

LE NUCLÉAIRE A T'IL ENCORE DE L'AVENIR ?

Jacques FOOS,
Professeur Honoraire au Conservatoire National des Arts et Métiers
(Sciences et Technologies Nucléaires)

Introduction

La Fondation Concorde s'est toujours intéressée aux problèmes énergétiques du futur. Un rapport de mars 2008¹ faisait le point sur les diverses énergies et montrait sans complaisance les atouts de l'énergie nucléaire, aussi bien sur le coût d'exploitation que sur le plan des rejets dans l'environnement. Une note plus récente, de décembre 2011² réaffirmait les avantages de cette source d'énergie et évaluait le coût d'une diminution de la part de nucléaire en France dans la production électrique.

Un évènement important a frappé l'humanité toute entière entre ces deux publications. Il s'agit bien évidemment du tremblement de terre de magnitude 9 survenu au Japon en mars 2011 et du raz de marée qui a suivi, avec pour conséquence, d'occasionner des accidents sur 4 réacteurs nucléaires de la Centrale de production électrique de Fukushima.

Il convient de ne pas se jeter dans le passionnel comme le font certains politiciens européens qui stoppent du jour au lendemain une partie de leur industrie énergétique ou arrêtent tous leurs projets sans savoir par quoi les remplacer.

Il est plus raisonnable de se projeter à long terme, d'ici 30 à 40 ans par exemple et de voir si la planète a les moyens de se passer de cette importante source d'énergie. Si c'est oui, le débat est clos. Sinon, avec quelles contraintes, sous quelles conditions peut-on envisager les applications électrogènes de l'énergie nucléaire ?

Une chose est toutefois certaine : le prix de l'énergie va augmenter de façon importante dans les décennies qui viennent. À la fois en raison d'une raréfaction de certaines sources d'énergie (pétrole et gaz), à cause d'un accroissement des coûts d'exploitation (lié essentiellement à une augmentation des contraintes de sûreté et de protection de l'environnement) mais aussi parce que le démantèlement des installations et le devenir des rejets, toutes sources d'énergie confondues, auront été pris en compte. Ceci va conduire les populations jusque-là privilégiées par un prix de l'énergie très bas, à modifier de façon drastique ses rythmes de vie. Il faut s'y préparer !

¹ « Le nucléaire du futur, un atout de développement durable » *Rapporteur : Alexandra Pugliese*

² « Produire en France : le nucléaire au service du pouvoir d'achat et de la lutte contre le réchauffement climatique »

1 - Énergie et démographie

À la fin de l'année 2011, nous avons passé la barre des 7 milliards d'habitants sur la planète mais peu de commentaires ont relié cette question démographique au débat, très animé en cette période pré-électorale, sur les scénarios énergétiques à l'horizon 2025 ou 2050.

La croissance démographique implique bien évidemment de considérer pour cet ensemble de populations, les besoins en eau, en alimentation, en éducation sans oublier la santé. Or tout ramène à l'énergie.

L'avenir de l'eau douce est bien sûr incertain quand on sait que la population mondiale a besoin de 64 milliards de m³ supplémentaires par an. On ne peut satisfaire de tels besoins sans avoir recours au dessalement de l'eau de mer. On est alors ramené à l'énergie puisque le dessalement d'un mètre cube d'eau de mer nécessite 5 kWh. Pour 64 milliards de m³, l'énergie requise équivaudrait à 65 000 éoliennes géantes ou 30 réacteurs EPR et ce, chaque année !

Des simulations ont été entreprises pour reprendre ce vieux rêve de transporter des masses de glace considérables d'eau douce à proximité de régions nécessiteuses. Ainsi, il faut 4 000 tonnes (minimum) de fuel pour arrimer au large des îles Canaries 4,5 millions de m³ de glace provenant de l'Arctique soit une énergie dépensée qui aurait permis le dessalement de 9,3 millions de m³ d'eau de mer, sans compter les autres dépenses !

L'alimentation des habitants de la planète dépend à la fois de la disponibilité en eau, en engrais, en sols. Là aussi, la soif d'énergie est grande. On sait combien les choix d'affectation des terres - entre ce qui sera consacré aux cultures vivrières et aux bio-carburants - sont essentiels. Les émeutes de la faim que l'on a vues dans certains pays en voie de développement sont essentiellement dues à la spéculation sur les céréales dans les pays « riches » anticipant la demande croissante dans ces applications.

