



Association des Retraités du Groupe CEA  
Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaire et Alternatives

Quelles énergies pour les générations  
futures : les défis à relever

## Thème 3

# Éléments de comparaison des différents modes de production d'électricité

**Gilbert BRUHL**

### Examen détaillé de quelques paramètres clés des différentes énergies :

- ▶ Coûts
- ▶ Emissions de gaz à effet de serre
- ▶ Taux de mortalité
- ▶ Rendements / Facteurs de charge
- ▶ Autres critères (emploi en France, ...)

### Fiches de synthèse GAENA sur l'énergie

- ▶ Liste des fiches
- ▶ Contenu type
- ▶ Tableau de synthèse « Avantages/Inconvénients » : éolien

### Références / Sources

# ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE

## NUCLÉAIRE



40-80 € / MWh

QUELLES DIFFÉRENCES DE COÛTS  
(Coûts complets de production)

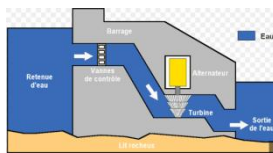
## ÉNERGIES RENOUVELABLES

### Biomasse



40-130 € / MWh

### Hydraulique



20-50 € / MWh

### Eolien terrestre



85-110 € / MWh + 220 € / MWh

### Eolien en mer

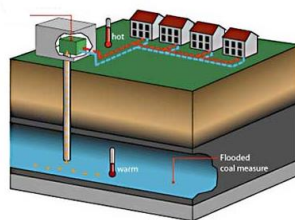


### Photovoltaïque – Thermique



De 100 (moyennes installations) à  
400 € / MWh (petites installations)

### Géothermie



20-100 € / MWh

## ÉNERGIES THERMIQUES

### Charbon



### Gaz



### Pétrole



70-120 € / MWh

Malgré leurs coûts de construction colossaux, les barrages, une fois en place, présentent très peu de frais de fonctionnement et de maintenance.

A l'heure actuelle, l'éolien terrestre est l'énergie renouvelable (hors hydraulique) la plus compétitive. Des travaux d'innovation et de développement industriels sont en cours pour rendre les autres énergies renouvelables économiquement abordables.

Pour les nouveaux projets (charbon supercritique, cycle combiné gaz)

