

Présentation au Groupe de réflexion sur l'énergie au 21^{ème} siècle
GR 21 SFEN

Analyse détaillée de la production éolienne et son impact sur le suivi de charge et les émissions de CO₂

Compte-rendu de la présentation par Hubert FLOCARD IN2P3.

Hubert Flocard a travaillé à l'institut IN2P3 ainsi qu'à l'Institut International d'Energie Nucléaire (assistance au recrutement, et à la formation à l'étranger). Il a monté et piloté le programme PACEN (sur l'Aval du Cycle et l'Energie Nucléaire) chargé de la contribution du CNRS et du monde académique dans le cadre de la loi Bataille, puis de la loi de 2006. Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'association « Sauvons le Climat » (www.sauvonsleclimat.org) pour exploiter les données récemment publiées par RTE sur la production électrique.

Les données RTE

La présentation porte sur la production et la consommation d'électricité française continentale, et notamment de l'électricité d'origine éolienne, à partir des chiffres publiés par RTE sur la période allant d'octobre 2010 à mai 2011 ainsi que, par extrapolation, sur l'évolution de la situation au fur et à mesure qu'on augmentera la puissance éolienne raccordée au réseau jusqu'à l'objectif de 25 GW, fixé le Grenelle de l'Environnement.

En effet, depuis octobre 2010, RTE met sur son site une moisson de données sur la production d'électricité par quarts d'heure, selon son origine, 4 à 5 ans après l'Espagne et l'Allemagne. La publication très récente de ces données laisse penser que les débats et les décisions qui ont été prises lors du Grenelle l'ont été en absence de données chiffrées précises.

Un objectif important de l'étude présentée était de prévoir les gains en termes d'émissions de CO₂ qu'on peut attendre de l'introduction d'éoliennes dans le parc de production français. RTE fixe les émissions de CO₂ à 0,96 t/MWh pour le charbon, 0,36 t/MWh pour le gaz, et 0,80 t/MWh pour le fioul ;

Les informations RTE (<http://www.rte-france.com/fr/developpement-durable/maitriser-sa-consommation-electrique/eco2mix-consommation-production-et-contenu-co2-de-l-electricite-francaise>) par quarts d'heure (26208 quarts d'heure entre septembre 2010 et mai 2011) portent sur :

Des informations sur 26208 quarts d'heure concernant

- 1) la consommation électrique
- 2) les productions
 - 2.A) fossiles
 - 2.A.1) charbon
 - 2.A.2) gaz
 - 2.A.3) fioul + pointe
 - 2.B) nucléaire
 - 2.C) hydraulique*
 - 2.D) éolien
 - 2.E) « autres »**
- 3) le solde « Import – Export »
- 4) la production de « CO₂ électrique »

*La rubrique « hydraulique » ne concerne que l'hydraulique de barrage (et les STEPs ?)

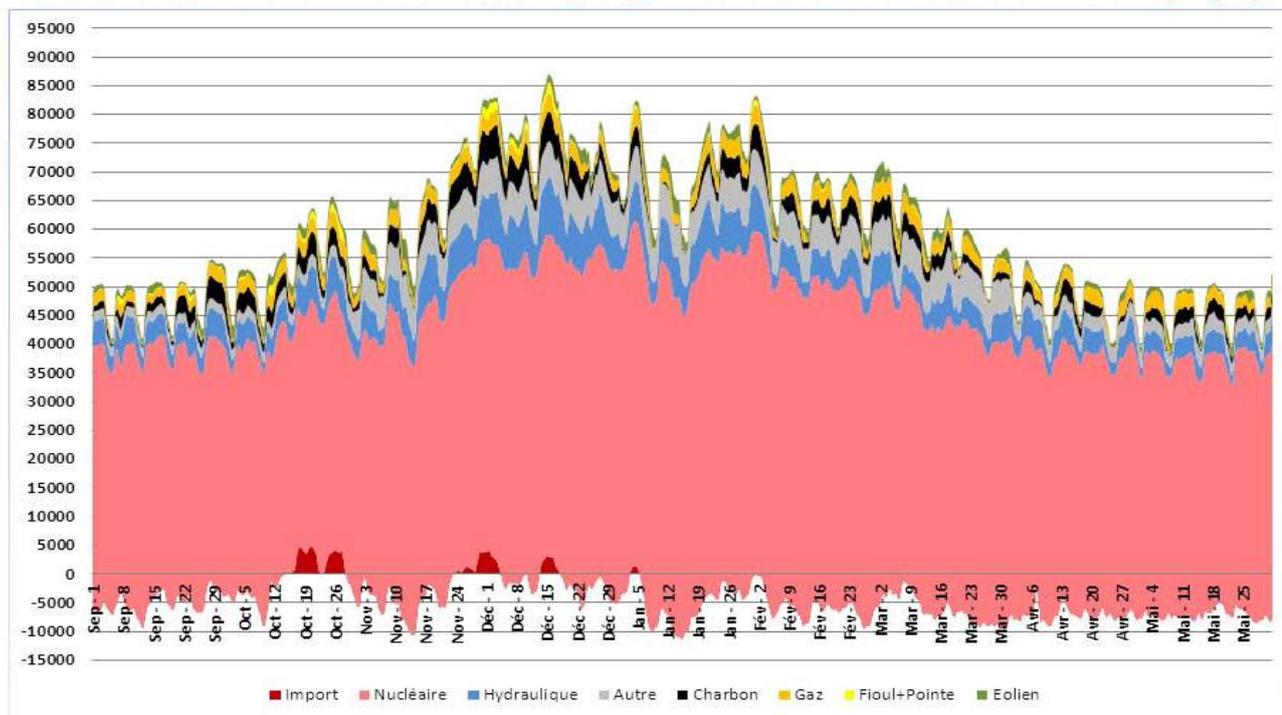
**La contribution des barrages « au fil de l'eau » est comptabilisée dans « autres »

