



## FLASH N°11 – mai 2009

Réagissez à ces articles sur le forum de [www.centrale-energies.fr](http://www.centrale-energies.fr), rubrique [Bienvenue sur ces forums](#)

### A propos de bilan énergétique (1) : énergie primaire et énergie finale par Alain ARGENSON (ECN 62)

*L'unité du système international pour mesurer l'énergie est le joule (J), mais certaines activités utilisent d'autres unités comme le kWh (1 kWh = 3.6 MJ), la calorie (1 cal = 4.18 J) ou la tonne équivalent pétrole (1 tep = 41,855 GJ). La prépondérance du pétrole dans l'économie a conduit les économistes à utiliser la « tep » pour comparer les énergies entre elles. C'est donc cette unité qui est utilisée dans les bilans énergétiques. Afin que tous puissent parler la même langue des équivalences énergétiques ont été adoptées.*

*Les bilans énergétiques font apparaître deux catégories d'énergie : énergie primaire et énergie finale. Par exemple, le bilan énergétique de la France en 2007 publié par la DGEMP est de 278.43 Mtep d'énergie primaire (-15,42 Mtep non énergétique) et 177.91 Mtep d'énergie finale. Il faut ajouter un autre décompte avec l'énergie utile, que l'on estime à 120 Mtep et qui fera l'objet d'un prochain article.*

*Cette grande différence entre les énergies nécessite une explication : c'est une question de définitions et de conventions prises au niveau international pour transformer toutes les énergies en tonnes équivalent pétrole (tep). Le présent article a pour objet d'apporter un peu de clarté.*

#### Définitions

**Energie primaire** : le principe retenu par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie organisme créé lors des chocs pétroliers des années 70 pour coordonner les actions des pays occidentaux dans leurs réponses à l'OPEP, et toujours fortement marquée par ses origines) est que la forme d'énergie à prendre en compte doit être la première forme rencontrée à savoir : la chaleur pour les énergies fossiles, l'électricité d'origine nucléaire, la géothermie et le solaire thermique et l'électricité pour l'hydraulique, l'éolien et le solaire photovoltaïque.

**Energie finale** : c'est la quantité d'énergie disponible pour l'utilisateur final. Ce sont donc les kWh électriques nucléaires, éoliens, hydrauliques ou photovoltaïques mais aussi les tonnes de fioul ou les m3 de gaz .

#### Conventions

**Pétrole** : en partant d'une tonne de pétrole, qui constitue la ressource primaire, on obtient une utilisation finale qui correspond naturellement à une tonne de pétrole et donc énergie primaire et énergie finale sont égales dans ce cas 1 tep = 11 628 kWh Cette stricte égalité ne tenant pas compte des pertes, il faut les déduire dans le bilan global.

**Charbon** : avec 1 tonne on ne récupère que 26 GJ(PCI=Pouvoir Calorifique Inférieur) donc 1 tonne de charbon correspond à  $26/42 = 0,62$  tep et par convention dans ce cas également énergie primaire et énergie finale sont égales.

**Gaz** : la question commence à se corser. En effet, son énergie est comptabilisée en Mégawattheure (MWh)/PCS. Comme 1 Joule = 1 Watt/seconde, 1 Wh = 3600 J et donc 1 MWh/PCS = 3,6 GJ. Le PCS (pouvoir calorifique supérieur) correspond à une combustion où la chaleur de condensation de la vapeur d'eau est récupérée, soit environ 10% de la chaleur totale. En conséquence, 1 MWh(PCI) = 0,9 MWh(PCS) =  $3,24 \text{ GJ} = 3,24/42 = 0,077$  tep. Comme pour le charbon, énergie primaire et énergie finale sont égales par convention.

Dans le bilan global des énergies fossiles il faut déduire les pertes, les usages internes et l'utilisation dans les centrales thermiques pour obtenir l'énergie finale consommée.

**Electricité** : il faut distinguer 3 cas

1. l'électricité produite par une centrale nucléaire est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 33% ; le coefficient de substitution est donc  $0,086/0,33 = 0,260606$  tep/MWh
2. l'électricité produite par une centrale à géothermie est aussi comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, mais avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 10% ; le coefficient de substitution est donc  $0,086/0,10 = 0,86$  tep/MWh.