## CRITÈRES D'ÉVALUATION DES COÛTS

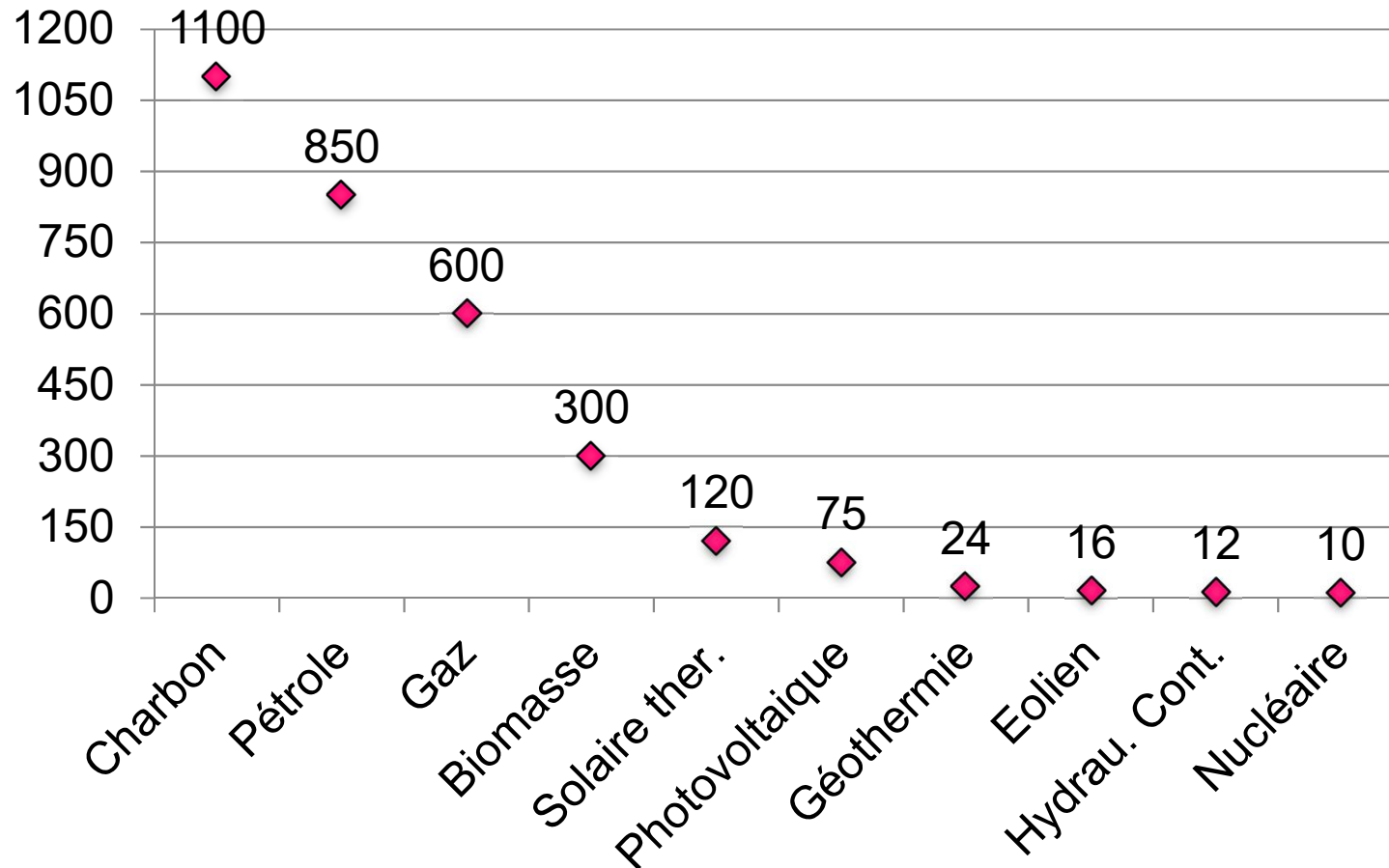
Les coûts sont évalués en prenant en compte :

- ♣ L'ensemble du cycle de vie, dit **ACV** (matière première, fabrication des composants, construction, exploitation, démantèlement, déchets, ...).
- ♣ Les **coûts externes** ou coûts des dommages environnementaux causés par la pollution liée à la source d'énergie.
- ♣ Cas particulier des **énergies aléatoires et intermittentes** : leurs coûts réels doivent intégrer d'autres paramètres
  - coût des énergies de secours (3 à 25 €/MWh)
  - coût du raccordement et renforcement réseau (2 et 13 €/MWh)
  - charges fixes des moyens centralisés venant pallier ces aléas et intermittences lorsqu'elles ne fonctionnent pas à pleine capacité (1 à 2 €/MWh)
  - prix du carbone émis par ces énergies de substitution (5 €/tonne de CO<sub>2</sub>)

A titre d'exemple, si l'on veut garantir 1 MW sur 8 000 heures en y adjoignant 1 MW de cycle combiné à gaz pour avoir 1 MW garanti, cela augmenterait les coûts de ces énergies intermittentes ou aléatoires d'un facteur 1,5 à 2. Ces chiffres coupent court au débat sur la parité réseau qui n'a pas de sens puisque la seule comparaison valable concerne le coût de production du MWh garanti.

