

L'effet d'une puissance éolienne sur la capacité nucléaire et sur les émissions de gaz carbonique

La contribution des éoliennes à satisfaire la demande d'électricité de pointe

Les éoliennes produisent de l'électricité sans émettre de gaz carbonique. Pourtant, programmer des éoliennes ne signifie pas nécessairement programmer moins d'émissions de gaz carbonique puisque avec l'énergie nucléaire il existe en France une autre façon de produire de l'électricité sans émettre de gaz carbonique.

Pour montrer que les choses méritent examen, il suffit d'imaginer le cas d'une consommation constante. Ou bien elle est satisfaite entièrement par une production nucléaire, ou bien, partiellement, par des éoliennes. Mais comme le vent ne souffle pas toujours, il faudra dans ce cas compléter la production éolienne, ce qui ne pourra se faire qu'avec une production à partir d'énergie fossile. Alors prévoir des éoliennes *dont il faut, coûte que coûte, injecter la production sur le réseau*, ce serait programmer une augmentation des émissions de gaz carbonique. Certes ce cas est théorique mais il montre qu'il vaut mieux entrer dans une analyse assez fine pour voir quand les éoliennes permettent – ou ne permettent pas – de diminuer les émissions et de combien.

Les calculs précis sont terriblement compliqués et demandent l'usage des ordinateurs – de sorte que l'on risque de ne pas voir quels mécanismes sont en jeu.

Dans cette note, nous proposons un raisonnement qui permet de faire des calculs *avec un crayon et du papier quadrillé* et nous avons vérifié que les résultats sont proches de ceux de calculs sophistiqués. Nous montrons dans quelles conditions les éoliennes permettent ou ne permettent pas d'éviter des émissions de gaz carbonique ; dans le premier cas, nous calculons à quel coût.

Les principaux résultats :

1- A capacité nucléaire donnée, une augmentation de la capacité éolienne diminue les émissions de gaz à effet de serre. Si les éoliennes sont sur terre, cette production deviendrait économiquement justifiée d'un point de vue économique et écologique si le coût des émissions de gaz carbonique était chiffré à **170 € par tonne de CO2 évitée**– 340 €/t CO2 évitée en France.

Explication : les éoliennes qui fonctionnent lorsque le nucléaire ne suffit pas à répondre à la demande remplacent une production d'électricité à partir de fossile ; la production des éoliennes peut aussi être exportée dans la limite des possibilités des interconnexions. Cela correspond en tout à environ 20% de la capacité nominale de production des éoliennes.

Compte tenu des délais de construction de centrale nucléaire, nous sommes tenus de raisonner à capacité nucléaire constante jusqu'en 2020 au moins.

2- Par contre, si l'on est libre de programmer la capacité de nucléaire, programmer des éoliennes ne conduit pas à diminuer les émissions de gaz carbonique. Le coût du CO2 évité par les éoliennes est donc « infini ».

Si la capacité éolienne reste inférieure à 10 GW, cette production éolienne est sans effet sur les émissions de CO2. Si elle est supérieure, cette production aura comme effet *d'augmenter* les émissions de CO2.

Nous n'avons pas tenu compte ici des fluctuations souvent rapides et peu prévisibles de la production éolienne ; celles-ci, en se combinant aux aléas de la consommation et de la production, augmentent ce que l'on appelle « la dentelle », c'est-à-dire cette partie de la demande qui ne peut être satisfaite que par des moyens de production *immédiatement mobilisables*, l'eau des barrages et les capacités des « réserves tournantes », centrales au charbon maintenues en chauffe et, pour certaines, fonctionnant au ralenti. Comme les réserves hydrauliques sont aujourd'hui pleinement utilisées, un épaissement de la « dentelle » pour cause de production éolienne augmentera la quantité de gaz carbonique émise. Selon les calculs du RTE, avec une capacité éolienne de 10 GW, pour l'équilibrage, l'augmentation de production sur énergie fossile reste limitée à 1 ou 2 % de la production des éoliennes.

