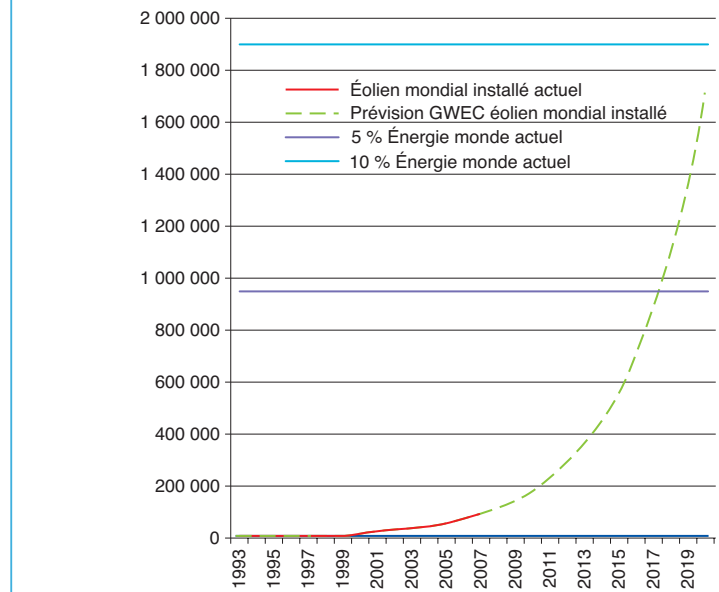


Fig. 1.8 – Prévisions des capacités installées et des productions éoliennes en Europe jusqu'à 2030.



Selon le GWEC, les industriels seront capables de mettre sur le marché mondial 172 GW avant 2010 et 240 GW avant 2014. À leurs yeux, cette puissance installée arrivera à produire 450 TWh d'électricité, et représentera déjà 3% de l'électricité mondiale en 2014, avec une croissance constante aux alentours des 25%.

Fig. 1.9 – Prospective de progression de la production éolienne mondiale par rapport à la demande électrique actuelle.



L'industrie éolienne semble donc capable de suivre, voire de mener, une progression supérieure à ce que les politiques énergétiques des différents pays pourraient viser.

Comparaison entre sources d'énergie et impact potentiel de l'éolien

Il s'agit maintenant de comparer l'éolien et les autres sources d'énergie électrique.

La liste ci-dessous donne les équivalences des 3% d'éolien de 2014, soit environ 450 TWh annuels. Les chiffres donnés représentent donc les économies réalisées pour chaque type de ressource, en ordre de grandeur :

- 600 000 millions de tonnes de fioul (rendement 40%);
- ou 900 000 millions de tonnes de charbon;
- ou 17 000 milliards de tonnes d'eau qui chutent de 100m;
- ou 12 000 tonnes d'uranium (avec la technologie actuelle, mais il y aura des progrès);
- ou un carré d'environ 150 x 150km recouvert de cellules photovoltaïques (toujours avec la technologie actuelle), ce qui représente tout de même une surface presque équivalente à la région Languedoc-Roussillon.

L'éolien ne représentera sûrement jamais, par la contrainte même de trouver du vent, une part prédominante du bouquet des sources électriques. Néanmoins, il possède des qualités non négligeables pour combattre les deux grands fléaux de notre siècle que sont la pénurie des ressources énergétiques fossiles et le changement climatique.

Une de ses qualités est le dynamisme réactif du secteur, capable de mobiliser rapidement des installations qui produisent des quantités non négligeables de kilowattheures.

De plus, l'éolien étant réapparu au même moment que la prise de conscience de la nécessité de préserver l'environnement, tous ses rouages internes intègrent les impératifs du développement durable.

Enfin, l'autonomie en matière d'éolien est totalement assurée si chaque pays veille à ce qu'un transfert de savoir-faire soit réalisé entre l'industrie locale et les fabricants de turbines ou les grands groupes énergétiques.

L'apport de l'éolien contre l'épuisement des ressources énergétiques

Comme nous l'avons vu, l'éolien est loin de représenter une part majoritaire de la production électrique actuelle. Cependant, une évidence pragmatique est à souligner : quelle que soit la quantité d'électricité produite par un parc éolien, cette production est consommée par un consommateur d'électricité.