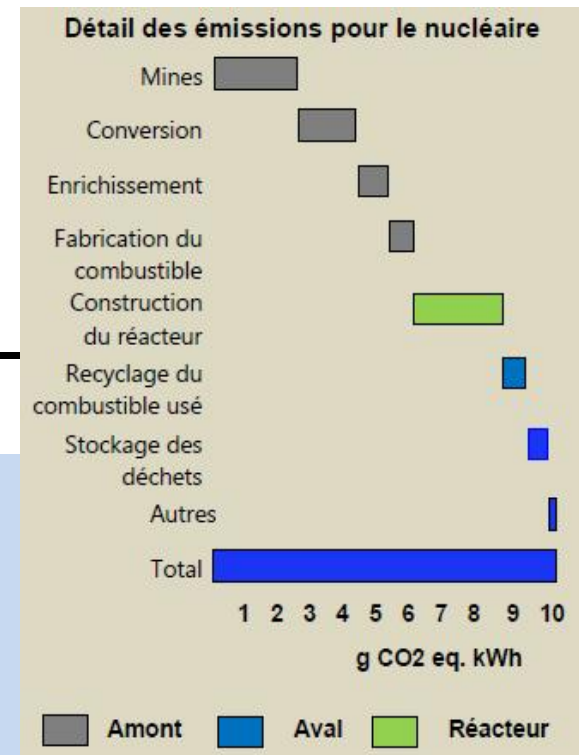
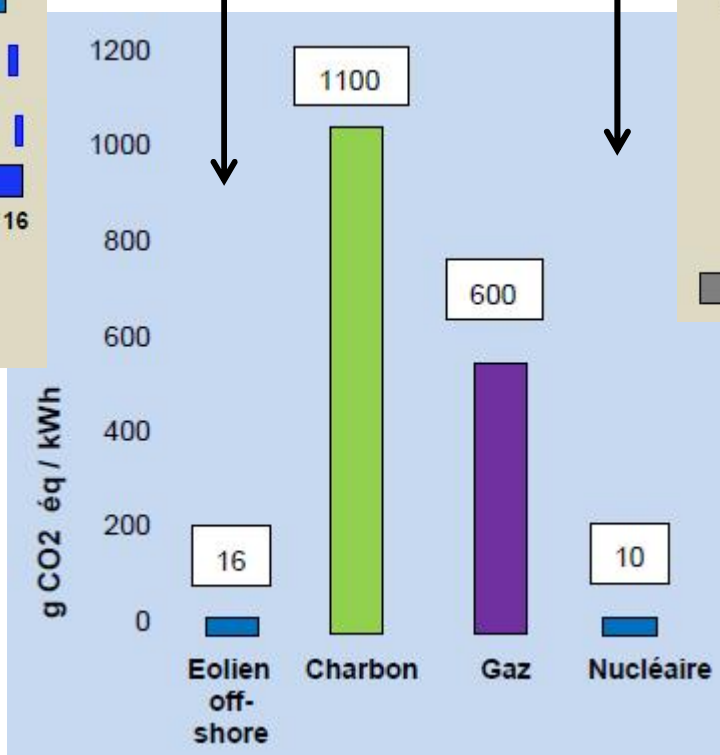
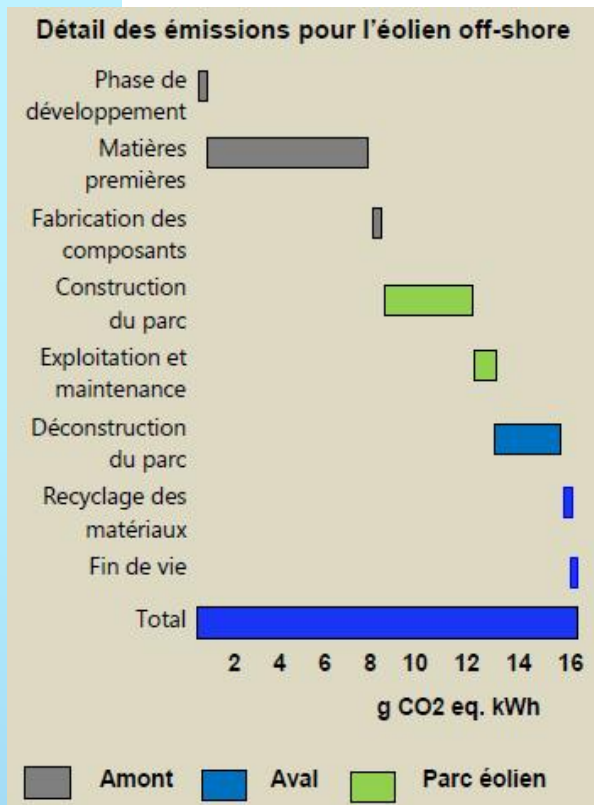
## EMISSION DE CO2 PAR SOURCE DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

