

Quelle place pour le nucléaire dans le mix énergétique mondial du vingt et unième siècle ?

Benjamin Dessus

**Intervention dans le cadre du colloque
«Le risque nucléaire et la décision publique»
organisé par le GRECHEC à l'ENS de Paris,
lundi 14 novembre 2011**



www.global-chance.org

Quelle place pour le nucléaire dans le mix énergétique mondial du vingt et unième siècle ?

Benjamin Dessus, novembre 2011

Pour essayer d'éclairer cette question, on se propose d'analyser des scénarios contrastés. Et d'abord les scénarios «main stream» comme ceux de l'AIE. Ce type de scénario repose sur deux postulats implicites :
- Puisque le CO₂ apparaît comme de très loin le premier responsable du réchauffement climatique, c'est la question énergétique qui constitue l'essentiel de la problématique du climat.
- Comme il est impensable pour des «gens sérieux» de remettre en cause la croissance économique, même dans les pays riches, ni nos modes de vie, et que la relation du niveau de vie avec la consommation d'énergie reste déterminante (même si on peut l'atténuer par des efforts d'économie d'énergie), la seule voie réaliste réside dans la substitution d'énergies non-pétrolières au pétrole et non-carbonées aux énergies fossiles, autrement dit *la croissance verte*.

D'abord l'équation *Emissions de gaz à effet de serre = énergies fossiles* ? Très vite en effet on a assimilé « teq CO₂ » et « t CO₂ ». Pourtant, quand on regarde le dernier rapport du GIEC on constate qu'à l'horizon 2110, le CO₂ énergétique émis aujourd'hui ne compte que pour 61 % du total du problème climatique. Et si, comme on le pense aujourd'hui, la question du réchauffement ne se pose plus seulement à 100 ans, mais à un horizon beaucoup plus proche de 20 ou 30 ans, les émissions de méthane mondiales qui, à l'horizon 2110, comptent pour 15 % des émissions totales, comptent pour 38 % à l'horizon 2030 : le gaz carbonique émis en 2010 ne contribue donc plus que pour 43 % au réchauffement redouté en 2030. Il est donc tout à fait exagéré d'assimiler la question climatique à la seule question énergétique.

Responsabilité des différents GES à différents horizons

	2110	2050	2030
CO2 énergie	60%	49%	43%
CO2 (forêt, ciment)	16%	14%	12%
N2O	8%	7%	6%
CH4	15%	30%	38%
Divers	1%	<1%	<1%

Les scénarios

En ce qui concerne les questions de croissance, de modes de vie et de maîtrise de l'énergie, l'histoire des scénarios de prospective énergétique est très éclairante. Jusqu'à la fin des années 1980, les scénarios imaginaient pour 2050 des consommations d'énergie mondiale trois à quatre fois supérieures à celle des années 1980. Une exception avec le scénario de Goldenberg en 1986 qui pour la première fois envisageait une décroissance significative de la consommation des pays riches dès 2020.

En 1990, F. Pharabod et moi-même avons élaboré au CNRS un scénario, NOE, en adoptant une approche normative de deux problèmes d'environnement globaux : limiter les émissions de gaz carbonique en 2060 aux quantités que la biosphère terrestre est censée pouvoir absorber annuellement et stopper avant 2100 la croissance de la masse de déchets nucléaires à longue durée de vie. Résultat : moins de 12 Gtep en 2060 avec un profond rééquilibrage Nord-Sud, puisque les habitants du Nord voyaient leur consommation énergétique annuelle par tête divisée par 2,5 et celle des habitants du Sud doubler. Comment ? D'abord, avec une diminution de l'intensité énergétique du PIB dans les pays riches de 2 à 2,5 % par an, mais aussi avec un ralentissement très net de la croissance dans ces pays (0,9 % par an) par rapport aux anticipations des scénarios du CME. C'était donc l'image d'un monde beaucoup plus sobre en énergie, beaucoup plus égalitaire, respectueux des normes environnementales choisies, sans rupture technologique, mais qui par contre remettait en cause la croissance minimale de l'ordre de 2 % par an considérée à l'époque comme définitivement indispensable aux pays riches.

En 2006 l'AIE a commencé à prendre en compte les questions de climat en cherchant à quelles conditions ses scénarios prévisionnels pouvaient être infléchis pour respecter les recommandations du GIEC. C'est ainsi qu'en 2008, *Energy Technology Perspectives* examine l'importance relative d'une dizaine de programmes d'action pour faire chuter les émissions de près de 62 (Gt) de CO₂ à 12 Gt de CO₂ en 2050 par rapport au scénario prévisionnel précédemment établi (27 en 2005).

