





# *10 questions sur l'éolien, une énergie du XXIème siècle?*

*Cette note répond au souhait du Conseil de l'Académie, de pouvoir formuler un avis sur le développement massif des équipements éoliens sur le territoire français, qui suscite dans le public de vives polémiques.*



# *Question 1 : Pourquoi une telle renaissance de l'éolien ?*

- En 1800, plus de 15.000 moulins à vent en France effectuaient des tâches mécaniques (moudre, pomper), supplantés ensuite par les machines à vapeur, puis les moteurs électriques, installables en tous lieux et indépendants du vent.
- **La renaissance de l'éolien est électrique**, par le remplacement de la meule ou de la pompe directement entraînées, par une génératrice électrique débitant sur un réseau.
- **Le taux de croissance mondial spectaculaire de l'éolien est de 25% par an.** La puissance actuellement installée est de l'ordre de 100 GW, dont les 2/3 sont en Europe.



# *Les facteurs qui ont dynamisé cette croissance spectaculaire*

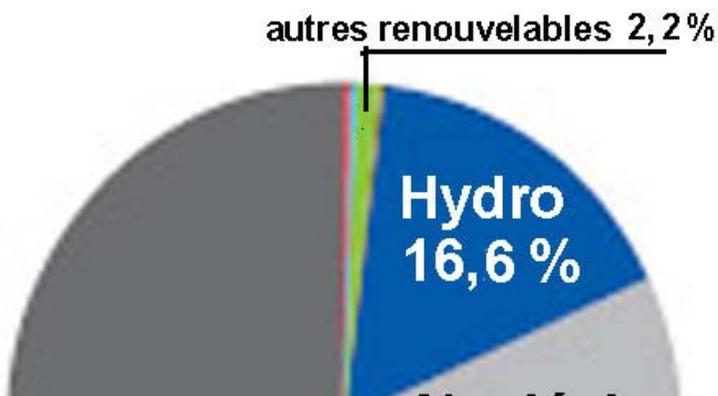
Le facteur principal est un haut niveau d'aides publiques, reposant sur quelques idées de base :

- Réduction de la dépendance des énergies fossiles importées.
- Potentiel important d'une ressource nationale.
- Energie sans émission de CO2.
- Espoir d'une compétitivité proche.
- Développement industriel créateur d'emplois.
- En Allemagne, volonté de sortir du nucléaire.

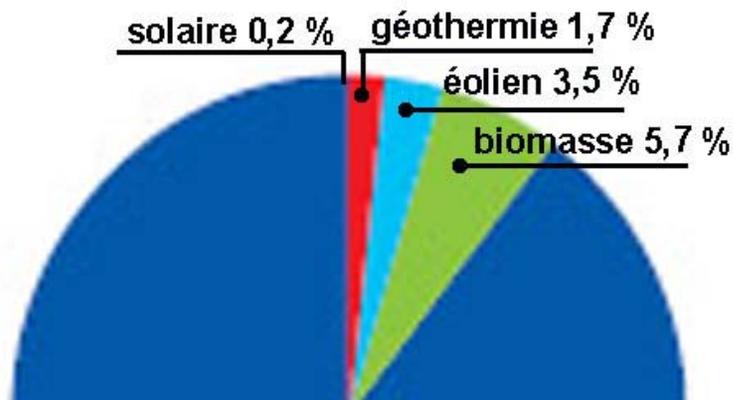


# Question 2 : Quelle est la part de l'éolien dans la production d'électricité?

PRODUCTION MONDIALE D'ELECTRICITE EN 2006



PROPORTION DE CHAQUE ENERGIE RENOUVELABLE



- Puissance éolienne installée dans le monde = ~100 GW, soit 2,5 % de la puissance électrique totale.

- Energie éolienne produite dans le monde = ~ 122 TWh soit 0,66 % de l'énergie électrique mondiale

(source OBSERVER 9ème inventaire 2007)



# *L'éolien en Europe*

## **Puissances installées et productions en 2007**

PAYS	Puissance Totale GW	Puissance Eolienne GW (fin 2007)	Energie produite en 2007 (TWh)	Energie eolienne 2007	Heures Fonction. epc <sup>1</sup>
UE 27	~630 GW	~ 57	~2250	~98	~1720
Allemagne	~120 GW	~22,2	~550	~33,5	1500*
Danemark	~20 GW	~ 3,1	~45,6	~6,1	~1950
Espagne	~52 GW	~ 15,1	~260	~28,8	~1900*
France	~112 GW	~ 2,5	~595	~4,2	~1700*



# *Que peut devenir cette part modeste dans la production d'énergie ?*

- **Parc éolien européen en 2007 : 57 GW**
- **Parc éolien européen envisagé en 2020 par EWEA\* : 180 GW**

**ce qui conduirait à une part de l'éolien dans la production électrique européenne passant d'environ 4 % actuellement, à environ 8 % en 2020.**

*\* European Wind Energy Association*



# *Question 3 : Comment se compare le coût du kWh éolien à celui des autres sources?*

Il coûte plus cher pour 2 raisons :

- C'est une énergie diluée (faible densité de l'air, comparée à l'hydraulique, exige pour 2,5 MW un diamètre de roue de 80 m contre 2 à 3 m seulement pour une turbine hydraulique)
- C'est une énergie intermittente, fortement variable avec la vitesse du vent (le cube), et limitée par fort vent, ce qui conduit à une performance en heures d'équivalent pleine charge (facteur de charge) de 15 à 35 % seulement, grevant d'autant le coût du kWh.
- Il en ressort un kWh coûtant probablement 5 à 8 c€ à terre, 13 c€ en mer à comparer à environ 3 c€ pour le nucléaire, et 4 à 5 pour le charbon et le gaz (hors taxe CO2).