g CO2 équivalent / kWh (ACV\*)














\* ACV = Analyse du Cycle de Vie

## COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE POUR LES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN BASE



Sources : Paul Scherrer Institute, AIEA, ADEME

## Taux de mortalité en fonction de la source d'énergie (nombre de morts par TWh)

Source d'énergie	Nb de morts par TWh produit	% énergie	% électricité
Charbon	 161	26	50
Chine			
USA	 15	278	
Pétrole	 36	36	
Gaz naturel	 4	21	
Biocombustible	 12		
Tourbe	 12		
Solaire (en toit)	 0,44	< 0,1	
Eolien	 0,15	< 1	
Hydroélectricité	 0,10	2,2	
Nucléaire	 0,04	5,9	16

Source : [nextbigfuture.com/2011/03/deaths-per-twh-by-energy-source.html](http://nextbigfuture.com/2011/03/deaths-per-twh-by-energy-source.html)

## Tableau comparatif des valeurs de facteurs de charge et de rendement thermiques des différentes sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nuclé	hydro	éolien ter	éolien mer	PV	géoth	solaire ther
<b>Rendement thermique</b>	38 %	40 - 60 %	38 %	30 - 33 %	70 - 90 %	50 %	50 %	10 %	70 - 90 %	38 %
<b>Facteur de charge</b>	1 - 5 % [1]	5 - 47 % [1]	1 - 40 % [1]	82 - 91 %	30 % [2]	23 %	40 %	10 %	70 - 90 %	30 %

**Rendement** : Rapport entre l'énergie apportée par la source d'énergie primaire utilisée et l'énergie électrique produite.

**Facteur de charge** : Rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale pendant la même période. Aussi appelé « Rendement global ».

*[1] Pour les énergies fossiles, le facteur de charge dépend de la politique énergétique du pays. En France, ces énergies servent de variable d'ajustement des consommations de pointe et de secours des énergies intermittentes. D'où ces valeurs relativement basses. Elles peuvent atteindre jusqu'à 90% dans certains pays.*

*[2] Pour l'hydraulique continentale, il s'agit du facteur de charge moyen pour la France, compte tenu du fonctionnement à la demande.*



## Tableau comparatif des caractéristiques des différentes sources d'énergie

	pétrole	gaz	charbon	nuc	hydro	éolien	PV	biomas	géoth	marine
abond.	---	--	300 a	300 a (x 50)	+	++	+++	+	+	+
séc. appro	---	-- (?)	-	++ (+)	+++	+++	+++	+++	+++	+++
bal. com.	---	-- (?)	-	++	+	-	-	+	+	+
pollution (exp. fab)	--	-	---	++ (F)	++ (F)	++ (F)	+(F)	+	+++	+++
déchets (Expl <sup>o</sup> -Dém <sup>t</sup> )	-	+++	--	-- (ED)	++ (D)	++ (D)	++ (D)	++	+++	+++
eff. de serre	--	-	---	+++	+++	+++	++ (F)	+ -	+++	+++
risques (env-mort)	-- (E)	-- E/H	-- (H)	-- (E)	-- (H)	++	++	++	++	++
coût	++	++	++	++	+++	++ -	-	+++	++	-
intermit.	+++	+++	+++	+++	+++	---	---	+++	+++	+
emploi en France	---	---	---	+++	+++	+ -	+ -	+++	+++	+ -

