

# Production d'électricité sans émission de CO<sub>2</sub>

## Résumé français de l'article de Nature :

### *ELECTRICITY WITHOUT CARBON*

NATURE|Vol 454|14 August 2008

La production annuelle d'électricité à l'échelle mondiale est de 18000 TWh<sup>1</sup>, 40% de l'énergie utilisée par l'homme, et génère 10 gigatonnes de dioxyde de carbone. Peut-on produire suffisamment d'électricité sans émission de gaz carbonique ? Un article paru dans la revue Nature le 13 août 2008 fait le point sur les sources d'électricité non émettrices de CO<sub>2</sub>, utilisables dans l'état actuel de la technologie ou dans un avenir proche. SLC vous en présente le résumé et donne sa propre évaluation en italique sous chaque section.

#### Observations SLC

*L'importance de la contribution de la production d'électricité aux émissions de CO2 soulignée par « Nature », qui représente 40% de la consommation totale d'énergie, conforte nos analyses et contredit les allégations des organisations antinucléaires, basées sur l'argumentation erronée de feu le groupe « facteur 4 » qui était présidé par Christian De Boissieux*

#### **L'Hydroélectricité**

Mise en oeuvre dans 160 pays avec 45000 grands barrages, l'hydroélectricité totalise une puissance installée de 800 GW et un taux de production de 40% environ<sup>2</sup>. Le Giga-Watt installé revient de 1 à 5 millions de dollars. N'utilisant aucun combustible, les frais de fonctionnement sont très réduits. La réponse à la demande d'électricité est immédiate. L'énergie produite en excès par ailleurs peut être stockée en pompant l'eau pour remplir les barrages. Utilisable seulement dans certaines régions, la mise en oeuvre de l'hydroélectricité implique des délais de construction importants et apporte des nuisances non négligeables : surfaces ennoyées avec déplacement des populations ; piégeage des matériaux transportés par le cours d'eau qui comblent peu à peu le lac de barrage, et dont la fermentation peut émettre du méthane (puissant gaz à effet de serre) ; entrave aux migrations des poissons. Si l'ensemble des écoulements à la surface du globe représente 10 TW, seuls 30 à 50% pourraient être exploitables. On peut raisonnablement voir la puissance installée d'hydroélectricité croître de 1 TW dans les décennies à venir (le barrage chinois des 3 gorges représente 12 GW, et 120 GW sont actuellement en développement).

---

<sup>1</sup> Les **puissances** sont exprimées en **watts** (W) et leurs multiples : **kilowatt** (kW), 1kW =1000 W ≈ un sèche-cheveux ; **mégawatt** (MW), 1MW = 1000 kW = 1million de W ≈ entre un petit train et une voiture F1 ; **gigawatt** (GW), 1 GW = 1000 MW = 1 milliard de watts ≈ un très gros barrage hydraulique ; **térawatt** (TW), 1TW = 1000 GW = 1million de MW = 10<sup>12</sup> W ≈ titanique ; 40-50 TW ≈ chaleur planétaire dissipée par l'écorce terrestre (origine: accréation planétaire + désintégrations radioactives), 100 000 TW ≈ puissance du soleil irradiant la Terre...Une puissance de 1 GW fonctionnant 100% du temps produit 8,76 TWh par an

Les énergies s'expriment en **wattheures** (Wh) et ses multiples **kilowattheure** (kWh), **mégawattheure** (MWh)...

<sup>2</sup> Valeur extraite de la plaquette « Key world energy statistics » de l'AIE. Puissance installée : 836 GW, Energie fournie : 2994 TWh

## Observations SLC

*Il est regrettable que Nature ne donne pas de tableau récapitulatif des données économiques et techniques des moyens de production. Nous essayons de pallier cette carence*

	Puissance GW	Facteur de charge	Production TWh	Investissement M\$/MW	Investissement M\$/GWh/an	Coût \$/kWh
2005	863	0,4	2994	1-5	0,29-1,43	0,03-0,1
2050	1800	0,4	6300			