Ses conclusions confirment les anticipations des scénarios «sobres» élaborés vingt ans plus tôt : la maîtrise de l'énergie compte pour 54 % du potentiel total de réduction des émissions. Suivi des renouvelables (21%), le stockage du CO₂ (19 %) et la relance du nucléaire mondial (6 %).

Des résultats proches du point de vue des GES mais des stratégies contrastées

Globalement, le scénario NOE et le scénario de l'AIE dit «450 ppm» donnent des résultats équivalents du point de vue du climat. Mais ils divergent profondément sur trois points majeurs : le degré de confiance dans le progrès scientifique et technique, dans le dogme de la croissance économique comme élément incontournable de la survie des sociétés, y compris des plus riches, enfin dans l'aspect négociable ou non de «notre» mode de vie.

Le scénario 450 ppm de l'AIE par exemple suppose le lancement simultané d'un très grand programme de captage stockage du CO₂, d'un vaste programme nucléaire mondial et d'un programme d'énergies renouvelables très ambitieux. Il cumule ainsi plusieurs paris : la pleine réussite technico-économique de technologies encore à l'état de prototype comme le stockage du CO₂, une dynamique très rapide d'implantation de ces technologies, une acceptation sans faille de ces programmes par les diverses sociétés et enfin une très bonne synergie entre ces divers programmes qui souvent s'attaquent aux mêmes marchés. C'est évidemment problématique.

L'élimination de 10 Gtonnes de CO₂ en 2050 par captage-stockage suppose une adoption massive et rapide de cette technologie et surtout la possibilité de stockage de ce CO₂ dans des nappes aquifères proches des lieux de production. Pour le nucléaire, la relance que propose l'AIE implique pratiquement une obligation de réussite de la mise au point des réacteurs de la génération IV au plutonium dans les 30 ans qui viennent, pour éviter la pénurie d'uranium 235 au-delà de 2040, avec l'ensemble des risques que cela comporte, en particulier en termes de prolifération.

Les deux programmes précédents ont enfin en commun un très mauvais rendement énergétique. Le captage-stockage avec une surconsommation de 15 à 20 % d'énergie. La taille des unités et les précautions d'installation du nucléaire qui rend pratiquement impossible l'utilisation de la chaleur perdue lors de la production d'électricité – 65 % de l'énergie produite !

C'est donc au prix d'un cumul de paris scientifiques, techniques, économiques et sociaux qui s'emboîtent que le scénario de l'AIE boucle son bilan.

Des divergences profondes

Premier constat : l'AIE ne remet pas en cause l'hypothèse d'une croissance économique encore significative des pays riches dans les 40 ans qui viennent, autour de 2%. Cela veut dire que la convergence des niveaux de vie vers celui des habitants des USA se situerait pour la Chine vers 2060 à des niveaux de l'ordre de 80 000 \$ par habitant, et bien plus tard pour l'Inde ou l'Afrique et à des niveaux nettement supérieurs à 100 000 dollars.

Un scénario comme NOE entérine au contraire la nécessité de stopper la croissance économique des pays du Nord les plus riches, ce qui permet d'une part d'atteindre la convergence des niveaux de vie beaucoup plus tôt et à des niveaux nettement plus modestes et, au sein des pays riches, de réaliser des économies d'énergie supplémentaires de l'ordre de 45 % en 2050 par rapport au scénario AIE.

Deuxième constat : Dans les scénarios de l'AIE, il n'est pas envisagé d'évolution significative des modes de vie actuels des pays riches. Dans les scénarios sobres type NOE, par exemple, l'urbanisme extensif pavillonnaire n'est plus la règle, la vitesse de transport individuelle, source de concurrence accrue des

usages de l'espace, n'est plus systématiquement recherchée. C'est la notion de *service de mobilité de l'ensemble de la population* plutôt que celle de *propriété et de vitesse individuelle* qui domine avec comme priorité un accès globalement plus performant et plus égalitaire à la mobilité qu'aujourd'hui. De même, NOE suppose une réorganisation des circuits de production et de distribution des marchandises qui favorise la proximité, décentralisation qui laisse intacte la possibilité d'utiliser la chaleur inéluctablement générée par les centrales électriques. Enfin, ce type de scénario met clairement à l'honneur la sobriété énergétique individuelle et collective.