Consommation électrique de 9 mois : 392 TWh

Charbon %	Gaz %	Fioul + Pointe %	Nucléaire %	Hydraulique %	Eolien %	« Autres » %	Consommation %	Import-Export %	Production %
3,59	3,46	0,30	83,0	8,23	2,02	6,97	100	-7,58	107,57
3,34	3,22	0,28	77,16	7,65	1,88	6,48	92,96	-7,04	100

Les données permettent de tracer le diagramme ci-dessous en moyennes journalières (les pics instantanés de puissance sont plus élevés avec un record de plus de 93 GW en décembre 2011), où les valeurs sous l'axe des abscisses correspondent aux exportations, et les valeurs en rouge vif aux importations. Les ordonnées sont graduées en MW.

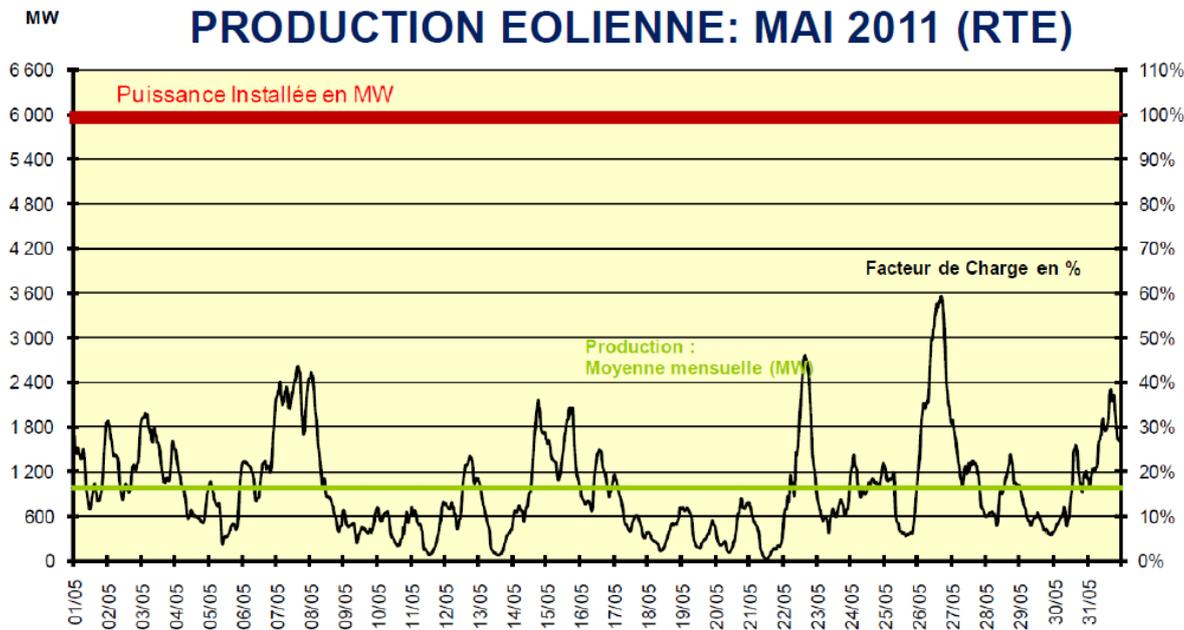
Notons que les quelque 5000 MW d'éolien fournissent la petite couche de neige verte qui couvre les sommets !