# Comparaison des coûts d'investissement éolien - nucléaire

	Eolien terrestre	Nucléaire
Coût d'investissement par MW (sans actualisation)	1,2 à 1,3 M€ <sup>1</sup>	2,1 M€
Production annuelle en MWh	2000 à 2300	7000 à 7500
Investissement par MWh productible	~ 520 à 600 €	280 € à 300
Durée probable d'exploitation (ans)	25	50
Nombre de MWh fournis sur la vie	2150x25 = 53750	7250x50 = 360000
Coût de l'investissement dans le MWh (sans actualisation)	23 €/MWh	5,8 €/MWh
soit probable avec actualisation 5 %/an	~50 €/MWh	15 à 20 €/MWh
avec actualisation 8 %/an	~80 €/MWh	~ 40 €/MWh



## *Y a-t-il d'autres conséquences de l'intermittence du vent ?*

- L'éolien ne permet pas de garantir une puissance à chaque instant, ce qui est pourtant nécessaire pour une gestion sûre du réseau.
- Ne pouvant participer que faiblement à cette garantie de puissance, l'éolien ne vient qu'en complément d'autres moyens de production ayant une réserve de capacité mobilisable en l'absence de vent.
- La création de cette réserve renchérit le coût de l'éolien et atténue son caractère « vert » et renouvelable lorsque cette réserve est thermique. Ce handicap s'accroît avec la part de l'éolien dans le mix énergétique.
- Ce caractère d'énergie « fatale » participant peu à la garantie de puissance réduit la valeur du kWh éolien au coût du combustible économisé lorsque le vent souffle. S'il remplace un combustible fossile, cette valeur est de 3 à 5 c€ ; s'il remplace du nucléaire, cette valeur n'est que de 0,5 c€.



## *Question 5 : L'éolien est-il une voie prometteuse pour réduire les émissions de GES ?*

La réponse dépend du parc énergétique préexistant :

- Si l'éolien complète un parc majoritairement thermique émetteur de CO<sub>2</sub>, les kWh éoliens contribuent à réduire les émissions. C'est le cas de l'Allemagne dont le parc est à 60 % fossile.
- Si l'éolien s'insère dans un réseau à 90-95 % nucléaire et hydraulique (cas de la France), il n'y a pas d'intérêt à remplacer une énergie non émettrice de CO<sub>2</sub> par une autre plus coûteuse.
- Le caractère « vert » de l'éolien dépend donc des choix faits antérieurement à l'introduction de l'éolien (charbon ou nucléaire).
- Il en ressort que l'éolien ne constitue pas pour la France une voie prometteuse pour réduire les émissions de GES.

# *Différents moyens de réduire les émissions avec 1 milliard d'euros*

Investissement 1 G€	Puissance (MW) (Electricité produite (TWh))	Energie fossile gaz évitée (Mtep/an)	CO2 évité par rapport à fossile gaz (Mt CO2/an)
Eolien remplaçant : <ul style="list-style-type: none"><li>• des CCG</li><li>• le mix électrique français</li></ul>	800 (2,1)	0,33	0,85
	-	0,03	0,08
Isolation habitat 200   100 kWh/m <sup>2</sup> (10000 € / 100 m <sup>2</sup> )	-	~ 0,15	~ 0,4
Chauffe-eau solaire (5000 € pour 0,5 tep économisé)	-	~ 0,07	~ 0,2
Nucléaire	475 (7,5)	1,2	3,1



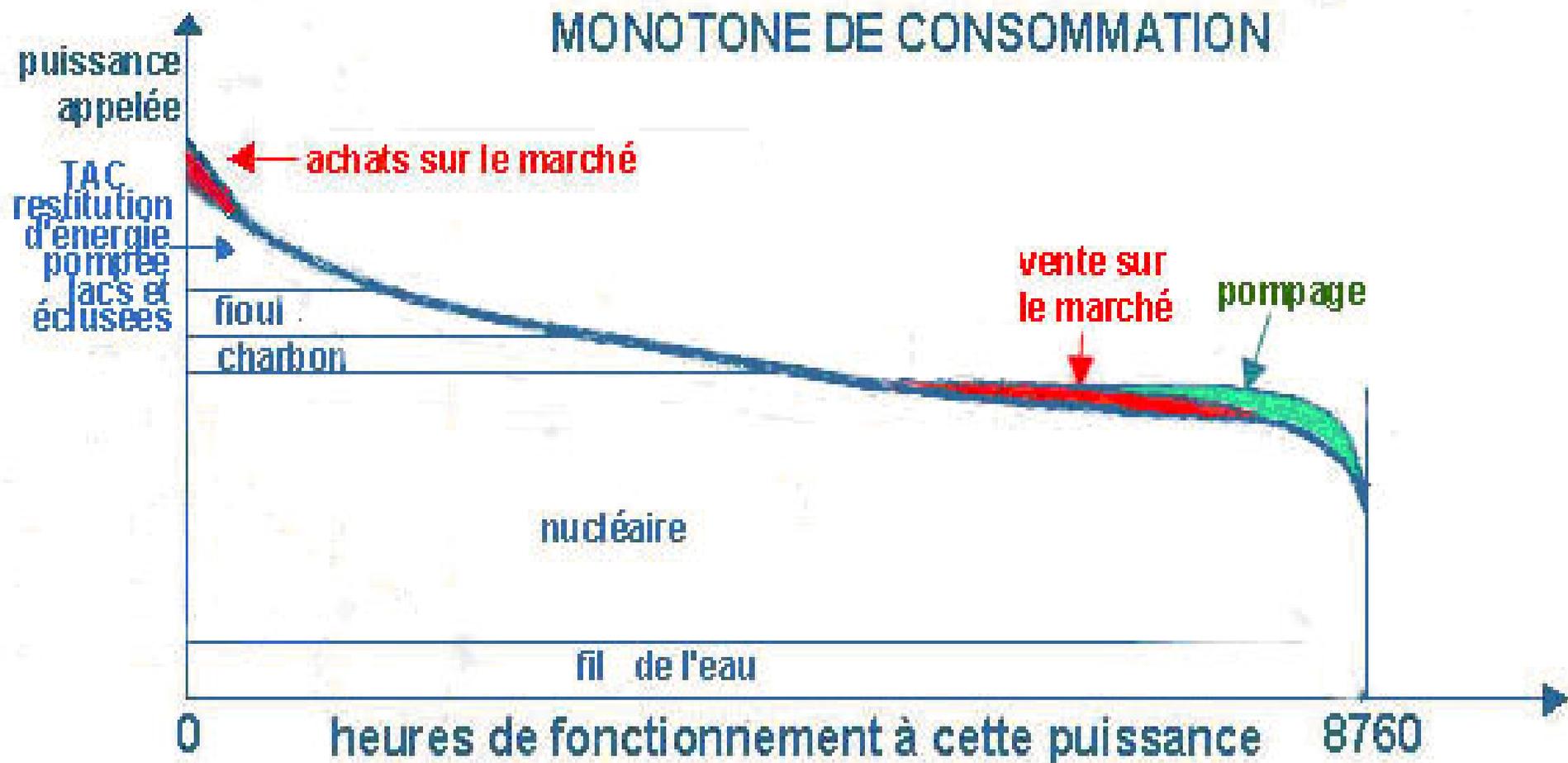
## *Soyons perfectionniste. Y a-t-il des moments où en France l'éolien peut remplacer du fossile ?*

Oui, si le vent souffle au moment de la pointe de consommation, et peut alors remplacer du thermique à flamme gardé en réserve pour ces pointes. Cela peut arriver, comme cela peut ne pas arriver.