Ce consommateur aurait-il cessé de consommer si l'électricité issue des éoliennes n'avait pas existé? Il est probable que non.

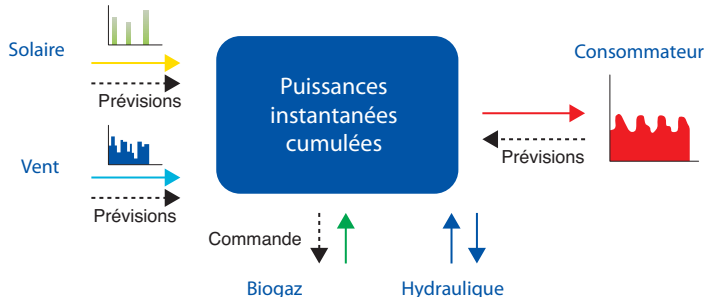
En l'absence d'éolienne, l'électricité qui aurait été consommée aurait-elle été majoritairement «renouvelable», c'est-à-dire issue «d'une source non menacée d'épuisement à l'échelle d'un siècle ou deux»? Probablement non, compte tenu de l'état actuel des bouquets énergétiques des pays.

À ce jour, aucune source n'est la panacée. Chacune d'elles peut néanmoins représenter une pièce du puzzle.

L'étude allemande *kombikraftwerk* menée par l'Institut des techniques solaires de production d'énergie (ISET) de l'université de Kassel¹

1. Source : extrait de veille technologique internationale de l'ambassade de France en Allemagne. Bulletin électronique : www.bulletins-electroniques.com/actualites/51447.htm.

Fig. 1.10 – Complémentarité instantanée des ressources électriques d'origine renouvelable – un projet pilote allemand.



Il s'agit d'un système décentralisé de production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables réparties sur l'ensemble du territoire allemand, l'objectif affiché étant de couvrir, à terme, 100% de la demande électrique nationale.

Combinant différentes technologies de production et de stockage de l'énergie à partir de sources renouvelables (éolien, solaire, hydraulique et biogaz), ce système pilote innovant, raccordé au réseau électrique en août 2007, relie et régule 36 centrales isolées. Le système est capable de fournir de l'électricité 100% renouvelable en continu, en fonction de la demande, de manière fiable et indépendante des conditions météorologiques.

Le concept consiste à combiner de manière optimale les avantages de différentes sources d'énergies renouvelables (d'où son nom de *Kombikraftwerk* ou «centrale-combi») : centrales hydro-électriques à pompe et centrales à biogaz sont utilisées pour compenser les fluctuations de l'éolien et du photovoltaïque. Le système permet par ailleurs de compenser les inégalités régionales en termes de ressources énergétiques.

Comme le souligne Frank Asbeck, président de SolarWorld, dans un communiqué : «Ce projet pilote permet de répondre aux besoins annuels en électricité d'une petite ville comme Stade qui compte 12000 foyers, soit de fournir 4,15 millions de kilowattsheures. Il montre ainsi en petit ce qui est possible en grand, une couverture totale (des besoins en électricité) grâce aux énergies renouvelables.» «Le *Kombikraftwerk* montre que les énergies renouvelables fournissent assez d'électricité, qu'elles sont régulières à tout moment, peuvent fonctionner en association et se compensent l'une l'autre via le réseau», a renchéri Ulrich Schmack, président de la société du même nom. Le système a été mis en place à la suite d'une demande de la chancellerie fédérale lors du sommet allemand de l'énergie en avril 2006.²

2. Pour plus d'informations (en allemand), consulter le site Internet du projet : www.kombikraftwerk.de.

En 2000, la consommation énergétique mondiale était d'environ une dizaine de Gtep (tep = tonne équivalent pétrole, 1 tep correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole). Les combustibles fossiles représentent environ 8 Gtep.