Ordonnée MW; Moyenne « glissante sur 96 quarts d'heure » (=1 jour)

Mais seul le diagramme par quarts d'heure permet d'apprécier les contraintes engendrées par la production très fluctuante de l'éolien et son impact sur les autres productions électriques. Il est donné ci-dessous pour l'éolien en mai 2011

PRODUCTION EOLIENNE: MAI 2011 (RTE)



	Production éolienne (MW)	Facteur de charge (%)	Date/ heure
valeur maximale	3 556 MW	59%	jeudi 26 à 17h
valeur moyenne	979 MW	16%	
valeur minimale	28 MW	0,5%	samedi 21 à 13h

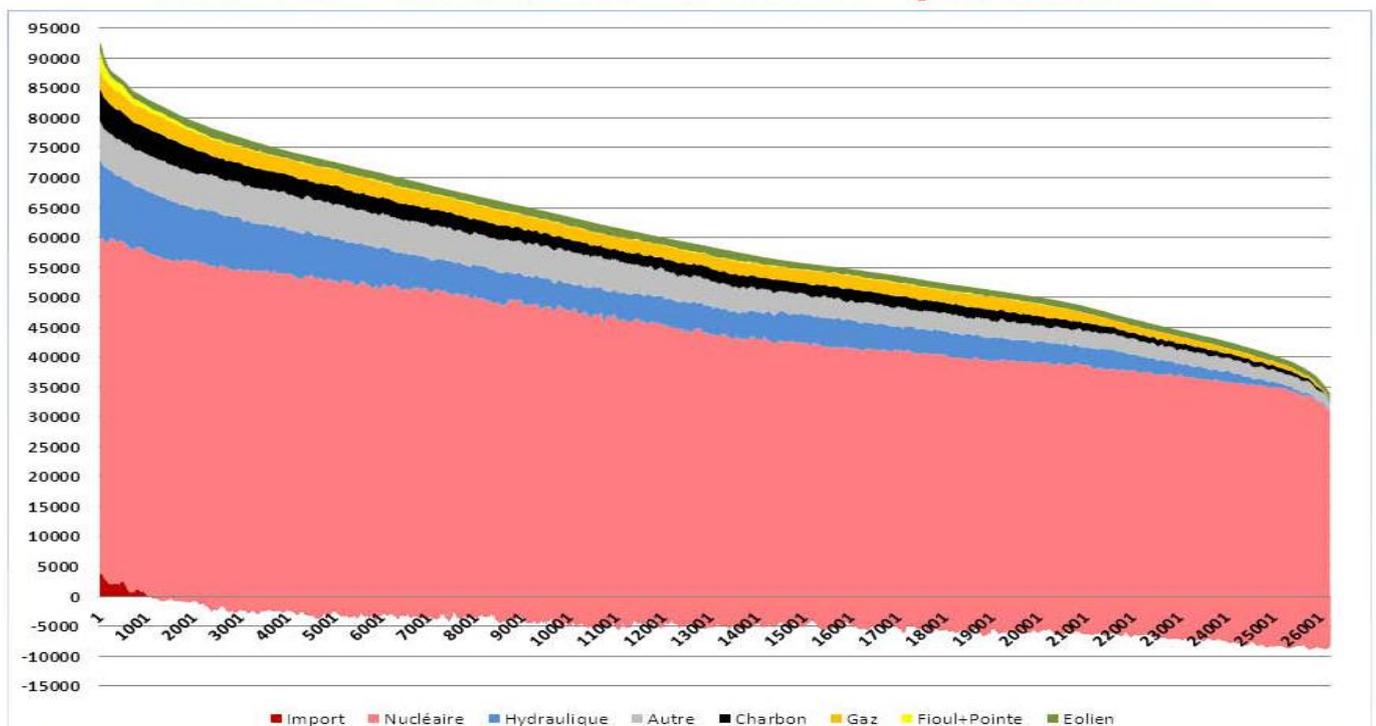
Le mois de mai a été peu productif (rendement 16% en moyenne). Le rendement moyen annuel devrait-être de 22 à 23% (à confirmer en septembre prochain après une année complète de statistiques).