## Fiches GAENA instruites

### Liste des fiches :

- ♣ Généralités sur l'énergie
- ♣ Biomasse
- ♣ Charbon
- ♣ Gaz naturel
- ♣ Fioul
- ♣ Nucléaire
- ♣ Eolien
- ♣ Géothermie
- ♣ Photovoltaïque
- ♣ Solaire thermique
- ♣ Hydraulique continental
- ♣ Energie marine

Energétique, le site du GAENA  
[www.energethique.com/](http://www.energethique.com/)

### Contenu type des fiches :

- ♣ Utilisation
- ♣ Avantages
- ♣ Inconvénients
- ♣ Perspectives

## EXEMPLE DE FICHE DE SYNTHÈSE



FICHE DE SYNTHÈSE ÉNERGIE N° 7  
ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA  
*Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaire et Alternatives*

Ind 1  
15 nov. 2016

### Energie éolienne

L'**énergie éolienne** consiste à exploiter l'énergie cinétique du vent. C'est une des formes d'**énergie** renouvelable. Elle est disponible dans toutes les régions du monde et permet de ce fait de désenclaver sur le plan énergétique les sites les plus isolés. Son inconvénient majeur est cependant son intermittence qui nécessite un accompagnement par d'autres sources d'énergie. On distingue deux types d'éoliennes :

- Celles qui fournissent un travail, tel que pomper de l'eau, ou faire tourner une meule. Elles sont généralement de petite taille. On en trouve dans les zones arides (Afrique, Etats-Unis, Australie, ...).
- Celles qui fournissent de l'électricité (on les appelle aussi *aérogénérateurs*). Elles ont des tailles très variables (de quelques mètres à 100 mètres de hauteur). Les plus petites sont utilisées pour l'alimentation électrique de sites isolés ou de maisons particulières. Les plus grandes sont souvent regroupées en *parcs éoliens terrestres ou maritimes* pour une production de masse sur le réseau d'électricité (centrales éoliennes).



# ÉNERGIE ÉOLIENNE (suite)

## 1. UTILISATION

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable toujours dépendante du vent. Elle sert à la propulsion des bateaux, au pompage, à la production d'eau potable par refroidissement d'air saturé d'eau sous les tropiques et à la production électrique.

Les éoliennes ont un rendement de l'ordre de **50 %** mais un **facteur de charge** (appelé aussi rendement global) pénalisant en raison de l'intermittence des vents (23 % en moyenne sur le territoire Français) jusqu'à 40 % pour l'éolien maritime.

### Coût de l'énergie éolienne

Pour le terrestre il est compris entre **85 et 110 €/MWh** pendant 10 ans et dégressif par la suite. Pour le maritime il est supérieur à **220 €/MWh** les dix premières années puis dégressif. Ces prix sont à comparer au prix du nucléaire qui est actuellement de 59 €/MWh.

## 2. AVANTAGES

Son prix est abordable, c'est l'énergie renouvelable la moins chère (hors hydraulique). Il s'agit d'une énergie disponible en tout endroit de la terre surtout dans les zones côtières, les plaines et les zones de collines. Elle est non polluante (aucun rejet thermique) et sa production est illimitée. Leur emprise au sol est faible (éolien terrestre) à moyenne (éolien off-shore). Elle est exploitable à grande échelle via des parcs éoliens.

## 3. INCONVÉNIENTS

C'est une énergie intermittente, qui ne produit pas constamment et qui doit donc être complétée par d'autres moyens de production : une politique énergétique ne peut pas se baser uniquement sur l'énergie éolienne.

