

Compte tenu de l'actualité brûlante, je voudrais revenir sur quelques fondamentaux, qui manquent cruellement dans les débats du moment sur l'énergie, que je trouve terriblement précipités et simplificateurs. Ce qui suit est la modeste contribution au débat d'un citoyen éclairé mais non spécialiste, qui s'intéresse quand même au sujet depuis près de quarante ans.

1.1.1 L' électricité nucléaire en France ¹:

a. **au plan fondamental** : un réacteur nucléaire n'est rien d'autre qu'une grosse bouilloire dont le rendement de Carnot n'est que de 34 % sans compter les pertes en ligne. Toutes ses filières (graphite-gaz, eau bouillante, eau pressurisée,...) sont donc dérivées des principes de la machine à vapeur du XVIIIe siècle. A l'époque où ils ont été conçus, nous étions encore dans le rêve prométhéen de l'énergie illimitée (on disait d'un gramme d'uranium qu'il représentait plusieurs dizaines de kg de pétrole, et ça nous faisait rêver). Compte tenu de sa dangerosité, on n'a pas osé augmenter ce faible rendement par de la cogénération (en y associant des réseaux de chaleur pour chauffer nos villes). En outre, il n'était alors pas question de lutte contre l'effet de serre, puisque celui-ci n'était pas encore reconnu. En quarante ans, l'Homme a montré que d'autres sources d'énergie que celles issues du feu (carboné ou nucléaire) pouvaient être « décarbonnées » et mises en place dans un temps relativement court: la fabrication d'électricité en direct par des renouvelables comme la grande hydraulique, puis l'éolien et le solaire photovoltaïque ont toutes au moins cette vertu, et des vertus plus belles encore sur le plan sociétal pour la dernière.

b. **au plan de la techno-science** : c'est une machine conceptuellement simple mais extrêmement complexe à faire fonctionner compte tenu du fait que par nature, la réaction est divergente. Outre le contrôle des barres de graphite qui régulent en permanence la réaction, il faut en continu faire marcher des pompes et des circuits d'eau sans défaillir pendant quarante ans. Or il se trouve qu'au cours des 30 dernières années, les faits nous ont prouvé à de nombreuses reprises dans des accidents plus ou moins graves, que tout ceci est sujet à des éléments de défaillance extérieurs (humains, géologiques, météorologiques, ...) qui bien que peu probables, se sont le plus souvent avérés comme de dures réalités. Rappelons nous que l'imprévisible est hautement probable (cf La Théorie du « Cygne noir », développée par le philosophe Nassim Nicholas Taleb, qui dans son ouvrage nous fait remarquer que l'histoire humaine a été façonnée par des évènements imprévisibles).

c. **au plan de la dangerosité** : Aussi improbables soient-ils, les risques liés au nucléaire civil ont des effets trop monstrueux sur les populations pour être socialement acceptables. 40 000 morts et 500 000 irradiés à Tchernobyl ; une modification définitive du paysage sur des milliers de km² pour les siècles des siècles, ceci n'a rien à voir avec les conséquences d'un crash d'avion (cf H.Proglio, patron d'EDF, qui le 16 Mars 2011 sur RTL compare les effets d'apprentissage du nucléaire avec ceux de l'aviation : « tout accident d'avion se traduit par une difficulté pour l'industrie aéronautique, mais ça ne condamne pas les avions pour autant »). On sait bien que ça n'est pas lui, ni Eric Besson qui iront faire les « héros liquidateurs » pour sauver les populations en danger d'irradiation. Au passage, il n'a même pas été prévu d'interdiction du survol aérien du centre de retraitement de La Hague (cf le très instructif film de Thomas Johnson « Nucléaire en alerte » qui simule en temps réel les conséquences pour les populations d'une fusion du coeur de la centrale de Flamanville). **A un moment donné, l'humanité doit savoir choisir entre la vie et les équations économiques : nous sommes à ce tournant de l'histoire.**