Il faut alors regarder quelle est la probabilité d'une énergie fatale de survenir à un moment où elle peut remplacer avantageusement du fossile, ou bien à un moment où elle ne peut remplacer que du nucléaire, ce qui n'est ni économique, ni écologique.

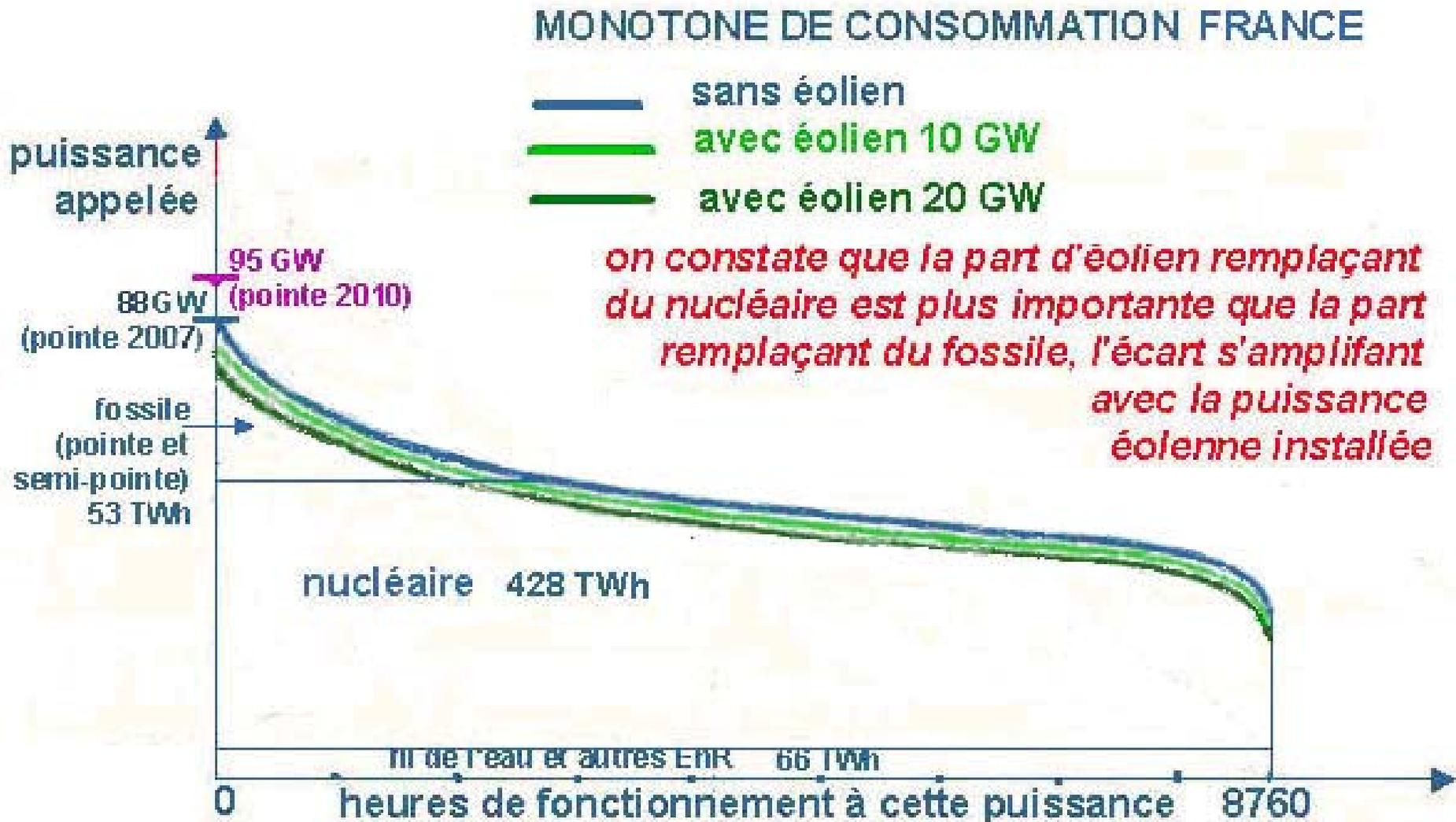


# Qu'est-ce qu'une monotone de consommation





# La monotone de consommation française





*Il semble donc infondé d'affirmer  
que l'éolien est une voie  
prometteuse pour réduire les  
émissions de CO2 en France.*

**(il y en a tellement d'autres plus avantageuses)**



## *Q 6 : Dans quels pays cette énergie croît-elle le plus vite? Potentiel de l'éolien en mer?*

- La logique : les pays dont le mix énergétique est majoritairement fossile, et où le vent souffle suffisamment (15 à 90 km/h)
- L'idéologie : l'option politique antinucléaire des « Grünen » imposée à la « grande coalition » du gouvernement allemand.
- L'éolien débitant sur réseau représente plus de 90 % du marché. Les sites isolés sans réseau ont peu de développement car ils nécessitent un stockage électrique coûteux par batteries.
- Les sites en bord de mer (ou mieux en mer) ont le vent le plus fort et le plus régulier, et permettent de grandes installations, mais ils sont en concurrence avec d'autres usage du sol, et le coût de l'éolien en mer est double de celui à terre. Des études sont en cours sur des centrales éoliennes flottantes, associées à des stockages gravitaires.