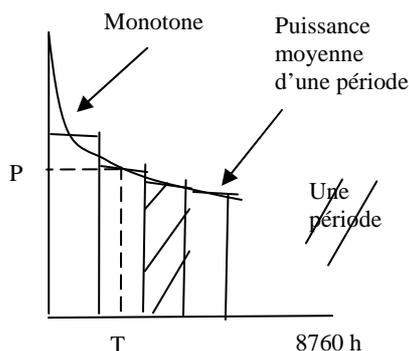
De même, nous n'avons pas tenu compte du fait que les variations journalières peuvent rendre nécessaire l'utilisation de moyens plus faciles à mettre en route que les installations nucléaires, même pour des niveaux de puissance qui sont appelés, au total sur l'année, sur une durée qui dépasse celle qui rend la production nucléaire moins chère.

Dans le cas théorique où la capacité des éoliennes est notable par rapport à la variation de consommation, lorsque la capacité nucléaire est libre programmer davantage d'éolien, c'est programmer plus d'émissions ; cette situation est commentée en annexe.

Autre résultat : une contribution à la « pointe » : les éoliennes contribuent à diminuer la capacité des autres installations de pointe à condition que la probabilité de grands froids sans vent un jour de semaine reste faible ; dans le cas contraire, la contribution des éoliennes à la capacité de pointe est nulle.

1- Courbe de consommation et courbe de consommation déduction faite de la production éolienne

La courbe de consommation est représentée par une « monotone » : on divise l'année en N périodes en affectant à chacune la puissance moyenne appelée, puis on range ces périodes par puissance décroissante. A partir de là, on construit la monotone.



La monotone de consommation est ainsi définie :

Un point dont l'abscisse est T et l'ordonnée P est sur la monotone si la puissance appelée est supérieure P pendant moins de T heures.

En général, pour chaque puissance moyenne la monotone passe par le milieu de la période, mais si les périodes ont une certaine « épaisseur » et si la courbure de la monotone est importante, comme à la pointe, la monotone se décale.

La production éolienne est aléatoire ; des études sont en cours mais faute de connaissances précises sur le sujet on supposera ici que la répartition des probabilités de puissance délivrée est indépendante de la période annuelle, donc en particulier indépendante de la consommation.

Le plus souvent, *une* éolienne tourne à la puissance nominale ou près de cette puissance, ou bien ne tourne pas, soit qu'il n'y ait pas assez de vent, soit qu'il y en ait trop¹. Mais, pour *un parc* d'éoliennes réparti sur tout le territoire français, la répartition des puissances délivrées est plus régulière. Selon les

¹ La puissance de l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

estimations actuelles, la production d'un parc en France pourrait être de 25 à 30 % de la production théorique maximale – c'est-à-dire celle qui serait délivrée si toutes les éoliennes tournaient à plein les 8760 heures de l'année. On représentera la probabilité de puissance éolienne par quelques nombres qui indiquent chacun la puissance moyenne appelée avec la même probabilité de 10 %. La méthode présentée permet aisément de faire les calculs avec d'autres puissances installées et d'autres répartitions de cette puissance.

La méthode adoptée ici pour évaluer l'effet des éoliennes sur les émissions de gaz carbonique :

1- Comme la production d'électricité éolienne doit être absorbée coûte que coûte par EDF (c'est une obligation légale), elle est comptée comme une diminution de la demande. On a donc une monotone de demande sans éoliennes et une autre déduction faite de la production des éoliennes.

2- Comparaison entre les monotones sans éoliennes et avec éoliennes.

A priori, on connaît deux points de la monotone déduction faite de la production d'éoliennes : en base, l'écart des puissances appelées est égal à la puissance maximale délivrée par les éoliennes car il se peut que le vent souffle bien quand la demande est très faible ; en extrême pointe, la puissance appelée avec éoliennes est la même que sans éoliennes car il se peut qu'il n'y ait pas de vent (ou qu'il y en ait tellement que les éoliennes se mettent en drapeau) lorsque la demande est très forte. Mais pour bien interpréter cette constatation, qui est exacte, il faut entrer précisément dans l'analyse de ce qui se passe en pointe : en réalité, comme on tolère une – très faible – probabilité de défaillance, équivalente à 3 heures par an en moyenne, même s'il est exact que la pointe extrême de la consommation déduction faite de la production éolienne est la même que sans éolienne, pour répondre à la demande « à trois heures près » la capacité des moyens de production autres que les éoliennes est inférieure lorsqu'il y a des éoliennes – voir ci-dessous au paragraphe 3.