De très nombreux scénarii énergétiques sont élaborés chaque année par des organismes spécialisés dans le domaine de l'énergie. Ces scénarios pour la demande d'énergie en 2050 vont de 15 à 25 Gtep. Ils se basent sur différents paramètres tels que la croissance économique, l'augmentation de la population mondiale, l'accès progressif à l'électricité des 1,6 milliard de personnes qui en sont encore privés, les besoins croissants des pays en voie de développement, mais aussi la mise en place de politiques d'économies d'énergie afin de protéger

l'environnement. Les incertitudes relatives à l'évolution de ces différents paramètres expliquent l'important écart entre les scénarios extrêmes.

Des crises économiques et financières peuvent venir ralentir pendant un temps la tendance, des spéculations ou des choix politiques peuvent venir l'accélérer dans un autre sens, mais, quoi qu'il en soit, il est raisonnable de prévoir que d'ici le milieu du siècle, la demande énergétique aura doublé.

Peut-être sommes-nous aujourd'hui à la croisée des chemins où s'impose la coopération entre les capacités de production des différentes spécialités énergétiques, assortie d'une diminution massive de nos consommations outrancières.

Les grands pétroliers, l'IEA ou l'IFP, s'accordent maintenant enfin sur le fait que les ressources en pétrole, gaz et autres sources fossiles, y compris l'uranium, sont susceptibles d'atteindre le point où elles ne pourront plus satisfaire l'intégralité de la demande bien avant la fin du siècle.

Les impacts économiques, politiques et financiers sont quant à eux attendus bien avant encore, et d'aucuns voient déjà beaucoup d'évènements de l'actualité comme des impacts précurseurs de ces échéances.

Chaque État décide donc de sa stratégie énergétique en conséquence : cela peut aussi bien déboucher sur des efforts de financement de recherche pour l'efficacité énergétique, la fission nucléaire, et l'ensemble des énergies renouvelables, que sur des moyens militaires accrus pour « sécuriser » l'approvisionnement en ressources qui se raréfient.

Mais, au niveau des particuliers, chacun est aussi en droit d'établir ses propres plans d'action (et son bulletin de vote) en vue d'un « monde énergétique » plus sain et plus stable pour ses enfants.

L'éolien est alors l'une des sources d'énergie qui est à la portée de toute personne capable de comprendre les quelques rouages techniques présents dans cet ouvrage. L'une des forces de l'éolien est cette capacité de démultiplication.

Devons-nous croire que la manière de vivre de nos sociétés industrialisées, comme celle des civilisations disparues des temps anciens, porte en elle les principes de sa propre destruction ? Trop de confort étouffe, trop de facilité sclérose. Tant que les consommateurs d'électricité restent dans la bonne conscience de bâtir un monde « tout confort » pour leurs enfants, en épuisant ainsi tout espoir pour ces mêmes enfants de pouvoir entretenir ce monde, l'éolien n'y pourra certes pas grand-chose. Cependant, ce qui est « sauvé » est sauvé.

Le rôle de l'éolien contre le changement climatique

Les effets combinés de tous les gaz à effet de serre (CO_2 , méthane, ozone...) équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% du CO_2 depuis le XIX^e siècle (dont 30% rien que pour le seul CO_2).

Il a été constaté une corrélation forte entre la présence de gaz à effet de serre et la température moyenne à la surface de la Terre. Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a été créé afin de suivre le phénomène et d'en étudier les ressorts.

En effet, depuis 1860, la température moyenne a augmenté de 0,6°C. Différents scénarios prospectifs prévoient que, d'ici 2100, cette température devrait encore augmenter entre 1,5 et 6°C selon le type de scénario retenu (notamment si les filières énergétiques et les habitudes de consommation actuelles sont ou non modifiées). Cette augmentation considérable s'accompagnerait, en particulier, d'une montée du niveau des mers de 20cm à 1 m. Si l'évolution du climat apparaît irréversible, il est possible de la ralentir en diminuant de manière significative les émissions de gaz à effet de serre.

Les puits naturels de CO_2 que sont les sols, les arbres et les océans ne seraient capables de résorber qu'un peu moins de la moitié de la production de CO_2 d'origine humaine. Afin de stabiliser la concentration de CO_2 à son niveau actuel, il faudrait donc réduire immédiatement de 50 à 70% les émissions de ce gaz. Si cette réduction brutale est impossible, il est cependant urgent d'agir, car on se trouve face à un phénomène cumulatif.