## *Q7: L'éolien a-t-il un comportement similaire aux autres sources en cas de perturbation du réseau ?*

- Non, les éoliennes utilisées jusqu'alors ont des caractéristiques aggravant les perturbations survenant sur le réseau (voir le texte pour des explications plus détaillées).
- La grande panne européenne du 4 novembre 2006 l'a mis en évidence (voir le texte et les rapports de l'UCTE et de la CRE).
- La leçon de cette panne conduit à renforcer le réseau HT et exiger une participation des éoliennes au réglage de fréquence et de tension. Ceci conduira à modifier les systèmes de protection et surtout à implanter de moyens de production de puissance réactive qui renchériront le coût de l'éolien.



## *Q8 : Quelles sont les conditions de vente du kWh éolien ?*

- La plupart des gouvernements d'Europe ont mis au point des aides diverses pour favoriser le démarrage de l'éolien.
- En France, une des formes d'aide est l'obligation faite à EDF d'acheter le kWh éolien terrestre au tarif très attractif de 8,4 c€ pendant 15 ans, et l'éolien en mer à 13,3 c€ pendant 20 ans.
- EDF est partiellement remboursé de la perte qu'il subit par cette obligation d'achat à un tarif beaucoup plus élevé que le coût de sa propre production (environ 2,7 c€/kWh), par le mécanisme de la CSPE (Contribution au Service Public de l'Electricité).



# *Qu'est-ce que la CSPE ?*

- C'est un mécanisme créé en 2000 pour concilier la dérégulation du marché et le service public de l'électricité, compensant l'écart entre le tarif réglementé du kWh (incluant des facteurs sociaux et écologiques, notamment l'achat à tarif imposé d'énergies renouvelables) et le coût moyen du kWh produit par EDF. Cet écart est payé par les consommateurs (sur leur facture).
- Plusieurs modifications récentes de ce mécanisme vont conduire à une augmentation sensible du prix de l'électricité en France :
  - réduction de l'assiette CSPE aux consommateurs individuels
  - remplacement du coût moyen du kWh EDF (~ 2,7 c€) par le prix moyen du kWh sur le marché (~ 6,8 c€) dans le calcul de l'écart, minorant fortement la compensation, amorçant un effet multiplicateur menant à une augmentation du prix de l'électricité, la CSPE risquant de passer de 0,45 c€/kWh en 2008 à 1,6 c€ en 2016 avec le développement programmé du parc éolien.



*Le commentaire de  
M. Marcel Boiteux, ancien président d'EDF*

Il ne s'agit plus d'ouvrir la concurrence  
pour faire baisser les prix, mais  
d'élever les prix pour permettre la  
concurrence !



## *Question 9 : Quel est le rôle de l'Union européenne dans l'essor éolien en France ?*

La Commission a fixé un objectif de réduction des 3 fois 20 en 2020, soit :

1. Réduction de 20 % de la consommation d'énergie.
2. Réduction de 20 % des émissions de CO2
3. Introduction de 20 % d'EnR dans la production d'énergie.

Si la division par 4 des émissions de GES en 2050 reste l'objectif principal, Il eut été plus efficace de fixer seulement l'objectif de réduction de 20 % des émissions en 2020, en laissant aux Etats le choix des moyens.

En fixant un objectif d'énergie renouvelable, la Commission montre qu'elle est trop influencée par la théorie très criticable de la troisième révolution industrielle\* de Jeremy Rifkin, son conseiller pour l'énergie.

\* Révolution basée sur trois piliers : « énergies renouvelables, stockage de l'énergie électrique par l'hydrogène, réseaux intelligents », excluant les fossiles, le nucléaire et les réseaux actuels, dont un chiffrage d'ordre de grandeur démontre l'utopie.



*Pourquoi la France accepte-t-elle de payer un tel prix, alors qu'elle dispose de moyens plus efficaces et moins coûteux pour satisfaire ses besoins en énergie et pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> ?*



## *Question 10 : Que peut-on conclure sur l'énergie éolienne ?*

1. Il ne peut y avoir de politique européenne commune de l'éolien, l'efficacité écologique dépendant du mix énergétique de chaque pays.
2. Un apport important d'énergie intermittente sur le réseau pose des problèmes qui limitent la puissance éolienne acceptable. Loin d'être une énergie décentralisée, elle demande au contraire un renforcement des réseaux de transport à haute tension, et une évolution vers des « réseaux intelligents » qui en augmenteront le coût.
3. La crédibilité de l'éolien à grande échelle passe par une réduction substantielle de son coût permettant la suppression des aides publiques, par le développement de stockages d'énergie électrique performants dans une nouvelle structure de réseaux intelligents capables de prendre en compte les spécificités actuellement gênantes de l'éolien.



## *Question 10 : Que peut-on conclure sur l'énergie éolienne ? (suite)*

- Dans les pays qui acceptent le nucléaire, l'éolien ne présente pas d'intérêt à terme. La seule justification du développement éolien actuel pourrait être qu'il est plus rapide de construire des éoliennes qu'une centrale nucléaire lorsque sa construction n'a pas été décidée à temps, mais l'extension du parc éolien aux valeurs citées dans la PPI sera coûteuse et ne constituera pas un moyen efficace pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Lorsque le coût de l'électricité d'origine fossile dépasse 5 c€/kWh hors taxe CO<sub>2</sub>, il y a place pour de l'éolien dans les pays qui refusent le nucléaire, à condition qu'il reste sous ce prix, sans subvention.
- Si les coûts de l'éolien, et les prévisions de baisse de ces coûts indiqués par l'EWEA sont crédibles, quelle est la part de rente dans les tarifs du kWh éolien, fixés pour 15 à 20 ans?