La surface entre les deux monotones avec et sans éoliennes est égale à la production des éoliennes, elle-même fonction du taux de production des éoliennes (appliqué à la capacité maximale), que l'on supposera ici égale à 30%.

Voici une méthode très simple pour tracer une monotone déduction faite de la production éolienne – hors la pointe et la proximité immédiate de la base

Les données ci-dessous datent de 2005.

En dehors des 400 heures de pointe (il y a 8760 heures dans l'année), la monotone de consommation française est proche d'un segment de droite qui diminue de 30 GW sur l'année, qui est voisin de 37 GW en base et qui, si on le prolonge vers la gauche en oubliant l'extrême pointe, coupe l'axe des ordonnées à 67 GW. Cette puissance appelée se répartit ainsi, en GW :

Pourcentage du temps où la puissance est supérieure à	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	67	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37

Si la puissance appelée est supérieure à 58 GW 30 % du temps et à 55 GW 40 % du temps, elle est comprise entre 55 et 58 pendant 10 % du temps. Donc, pendant 10 % du temps, sa valeur moyenne est de 56,5 GW à + ou – 1,5 GW près. De même pour les autres déciles, ce qui donne le tableau suivant :

Déciles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
puissance moyenne	65,5	62,5	59,5	56,5	53,5	50,5	47,5	44,5	41,5	38,5

Supposons que la puissance éolienne installée soit telle que la répartition des puissances effectives en fonction de leur probabilité est la suivante :

Déciles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
puissance moyenne	0	1	2	2	3	3	3	4	6	8

Si la puissance installée est de 10 GW, cela donne un taux de disponibilité des éoliennes de 32 %.

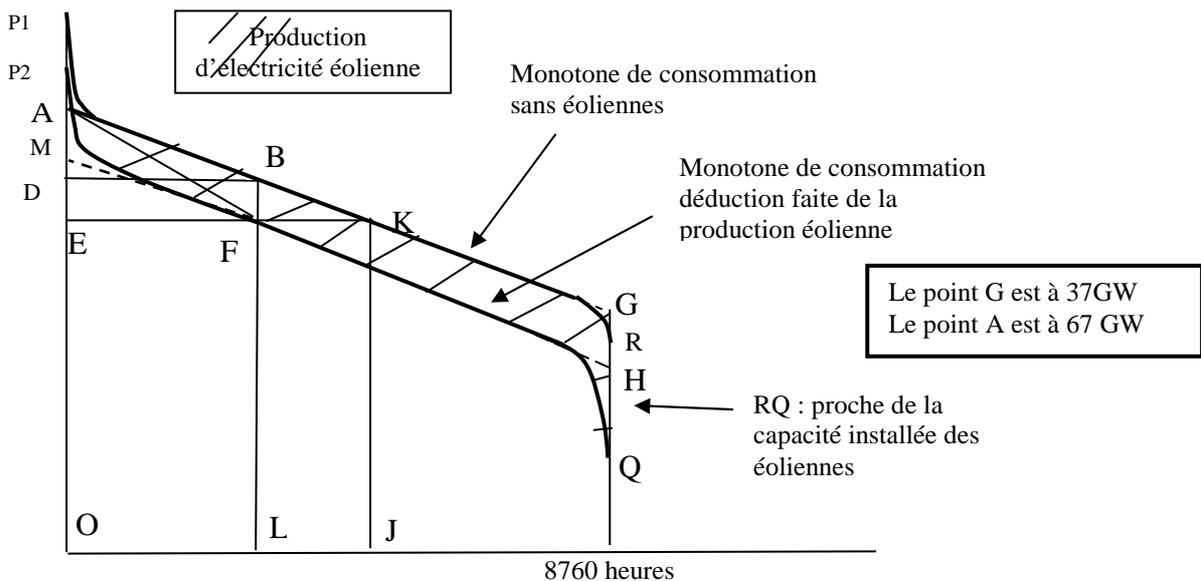
En moyenne par décile, la puissance appelée déduction faite des éoliennes va donc de 65,5GW à 30,5 GW. Il est alors assez simple de dresser la monotone de consommation déduction faite de la production éolienne.