**Tableau 1 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production hydroélectrique selon Nature**

## Fission nucléaire

Forte de 439 réacteurs en service avec une puissance installée de 370 GW produisant à 90%, la fission nucléaire produit 15% de l'électricité mondiale. 35 réacteurs étaient en construction en 2007, essentiellement en Asie. Bénéficiant d'une recherche amont très importante, la fission a un coût de production très bas de 0.025 à 0.07 \$/kWh, grâce à un coût du combustible faible et une grande longévité des installations. L'essentiel du coût venant de l'installation, ceci en fait un investissement peu attractif car peu rentable à court terme. Le nucléaire a bénéficié, dans sa mise au point, de forts investissements de recherche publique. Le nucléaire est parfaitement adapté à une production électrique en base. L'uranium est très réparti à la surface du globe ce qui est un gage de sécurité d'approvisionnement. Les réserves connues d'uranium à un prix inférieur à 130\$ par kg peuvent alimenter 80 ans de fonctionnement de centrales au rythme actuel d'utilisation ; on peut envisager de mobiliser 35 millions de tonnes pour un prix encore raisonnable. Les surgénérateurs permettent de tirer 60 fois d'énergie par tonne d'uranium. En outre le thorium peut aussi être utilisé pour l'électronucléaire. Dans ces conditions le nucléaire pourrait suffire à fournir toute l'énergie dont le monde a besoin. La rentabilité économique de ces options reste à démontrer.

Le nucléaire souffre d'une image de marque dégradée par les accidents de Three Mile Island<sup>3</sup> et de Tchernobyl et par la polémique sur la gestion des déchets, un problème plus politique que technique, et par les risques potentiels de prolifération de l'arme nucléaire et d'attentats terroristes. Si le nucléaire est accepté par les populations, la puissance installée pourrait atteindre le TW en 2050, et même, selon la Commission Européenne, 1,7 TW, mais un frein à son développement est le manque de personnel suffisamment qualifié.

## Observations SLC

*L'analyse du coût du nucléaire est superficielle. Le coût de l'investissement n'est même pas mentionné. En se référant aux données de l'EPR finlandais on peut estimer un coût de l'ordre de 3M\$/MW. Un tel coût ramené à la production annuelle donne un coût d'investissement du nucléaire inférieur à celui des énergies renouvelables à l'exception de la biomasse.*

*S'il est vrai que le nucléaire a été développé grâce à la volonté et l'argent public il faut rappeler que cet investissement a été extraordinairement rentable. Ainsi le budget du CEA réservé à la recherche en 2005 sur le nucléaire était de l'ordre de 350 M€ dont 200 M€ de subvention publique. Ce chiffre est à rapprocher de celui de la production des centrales nucléaires, soit environ 15000 M€/an. On peut aussi rapprocher ces 200 M€ de la politique d'obligation d'achat de l'éolien. Pour une production éolienne de 8 TWh (équivalente à celle d'un réacteur de 1 GW) le surplus payé aux producteurs vaut environ 400 M€.*

<sup>3</sup> Rappelons que l'accident de Three Mile Island n'a fait aucune victime (0 mort, 0 blessé).

Nature insiste sur l'intérêt potentiel de la surgénération qui permettrait de résoudre entièrement le problème énergétique, à condition que la rentabilité économique en soit prouvée. « Sauvons le Climat » considère que la faisabilité technique des réacteurs surgénérateurs refroidis au Sodium est démontrée. A cet égard on doit souligner la stupidité de la décision d'avoir arrêté Super Phenix alors qu'il fonctionnait correctement. Le réacteur Phénix fonctionne très bien depuis 1973 alors même que les dépenses d'entretien ont été réduites à la portion congrue. La Russie et le Japon poursuivent et développent leurs programmes sur ces réacteurs tandis que l'Inde et la Chine s'y lancent avec détermination. Le réacteur rapide européen qui aurait dû prendre la succession de Super Phénix laissait prévoir un supplément de prix de 50% par rapport aux réacteurs REP, soit environ 0,05 \$/kWh.