*Les questions d'intégration au paysage, de nuisances sonores, de dégâts causés par les travaux d'accès aux sites n'ont pas été abordés dans cette analyse , car ils impliquent trop d'aspects sociétaux pour partie subjectifs, mal chiffrables et toujours polémiques*















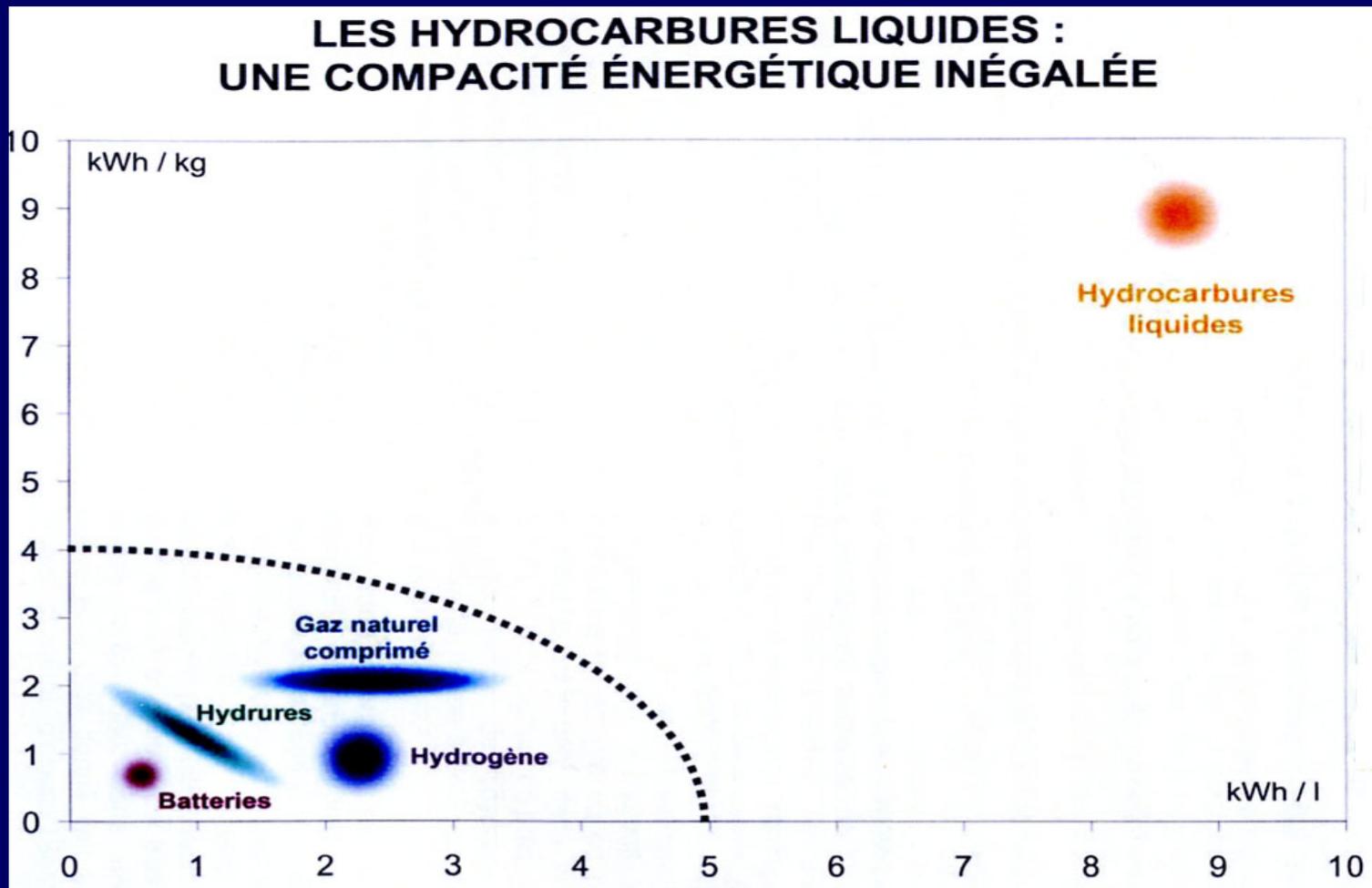
# Classement des énergies selon ces critères

	fossile ↓	RISQUE GEO POLITIQUE	renouvel. ↓	concentrée ↓	diluée ↓	risque santé ↓
avec effet de serre →	charbon (1) pétrole (0,85)	NON OUI		charbon pétrole		● charbon (1)
	gaz (0,46)	OUI	biomasse éolien solaire hydraulique géothermique	gaz	biomasse	● pétrole (0,57)
sans effet de serre →	nucléaire	NON		hydraulique nucléaire	éolien solaire géothermique	● gaz (0,24) ● nucléaire (0,04)