En effet, la durée de vie du gaz carbonique dans l'atmosphère étant de l'ordre du siècle, il faudra plusieurs générations pour obtenir la stabilisation des concentrations de CO_2 à un niveau acceptable.

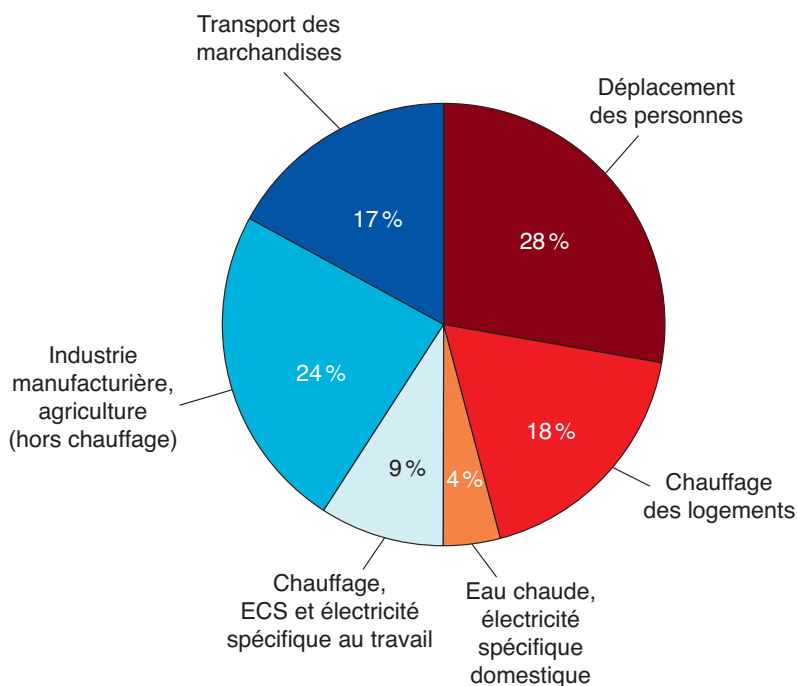
Le CO_2 est, entre autres, produit par la combustion de tous les combustibles fossiles : pétrole, gaz et charbon. Les rejets de CO_2 sont environ deux fois plus importants pour le charbon que pour le gaz naturel, ceux liés au pétrole se situant entre les deux.

Au début des années 2000, la répartition par secteur des émissions de CO_2 dans le monde était la suivante : production électrique 39%,

transport 23%, industrie 22%, résidentiel 10%, tertiaire 4% et agriculture 2%.

Cette répartition est cependant très différente d'un pays à l'autre. Par exemple, en France, où seulement un dixième de l'électricité est produit à partir de combustibles fossiles, le secteur des transports est responsable de plus de 40% du CO₂ émis dans l'atmosphère.

Fig. 1.11 – Répartition des 15,5 tonnes de CO₂ émis par ménage et par an, selon l'Ademe.



La Terre s'en sortira sûrement car c'est un système physique qui s'auto-régule. La question se pose plus au niveau des espèces, et notamment de l'espèce humaine, et de leur capacité d'adaptation dans le laps de temps requis.

En 1997, le protocole de Kyoto a fixé comme objectif de réduire de 5,2% les rejets de gaz à effet de serre du monde vers 2010 par rapport à 1990. L'Union européenne s'est engagée à une réduction de 8% de ses émissions pour 2010, et chacun de ses membres

s'est vu attribuer son propre quota de réduction de ses émissions (en tenant compte des particularités de chaque pays). Plus de la moitié des pays s'y engageaient à réduire leurs émissions (Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Italie, Luxembourg, Pays-Bas), certains pays devaient stabiliser leurs émissions (France, Finlande), tandis que d'autres sont autorisés à accroître leurs émissions (Grèce, Irlande, Portugal, Espagne, Suède).

Ainsi, pour cesser à l'horizon 2050 d'augmenter la concentration de gaz carbonique présent dans l'atmosphère, il faudrait diviser par deux les émissions actuelles au niveau planétaire, et donc les diviser par 3 à 5 dans les pays développés.