3. toutes les autres formes d'électricité (production par une centrale thermique, hydraulique, éolienne, marémotrice, photovoltaïque, etc.) sont comptabilisées selon la méthode du contenu énergétique à la consommation, avec le coefficient 0,086tep/MWh.

Cette méthode en vigueur depuis 2002 déséquilibre le bilan énergétique et rend la comparaison difficile entre des pays dont le mix énergétique est très différent.

Pour mémoire, l'ancienne méthode utilisait strictement "l'équivalent primaire à la production" : quel que soit l'emploi ou l'origine de l'énergie électrique, un coefficient unique était utilisé, égal à 0,222 tep/MWh depuis 1972 (auparavant, il était de 0,4 tec/MWh, soit 0,27 tep/MWh). Autrement dit, l'électricité était comptabilisée dans les bilans de l'Observatoire de l'Énergie, à tous les niveaux (production, échanges avec l'étranger, consommation), avec l'équivalence 0,222 tep/MWh, c'est-à-dire comme la quantité de pétrole qui serait nécessaire pour produire cette énergie électrique dans une centrale thermique classique théorique de rendement égal à  $0,086/0,222 = 38,7\%$  (contre 31,9% avant 1972).

Dans le cas des échanges d'électricité avec l'étranger, énergie primaire et énergie finale sont ici aussi identiques avec l'équivalence 1 MWh = 0,086 tep. On ne s'intéresse pas à l'origine des MWh produits.

Le bilan énergétique complet pour 2007 établi par l'Observatoire de l'Énergie de la DGEMP est donné ci-dessous.