Source : Commission Européenne Projet ExternE



# *Le remplacement du pétrole sera très difficile*



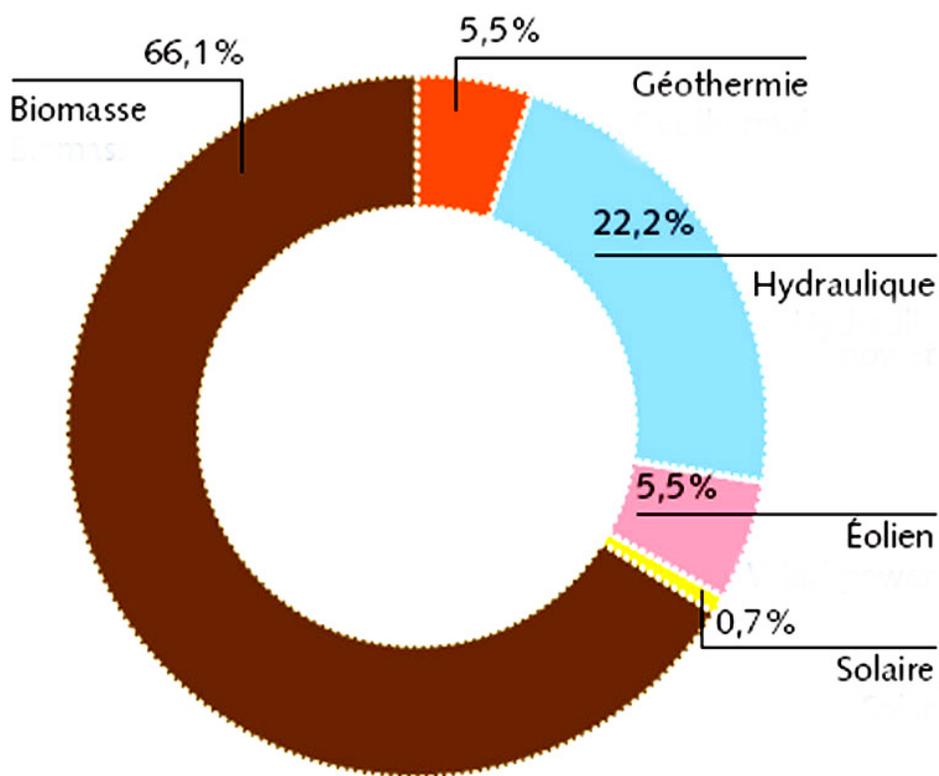
D'après P-R Bauquis



# Que pèsent chacune des EnR ? (en Europe)

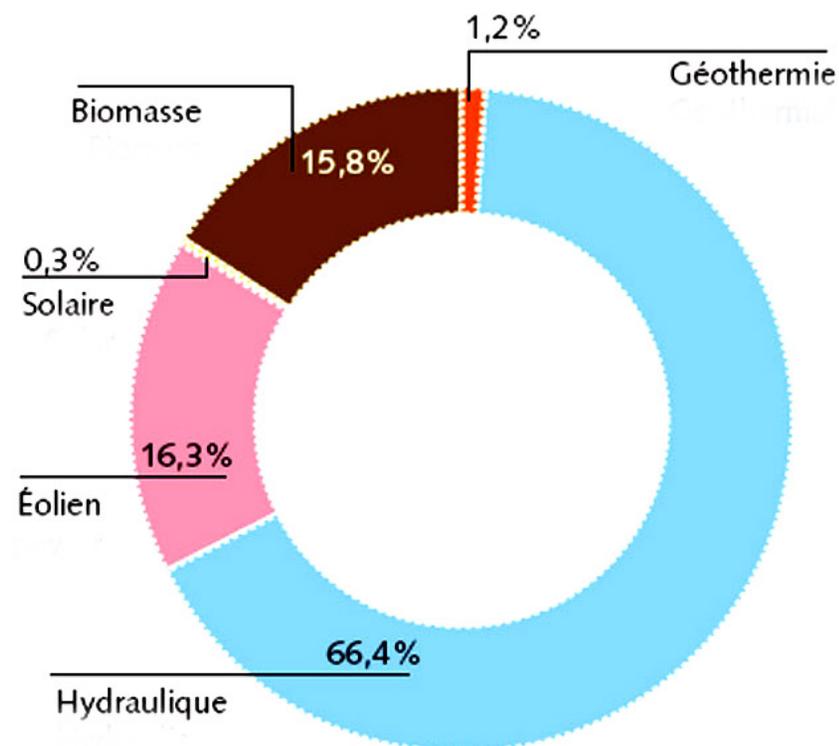
2005

Dans l'énergie primaire, en %