À en croire certains experts, il faudrait revenir à un mode de vie du même type que celui d'un Brésilien « moyen » aujourd'hui. Chacun peut faire son bilan carbone personnel sur le site Internet de l'Ademe... cela n'incite pas à l'optimisme.

L'éolien, comme on l'a vu, ne résout rien tout seul ; il ne peut produire une énergie constante, rien ne garantit qu'il sera là à l'instant précis où l'on en aura besoin... Mais, en termes d'impact CO_2 , ses qualités par rapport aux autres énergies sont importantes.

- En fonction de la qualité du vent du site où elle va être implantée, une éolienne compense en cinq à dix mois de service l'énergie qu'il a fallu pour la construire (usine, chantier, etc.). Peut-on trouver mieux ?
- Une éolienne a une durée de vie de 20 ans en moyenne, soit 19 ans de production totalement propre d'un point de vue CO_2 , mais aussi sans polluants autres, sans déchets, sans radioactivité, quasiment sans impact sur la nature environnante – à comparer à la grosse hydraulique, par exemple.

Même si cette source d'énergie est un peu plus chère que d'autres – et cela n'est pas toujours le cas –, cela vaut la peine d'étudier la question.

3. Extrait d'un communiqué Internet de France énergie éolienne (branche éolienne du SER, Syndicat des énergies renouvelables).

L'énergie éolienne est effectivement variable... mais pas imprévisible³

La production d'électricité par les éoliennes dépend de la force du vent à un instant donné. Elle est par conséquent variable, mais pas imprévisible. Les sites éoliens sont sélectionnés à partir d'études approfondies (habituellement après l'évaluation du potentiel éolien du site à partir de mâts de mesure de vent) permettant de déterminer les caractéristiques de la ressource éolienne disponible, notamment sa puissance potentielle ainsi que son orientation à différentes périodes de la journée et de l'année. Ceci permet d'établir des prévisions du rendement exploitable, une information qui pourra être mise à disposition des gestionnaires du réseau d'électricité.

Les prévisions de vent se sont considérablement améliorées ces dernières années, notamment grâce aux perfectionnements réalisés dans le domaine des prédictions météorologiques. Plus ces prévisions se rapprochent du temps réel, plus elles sont précises. En Allemagne, un système de gestion de la ressource éolienne, développé par l'Institut de recherche ISET, situé à Kassel, élabore des prévisions à 72 heures du niveau de production éolienne. Depuis 2001, la marge d'erreur dans les prévisions à la veille a été réduite à 6% sur la totalité du parc éolien allemand. Pour des prévisions à 2 h, cette marge d'erreur est réduite à 2,5%. (Source : *Integrating Wind Energy into Public Power Supply Systems*, German State of the Art, ISET.)

L'éolienne et le réseau

La plupart du temps, l'éolien et le réseau font même plutôt bon ménage, comme en témoigne le dernier bilan prévisionnel 2007 de RTE⁴.

Quels sont les grands messages de ce bilan prévisionnel en ce qui concerne l'éolien ?

D'une part, l'éolien est plutôt utile pour les moments de pics de consommation dus aux grands froids d'hiver, car en moyenne il y a autant de vent pendant ces périodes de froid que sur le reste de l'année (à la différence de l'hydraulique par exemple, qui voit sa production d'énergie baisser sur ces périodes).

4. Ce bilan peut être consulté à l'adresse Internet suivante : www.rte-france.com/html/fr/mediatheque/telecharge/bilan_complet_2007.pdf.

D'autre part, le foisonnement des parcs éoliens répartis sur le territoire compense globalement les variations aléatoires de production.

Une des conclusions est ainsi que l'installation d'éoliennes réduit les besoins en centrales thermiques.

Faire face aux variations de l'éolien

En France, l'équilibre instantané entre la consommation et la production est une des missions de RTE.

L'équilibrage instantané est une tâche classique de tout gestionnaire de réseau. Les industriels ici, les communes là-bas, et, pour caricaturer quelque peu le propos, tous les particuliers qui mettent en route en même temps leur four juste avant un match de football, ou bien à la mi-temps : les sursauts de consommation que les réseaux doivent absorber sont quotidiens.