En combinant décile par décile la consommation et la puissance délivrée par les éoliennes (que l'on soustrait à la consommation), on obtient 100 nombres de 65,5 à 30,5 séparés les un des autres par un nombre entier. Pour chaque valeur de la puissance on compte les nombres qui ont cette valeur ; on trouve alors le nombre de combinaisons « consommation-puissance éolienne » qui conduisent à la « consommation déduction faite de la puissance éolienne » qui a cette valeur. Ce nombre de combinaisons représente la durée pendant laquelle sont appelés à ce niveau de puissance les moyens de production autres que les éoliennes. On classe les niveaux de puissance par ordre décroissant en affectant à chaque niveau le nombre de combinaisons correspondant. Puis pour chaque niveau de puissance, on fait le total des nombres correspondant à ce niveau et aux niveaux supérieurs. A partir de là on peut tracer la monotone de la consommation déduction faite de la production d'éoliennes.

Ainsi le niveau de puissance 59,5 est atteint 5 fois (59,5 et 0 ; 62,5 et 3, trois fois ; et 65,5 et 6). Ce niveau et les niveaux supérieurs sont atteints, en tout, 17 fois, soit 17 % du temps. On fait ce calcul pour tous les niveaux de puissance puis, par interpolation, on dresse le tableau suivant :

Pourcentage du temps	3	10	20	30	40	50	60	70	80	90	98	100
où la puissance est supérieure à	63,5	60,5	58,2	55,2	52,2	49,2	46,2	43,3	40,2	37,2	33,5	30,5

Dans sa partie médiane, cette monotone diminue de 3 GW sur chaque tranche égale à 1/10^{ème} de l'année. **Elle est donc parallèle à la monotone de consommation.**



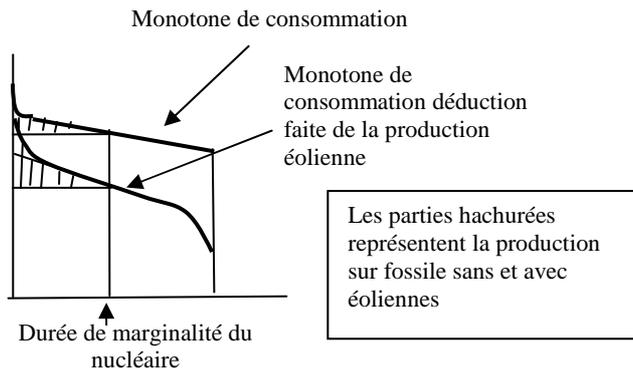
La surface hachurée est égale à la production éolienne ; dans la réalité environ 30 % de la capacité nominale.

Commentaires sur la forme de la monotone déduction faite de la production éolienne :

La forme de la monotone de consommation déduction faite de la production des éoliennes dépend, bien sûr, de la forme de la monotone de consommation. Elle dépend aussi de la puissance des éoliennes, comparée à la décroissance de la monotone de consommation.

Dans le cas présenté ci-dessus, sans tenir compte des extrémités, la décroissance de la consommation est de 30 GW sur l'année, la puissance installée des éoliennes de 10 GW. Sauf aux extrémités, la monotone déduction faite de la production des éoliennes est parallèle à la monotone de consommation.

Si la puissance éolienne installée est supérieure à la moitié de la décroissance de la monotone de consommation, la forme de la monotone déduction faite de la production éolienne est différente car disparaît sa partie centrale où elle est parallèle à la monotone de consommation. La monotone déduction faite de la production éolienne décroît alors *plus vite* que la monotone de consommation.



Même s'il s'agit d'un cas d'école, cette situation est intéressante à examiner pour mieux comprendre comment la production éolienne se combine avec les variations de la consommation.

Voir en annexe.

2- Une capacité éolienne ne permet pas toujours de diminuer les émissions de gaz carbonique

Il s'agit de programmer les moyens de production autres que les éoliennes de façon à répondre à la demande au moindre coût, sachant que la capacité éolienne est fixée pour des motifs autres qu'économiques. Compte tenu du délai important entre la décision de construire une centrale nucléaire et de la très longue durée de fonctionnement d'une centrale, **il convient de bien distinguer deux cas.**

1^{er} cas : jusqu'en 2016 la capacité nucléaire est connue et ne peut être modifiée ; à cette échéance, ce n'est donc pas un paramètre à programmer. **2^{ème} cas : au-delà**, la capacité nucléaire dépend de décisions à prendre ; c'est alors un paramètre à faire entrer dans la programmation.