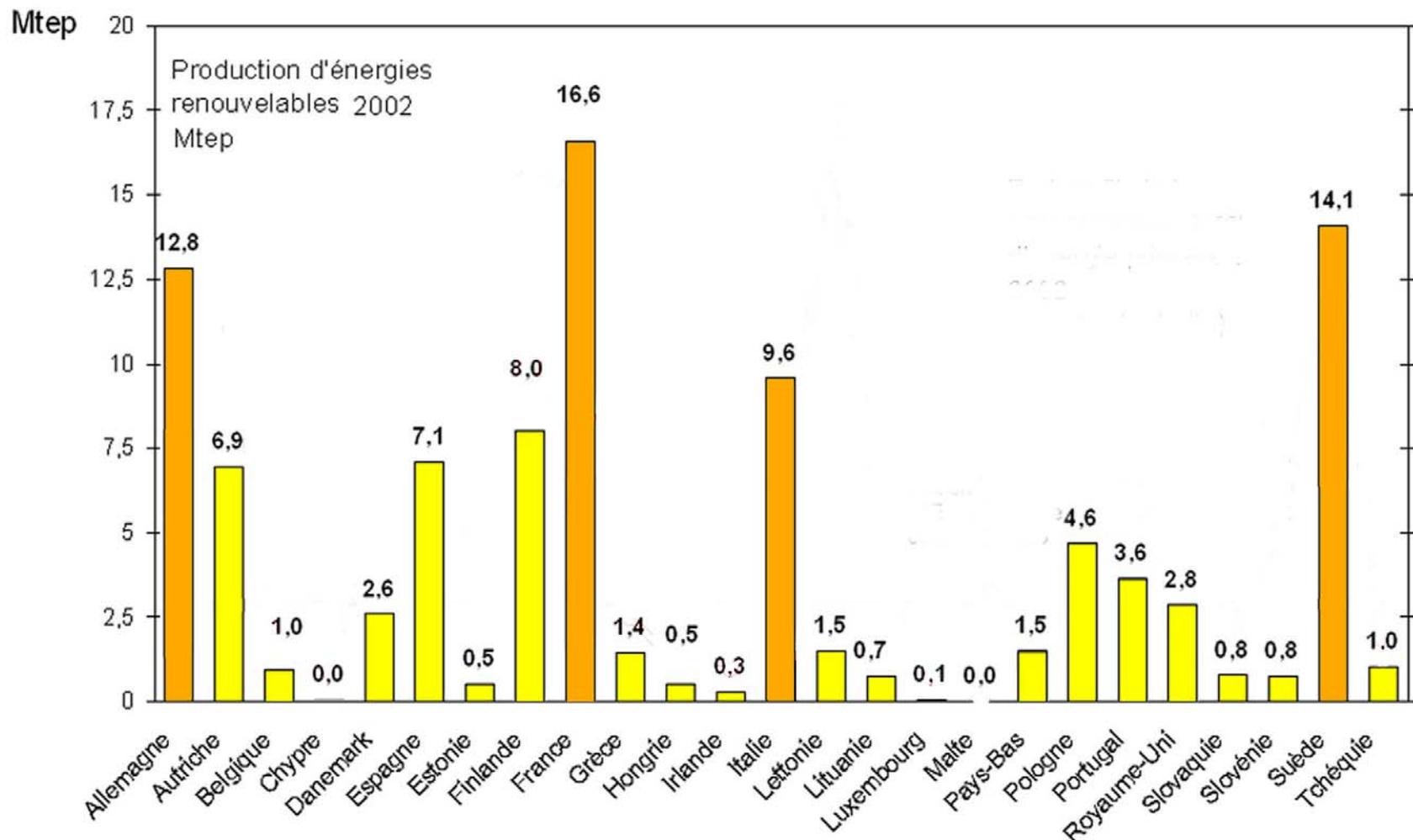


2005

Dans l'énergie électrique, en %

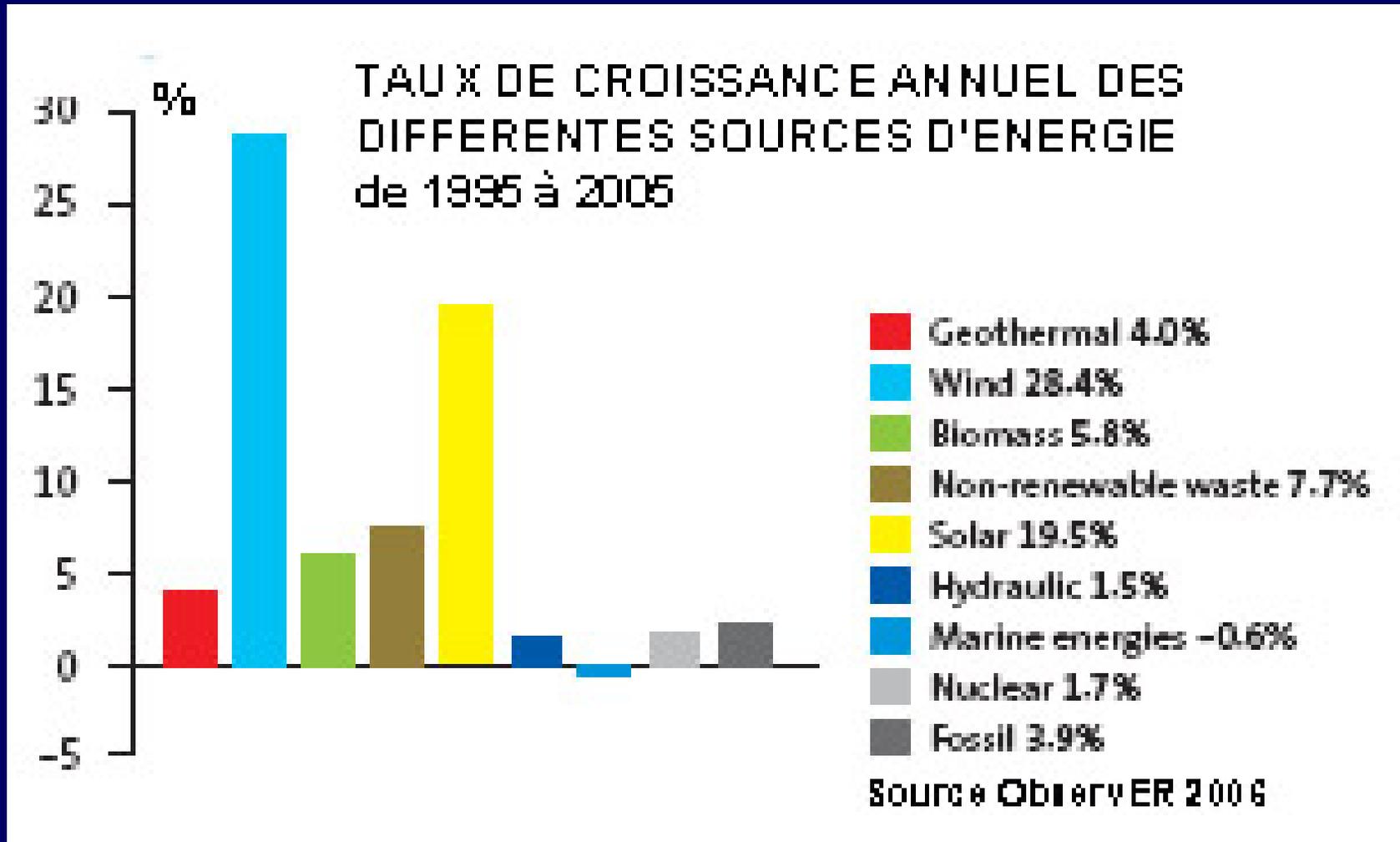


# La France est le premier pays producteur d'énergies renouvelables dans l'UE





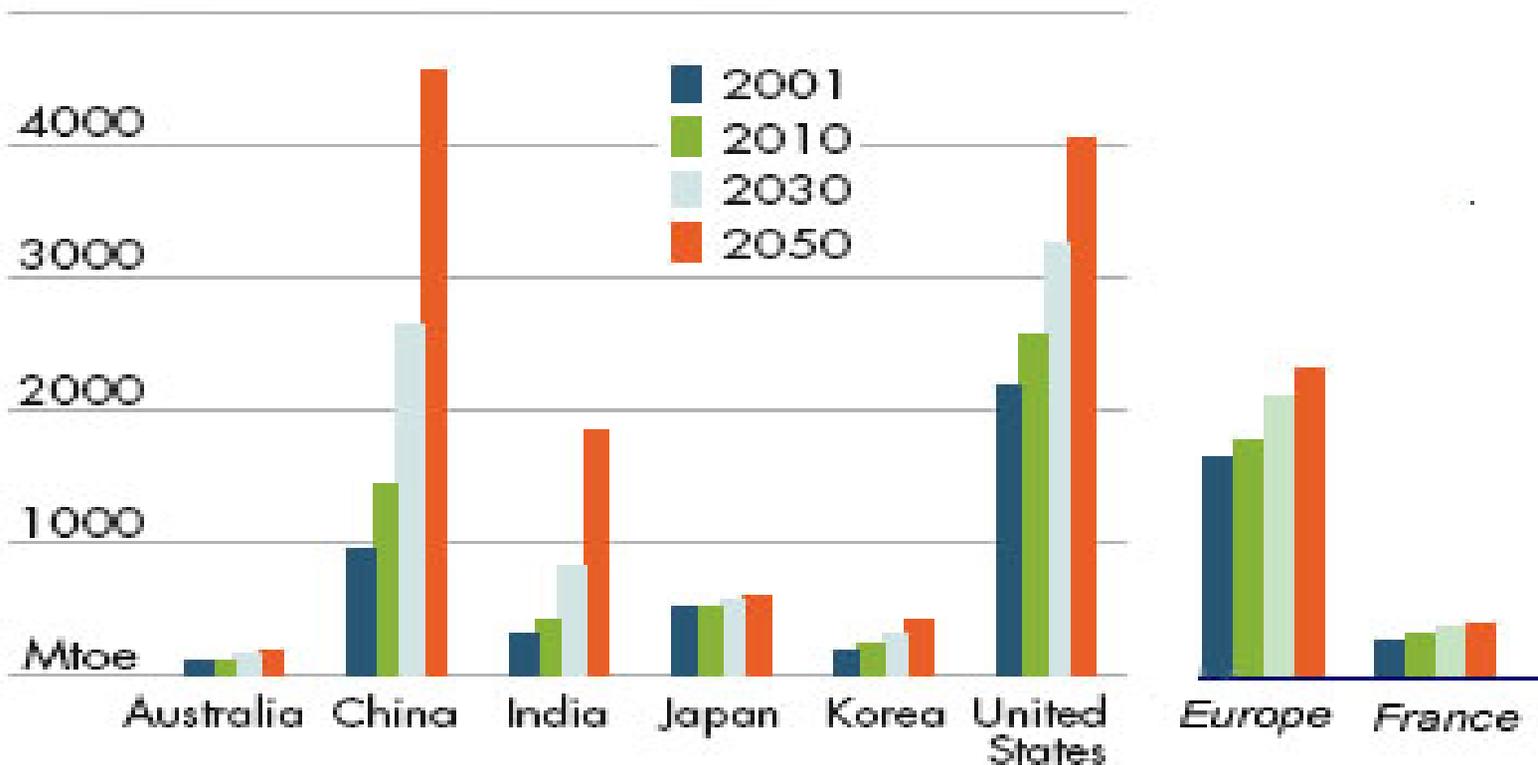
# *Leurs croissances respectives sont très inégales*