¹ Réflexions de l'auteur au moment de la catastrophe de Fukushima le 20 Mars 2011

d. **au plan de la décision politique** : Mais pour faire ce choix il faut être en démocratie. Une vraie démocratie, pas celle de nos pays où l'on dépose un bulletin dans l'urne tous les deux ou trois ans. En 1974, jeune ingénieur chez IBM, je faisais partie à Nice du mouvement d'écologie politique et je me suis vivement opposé dans de nombreuses manifs, au choix Gaullo-Pompidolien du gouvernement Messmer (proposé par un quarteron de polytechnicien au petit matin dans une Assemblée Nationale aux trois quarts vide), sans la moindre consultation démocratique. En outre, il s'agissait à l'époque de dire « merde » aux arabes et à ce détestable OPEP qui augmentait outrageusement le prix du pétrole (passant de 2 \$/baril en 1973 à 12 en 1974, puis à 40 en 1980). L'idée était de gagner plus d'indépendance énergétique au moins pour la fabrication de notre électricité. Les faits nous ont montré que sur le coût direct de l'électricité produite, nous étions gagnants, mais que sur le taux d'indépendance énergétique, le mensonge était grossier.

e. **au plan du secret et de la communication** : les années 70 ont été marquées par une chape de plomb sur le sujet du nucléaire civil tant ses acteurs étaient liés à l'époque à la grande épopée gaullienne du nucléaire militaire. Quand la CFDT a sorti son fameux ouvrage (extrêmement bien documenté puisqu'écrit par les acteurs des centrales) comme le dit Bernard Laponche avec humour, on les a sommés de se taire en leur disant que « tout ceci doit rester entre nous, n'être communiqué, ni aux journalistes, ni aux politiques, ni... aux bonnes sœurs ». Cependant, à l'époque, régnait encore sur le sujet, une hiérarchie de la compétence, et nos centrales ont été conçues et opérées par des entreprises nationalisées qui avaient le souci de la sécurité avant celui de la rentabilité. Avec les années 80, le nucléaire qui ne nous posait pas trop de problèmes, s'est peu à peu banalisé auprès du grand public et des organismes indépendants ont vu le jour (CRIRAD), donnant naissance à des sources d'informations de plus en plus transparentes (IRSN, ASN, ...). En même temps qu'avait lieu cette évolution positive, nos représentants politiques n'ont fait aucun effort pour comprendre les implications sociétales du choix du nucléaire, et celui-ci leur apparaît maintenant comme une source d'énergie irremplaçable, au mieux comme un mal nécessaire pour les plus avertis d'entre eux.

f. **au plan de l'indépendance énergétique** : les ressources d'uranium se trouvent toutes à l'étranger, en grande partie au Niger, qui depuis peu, n'est plus le jardin de la France où on pouvait y imposer nos conditions. En outre, peu de nos décideurs savent que l'indépendance énergétique de la France n'est que de 12% (7% bois énergie, 2% hydraulique, 1% agro-carburants, 2% éolien et solaire), et non pas de 50% comme nos politiques et nos journalistes analphabètes nous en rebattent les oreilles depuis 20 ans !

g. **au plan de la pérennité sur le long terme** : le nucléaire dépend d'une ressource fossile (l'uranium naturel dont l'horizon d'utilisation est d'une centaine d'années). Quant aux déchets, outre le fait que le centre de retraitement de La Hague est devenu la poubelle du monde, malgré la loi Bataille de 1993, nous n'avons toujours pas décidé où enfouir nos déchets à longue durée de vie. Le développement du nucléaire dans les scénarios qui y font le plus appel (un facteur 4 d'augmentation par rapport à 2010) ne va pas sans un renforcement important du cumul des déchets et des risques de prolifération.

h. **au plan du bilan carbone** : en termes de lutte contre l'effet de serre, la contribution du nucléaire à la diminution des émissions dans le même scénario est de l'ordre de 12 à 13% (en faisant l'hypothèse favorable que le nucléaire se substitue uniquement à du charbon), ce qui n'est pas négligeable mais montre bien que ce n'est pas une solution à la mesure du problème de réchauffement du climat.

i. **au plan du coût** : le coût officiel annoncé par EDF est imperturbablement le même depuis 15 ans : entre 35 et 45 € /MWh. Il s'agit d'un coût direct pour l'opérateur. A ma

connaissance, ce coût n'inclut pas le coût de la gestion longue des déchets – car inconnu, pas plus que celui du démantèlement des centrales – puisque celui de la centrale de Brénilis en Bretagne par exemple, a été multiplié par quatre en dix ans. En outre, en cas d'accident, ce sont les assurances et l'Etat qui prennent en charge le coût sanitaire et social. A cause des sécurités supplémentaires que devront incorporer les nouvelles générations, le coût direct ne peut qu'augmenter, en même temps que le coût des renouvelables ne peut que diminuer (par la vertu de la loi de Verdoorn).