1°) Comparaison entre les situations avec et sans éoliennes, la capacité nucléaire étant la même dans les deux cas

Revenons au graphique de la page précédente.

La capacité d'hydraulique au fil de l'eau et du nucléaire réunis est OE.

En ne tenant pas compte de l'extrême pointe, sans éoliennes la quantité de gaz carbonique émis est proportionnelle à la surface EAK. Avec éoliennes, elle est proportionnelle à la surface EMF.

Il y a donc une diminution des émissions de CO₂, correspondant à la production des éoliennes pendant les heures où le nucléaire ne suffit pas, sans les éoliennes, à répondre à la demande. Si, sans éoliennes, le nucléaire suffit à répondre à la demande la moitié du temps et si le taux de marche des éoliennes est de 30%, la production fossile remplacée par les éoliennes est 15 % de la capacité nominale des éoliennes.

2°) Comparaison entre deux situations avec plus ou moins d'éoliennes, la capacité nucléaire étant fixée pour minimiser les coûts de production

La capacité éolienne est fixée ; la programmation a pour objet de minimiser le coût de production des autres moyens de production ; la capacité nucléaire peut être augmentée. A chaque niveau de capacité éolienne correspond une capacité nucléaire qui minimise les coûts de production. On s'aperçoit que les quantités de gaz carbonique émises ne dépendent pas de la capacité des éoliennes.

Supposons qu'il s'agisse de se préparer à répondre à une augmentation de la demande avec une capacité imposée d'éoliennes en recherchant, pour les autres moyens de production, le parc qui permet de répondre à la demande au moindre coût.

La composition de ce parc – nucléaire, turbines à gaz à cycle combiné, turbine à combustion, autres moyens de pointe – sera calculée en fonction des coûts de production de chaque moyen. Selon les cas, on comptera seulement les coûts variables (lorsque les équipements existent déjà, les coûts variables augmentant alors avec l'âge des machines) ou, également, les coûts fixes pour les installations nouvelles. Quoi qu'il en soit, le point important ici est que ce calcul conduit à déterminer d'abord les *durées de fonctionnement* des différents modes de production, en fonction de ces coûts mais *indépendamment de la consommation*. Les capacités dépendent, elles, de la monotone de consommation, en l'absence d'éoliennes, ou de la monotone déduction faite de la production d'éoliennes.

La capacité nucléaire qui minimise les coûts est OD sans éoliennes, ou OE avec éoliennes.

Sans tenir compte de la pointe extrême, les émissions de gaz carbonique sont proportionnelles aux surfaces ADB sans éoliennes et EMF avec éoliennes.

Si la capacité éolienne est très inférieure à la décroissance de la monotone de la consommation, la plus grande partie de la monotone déduction faite des éoliennes est parallèle à la monotone de consommation. Les deux surfaces ADB et EMF sont donc égales. Les surfaces des pointes extrêmes sont très faibles et ne modifient pas le résultat.