Si l'énergie délivrée par l'éolien est en général plus élevée en hiver, lors des besoins les plus forts, elle est cependant très fluctuante, un même mois d'une année pouvant être différent du suivant. Les figures ci-dessus révèlent par ailleurs la possibilité de dynamiques d'évolution très importantes qui, pour 25 GW de puissance pourrait dépasser 1GW/heure

L'hydraulique des barrages de retenue est la source idéale pour faire face à ces variations de puissance. Elle est cependant limitée, et présente la caractéristique de se constituer essentiellement au printemps (fonte des neiges) et de devoir être gérée sur toute l'année.

Les « STEPs », combinant une retenue avec un lac ou un barrage à basse altitude et des capacités de pompage inverse, sont limitées. Elles sont idéales pour pomper la nuit avec des kWh nucléaires très bon marché (mais aussi un surplus éolien s'il est disponible), puis turbiner aux heures de pointe. Leur puissance actuelle est de 5GW et leur production de 6,5 TWh/an environ. La construction de nouvelles capacités serait très intéressante pour gérer le réseau mais elles se heurtent à de fortes oppositions locales. Elles sont cependant dédiées aux heures de pointes, et ne peuvent répondre aux sautes de l'éolien.

Le diagramme en monotone ci-dessous montre la bonne capacité de l'hydraulique, des fossiles et du nucléaire¹ à faire face aux augmentations de la demande. La France doit cependant importer sur une courte période de très forte demande (3 à 4% du temps sur cette période de septembre 2010 à mai 2011) mais le solde export-import est resté nettement positif.



Pendant la période de grands froids de novembre et décembre 2010, seuls 55 GW de nucléaire ont pu être sollicités, du fait d'arrêts de tranche décalés (problèmes « sociaux ») et de nombreux arrêts décennaux qui ont pesé sur les échanges.

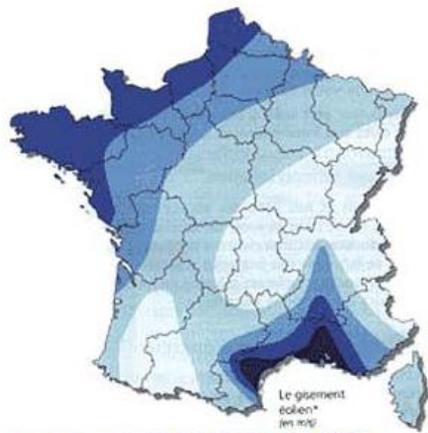
L'éolien en France continentale

Les données ci-dessous résument les principales caractéristiques géographiques de l'éolien :

¹ Le nucléaire se révèle relativement souple, notamment les réacteurs pilotés en « mode gris », pour pouvoir ajuster leur niveau de puissance

- Une puissance installée de 5,8 GW (France continentale) 1^{er} Juin 2011
- Une croissance annuelle typique de 1GW par an : 4,95GW au 1^{er} Septembre 2010.
- Une implantation géographique pour laquelle **les considérations énergétiques ne sont pas nécessairement prédominantes.**

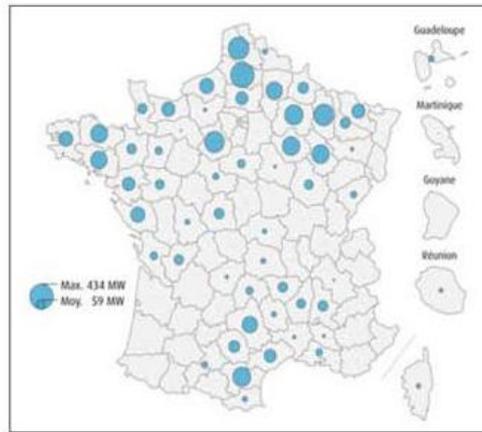
Gisement de vent (vitesses m/s)



Accroche d'enneigement, bois, banlieue	Plains, campagnes, obstacles épars	Prairies pâturées, quelques buissons	Lacs, mer	Crêtes, collines	
<3,5	<4,5	<5,0	<5,5	<7,0	Zone 1
3,5 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 7,0	7,0 - 8,5	Zone 2
4,5 - 5,0	5,5 - 6,5	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,5 - 10,0	Zone 3
5,0 - 6,0	6,5 - 7,5	7,0 - 8,5	8,0 - 9,0	10,0 - 11,5	Zone 4
>6,0	>7,5	>8,5	>9,0	>11,5	Zone 5