Il est intéressant de voir que Nature considère que la question de la gestion de déchets nucléaires est plus politique que technique, ce qui correspond à notre propre analyse.

Comme Nature, SLC considère que le problème capital du nucléaire est celui de son acceptation sociale. Ajoutons que nous pensons que les difficultés que rencontrent celle-ci sont liés, d'une part, à une propagande ne reculant devant aucun mensonge des organisations antinucléaires, propagande exaltant des peurs fantasmagiques dans le public, d'autre part à un étrange silence des autorités qui continuent à croire que le silence est la meilleure réponse aux outrances.

L'autre point soulevé par Nature est celui de la disponibilité d'une main d'œuvre qualifiée. C'est un problème sérieux, en particulier en France. Il est intimement lié à la faible attraction des études scientifiques et techniques. La Chine, l'Inde, la Russie et les USA ne semblent pas souffrir de ce syndrome. Il faut tout fois rappeler que la France a réalisé la presque totalité de son parc de 60 réacteurs en un peu plus de 25 ans( de 1973 à 2000) et les USA également (109 réacteurs de 1965 à 1990). Pourquoi un effort comparable, atteignant un taux de mise sur réseau de 1 réacteur pour 10 millions d'habitant et par an en France serait il devenu impossible ? Avec un tel taux les seuls pays de l'OCDE pourraient réaliser 5 TW en 50 ans. Certains scénarios (par exemple ceux de P.R.Bauquis et ceux du LPSC de Grenoble) envisagent effectivement un parc nucléaire de 5 à 7 TW en 2050 et montrent qu'un tel objectif est physiquement et économiquement réalisable si la volonté politique est présente

	Puissance GW	Facteur de Charge	Production TWh	Investissement M\$/MW	Investissement M\$/GWh/an	Coût \$/kWh
2005	363	0,9	2920	3	0,38	0,025-0,07
2050	1000-1700	0,9	7884 -13400			

**Tableau 2 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production nucléaire selon Nature**

## Biomasse

Source d'énergie historique de l'humanité, la biomasse (bois, résidus de culture) demande une utilisation des sols qui complète ou rentre en concurrence avec leur usage agricole alimentaire. Elle reste juste derrière les combustibles fossiles dans la consommation mondiale d'énergie (essentiellement bois de chauffe), et aiguise désormais l'appétit les producteurs d'électricité... et d'agro-carburants liquides. Sa composition chimique en fait un produit de choix pour la production de carburants transportables, ce qui n'est pas l'utilisation énergétique optimale mais génère un produit à forte valeur ajoutée. On peut aussi utiliser la biomasse pour produire de l'électricité, avec des centrales en principe peu différentes de celles brûlant des combustibles fossiles. La

production d'énergie par la biomasse est nécessairement peu intense et demande des surfaces importantes, car elle repose sur la photosynthèse des végétaux qui est un mécanisme peu efficace de conversion de l'énergie solaire. Minimiser les frais de transports du combustible implique en pratique des unités localisées et assez réduites, donc un investissement plus lourd. Les unités de cogénération (électricité + chaleur domestique) maximisent l'extraction d'énergie de la biomasse, et amènent à un coût du kWh de 0.02 à 0.09 \$, installation comprise. Particularité unique, si on lui associe la capture et la séquestration (géologique ou biochimique) du carbone produit, la biomasse peut devenir une source d'électricité à production négative de CO<sub>2</sub>; ceci demande toutefois d'accepter un rendement énergétique moindre et un surcoût économique sensible (comme pour le charbon).

Les problèmes d'une utilisation accrue de la biomasse commencent avec la compétition avec l'agriculture vivrière –les deux types d'utilisation des sols risquant par ailleurs de pâtir du réchauffement climatique. De plus, la mise en culture de surfaces encore inexploitées implique un déstockage initial massif du carbone fixé dans le bois et les sols; ceci aggravera l'évolution climatique. Enfin, les sols privés des résidus agricoles risquent de s'appauvrir, rendant problématique une utilisation durable.