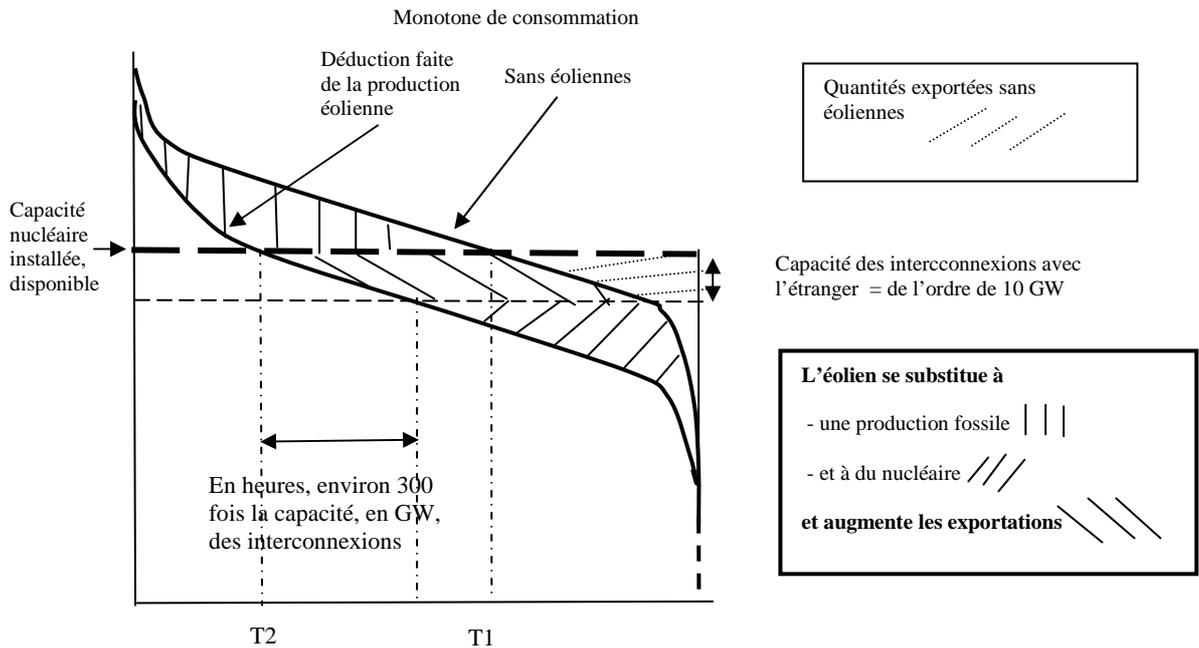
Ainsi, tant que la capacité éolienne est inférieure à 10 GW, quel qu'elle soit, si l'on cherche à minimiser les coûts de production, les émissions de gaz carbonique seront les mêmes. ***Programmer de nouvelles capacités d'éoliennes ne conduit pas à programmer une diminution des émissions de gaz carbonique.***

Cela est vrai quel que soit le coût du gaz carbonique, quels que soient les coûts fixes et variables des différents moyens de production et quel que soit l'état du parc existant.

3- A capacité nucléaire constante, à quoi se substitue la production d'éoliennes ? A quel coût ?

3.1- A quoi se substitue la production d'électricité éolienne

Sur ce graphique, pour plus de visibilité, les proportions ne reflètent pas la réalité : l'« épaisseur de la production éolienne est très grossie



Sans éoliennes,

la quantité d'électricité nucléaire produite pour la consommation nationale est la surface comprise sous la monotone sans éolienne et sous la droite représentant la capacité nucléaire

la quantité exportée est limitée par la capacité des interconnexions avec l'étranger ; on peut commodément la représenter par la surface située au-dessus de la monotone de consommation, sous la droite représentant la capacité nucléaire mais et à une distance de cette droite inférieure à la capacité des interconnexions.

la quantité d'électricité thermique et hydraulique est la surface située sous la monotone et au-dessus de la droite représentant la capacité nucléaire.

Avec les éoliennes

La production d'électricité éolienne est la surface comprise entre les deux monotones, soit 30 % de 8760 fois la puissance installée et l'on peut donc dire que cette production éolienne se substitue à du nucléaire ou à du thermique et augmente les exportations comme indiqué à droite du graphique.

Les quantités de production nucléaire pour la consommation nationale et pour l'exportation et la quantité d'énergie fossile et hydraulique se visualisent de la même façon.

La production éolienne qui remplace de l'électricité produite sur fossile est proportionnelle à la durée où le nucléaire ne suffit pas à répondre à la demande (sans tenir compte, bien sûr, des besoins en d'énergie fossile pour répondre aux nécessités de l'ajustement) ; supposons que ce soit 3000 heures. Alors, pour 1 GW installée produisant 2700 GWh, 900 GWh de production éolienne remplacent une production à partir de fossiles, un tiers de la production éolienne.

La quantité exportée est représentée dans un parallélogramme dont il est facile de calculer la surface : 300 fois la capacité d'interconnexion multiplié par 30% de la capacité éolienne installée soit 900 GWh par GW installé – un tiers également de la production éolienne.