Derrière ces images de «sortie de crise» se profilent donc des priorités bien différentes que masque une sorte de consensus de façade sur l'importance de la maîtrise de l'énergie. Pour les tenants de la *croissance verte*, c'est en fait la croissance qui reste intouchable, même pour les plus riches : au progrès technique de faire le reste. Pour ceux qui s'inquiètent des paris technologiques irréalistes, la sobriété des comportements est un élément indissociable de la maîtrise de l'énergie, à la fois pour réduire les inégalités les plus criantes et pour éviter «l'effet rebond» qu'engendrent les progrès d'efficacité énergétique.

Et le nucléaire dans tout cela ?

La situation en 2011

Le parc mondial de 450 réacteurs environ dans une trentaine de pays, cumule un peu moins de 400 GW de puissance installée et 6% de l'énergie primaire mondiale, mais 2,4% de l'énergie finale. Une part de l'électricité mondiale en décroissance : 18% en 1995 13,5% en 2009.

C'est un parc dont l'âge moyen atteint 27 ans, alors qu'il a été généralement prévu pour une durée de vie de 30 ans.

Les émissions évitées par ce parc (1,8 Gt CO₂ à 650gCO₂ /kWh) sont de 3,6% de l'ensemble des GES (à 100 ans) et de 3,1% à 2050.

4 ou 2 accidents majeurs de réacteurs (selon qu'on considère ou non les accidents des réacteurs comme liés) se sont produits au monde au cours des 30 dernières années, contre un objectif affiché de 0,014 (10-6 par réacteur et par an) : un rapport 285 à 142

L'élimination et ou le stockage des déchets HAVL ou MAVL ne sont pas des problèmes résolus.

La stratégie, le planning et les coût de démantèlement restent très incertains. Il existe un rapport 15 entre les coûts prévisionnels français et anglais

Il existe une polémique importante sur la prolifération vers les armes. Même si on peut en exclure en partie les centrales elles mêmes, l'enrichissement de l'uranium et surtout son retraitement sont sources de risques de prolifération.

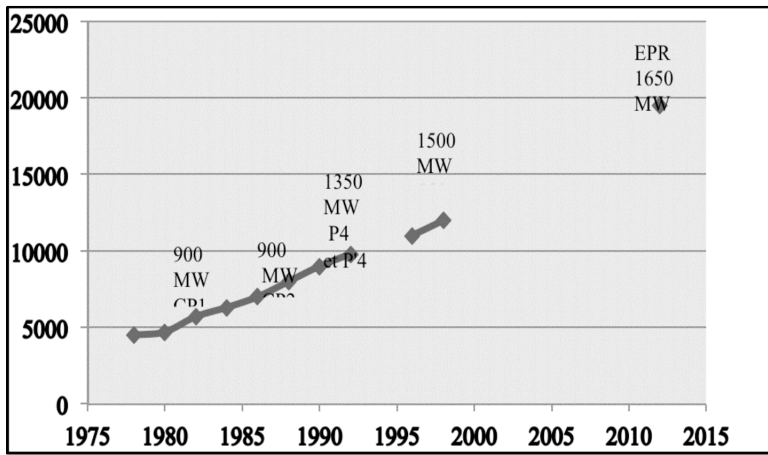
Les perspectives

On va examiner successivement les points suivants :

- Les coûts futurs
- Le marché mondial
- Les émissions évitées
- Les ressources en uranium et les réacteurs du futur ?
- La fusion

A - Les coûts futurs

L'histoire des 50 dernières années montre un phénomène très atypique et unique de désapprentissage industriel, comme le montre la figure ci-dessous :



Le coût au d'investissement en francs ou euros constants au kW augmente linéairement avec le temps, l'expérience et le nombre de réacteurs construits au contraire des lois classiques de l'industrie. L'EPR se situe sur cette droite, voire au-dessus. Ces coûts élevés et croissants d'investissement se traduisent par une forte influence sur le coût total du MWh comme le montre le tableau ci-dessous.

EPR (3800 euros/kW) fonctionnant 6500 heures par an (75% de taux de charge)

Taux d'actualisation	Durée de vie : 40 ans	Durée de vie :60 ans
6%	38,6 €/MWh	36,3 €/MWh
8%	42,6 €/MWh	40,2 €/MWh

Les coûts de fonctionnement se caractérisent aussi par le poids très important des frais annuels fixes par rapport aux frais variables (proportionnels à la production).