j. **au plan de la propriété des centrales** : Il faut souligner ici le fait que la course à la compétitivité ainsi que la rapacité financière des acteurs a conduit l'opérateur EDF à mettre en place beaucoup de sous-traitance mal payée dans les parties les plus critiques des réacteurs. Ceci ne peut qu'augmenter les risques liés au facteur humain (cf les protestations récentes d'ouvriers sous-traitants syndiqués à la CGT, syndicat qu'on ne peut pas accuser d'être anti-nucléaire). Dans la folie de la dérégulation et des amitiés présidentielles, nous avons jusqu'à présent échappé à la vente de notre parc nucléaire à Bouygues ou à Vinci, mais jusqu'à quand ? Imaginons ce que deviendrait le rapport coût/ sécurité dans un tel scénario.

k. **au plan de notre activité économique** : fer de lance des potentielles exportations à la française, les centrales nucléaires ne peuvent être construites que dans les pays ayant à la fois la culture technologique et la stabilité politique. De plus les pouvoirs politiques des pays exportateurs, signataires du Traité de Non Prolifération Nucléaire, estiment que ces pays ne doivent avoir aucune tentation de développer des armes nucléaires. Il y a 435 réacteurs en service aujourd'hui dans le monde produisant 2.5% de l'énergie primaire mondiale. Les plus optimistes prévoient encore la semaine dernière au moins 250 réacteurs supplémentaires à construire dans les 20 prochaines années dont 35 nouvelles centrales (100 réacteurs) rien qu'en Chine. La catastrophe de Fukushima a singulièrement obscurci l'horizon d'EDF pour qui l'ambition internationale est ébranlée, aussi bien d'ailleurs que pour AREVA.

1.1.2 Comment sortir du nucléaire :

Même à long terme, avec 20 Gtep (230 000 TWh) cumulées d'ici 2050, l'énergie nucléaire apparaît comme relativement marginale dans le bilan énergétique à l'échelon mondial. En évolution tendancielle, il y aura peu de nouvelles substitutions d'énergie vers l'énergie nucléaire dans le monde au cours des vingt prochaines années. En ce qui concerne la France, mis à part les deux EPR vitrines pour l'exportation, au prix d'une extension de durée des centrales à 40 ou 45 ans, le parc actuel d'une soixantaine de «tranches » restera probablement inchangé jusqu'à 2020, ce qui donne aux politiques le temps de faire les meilleurs choix pour l'avenir du nucléaire et de l'énergie en général. Il n'est pas question d'abandonner en rase campagne les centrales existantes, mais pas plus qu'il n'est question de se lancer dans un nouveau programme de façon prématurée, non désiré et non nécessaire. Avec une production d'électricité de 500 TWh dont 10 % est exportée, la France dispose de plus qu'il n'en faut. Les mesures à prendre d'urgence par le gouvernement sont des mesures de sécurité des centrales et pour réguler nos consommations, des mesures de sobriété et d'efficacité énergétique. Ceci requiert des programmes d'éducation et non pas des publicités éhontées pour se peindre en vert et au final augmenter notre consommation d'électricité.

1.2 L'électricité renouvelable en 2010 :

- a. En 2010, la somme des productions ENR électriques directes mondiales, soit 3 260 TWh (gde hydro : 2 800, éolien : 400 et solaire PV : 60) était déjà supérieure à celle du nucléaire (2 460 TWh). Ceci sans compter la production d'électricité renouvelable à partir de sources thermiques (bio-masse et géothermie).
- b. Sur la base des croissances respectives actuelles, on peut raisonnablement prévoir qu'en 2020 la somme des productions ENR électriques directes, soit 5 050 TWh (gde hydro : 3 150, éolien : 1 250 et solaire PV : 650) sera très supérieure à celle du nucléaire (3 460 TWh).
- c. A terme - en 2050 - la somme des productions ENR électriques directes peut représenter 50% de notre consommation mondiale d'électricité (42 000 TWh) et le nucléaire 10%, les 40% manquants pouvant être produits à partir de sources thermiques renouvelables (bio-masse et géothermie).
- d. L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer (754 million de TWh) représente plus de 5 000 fois l'énergie que nous consommons en 2010 (environ 12 Gtep ou 139 000 TWh). Sur le long terme - environ 50 ans - le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait couvrir la consommation mondiale actuelle - qui pourrait rester constante si nous options tous pour l'efficacité et la sobriété.