Les gestionnaires de réseau ont l'expérience pour faire face à ces contraintes, et peuvent donc sans difficulté intégrer le facteur éolien. Ils demandent simplement d'être dans le circuit de décision/information des parcs et de pouvoir imposer les caractéristiques techniques qui leur sont nécessaires.

Bien sûr, plus elles deviennent nombreuses et puissantes, importantes dans la production, plus la variabilité des éoliennes demande à être étudiée de près. C'est ce que des spécialistes de plusieurs bords ont fait. En bref, ils en ont conclu qu'avec un réseau dit « interconnecté » assez large (autrement dit, avec des maillages importants qui passent les frontières, ou du moins s'étendent à un ensemble important de sites de production), statistiquement les éoliennes s'équilibrent entre elles plutôt harmonieusement.

Dans les faits, il s'agit surtout de relier des zones qui n'ont pas le même comportement en vent, c'est-à-dire où les vents dominants ne sont pas les mêmes. C'est possible en France, pays qui possède des régimes de vents variés (sud/nord, ouest/est...) et totalement décorrélés. C'est d'ailleurs aussi assez souvent le cas dès que l'on travaille sur des zones de trois à quatre pays limitrophes – mais il faut alors coopérer avec les pays voisins.

Une autre piste pour faciliter la tâche du gestionnaire de réseau est bien sûr de travailler sur la prévision météorologique. Là encore rien d'impossible, et beaucoup de choses intéressantes à étudier...

S'adapter à la production décentralisée

La plupart des réseaux mondiaux n'ont pas été conçus pour voir apparaître des points d'injection d'électricité en des zones reculées.

On trouve souvent les plus anciennes petites centrales sur les grandes urbanisations d'alors. Puis sont arrivées, par exemple en France, les centrales nucléaires, que l'on a placées avec la contrainte de trouver un cours d'eau suffisant pour le refroidissement, et, pour des raisons diverses, plutôt loin des urbanisations denses. De même, les centrales hydrauliques, telle celle de Manantali au Mali, se situent uniquement sur un grand fleuve avec un bon dénivelé.

En somme, depuis le début de la production électrique, les réseaux se sont à chaque fois construits en «suivant», d'une part, les besoins dus à la multiplication et aux mouvements des consommateurs, et, d'autre part, les contraintes de construction des centrales de production devant faire face à ces nouveaux besoins.

Même si, jusqu'à présent, le réseau a été très influencé par une structure de production très «centralisée», il a la capacité aujourd'hui de s'adapter à l'éolien, tout comme il s'est jadis adapté aux centrales à charbon, aux centrales nucléaires et aux centrales hydrauliques : c'est son rôle, techniquement parlant.

Tout est question de proportion et de planification, et il semble normal que le gestionnaire du réseau se préoccupe de ces aspects.

Notions de réseaux isolés ou interconnectés et comportement par rapport à l'éolien

On entend souvent parler d'«intégration» de l'éolien sur le réseau, ou de «taux de pénétration» admissible de l'éolien.

Dans un premier temps, il s'agit ici de bien comprendre ces notions dans le cadre de ce que l'on appelle un «réseau isolé».

Un réseau isolé est, comme son nom l'indique, un réseau «fini» par rapport au cadre de référence dans lequel on travaille. Cette définition peut paraître compliquée (en général, on parle d'«un réseau non interconnecté avec un autre réseau»), mais elle illustre le fait que tout dépend de ce que l'on doit en faire. Par exemple, un réseau insulaire ou celui d'une oasis non relié au «reste du monde» par une ligne électrique est un réseau isolé. Un tel réseau ne dépasse pas a priori le niveau de tension qui est celui de la distribution électrique aux villages ou aux villes (de l'ordre des 20kV dans la plupart des pays).

En revanche, le réseau de distribution de la métropole française par exemple s'accompagne d'un réseau dit de «transport» qui va rejoindre d'autres réseaux de distribution. On monte alors la tension de manière à pouvoir parcourir plus de distance tout en limitant les pertes énergétiques par effet Joule⁵. Parfois les réseaux de transport (225kV, 400kV, et même 1000kV au Canada, car les distances sont aussi grandioses que le paysage...) passent les frontières (entre la France et l'Allemagne, l'Espagne...), voire des bras de mer (France-Angleterre, Espagne-Maroc...). Ce sont des réseaux très interconnectés.