* Vitesse du vent à 50 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie
 ** Les zones montagneuses nécessitent une étude de gisement spécifique

Implantation éolienne 31/03/2011



Source CGDR – ERDF-RTE

Les grandes régions éoliennes françaises au 31 Mars 2011

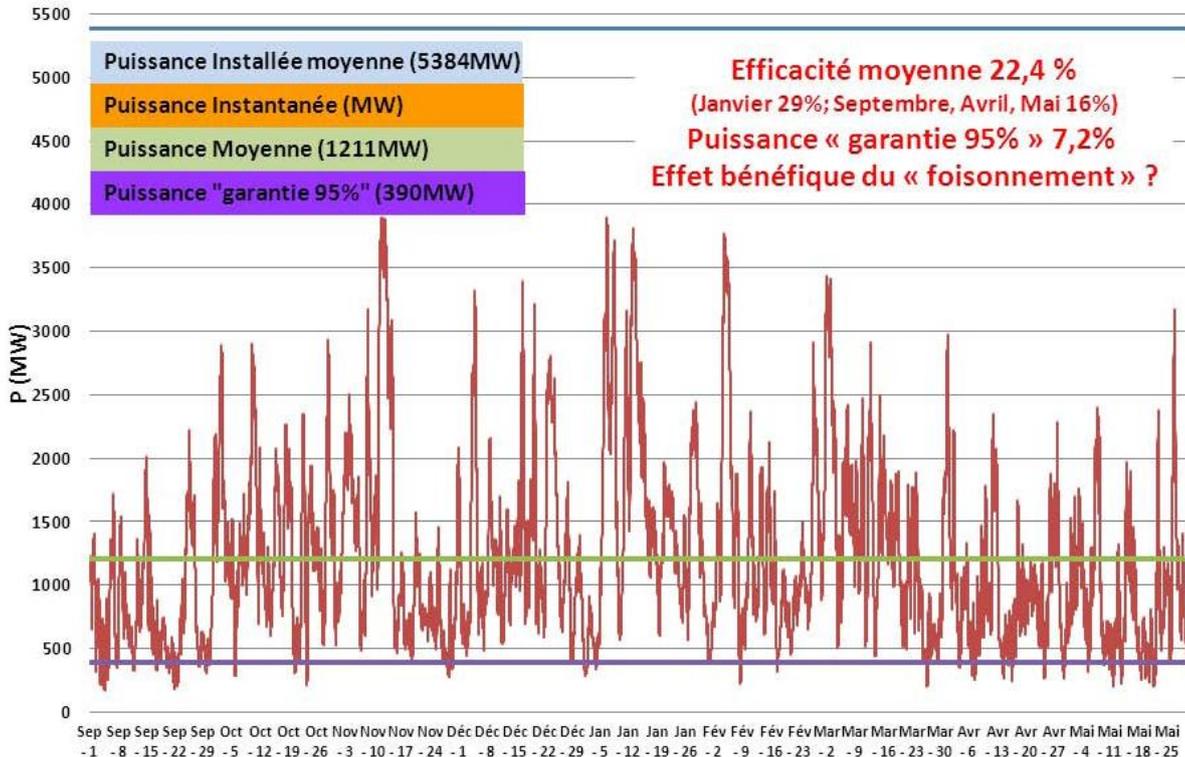
(source ADEME)

Champagne - Ardennes	744MW,
Picardie	709MW,
Bretagne	599MW,
Centre	566MW,
Lorraine	532 MW,
Languedoc – Roussillon	419MW,
Pays de Loire	392MW,
Nord - Pas de Calais	345MW,
Midi - Pyrénées	330MW,
...	
Basse Normandie	198MW,
Haute Normandie	180MW,
...	
PACA	45MW

Apparemment, on met de l'éolien où il y a de la place, et où la population ne manifeste pas trop d'opposition !

La puissance installée du parc est passée de 5 GW à 5,2 GW dans l'intervalle septembre-décembre 2010 (voir le site www.suivi-eolien.com). Elle est proche de 5,8 GW en juin 2011.