Consommation mondiale d'énergie				GW	taux	Prod TWh		GW	taux	Prod TWh	
1 kep	11,6	kWh		1990	3 318	42%	12 166	1990	340	77%	2 293
1 Mtep	11,6	TWh		2000	3 937	43%	14 831	2000	360	78%	2 460
1 Gtep	11 600	TWh		2010	4 690	44%	18 078	2010	410	79%	2 837
Conso prim mondiale				Electricité				Nucléaire			
	croissance	Gtep	TWh	croissance	part prim	Gtep	TWh	croissance	part élect	Gtep	TWh
2000		10,2	118 444	2,0%	12,5%	1,28	14 831	0,7%	16,6%	0,21	2 460
2010	1,65%	12,0	139 504	2,0%	13,0%	1,56	18 078	1,4%	15,7%	0,24	2 837
2020	1,45%	13,9	161 104	2,1%	13,8%	1,92	22 254	2,0%	15,5%	0,30	3 459
2030	1,35%	15,9	184 223	2,1%	14,9%	2,36	27 395	1,5%	14,7%	0,35	4 014
2040	1,25%	18,0	208 591	2,2%	16,3%	2,94	34 054	1,0%	13,0%	0,38	4 434
2050	1,15%	20,2	233 859	2,2%	18,1%	3,65	42 333	0,0%	10,5%	0,38	4 434
Part primaire en 2050	100%			100%	18,1%				10,5%	1,9%	
Cumul 2000-2050		901,5	10 457 258			137,0	1 589 455			18,7	216 378
Part primaire cumul	100%			100%	15,2%				13,6%	2,1%	

Tableau 1 : Consommation mondiale d'énergie primaire, part de l'électricité et part du nucléaire

	Grande hydro				Eolien				Photovoltaïque			
	croissan	part élé	Gtep	TWh	croissa	part élect	Gtep	TWh	croissanc	part élect	Gtep	TWh
2000	1,3%	2,1%	0,22	2 514	30,2%	0,5%	0,01	77	14,8%	0,0%	0,00	1,8
2010	1,1%	2,0%	0,24	2 803	18,0%	2,2%	0,03	403	42,6%	0,3%	0,01	63
2020	1,2%	2,0%	0,27	3 158	12%	5,6%	0,11	1 252	26,0%	2,9%	0,05	636
2030	1,0%	1,9%	0,30	3 489	6%	8,2%	0,19	2 241	16,0%	10,2%	0,24	2 806
2040	0,8%	1,8%	0,33	3 778	3%	8,8%	0,26	3 012	10,0%	21,4%	0,63	7 279
2050	0,6%	1,7%	0,35	4 011	0%	7,1%	0,26	3 012	4,0%	25,5%	0,93	10 774
Part 2050		9,5%	1,7%			7,1%	1,3%			25,5%	4,6%	
Cumul			17,0	197 536			8,6	99 972			18,6	215 664
Part cumul		12,4%	1,9%			6,3%	1,0%			13,6%	2,1%	

Tableau 2 : Part de la grande hydro, de l'éolien et du solaire PV

	Total électricité renouvelable			Nucléaire	Autres
	part élect	Gtep	TWh	TWh	TWh
2000	17,5%	0,22	2 593	2 460	9 778
2010	18,1%	0,28	3 269	2 837	11 971
2020	22,7%	0,43	5 046	3 459	13 749
2030	31,2%	0,74	8 536	4 014	14 844
2040	41,3%	1,21	14 069	4 434	15 552
2050	42,0%	1,53	17 797	4 434	20 102
Part 2050	42%	7,6%		10,5%	47,5%
Cumul		44,24	513 172	216 378	859 969
Part cumul	32,3%	4,9%			

Tableau 3 : Part des renouvelables, du nucléaire et autres dans la production d'électricité