Le rapport Charin Dessus Pellat donnait la formule C exploit = 50€/kW +0,75€/MWh en €/2000.

Ordre de grandeur du coût d'exploitation au MWh de l'EPR en fonction de son utilisation annuelle

€/MWh	4000 heures /an	6000 heures /an	8000 heures /an
Fixe	15	10	7,50
Proportionnel	0,9	0,9	0,9
Total	15,9	10,9	8,4

En ce qui concerne le combustible, en 2003 la DGEMP (ministère de l'industrie) estimait le coût du combustible autour de 4 (€/MWh) dont 1,5 environ pour l'uranium, avec un uranium à 20\$/livre. En 2010-2011 le prix de l'uranium a oscillé entre 50 et 75\$/livre. Le coût complet du combustible passe alors dans la fourchette 6,8- 8,6 €/MWh.

Au total hors aval du cycle et assurance contre le risque d'accident majeur, on obtient la répartition du coût de production suivante, toujours pour l'EPR, considéré par ses promoteurs comme le meilleur réacteur.

Coût MWh EPR hors démantèlement, aval du cycle et assurance

€/MWh.	
Investissement initial	43
Exploitation	10
Combustible	7
Total	60

Au total de l'ordre de 60€/ MWh avec une marge de + ou - 10%.

La question des surcoûts incertains

- **La mise à niveau post Fukushima**, des réacteurs type EPR par exemple qu'on ne sait pas encore chiffrer.
- **Le coût du démantèlement poste très mal renseigné.**

En France le ministère de l'industrie estime ce coût à 15% de l'investissement initial soit environ 220 M€ par réacteur, sans justification précise.

Mais le coût estimé du démantèlement de Brennilis (480M€) est 20 fois supérieur au coût initial. Enfin le coût de démantèlement prévu au Royaume Uni est de 2,9 G€ par réacteur, 15 fois plus qu'en France.

On est donc en pleine incertitude. En fait ces écarts d'estimation qu'il n'existe pas de doctrine de démantèlement bien établie, ni en termes techniques ni en terme de calendrier...

Cependant les dépenses à engager dans les 10 ans qui viennent sur le parc actuel risquent de peser fortement sur les coûts . La pratique de l'actualisation des investissements sur des périodes de l'ordre de 40 ans a fortement contribué à l'oubli de l'importance de cette affaire . A 8% de taux d'actualisation un investissement de 1000 euros est comté pour 46 euros. A 3% il n'est encore comté que pour 310 euros....

- **Le coût du traitement et conditionnement des déchets (hors stockage), mieux connu.**

Le rapport CDP 2000 l'estimait à 2 €/MWh environ, la DGEMP dans ses coûts de référence 2003 à 1€/MWh. L'incertitude porte en particulier sur l'influence du démantèlement des ateliers de la Hague sur ces coûts.

- **Le coût du stockage « définitif » des déchets HAVL et MAVL encore très mal connu.**

L'estimation du coût d'investissement du stockage géologique par l'ANDRA, est passé de 15 à 35 milliards d'euros en 4 ans et de nombreuses questions de conditionnement et stockage de déchets à plus faible activité restent non résolus

- **Les coûts d'assurance contre le risque d'accident majeur**

Les évaluations des coûts d'accident majeur de Tchernobyl et de Fukushima se situent entre 100 G€ et 500 G€.. Actuellement les assurances du producteur et de l'Etat portent sur 2G€ environ .

Si l'on veut assurer pour 200 G€ le parc français avec les probabilités constatées au niveau mondial (0,5 accident tous les 30 ans pour la France) la prime atteindrait de 6 à 12€/MWh (2,4 à 4,8 G€/an) selon la rapidité de constitution de la cagnotte (10 ou 30 ans).

- **Les coûts de R&D et de contrôle**

Il s'agit des coûts de recherche du CEA et du CNRS non refacturés à EDF (environ 300 M€/an) de ceux d'Areva (100 M€/an) et des budgets de l'IRSN et de l'ASN (450 M€/an), soit au total moins de 1 G €/an et 2 à 2,5 €/MWh.

Au total des investissements supplémentaires de 50% à 150% de l'investissement initial et des frais mobiles (assurance, recherche, contrôle) de 9 à 15€/MWh.

Globalement, on constate une très forte incertitude sur le coût futur total du «nouveau» nucléaire (80 à 120€/MWh?), bien supérieure, par exemple, à celle qu'on connaît sur les coûts des économies d'électricité ou les renouvelables proches de la maturité.