5. C'est-à-dire en « chauffage » de câbles

L'insertion d'éoliennes dans un réseau isolé pose des problèmes plus contraignants que dans un grand réseau continental interconnecté. Nous l'avons vu, la puissance fournie par les éoliennes est par nature aléatoire : les variations des vents se traduisent par de fortes variations de la puissance fournie. Or ces variations de puissance sont susceptibles de provoquer également des variations de tension, et ce d'autant plus que le réseau est faible. En outre, aux conditions limites, lorsque le vent dépasse une certaine valeur (différente selon le type d'éolienne), l'éolienne se déconnecte du réseau, faisant passer sa puissance injectée directement de sa puissance maximale à zéro.

Si la proportion de variation dépasse la proportion admissible «de conception» du réseau en termes de valeur autant qu'en termes de temps de réaction des appareils de coupure, le réseau isolé peut «tomber», ou du moins avoir un fonctionnement dégradé allant du simple vacillement de tension à la coupure.

C'est pourquoi on dit souvent que lorsque la part de production de l'éolien commence à devenir importante dans un réseau isolé, il est nécessaire ou bien de disposer de batteries calibrées pour les variations de l'éolien, ou bien d'augmenter la réserve disponible sur les autres moyens de production (hydrauliques ou thermiques), qui savent avoir des réactions «rapides».

Mais cette contrainte n'a plus vraiment de sens dès que l'on n'est plus en réseau isolé. La variabilité de la production éolienne est alors limitée par le foisonnement de l'ensemble des éoliennes raccordées sur le territoire. En effet, comme nous l'avons vu, dès lors que les vents ne sont pas les mêmes sur l'ensemble du territoire considéré, les éoliennes ne fonctionnent pas toutes en même temps et les variations sont fortement pondérées.

Un autre aspect souvent mis en avant est que certains types de turbines⁶ se protègent des incidents réseau en se déconnectant dans des temps courts inférieurs au «temps de réaction» des autres installations présentes sur le réseau, qui n'ont donc pas la réactivité pour compenser immédiatement cette variation. Ainsi, un court-circuit sur une ligne HTB, qui crée un creux de tension généralisé, peut provoquer un défaut qui va entraîner la

6. Voir chapitre 3, p. 98.

déconnexion brutale de l'ensemble des éoliennes de ce type présentes sur ce réseau. Il y a des moyens de pallier cette situation, mais il faut en tenir compte dès la conception du parc et du raccordement.

Ces contraintes incitent les gestionnaires de réseau isolé à limiter à environ 30% le taux instantané de pénétration d'énergie aléatoire dans l'énergie totale injectée sur le réseau. Ils vont donc limiter la puissance totale installée en éolien, par exemple, à 30% de la puissance instantanée minimale consommée sur le réseau.

Cas de l'éolien sur des réseaux interconnectés

Que deviennent ces notions de limite de la part de l'énergie éolienne dans le cadre d'un réseau interconnecté aussi immense que celui de l'UCTE?

L'UCTE, *Union for the Coordination of Transmission of Electricity*, est l'alliance des réseaux de transport d'électricité des pays interconnectés de l'Europe au sens étendu, puisqu'on y trouve aussi des liens vers la Turquie ou le Maroc. Le site Internet de l'UCTE⁷ est l'une des meilleures références qui soit pour trouver des chiffres et des statistiques intéressantes, du moins concernant l'Europe. On y retrouve les grands projets d'extension du réseau : il y a là de quoi être optimiste sur les possibilités de foisonnement à grande échelle.