La figure ci-dessous donne la production éolienne (ligne rouge). La ligne bleue donne la puissance installée (5384 MW en moyenne). La ligne verte donne la puissance moyenne délivrée sur le réseau.



Le rendement annuel moyen du parc éolien français est de 22,5 % sur cette période. Il est comparable au rendement annuel des autres pays européens, sauf l'Allemagne et l'Italie (16 à 17%) et l'Angleterre et l'Irlande (27 à 28%). On ne constate pas un effet net de la complémentarité des trois régimes de vent dont bénéficie la France, argument souvent présenté en faveur de l'éolien français.

Les éoliennes « tournent » en moyenne 70% du temps mais, en raison d'une courbe de rendement défavorable (la puissance est fonction du cube de la vitesse du vent) leur contribution est souvent très faible. Le parc ne dépasse :

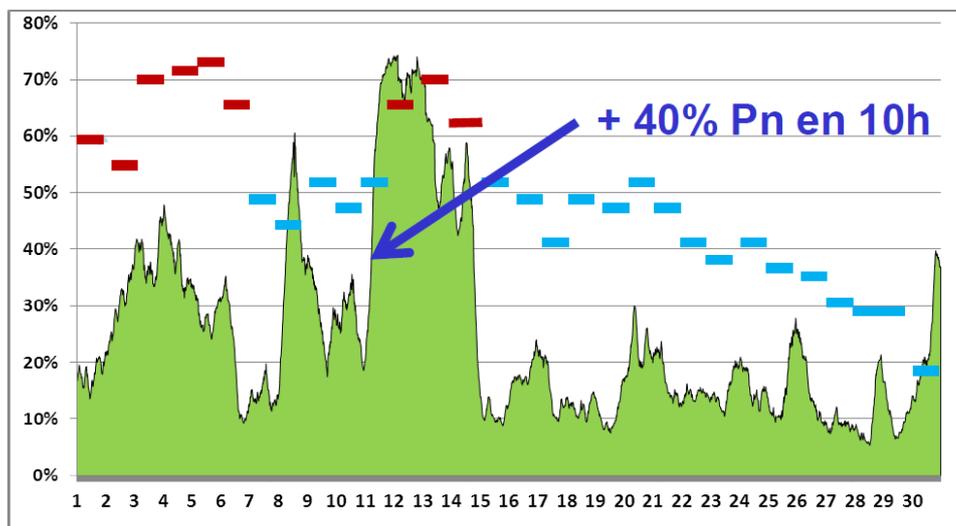
- 50% de la puissance que 20 jours équivalent environ par an

- 25% 100 jours équivalent environ par an
- 10% 220 jours équivalent environ par an
- et est quasi nulle (<10%) 140 jours équivalent environ par an

La puissance « garantie à 95% »² représente 390 MW, soit 7,2% de la puissance installée. C'est la puissance de centrales pilotables dont la construction aurait pu être épargnée par l'installation des 5,1 GW éoliens.

On observe comme partout en Europe une production moyenne plus élevée en hiver, mais la production éolienne est très généralement faible lors des grands épisodes anticycloniques (80% du temps environ), périodes qui coïncident avec des grands froids et des canicules.

NOVEMBRE 2010: période froide anticyclonique Puissance éolienne très limitée



Source: Hubert Flocard

On ne peut donc compter sur elle à ces périodes et le parc doit être dimensionné en conséquence. La courbe ci-dessus, lors des périodes froides de fin 2010 le montre et c'était également vrai en janvier 2010.

La campagne médiatique de décembre dernier du Syndicat des énergies renouvelables mettant en valeur une puissance élevée (70%) lors d'un pic de consommation doit donc être jugée en conséquence.³

Cette faible production implique une réserve de 1 à 2 GW de centrales à combustible fossile (essentiellement gaz) en stand-by, mobilisable instantanément. Mais ces centrales étant utilisées à temps partiel sont donc difficilement amortissables. Il faudra donc soit consentir des tarifs spéciaux à leurs opérateurs soit accepter des augmentations supplémentaires du tarif de l'électricité en compensation d'une augmentation réglementaire des réserves de puissances.

Si on raisonne en termes d'emplois la quasi-totalité des éoliennes de grande puissance installées en France sont importées. Des entreprises françaises sont devenues constructeurs mais ont leurs usines à l'étranger, Areva (en Allemagne) et Alstom (en Espagne). L'intérêt des industriels français pour l'éolien maritime s'explique par un effet d'aubaine, et par la possibilité de prendre en charges les plateformes en mer et les entretiens, en particulier pour nos chantiers navals.