---

Siège : ARCEA/GAENA – CEA/FAR – 92265 Fontenay aux Roses Cedex  
Contact rédaction : ARCEA – GAENA Bât 639 – 91191 GIF sur Yvette Cedex  
Tél. 01 69 08 96 87 (le mardi matin) -- e-mail : [arcea.sac@free.fr](mailto:arcea.sac@free.fr)  
<http://www.energethique.com>

Page 1/2



### 3. INCONVÉNIENTS (suite)

- En utilisation isolée il faut prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent. Les grandes éoliennes sont immenses et ne passent pas inaperçu dans le paysage.
- Les éoliennes sont des systèmes mécaniques mobiles qui demandent un investissement initial élevé et un certain entretien (graissage, nettoyage des pales, remplacement des pièces rotatives), sans quoi elles perdent leurs qualités. Elles peuvent constituer un obstacle à l'avifaune et aux aéronefs.
- A ce jour, à l'issue de l'exploitation, seul un processus de démantèlement des parties aériennes est prévu. Ainsi 1.000 à 1500 tonnes de béton par machine devraient subsister dans le sol. De plus, leur pérennité repose sur la disponibilité des terres rares pour produire les alternateurs.

Les éoliennes présentent :

- une nuisance visuelle par la défiguration du paysage (notamment en cas de fortes concentrations d'éoliennes) et par l'émission de flashes visuels permanents en haut des mâts.
- des nuisances sonores, vibratoires (bruit et rotation des pales, gênes occasionnés par l'effet stroboscopique...) et environnementales : perturbation des ondes hertziennes qui peuvent entraîner des bruitages sur les récepteurs TV, interférences avec les radars météorologiques, création de turbulences au niveau des rotors...
- des nuisances environnementales liées à l'utilisation de terres rares incorporées aux alternateurs à aimants permanents équipant les éoliennes (épuisement des ressources et conditions d'hygiène des industries concernées en Chine)<sup>1</sup>.

Pour l'éolien maritime les inconvénients sont plus élevés : Privatisation du domaine maritime, fortes contraintes environnementales, maintenance plus complexe, techniques de mise en œuvre onéreuses, restriction des zones de pêche .... A ceci se rajoute le problème du raccordement électrique coûteux et fragile (liaison en courant continu pour limiter les pertes en ligne).

---

<sup>1</sup> Pour la plupart des modèles, les aimants permanents sont composés en partie d'un alliage de terres rares (néodyme-fer-bore) dans la majorité des cas, avec de plus petites quantités de dysprosium et de praséodyme. Ainsi une éolienne de 5 MW, contient une quantité de terres rares pouvant aller jusqu'à 430 kg. Avec le développement de l'éolien au niveau mondial, l'industrie des terres rares s'attend donc à une demande de plus 8 000 tonnes de la part de l'industrie éolienne en 2017.

### 4. PERSPECTIVES

L'Union Européenne estime qu'à l'horizon 2020 un tiers de l'électricité d'origine éolienne sera probablement produite par des installations off-shore (en mer, là où les vents sont plus puissants et plus réguliers). Plusieurs pistes d'étude sont en cours pour augmenter les performances et le champ d'implantation des éoliennes :

- implantation des éoliennes maritimes sur des systèmes d'îles artificielles ou des fondations flottantes ancrées jusqu'à 60 mètres de profondeur d'eau en complément des systèmes d'ancrage fixes actuels qui sont limités à 30 m de profondeur.
- pour pallier à l'effet de précession gyroscopique, exploration d'éoliennes du type Stromlad (éoliennes carénées) qui permettraient d'atteindre des vitesses de vent allant de 11 à 193 km/h alors qu'elle n'est que de 40 à 90 km/h pour les éoliennes actuelles. L'avantage de ces systèmes est d'avoir une production beaucoup plus régulière.
- mise au point d'éoliennes basées sur l'effet Magnus qui offrent un rendement supérieur à celui des hélices. Cette technologie pourra conduire à des petites unités mieux adaptées à des productions locales.

Pour ces éoliennes maritimes, qui présentent un meilleur facteur de charge, une difficulté subsiste cependant au niveau des investissements et du coût de la maintenance indispensable compte tenu des contraintes sévères auxquelles seront soumis ces matériels.