La quantité qui remplace du nucléaire est la différence soit un tiers de la production éolienne.

Ces valeurs rejoignent bien le résultat des calculs précis.

La quantité substituée à de l'énergie fossile dépend du temps où l'électricité nucléaire ne suffit pas à répondre à la demande ; la quantité exportée dépend de la capacité des interconnexions.

3.2- En cas de diminution des émissions, le coût à la tonne évitée est très élevé

On suppose ici que la capacité nucléaire est fixée et que, pour répondre à une augmentation de la demande, la décision à prendre est d'investir plus ou moins en éoliennes et plus ou moins en installations de production à partir de gaz. La capacité des moyens de pointe reste inchangée.

En voyant à quoi se substitue la production éolienne – énergie fossile ou nucléaire -, il est possible de calculer son coût, c'est-à-dire la différence des dépenses nécessaires pour produire la même quantité d'électricité avec ou sans éoliennes. Ce coût dépend évidemment du prix des énergies fossiles. En rapportant ce coût à la quantité de gaz carbonique évitée, on mesure à quel niveau devrait être porté le coût d'usage de l'énergie fossile (c'est-à-dire la somme du prix de l'énergie et du « coût du gaz carbonique ») pour justifier l'investissement en éoliennes.

Le prix du gaz est celui qui est retenu dans l'étude « coûts de référence » de la DGEMP, c'est-à-dire les prix au début de 2004.

Le coût complet de l'éolien terrestre, fonctionnant à 25 % de sa capacité maximale nominale, est aujourd'hui de 80 €/MWh². La gestion de l'équilibre offre/demande est compliquée par l'introduction d'une production intermittente. *Tant que la capacité installée est assez faible*, la volatilité de la production éolienne se fonde assez bien dans celle de la consommation ; pour l'équilibrage, le coût des investissements complémentaires reste alors limité à 1 €/MWh. Par ailleurs, les éoliennes créent une gêne environnementale évaluée à 8 €/MWh. Le coût complet de la production éolienne est donc de 89 €/MWh.

Cette production est exportée pour un tiers à (supposons) 60 €/MWh ; pour un tiers elle remplace une production à partir de gaz dont le coût moyen complet (sans compter l'effet de serre) est de (autre hypothèse) 60 €/MWh ; pour un tiers elle remplace une production nucléaire dont elle évite seulement le coût marginal de 10 €/MWh, soit une augmentation des recettes et une diminution de dépenses qui, en moyenne, au total sont égales à 43 € par MWh produit par les éoliennes.

La différence avec le coût de la production éolienne est donc de 56 € par MWh produit par les éoliennes, soit 123 M€/an pour une capacité installée de 1 GW produisant 2200 GWh/an.

Dans cette situation où la capacité nucléaire est intangible, pour une capacité éolienne installée de 1 GW produisant 2200 GWh, la production éolienne permet d'éviter des émissions de gaz carbonique causées par la production à partir de gaz de 1450 GWh, à raison de 0,5 tonne de CO₂ par MWh, soit 725 000 tCO₂, moitié en France, moitié à l'étranger.

² Un taux de 25 % est plus proche de la réalité qu'un taux de 30 %. Le coût était estimé à 51,5 €/MWh en 2004 dans l'étude « coûts de référence » de la DGEMP qui faisait par ailleurs l'hypothèse qu'il baisse jusqu'à 43 €/MWh. En 2012, il est de 80 €/MWh.

L'éolien en mer coûte deux fois plus cher.

Les dépenses supplémentaires attachées à la production d'éoliennes sont donc de 170 €/tCO₂ (ou 622 € par tonne de carbone) évitée, moitié en France, moitié à l'étranger – soit **340 € par tonne de CO₂ évitée en France**.

Pour situer cet ordre de grandeur, rappelons que les hypothèses retenues sont en général inférieures à 100 €/tCO₂ émis dans l'atmosphère et redisons que ce calcul n'est ici possible qu'en supposant que la capacité nucléaire est fixée ; en effet si celle-ci est choisie de façon à diminuer les coûts de production d'électricité, programmer une capacité éolienne n'a aucun effet sur les émissions de gaz carbonique ; le coût implicite des émissions évitées est alors « infini ».