Seul constructeur français, Vergnet, occupe une niche, celle d'éoliennes de faible et moyenne puissance (jusqu'à 1 MW) adaptées à des sites insulaires et tropicaux : « auto-montage » sans moyens de levage importants) et « effaçables » en cas de cyclones.

A quoi s'attendre avec les 25 GW éoliens du Grenelle II ?

Sur la base de ces données maintenant chiffrées officiellement, l'auteur s'est livré à une extrapolation en ajoutant GW par GW jusqu'à atteindre les 19 GW terrestres et 6 GW offshore préconisés par le Grenelle II. En effet, l'éolien étant parfaitement mature et ayant des rendements proches des rendements théoriques, les futurs GW ajoutés se comporteront de manière identique à ce qu'on constate actuellement avec les 5,3 GW en service, notamment en matière de « CO2 évité ».

Les émissions de CO2 du secteur électrique étaient en 2008 de 31 Mt soit 8,1% des émissions totales françaises (381 Mt). En procédant à l'effacement des autres moyens de production, par ordre de leurs rejets potentiels de CO2/kWh, on ne peut peser que sur ces 31 Mt et on constate, au fur et à mesure que les moyens émetteurs de CO2 s'effacent, que plus il y a de puissance éolienne, moins le gain devient important comme le montre le tableau ci-dessous

² Puissance sur laquelle on peut compter avec 95% de chances de l'obtenir

³ Syndicat des Energies Renouvelables (SER : syndicat des industriels des renouvelables).

Gain d'émission de CO2 par GW de puissance éolienne supplémentaire (6 mois de septembre à février 2011)

Puissance additionnelle GW	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Mt/ GW	1	0,85	0,78	0,7	0,64	0,58	0,5	0,43	0,38	0,32

A partir de la situation actuelle le gain de 20 GW supplémentaires devrait être limité à 12 Mt de CO2 dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire que l'effacement ne prend en compte ni optimisation économique ni capacité de suivi des variations de charge. En effet l'effacement des moyens de production devra aussi prendre en compte leur souplesse et il est peu probable que, lors d'évolutions rapides de la puissance éolienne, on puisse arrêter instantanément des centrales à charbon. C'est donc une valeur par excès.

Il faudra mettre en regard en première approximation :

- Les investissements consentis, qu'il faudra rétribuer pour 6 GW maritimes et 19 GW terrestres, soit environ 18 et 28 G€ respectivement,
- Leur production sur 25 ans soit 1100 TWh (terrestre 23% et maritime 30% de rendement) ou 8% de la production totale,
- Une économie de CO2 de 385 Gt de CO2 environ soit 70% du calcul théorique de 10 Gt pour les 5 premiers GW d'éolien + 12 pour les 20 GW additionnels

Cela se traduira par un coût d'investissement hors intérêts de 120 €/tonne de CO2 évitée, et un coût total incluant rétribution du capital et exploitation compris entre 200 et 400 € /t selon qu'il s'agira d'éolien terrestre ou maritime. Il faut noter que la tonne de CO2 sur le marché des quotas évolue entre 15 et 25 € et que les experts estiment qu'il serait souhaitable qu'il atteigne 100€ à moyen terme.

La variabilité de l'éolien oblige à l'associer, ainsi que le solaire, à des énergies pilotables que sont le charbon, le gaz ou le pétrole, ou au nucléaire. Le nucléaire produit bien sûr des déchets qui sont géré et pris en charge dans le pays producteur qui en subit seul les inconvénients. Par contre on peut rappeler que la production des centrales à combustibles fossiles profite au pays mais que ses rejets, pollution et gaz à effet de serre, se dispersent dans l'atmosphère et touchent à l'ensemble du système climatique mondial.

L'éolien apparaît donc comme un moyen coûteux et médiocrement efficace si on veut s'attaquer aux émissions de gaz à effet de serre dans notre pays, sans oublier l'impact qu'aura une obligation d'achat du MWh à 87 € (valeur 2011 d'après RTE) pour le terrestre (et probablement 200 € pour le maritime), le coût moyen de production en France ayant été de 47,5 € en 2010 (source RTE)⁴.

⁴ Cette étude ne prend évidemment pas en compte l'impact de ces milliers d'éoliennes sur le paysage terrestre et côtier, et ses conséquences économiques.