# *En 2050, les questions d'énergie vont se jouer en Asie et USA*

PREVISION DE CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE  
DES PAYS DU PARTENARIAT ASIE-PACIFIQUE  
COMPARAISON AVEC L'EUROPE ET LA FRANCE

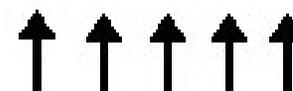


**FRANCE 275 Mtep prim.  
en 2003**

**ALLEMAGNE 347 Mtep prim.  
en 2003**

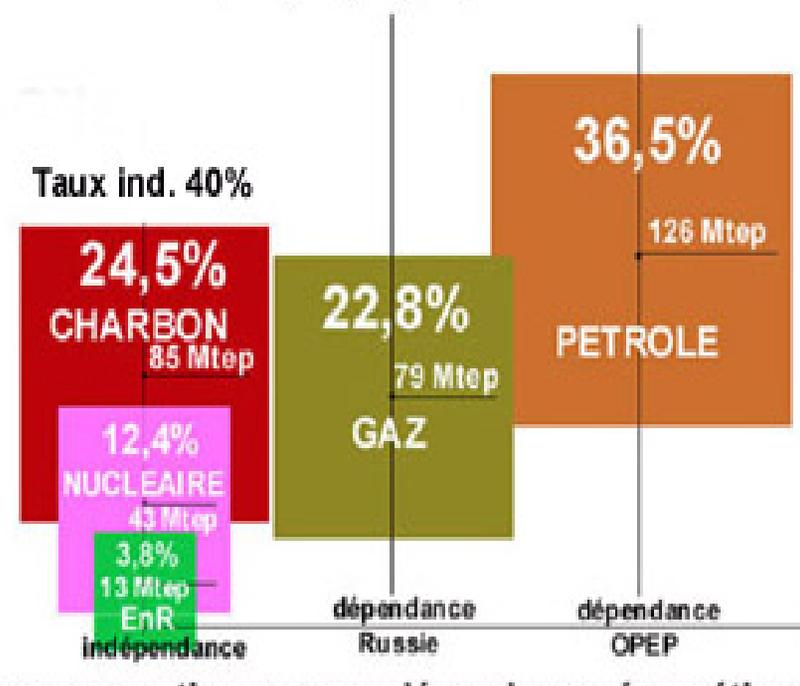
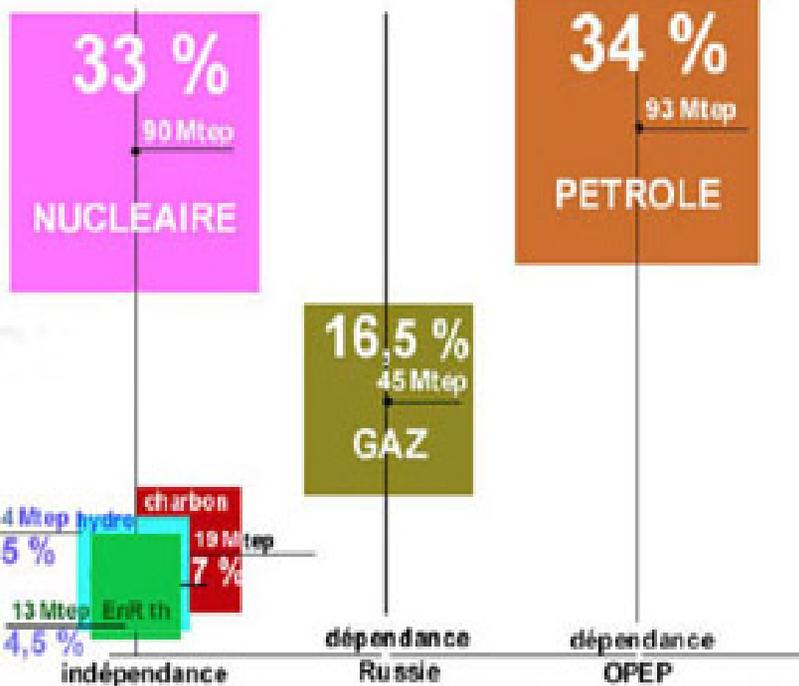
550 MT CO<sub>2</sub>

1100 Mt CO<sub>2</sub>



Taux ind. 50%

Taux ind. 40%



consommation versus dépendance énergétique

consommation versus dépendance énergétique

# WORLD ENERGY CONSUMPTION (10,2 Gtoe) VERSUS DEPENDENCE