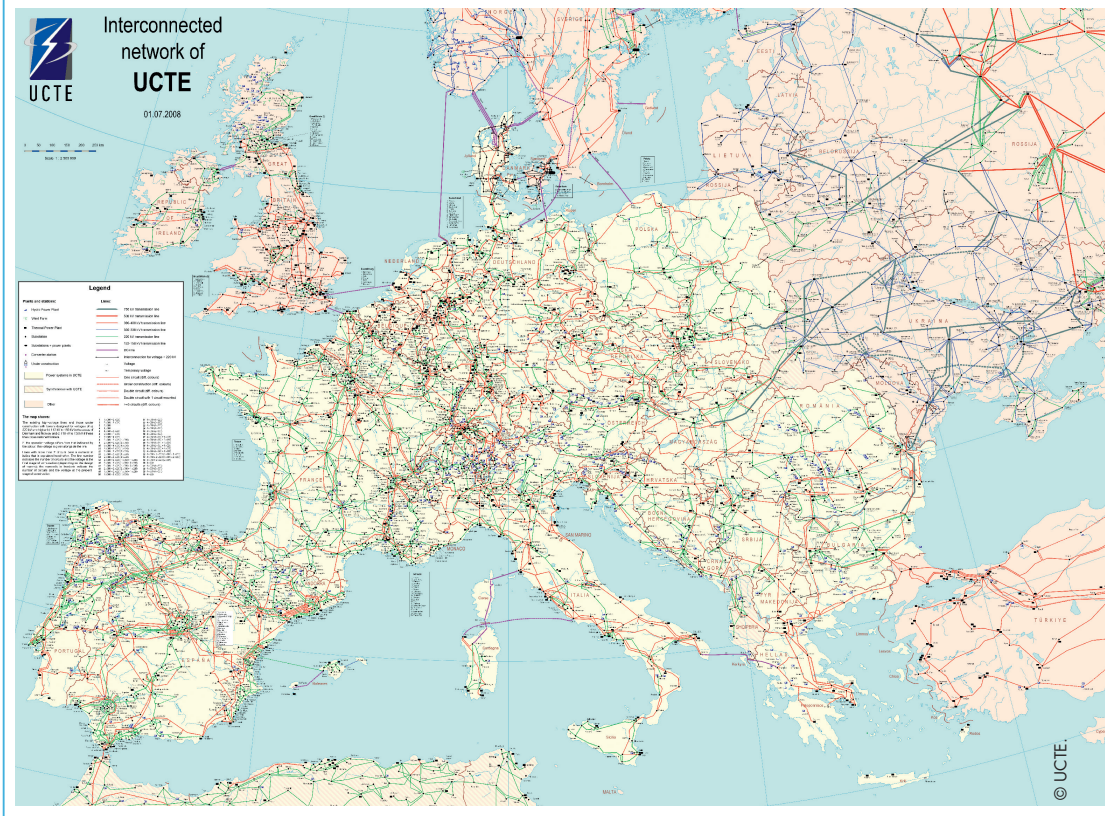
Les figures 1.12 et 1.13 illustrent ce que sont des réseaux interconnectés. La «problématique d'intégration» de l'éolien ne saurait y avoir le même sens que dans un réseau isolé. En effet, sur quelle production faudrait-il tabler la limite de 30%?

Le vent n'a pas de frontières, les réseaux tendent eux aussi à ne plus en avoir. Il ne peut donc être rationnel de raisonner de manière nationale sur une question de proportion maximale de production dite «aléatoire».

On s'aperçoit ici, avec une once de philosophie, qu'il est techniquement possible de faire beaucoup pour l'autonomie de chaque nation en matière de ressource primaire, à condition qu'ensemble elles sachent dialoguer et coopérer avec leurs voisins. Autonomes et solidaires à la fois.

7. www.ucte.org

Fig. 1.12 – Carte du réseau UCTE.



En quoi consiste l'éolien ?

L'éolien n'est peut-être pas une panacée, mais il se révèle un outil de production d'électricité propre, renouvelable et rapide à mettre en œuvre.

L'éolien a de plus la particularité d'éveiller la curiosité vis-à-vis de toutes sortes de sciences et de techniques. Les chapitres qui suivent aborderont petit à petit chacun de ces aspects, en essayant de rester le plus facile d'accès possible – sans toutefois aller jusqu'à des représentations trop simplistes, qui ont souvent tendance à dévoyer le sens profond des aspects scientifiques ou techniques abordés. Les concepts qui doivent être appréhendés le seront dans l'unique objectif d'obtenir une prévision hautement probable de l'énergie électrique qui sera injectée sur le réseau ou fournie au consommateur.

Fig. 1.14 – Schéma des principes et des secteurs scientifiques et technologiques impliqués dans l'éolien.