Les auteurs citent une estimation de production de 3 à 5 TW, si on décidait d'investir massivement dans la production d'électricité par combustion de la biomasse d'ici 2050.

### *Observations de SLC*

*Suivre les propositions de l'OCDE et du GIECC citées par Nature conduirait à une augmentation considérable de la mise en exploitation de la biosphère. Actuellement, sur une production énergétique annuelle totale de la biosphère de 70 Gtep, l'humanité utilise un peu plus de 2 Gtep pour se nourrir, 0,4 Gtep pour la réalisation de matériaux de construction et 1,3 Gtep (dont 1,1 dans les PVD sous forme de bois de feu) pour ses besoins énergétiques, soit un total utilisé par l'homme de 3,8 tep. Dans l'hypothèse de l'OCDE le prélèvement supplémentaire atteindrait 6 Gtep. Dans le cas du GIECC ce serait 10 Gtep. Autrement dit notre prélèvement passerait de 6 à 20% de la production énergétique de la biomasse. Est-ce raisonnable ? Les conséquences environnementales en termes de biodiversité, de déforestation possible sont elles acceptables ?*

*Si Nature souligne à juste titre les problèmes de compétition entre utilisations alimentaire, de production d'agro-carburants et de production de chaleur et d'électricité il nous semble qu'elle n'insiste pas suffisamment sur certains aspects environnementaux très préoccupants d'un développement considérable des utilisations non alimentaires de la biomasse :*

- 1. La combustion contribue à la pollution atmosphérique par l'émission de particules (HAP), qui ont peu d'effet sur le climat mais un impact très négatif sur la santé.*
- 2. Risques accrus de déforestation si la production et la vente du bois sont sources de profits importants*
- 3. Certaines pratiques agricoles sont lourdement émettrices de gaz à effet de serre. Pour le CO<sub>2</sub>, il s'agit surtout de la production d'engrais, pour le méthane, des processus de fermentation, et pour le NO<sub>2</sub>, d'une dégradation des engrais azotés. Le bilan écologique de l'utilisation de la biomasse n'est donc pas nécessairement positif.*
- 4. Une extension considérable de l'agro-business représente une lourde menace pour la préservation de la biodiversité.*

	<i>Puissance</i> GW	<i>Facteur de Charge</i>	<i>Production</i> TWh	<i>Investissement</i> M\$/MW	<i>Investissement</i> M\$/GWh/an	<i>Coût</i> \$/kWh
2005	40	0,9	315	2	0,23	0,03-0,09
2050	3000-5000	0,9	23650-39400			

**Tableau 3 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production par biomasse selon Nature**

## Eolien

En croissance très rapide du fait des subventions (+ 25% par an sur les 5 dernières années, les fabricants d'éoliennes ont peine à suivre), l'éolien avait 94GW installés en janvier 2008, mais avec un taux de production de 20%. Le coût d'installation est de 1,8 millions de dollars par MW sur le continent et 2,4 à 3 millions de dollars offshore, ce qui donne un coût de 0,05 à 0,09\$/kWh. La capacité mondiale est de 72TW si 2,5 millions de grandes éoliennes sont installées sur 13% des sites, ceux où le vent souffle régulièrement à plus de 25km/h. Car les éoliennes dépendent du vent dont l'intermittence est le problème majeur de cette source d'énergie. De ce fait, la conduite des réseaux électriques deviendrait très difficile si la capacité d'électricité d'origine éolienne dépassait les 20% de la capacité totale. Les bons sites très ventés sont généralement éloignés des zones d'utilisation du courant et la densité d'énergie au m<sup>2</sup> de sol est faible. Une grande utilisation d'énergie éolienne ne serait pas sans conséquences sur le régime des vents et donc sur le climat. Si on procède à une implantation massive d'éoliennes dans les grandes plaines de Chine et des Etats-Unis, la capacité de production pourrait atteindre le TW.