Éducation ? Dans beaucoup de villages de l'Inde, le chef de la communauté lance encore l'unique générateur d'électricité une heure le soir. Comment le jeune élève peut-il faire ses devoirs ?

Dans le Bengale occidental, dans les deux hameaux de Kalyani³, situés au milieu d'une forêt si dense qu'il est impossible de les électrifier, la société Schneider Electric a installé des panneaux photovoltaïques qui alimentent les batteries fournies aux familles. Fini, les lampes à kérosène qui brulaient les poumons et piquaient les yeux et que l'on s'empressait donc de fermer dès la fin du dîner. Le chef du village résume ce progrès par « Imaginez un aveugle qui recouvre la vue, c'est pareil ». De plus, une simple lampe comme éclairage public suffit à éloigner les bêtes sauvages. On mesure le progrès !

La santé aussi est affaire d'énergie : prenons un seul exemple : la natalité. Une femme qui porte un enfant et accouche seule, sans aide médicale, dans un village africain, aura consommé pour cette conception quelque 90 kWh en neuf mois. Une femme qui met au monde son enfant dans un pays « riche », après avoir eu des visites médicales régulières, des échographies, un accouchement en maternité, consomme pour cela, l'équivalent énergétique d'environ 4 000 kWh, 45 fois plus, mais c'est de l'énergie bien employée. L'avenir souhaitable est que toutes les femmes du monde bénéficient de cette assistance médicale.

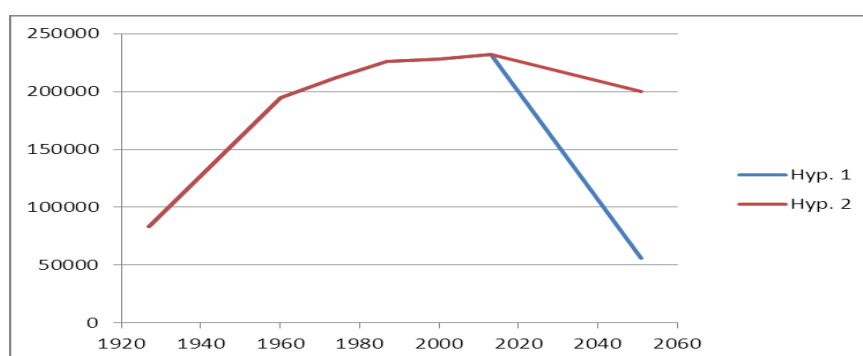
³ D'après « l'Express » n°3207 du 19 décembre 2012

Des prévisions bien optimistes

Sept milliards de Terriens en 2011 et combien en 2050 ? On peut suivre « en direct » cette évolution sur divers sites d'internet. Fort heureusement, ils donnent tous à peu près la même valeur. Plus de 232 000 habitants se rajoutent tous les jours, soit l'équivalent d'une grande ville française par 24 heures. Il s'agit bien d'une différence entre les naissances (autour de 402 000 : près de 5 par seconde) et les décès (170 000). Plus de 90% de ces naissances sont dans les pays en voie de développement : Asie, Afrique et Amérique du Sud. À ce rythme, qui ne décroît pas depuis 2011, nous serons 7 milliards et demi vers juillet 2017, ce qui n'est pas si éloigné que ça !

Certes, une baisse du taux de fécondité a été enregistrée depuis un siècle mais ceci a malheureusement été « compensé », de façon systématique et logique, par un accroissement du nombre des femmes en état de féconder. À chaque décennie, la génération d'adolescentes la plus nombreuse de l'histoire de l'humanité entre dans ses années de procréation. Même si chacune n'a que 2 enfants (au lieu des 5 en moyenne, il y a un siècle), la population va continuer de grimper.

Le graphique ci-dessous présente l'accroissement quotidien de la population mondiale. L'hypothèse 1 (9 milliards de Terriens en 2050) exigerait une baisse drastique de la natalité : passer dès cette année de 400 000 naissances quotidiennes à 220 000 en 2050 !). L'hypothèse 2 prévoit une population de 10 milliards. Elle est plus raisonnable : un accroissement quotidien de la population de 200 000 personnes (soit 370 000 naissances par jour en 2050 au lieu de 400 000 aujourd'hui), ce qui ferait en moyenne 1,3 enfant par Terrienne sur ces 40 ans (0,9 dans l'hypothèse 1).



accroissement quotidien de la population

Hypothèse 1 : 9 milliards d'habitants en 2050 Hypothèse 2 : 10 milliards d'habitants en 2050

Cette évolution de la population mondiale va se traduire par une augmentation considérable de la consommation en énergie. Nous devons non seulement suivre la courbe démographique mais la dépasser pour mieux répondre aux besoins des populations des pays en voie de développement.