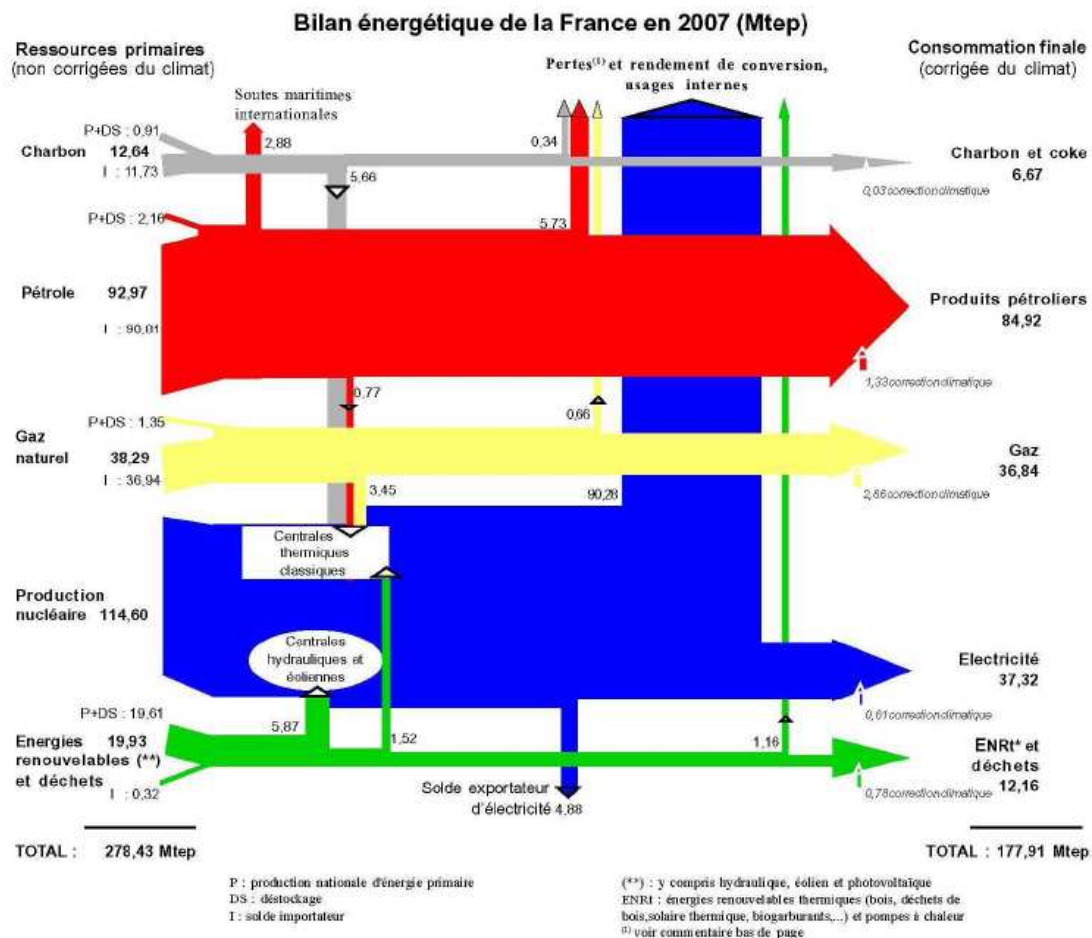
### Conclusion

**Les bilans énergétiques présentent donc un certain caractère artificiel. Mélanger électricité et énergie thermique tient un peu du mariage "de la carpe et du lapin" !**

C'est pourtant ce qui est fait dans la loi du Grenelle 1.

Dans l'article 2 il est indiqué que « la part des énergies renouvelables sera d'au moins 23% de la consommation d'énergie finale en 2020 » Cet objectif global n'est pas clair car l'électricité sera utilisée avec un rendement de 90% et la chaleur avec un rendement de 40% pour la majorité du bois énergie des ménages. La loi de programme n°2005-781 pour le développement des énergies renouvelables distinguait chaleur (+50% de production en 2010) et électricité (21% de la consommation intérieure de renouvelable en 2010).

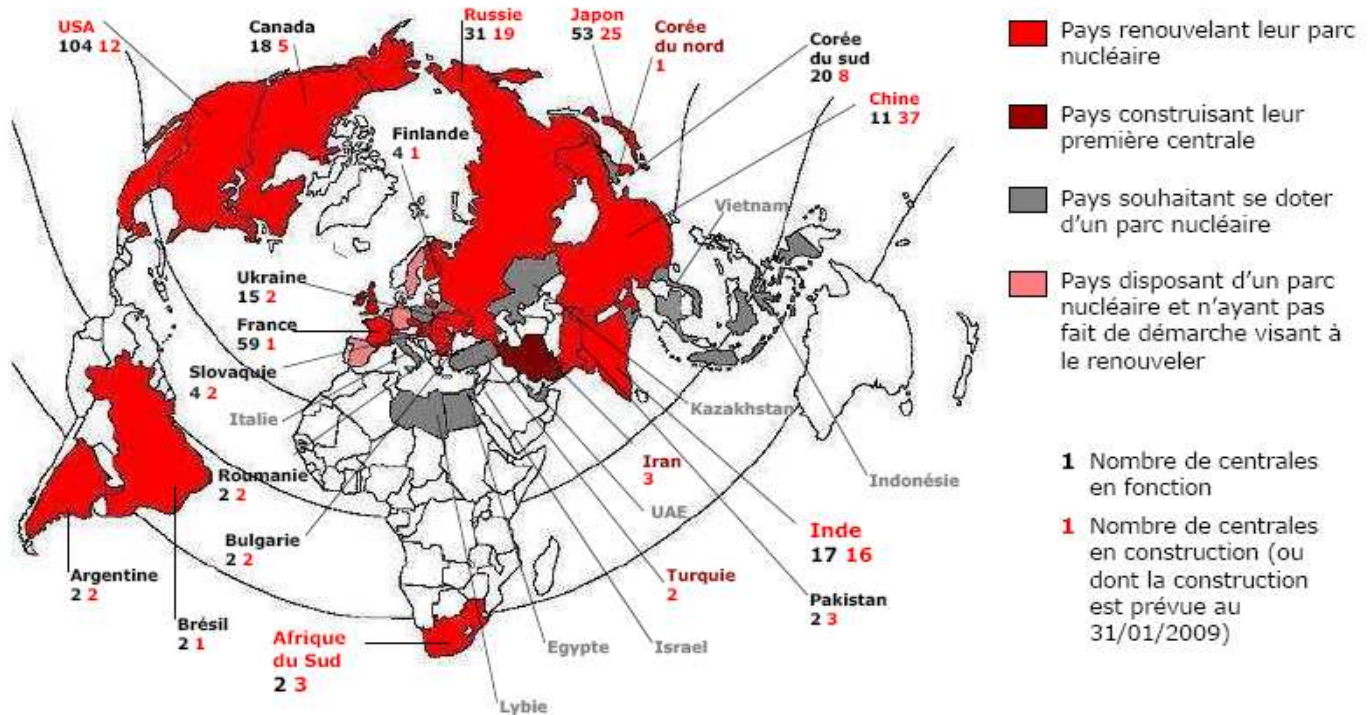
L'article 4 en fixant une consommation d'énergie primaire de 50kWh/m<sup>2</sup>/an dans les bâtiments mélange consommation et production. L'énergie primaire est par convention internationale comptée en tep. Que viennent faire ces kWh ? Pour l'électricité, un nouveau coefficient français de transformation de l'énergie finale en énergie primaire a été « adopté » : 1 kWh final= 2.58kWh primaire.