1.2.1 Le changement de paradigme :

L'énergie solaire photovoltaïque doit se comprendre dans le cadre d'un triple changement de paradigme : le passage des énergies «stocks» aux énergies «flux» d'une part, une grande égalité d'accès d'autre part, et enfin de proximité démocratique (les consommateurs deviennent en même temps producteurs), donc une véritable rupture dans nos modes de raisonnement.

i. Elle ne peut pas être source de conflits armés prédateurs de territoires comme c'est le cas pour les énergies fossiles, mais seulement de guerres économiques.

ii. Le PV ne doit pas être vu comme une technologie supplémentaire pour construire des centrales électriques, en s'en remettant à un oligopole d'opérateurs, mais un moyen parmi beaucoup d'autres de transformation de la société.

iii. Les enjeux ne portent pas tant sur le volume des puissances installées en France, mais - comme l'a si bien montré l'Allemagne - sur la création d'industries innovantes et exportatrices.

iv. Comme la production peut avoir lieu sur le site d'utilisation, à terme la « parité réseau » se mesurera en comparaison du tarif domestique, grâce à des compteurs réversibles. Il faut donc clairement distinguer les producteurs d'électricité de type « utilities » comme les centrales au sol dont l'objectif est de vendre cette électricité (l'ancien paradigme), et les utilisateurs qui auto consommeront toute leur production, et utiliseront le réseau comme un moyen de « stockage temporaire » qui contrebalance le déphasage entre production et consommation (le nouveau paradigme).

v. Les systèmes photovoltaïques ne suivent pas de véritable loi d'économie d'échelle dans leurs coûts d'installation. D'où l'inutilité économique de programmes de grandes centrales en plein champ. L'argument de l'aide à l'augmentation des volumes est fallacieux, il ne vaut que temporairement, dans le cadre d'un tarif très favorable comme c'est le cas aujourd'hui en France.

vi. Ses possibilités décentralisées en termes d'installations sont sources d'emplois, avec une grande diversité d'approches. La révolution informatique de bureau suivie de l'internet qui ont cassé le monopole d'IBM des années 70, nous ont montré le chemin; à nous de répondre présents dans cette fabuleuse révolution pour redonner confiance et espoir aux générations futures ...

vii. Concernant le stockage, les réseaux intelligents incluront la partie recharge de véhicules électriques : chargés au travail et déchargés en différé, les véhicules « transporteront

» l'énergie solaire du midi vers le soir, rendant ainsi à la collectivité à la pointe de 19h, un service d'usage autre que le seul transport.

viii. Malgré une relative stagnation des rendements photovoltaïque, des progrès considérables peuvent encore être faits pourvu que la recherche fondamentale sur les nouveaux matériaux (cellules multi spectrales, absorption à deux photons par des semi-conducteurs magnétiques, couches minces, etc...), et les recherches appliquées pour leur mise en œuvre industrielle soient accompagnées de façon structurée et pérenne.

ix. Avec un gramme d'Indium on peut produire 1 500 kWh d'électricité sur la durée de vie d'un module en couches minces (25 ans). Ceci est l'équivalent de 150 litres de pétrole. C'est aussi fort que l'Uranium, sauf que cette fois-ci, la centrale nucléaire est à 150 millions de km de distance sa durée de vie se compte en milliards d'années et le retraitement des déchets y est intégré.

x. Dans le contexte actuel où c'est encore une industrie qui a besoin d'aide, la vision du législateur doit être globale et à long terme. Si l'on cherche de l'argent pour financer le déploiement d'une industrie solaire, il y a des milliards à trouver par exemple dans le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) implanté à Cadarache, projet qui a pour but de prouver la faisabilité de la production d'électricité à partir de la fusion nucléaire. Ce projet dont j'entends parler depuis 30 ans est un autre rêve prométhéen qui appartient au siècle dernier.

Entre l'ambition trop grande du programme allemand et la taille modeste des réalisations françaises, par l'étendue de ses applications et la diversité des services rendus, l'électricité photovoltaïque n'a pas fini de nous étonner. La pénétration sélective de certaines niches de marché a permis de maintenir une progression constante de la qualité, de la durée de vie et des coûts du matériel, ce qui permet aujourd'hui d'envisager avec confiance la phase d'industrialisation et de diffusion massive.