### Observations de SLC

*SLC constate que Nature partage son analyse concernant les limitations dues à l'intermittence et à la difficile prédictabilité de l'éolien : 20% de la puissance installée et un taux de disponibilité (facteur de charge) inférieur à 30%, soit une contribution à la production d'électricité limitée à 6% environ (SLC avait même porté cette limite à 9%).*

*L'investissement par MWh produit est notablement supérieur pour l'éolien à celui pour le nucléaire ou l'hydraulique.*

	<i>Puissance</i> GW	<i>Facteur de Charge</i>	<i>Production</i> TWh	<i>Investissement</i> M\$/MW	<i>Investissement</i> M\$/GWh/an	<i>Coût</i> \$/kWh
2005	92	0,2	165	1,8-3	1,03-1,71	0,05-0,09
2050	1000	0,25	2190			

**Tableau 4 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production par éolien selon Nature**

## Géothermie

Le flux d'énergie de l'intérieur de la terre vers la surface est faible ; l'énergie géothermique n'est utilisable que dans des régions disposants de sources chaudes. Seuls 5 pays produisent plus de 15% de leur électricité par géothermie. Très variable selon les conditions locales, le coût peut descendre à 0,05 \$/kWh. Le taux de production est de 75% ; la géothermie est bien adaptée à la production d'électricité en base; la chaleur résiduelle est utilisable pour du chauffage. Avec les technologies actuelles, on pourrait exploiter 70GW. Il pourrait être possible d'atteindre le TW avec des améliorations très importantes utilisant l'injection d'eau dans des forages sophistiqués qui bénéficieraient de l'expérience des pétroliers. Mais de telles installations risquent de faire partir dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> du sous-sol et de polluer les aquifères.

*Observations de SLC*

*SLC partage l'analyse de Nature. Une capacité de production de 1 TW paraît assez utopique.*

	<i>Puissance GW</i>	<i>Facteur de Charge</i>	<i>Production TWh</i>	<i>Investissement M\$/MW</i>	<i>Investissement M\$/GWh/an</i>	<i>Coût \$/kWh</i>
<i>2005</i>	<i>10</i>	<i>0,75</i>	<i>66</i>			<i>0,05</i>
<i>2050</i>	<i>1000</i>	<i>0,75</i>	<i>6570</i>			

*Tableau 5 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production par géothermie selon Nature*

## Solaire

Pour la production d'électricité, l'énergie solaire peut être utilisé par un procédé soit thermodynamique, soit photovoltaïque, le mode principal. La puissance solaire est très grande. Les rendements actuels sont largement supérieurs à ceux de la photosynthèse (10% de la surface du Sahara fourniraient l'équivalent de la consommation électrique mondiale) et s'améliorent encore,. Mais c'est une énergie très intermittente, du fait des nuits, mais aussi des nuages, et dont le rendement à la surface du globe décroît rapidement quand on s'éloigne des zones tropicales. Le coût est de 0,25 à 0,4 \$/kWh en photovoltaïque et 0,17 \$/kWh en thermique. Le solaire thermodynamique peut aussi être utilisé là où il n'y a pas de réseau électrique. Des installations thermiques stockent l'énergie sous forme de sels fondus, une technologie qui pourrait servir comme stockage d'énergie d'autre origine. Le solaire photovoltaïque peut être un bon candidat pour l'énergie renouvelable du futur si le coût de production des cellules diminue notablement comme on peut l'espérer, et si on développe de nouveaux réseaux électriques à courant continu pour transporter l'électricité depuis les régions désertiques de production vers le pays utilisateurs éloignés. La rareté de certains matériaux entrant dans la fabrication des cellules peut être un frein au développement de cette filière.