# Le nucléaire civil dans le monde (1) : les réacteurs

par Etienne PESNELLE (ECP 86)

Cinquante ans de R&D ont fait se succéder plusieurs générations de réacteurs : la plupart des tranches en construction aujourd'hui appartiennent encore à la troisième génération, tandis que la quatrième (réacteurs à neutrons rapides) attend son heure. Le premier réacteur nucléaire n'est pas celui construit par Enrico Fermi à l'Université de Chicago en 1942, mais le réacteur nucléaire naturel d'Oklo, qui fonctionna... il y a deux milliards d'années, et dont les produits de fission sont restés depuis confinés dans les couches géologiques. Au-delà de la curiosité scientifique, ce site constitue un des arguments utilisés par les défenseurs du stockage géologique du combustible usé.



## Les filières de réacteurs nucléaires

Actuellement, six filières électronucléaires ont franchi le seuil de l'industrialisation :

- **Graphite-gaz** : modéré par le premier et refroidi par le second, les réacteurs de cette filière furent plébiscités dans les années 1960 car ils permettaient de produire également du plutonium de qualité militaire sans forcément enrichir au préalable l'uranium. Seul le Royaume-Uni exploite encore les 18 tranches de ce type en activité.
- **Eau lourde (PHWR)** : ce réacteur rustique - on peut ne pas enrichir l'uranium - produit également du plutonium, mais de qualité isotopique moyenne pour des usages militaires. L'Inde et le Canada en sont aujourd'hui les principaux utilisateurs. Le PHWR indien actuel, de puissance moyenne (200-500 MW) est le réacteur idéal pour un pays émergent. La France a exploité un prototype de PHWR à Brennilis, dont le démantèlement est en cours,

émaillé de joutes juridiques animées par les ONG antinucléaires, fait régulièrement parler de lui dans les journaux.

- **Eau-graphite** : c'est encore une autre filière conçue pour être militairement plutonigène, uniquement représentée actuellement par le modèle RBMK dont l'accident de Tchernobyl sonna le glas.
- **PWR (Pressurized Water Reactor)** : dérivé d'un modèle de réacteur conçu pour la propulsion navale par Westinghouse, elle nécessite un combustible enrichi, c'est aujourd'hui la filière la plus performante sur le plan technico-économique avec le BWR, et donc la plus répandue. Ce sont des modèles de grande puissance (1000-1600 MW), destinés à des puissances industrielles.
- **BWR (Boiling Water Reactor)** : filière concurrente de la PWR, principalement utilisée au Japon, aux USA, en Allemagne et en Suède

- **Réacteurs à Neutrons Rapides Sodium** : popularisé en France par la gamme Phénix, ils finissent de s'industrialiser en Russie et en Chine. Les autres filières de réacteurs civils à neutrons rapides ne sont pas encore sorties des laboratoires de recherche. Les réacteurs à neutrons rapides forment l'incontournable prochaine étape dans le développement de l'industrie électronucléaire, car ils permettent de réduire drastiquement la quantité de déchets ultimes et de « brûler » d'autres isotopes de l'uranium que le rare U235.