## AVANTAGES – INCONVÉNIENTS ÉNERGIE ÉOLIENNE

Tableau de synthèse

Source d'énergie	Usage dans le système électrique	Atouts-Avantages	Inconvénients-Contraintes
Eolien	Energie intermittente dépendant des conditions aérauliques	<p>Faible émission de CO<sub>2</sub> : 10 à 20 g équivalent CO<sub>2</sub>/kWh [en ACV et hors back-up <sup>(1)</sup>].</p> <p>Faible emprise au sol pour l'éolien terrestre.</p> <p>Exploitable à grande échelle via des parcs éoliens.</p>	<p>Contraintes géographiques.</p> <p>Acceptabilité et intégration au paysage.</p> <p>Production intermittente et limitée.</p> <p>Faible facteur de charge (25 à 40 %).</p> <p>Prix d'installation et coûts d'entretien élevés.</p> <p>Épuisement des ressources en terres rares et conditions d'hygiène associées.</p> <p>Nuisance visuelle, sonore et environnementale (perturbation ondes hertziennes et interférence avec radars).</p> <p>Coût énergétique élevé.</p> <p>Raccordement au réseau électrique difficile pour les petites unités et pour l'éolien off-shore.</p>

(1) Back-up = Système de secours



Association des Retraités du Groupe CEA  
Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaires et Alternatives

## SOURCES

### ▪ Coûts des différentes filières

Les coûts de production des différentes sources d'énergie en France, Rapport Cour des Comptes, juillet 2013

Les prix et les coûts des sources d'énergie, Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX, Directeur de recherche émérite CNRS

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/couts-de-production-de-l-electricite-en-france>

<http://www.actu-environnement.com/ae/news/cout-energies-renouvelables-cour-comptes>  
WIKIPEDIA

### ▪ Bilan CO2

PSI, Ecobilan de l'énergie nucléaire, octobre 2015

[www.nuklearforum.ch/sites/default/files/151030\\_Faktenblatt\\_Oekobilanz\\_f\\_web.pdf](http://www.nuklearforum.ch/sites/default/files/151030_Faktenblatt_Oekobilanz_f_web.pdf)

IAEA, Nuclear Power and Climate Change, march 2013

[http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5- ...](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-...)

IAEA, Greenhouse Gas Emission of Electricity Generation Chain Assessing the Difference, IAEA Bulletin, 42/2/2000

<https://www.iaea.org/sites/default/files/42204981924.PDF>

SLC, Le Nucléaire émet moins de CO2 que l'éolien, Hervé NIFENECKER



## SOURCES (suite)

### ▪ Bilan CO2

EDF Energies Nouvelles, Dong Energy et WPD Offshore, Bilan carbone d'un parc éolien en mer, mars 2013.

ADEME, Impacts environnementaux de l'éolien français, Données 2015. [www.adem.fr](http://www.adem.fr)

### ▪ Comparatif nombre de morts

Deaths per TWh by Energy source

<http://nextbigfuture.com/2011/03/deaths-per-twh-by-energy-source.html>

Rapport Institut Montaigne, juin 2016

### ▪ Fiches énergie

<http://rapport-dd-2013.edf.com/fr/avantages-et-inconvénients-des-différentes-sources-d-energie>

Bilan quantitatif des modes de production d'énergie électrique, M. REYNE, 2 février 2014

<http://www.emploi-2017.org/bilan-quantitatif-des-modes-de-production-d-energie-electrique>

[www.poncelt-services.com/avantages-inconvenients-sources-energie.htm](http://www.poncelt-services.com/avantages-inconvenients-sources-energie.htm)

Qu'est-ce que le "vrai coût" de l'électricité ?, Jean-Marc JANCOVICI [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

SLC, Le problème de l'intermittence des énergies renouvelables, Frédéric LIVET



Association des Retraités du Groupe CEA  
Groupe Argumentaire sur les Energies Nucléaires et Alternatives

**Merci de votre attention**