B - Le marché mondial

Le renouvellement du parc mondial vieillissant est déjà un objectif ambitieux. Pour ne pas reculer il faudrait reconstruire 170 GW avant 2025 (dans l'hypothèse optimiste d'une durée de vie moyenne des réacteurs de 40 ans). Ce n'est évidemment pas gagné.

Le marché se heurte d'autre part à la question du pas d'investissement technique et financier pour les nouveaux pays (au minimum 10 milliards de dollars de mise de fond initiale) et à l'organisation du réseau qu'impose le nucléaire (question des *smart-grid* et des renouvelables).

S'y ajoute l'effet post Fukushima (décisions d'arrêt en Allemagne et autres), la concurrence du gaz et la forte incertitude sur les coûts d'aval à long terme.

En France la balance commerciale annuelle de l'industrie nucléaire et de la production électronucléaire fluctue autour du milliard d'euros en positif : 0,3 G€ en 2009 et 1,7 G€ en 2010. C'est 4 fois moins que la balance commerciale du lait ou du vin par exemple.

C - Les émissions évitées

Dans le scénario Blue Map de l'AIE, le moins émetteur de GES, 1200 GW de nucléaire en 2050 produisant 7500 TWh et évitent de 2,5 à 4,7 Gt de CO₂ selon le mix remplacé pour des émissions *énergétiques* de 62 Gt de CO₂ auxquelles il faut ajouter entre 25 et 35 au moins de Gt d'éq CO₂ des autres GES. Le nucléaire joue donc un rôle marginal vis à vis des émissions globales de GES, même dans ce scénario.

D - Les ressources en uranium et la génération 4

On sait qu'en cas de relance du programme nucléaire mondial, se pose un problème d'accès à l'uranium.

A court et moyen terme, l'atonie du marché des centrales n'a pas incité les producteurs d'uranium à développer de nouvelles mines. Et comme le délai de mise en exploitation dépasse souvent une dizaine d'années, le risque d'un renchérissement des prix de l'uranium est réel.

A plus long terme, ce sont les ressources même qui sont en cause. La réponse proposée repose sur l'emploi de plutonium dans des réacteurs dits de génération IV analogues à Superphenix qui permettent de valoriser plusieurs dizaines de fois mieux le minerai d'uranium (U 239) qu'actuellement. Mais le plutonium indispensable suppose de généraliser le retraitement du combustible. Les technologies correspondantes de réacteur ne sont pas au point, et, en cas de succès vers 2040-2050, leur adoption éventuelle entraînerait le monde dans une civilisation du plutonium pour plus de 100 ans avec des risques importants.

E - Et la fusion?

Même les plus optimistes défenseurs de la fusion contrôlée n'imaginent pas l'industrialisation de la fusion avant 2080.

D'autre part, ITER, actuellement en construction à Cadarache est l'objet de critiques majeures de la part d'une partie de la communauté scientifique à la fois sur sa faisabilité même et sur les risques associés à son fonctionnement :

- *Disruptions* pouvant conduire à une destruction et une catastrophe écologique,
- Béryllium et tritium particulièrement dangereux
- Déchets très radioactifs (bombardement neutronique des parois) etc.

La fusion n'apparaît donc pas comme le «relais» vraisemblable d'un nucléaire de fission présenté parfois comme transitoire.

Eléments de conclusion

L'analyse précédente montre :

- Que la poursuite du nucléaire est inutile dans les scénarios de transition du type NOE ou Négawatt qui refusent les paris technologiques.
- Que dans les scénarios type AIE, le triplement du nucléaire avant 2050 se heurte à des difficultés importantes de marché sans apporter de contribution significative à la solution du problème climatique. Ce triplement impose par contre de passer à la génération 4 non encore démontrée et de s'engager sur le long terme dans une civilisation du plutonium avec de nouveaux risques.
- Que *l'incertitude* sur les coûts futurs de la filière sont bien supérieurs à ceux de la maîtrise de l'électricité ou des renouvelables et rejoignent ceux sur les énergies fossiles.

L'analyse montre aussi qu'en cas de poursuite et croissance du nucléaire de fission, la probabilité d'un ou plusieurs accidents majeurs dans les 30 ans qui viennent est loin d'être négligeable.

Dans ces conditions il faut se demander sérieusement si le «jeu vaut la chandelle».