### Les principaux constructeurs

Le gros de la compétition se joue évidemment autour de la filière PWR. S'y affrontent :

- **Westinghouse**, désormais filiale de **Toshiba**, mère de la filière PWR et qui propose aujourd'hui la famille AP600/1000.
- **Areva**, filiale du CEA, née du transfert de technologie de Westinghouse vers la France qui donna naissance au modèle REP, et qui en promeut maintenant une évolution, l'EPR
- **Siemens**, qui avait également acquis la licence PWR de Westinghouse, a récemment rompu sa collaboration avec Areva et a aussitôt annoncé une alliance avec
- **Atomenergoprom**, entité russe dépendant de Rosatom, commercialise la famille VVER

ainsi que quelques nouveaux entrants comme le chinois **CGNPC**, qui cherche à placer son modèle CPR-1000 dérivé du REP construit sous licence Areva à Daya Bay.

En BWR, le jeu est plus restreint : on retrouve Toshiba-Westinghouse et Siemens, ainsi que **General Electric-Hitachi**.

Enfin, sur la niche du réacteur à eau lourde, seuls les Indiens de NPCIL semblent aujourd'hui être actifs. L'Inde vient ainsi de promettre de construire des centrales nucléaires CANDU au Kazakhstan en échange d'une sécurisation de son approvisionnement en uranium.

### Perspectives

Dans les prochaines années, on devrait voir le jeu concurrentiel s'intensifier sur le marché du PWR. Du point de vue des opérateurs électriques des pays industrialisés, l'offre y est en effet vaste et la compétition qui s'y livre laisse espérer des prix de vente optimisés.

Sur le segment du réacteur pour « pays primo-accédant émergent », la situation est plus confuse : en plus de l'offre CANDU, Atomenergoprom proposerait des centrales électriques flottantes – probablement des navires à propulsion nucléaire reconvertis – tandis que le CEA reste discret sur les projets qu'il mène actuellement sur le pourtour méditerranéen.

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, la Chine ne cherchera sans doute pas à s'imposer sur ces deux marchés à l'exportation : face aux Européens, aux Américains du Nord, aux Japonais... et même aux Indiens, son expérience en exploitation est beaucoup trop récente pour être crédible : en effet, mesuré en années-réacteurs par le CEA, l'expérience d'exploitation de la Chine est près de 4 fois inférieure à celle de l'Inde, 12 fois à celle de la Russie, 20 fois à celle de la France... et 43 fois à celle des Etats-Unis !

En terme de développement du nucléaire civil, la stratégie chinoise est probablement de s'équiper en PWR dans les prochaines années pour satisfaire sa soif inextinguible d'énergie en réduisant ses émissions de carbone, tout en se préparant une place au premier rang pour le futur marché du réacteur à neutrons rapides.

## Dates à retenir

Par **Christiane DREVET (ECN 65)**

10 juin 09  
23 ou 30 sept 09  
ou 24 sept ou 1 oct  
21 ou 22 oct 09  
18 ou 19 nov 09  
16 ou 17 dec 09

**Transports durables**, ASIEM

**Climat et économie**, ASIEM

**Dérégulation énergétique : le point de vue des consommateurs**, ASIEM

**Chine et environnement (à confirmer)**, ASIEM

**AIE WEO 2009 (à confirmer)**, ASIEM

*Les lieux et le mode d'inscription sont précisés sur l'invitation, insérée au site [www.centrale-energie.fr](http://www.centrale-energie.fr), un mois avant chacune des conférences*

**Au sommaire du prochain numéro (juillet 2009)**  
**Combien d'énergie faut-il pour extraire un baril de pétrole ?**  
**A propos de bilan énergétique (2) : énergie utile**  
**Le nucléaire civil dans le monde (2) : le cycle du combustible**  
**Dates à retenir**

Rédacteur en chef, mise en page : Etienne PESNELLE (ECP 86)  
Rédactrice-adjointe : Christiane DREVET (ECN 65)