*Observations de SLC*

*Comme Nature, SLC pense que la production d'électricité solaire, sans dispositif de stockage et reliée au réseau ne pourra avoir une contribution significative que dans la mesure où elle sera fortement subventionnée. Par contre, nous pensons que Nature ne souligne pas assez l'intérêt du solaire électrique couplé à un stockage par batteries, en absence de réseau. Cette approche nous semble très importante dans de nombreux districts ruraux de PVD.*

	<i>Puissance</i> GW	<i>Facteur de Charge</i>	<i>Production</i> TWh	<i>Investissement</i> M\$/MW	<i>Investissement</i> M\$/GWh/an	<i>Coût</i> \$/kWh
2005 PV	9	0,14	11	5-7	4,08-5,71	0,25-0,4
2050	1000	0,14	1226			

*Tableau 6 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production d'électricité solaire selon Nature*

## Océans

Les océans présentent deux sources d'énergie utilisables : les marées, y compris les courants de marée, qui représentent une puissance totale de 3 TW dont peut-être 1TW serait accessible, et les vagues dont on pourrait peut-être récupérer 1 à 10 TW. En ce qui concerne les marées, peu de sites s'y prêtent vraiment. En service depuis 40 ans, l'usine marémotrice de la Rance reste la plus grande installation de ce type avec ses 240 MW. Le coût d'installation des barrages pour récupérer l'énergie des marées, comparable à celui de l'hydroélectricité fluvial amène à un coût de l'électricité de 0,2 à 0,4 \$/kWh, une partie du coût venant des matériaux utilisés qui doivent résister aux conditions marines. Aucune installation à grande échelle ne se profile pour faire baisser ces coûts. Les marées sont parfaitement prédictibles ; les vagues sont variables mais plus prédictibles que le vent. Dans les régions côtières bien adaptées, cette énergie peut être utilisée pour la production d'électricité. Mais à l'échelle mondiale, ceci restera marginal.

### Observations de SLC

*Nature omet les possibilités offertes par les courants thermiques comme le Gulf Stream au large de la Floride. D'une façon générale, toutefois, il est, effectivement, peu réaliste de penser que l'énergie des mers puisse contribuer très significativement à la production électrique mondiale.*

	<i>Puissance</i> GW	<i>Facteur de Charge</i>	<i>Production</i> TWh	<i>Investissement</i> M\$/MW	<i>Investissement</i> M\$/GWh/an	<i>Coût</i> \$/kWh
2005	0,25	0,4	0,9	4		0,2-0,4
2050	500	0,4	1825			

*Tableau 7 Caractéristiques actuelles et prévision pour la production d'électricité par l'océan selon Nature*

## Récapitulation

*Nous récapitulons ci-après les prévisions de puissance et de production d'énergie électrique annuelle qu'on peut tirer de l'article de Nature*

*Nous retenons les valeurs qui semblent avoir les préférences de Nature:*

	PUISSANCE GW	ENERGIE TWH
<i>Hydroélectricité</i>	1800	6300
<i>Fission nucléaire</i>	1000	7884
<i>Biomasse</i>	3000	23650
<i>Eolien</i>	1000	2190
<i>Géothermie</i>	1000	6570
<i>Solaire</i>	-	-
<i>Océans</i>	500	1825
<i>Total</i>	6500	48419

**Tableau 8 Récapitulation des puissances électriques mobilisables et des énergies pouvant être produites en 2050 par des énergies non carbonées selon Nature**

*La production d'électricité non carbonée pourrait donc atteindre plus de 2,5 fois la production totale de 2005, soit une augmentation de 2,5%/an. Il semblerait donc possible de se passer des énergies fossiles pour faire face en grande partie aux besoins.. Nous doutons fortement, toutefois qu'une production de plus de 23000 TWh puisse être fournie par la biomasse sans dégâts écologiques considérables et avec un bilan CO2 suffisamment bon. Et cela d'autant plus que la concurrence entre la production d'électricité et d'agro carburants sera sans doute sévère. Il nous semble qu'il serait plus raisonnable de limiter la puissance des centrales électriques utilisant la biomasse à 1 à 1,5 TW. De son côté la puissance nucléaire pourrait atteindre sans problème majeur, sauf, éventuellement, son acceptabilité sociale, 2,5 TW.*

*Nature signale la possibilité d'utiliser la technique de capture-stockage du CO2. Elle souligne la difficulté d'avoir à stocker des milliards de tonnes de CO2 chaque année. Il est clair que des progrès plus rapides sur cette technique changerait profondément la donne.*