Des économistes, fin 2012, évoquaient toutefois l'hypothèse de 12 milliards de terriens en 2050, ce qui ne correspond qu'à une augmentation de 1% des naissances chaque année. Dans la suite, nous sommes restés sur l'hypothèse de 10 milliards d'habitants en 2050.

2 - Les besoins énergétiques de 2050

N'oublions pas que le Monde dont nous faisons partie actuellement est malheureusement simple à décrire dans ses inégalités : 1/5 de la population (où nous nous trouvons) dépense 4/5 de l'énergie totale fournie actuellement par cette planète. Or, au moins 2 autres cinquièmes sont en voie de fort développement, ce qui représente 2,8 milliards de Terriens. Les besoins énergétiques de ces derniers sont considérables et il faut en tenir compte.

Nous n'allons pas nous étendre longuement sur les divers scénarios énergétiques à l'horizon 2050. Les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie ou du Conseil mondial de l'énergie tablent sur une demande énergétique entre 22 et 27 Gtep (Gtep : milliard de tonnes équivalent pétrole) en 2050, contre 10,2 Gtep en 2000 grâce à une meilleure efficacité énergétique. Nous ne mettons pas en cause le sérieux de ces études économétriques, mais elles paraissent bien optimistes : rien qu'en conservant l'augmentation constatée au XX^e siècle (2,35% par an), on arrive à un besoin annuel de 32 Gtep. Comment penser que le monde va consommer l'énergie à un rythme inférieur à celui du XX^e siècle, siècle commencé avec 1,6 milliard d'individus ? Enfin, si l'on se réfère au scénario qui serait le plus réaliste, celui dans lequel on évolue depuis plus de 10 ans, on arrive à une multiplication par plus de 5 de ces besoins⁴.

Cela donne la mesure des efforts à accomplir. La consommation mondiale d'énergie a été multipliée par 10 entre les années 1900 et 2000, passant de 1 à 10 Gtep par an. Selon les scénarios, elle sera comprise entre 30 et 50 Gtep/an en 2050. En fait, il est à peu près certain que nous ne pourrions pas trouver plus de 30 Gtep en 2050, toutes sources d'énergie confondues, comme nous allons le montrer.

3 - Les sources d'énergie, leurs limites et leurs contraintes

L'énergie se répartit essentiellement en trois usages : transport, chaleur et électricité, celle-ci pouvant d'ailleurs être utilisée pour les deux premiers. L'électricité représente environ 20% de l'énergie mondiale. Son utilisation est souple et variée et ses sources de production sont nombreuses et diverses. Cette part dans la consommation d'énergie totale de notre humanité ne devrait pas décroître, dans les décennies à venir, bien au contraire.

La France a franchi pour la première fois la « barre » des 100 000 MW consommés le 8 février 2012 avec 102 098 MW, battant ainsi de 5 000 MW le précédent pic établi le 15 décembre 2010. Ce record n'a pas été battu depuis.

La source d'énergie électrique idéale doit bien évidemment être non polluante et économique ; elle doit respecter le développement durable et utiliser le moins de surface possible. De plus, l'indépendance énergétique est une exigence majeure, oubliée à l'heure actuelle dans certains pays comme le nôtre où on a tendance à ne pas se souvenir des chocs pétroliers des années 1970 et de leurs conséquences à l'époque sur notre économie. Ces menaces existent toutefois toujours en fonction de l'actualité internationale. Aucun mode de production électrique ne peut répondre à tous ces critères et ici comme partout, le compromis est de rigueur. Malgré tout, au regard de toutes ces contraintes, l'énergie nucléaire se compare bien, comme on va le montrer plus loin.

⁴ Ce calcul dans ce cas est basé, pour les pays émergents, sur une consommation à 8%/an jusqu'en 2025 (2,35% pour les autres) puis un fort ralentissement du rythme de croissance à partir de 2025 (2,35% par an comme pendant le XX^e siècle pour tous les pays). On arrive ainsi à une demande de 57 Gtep/an,

Sur un autre plan, le tribut humain payé pour l'exploitation de ces ressources énergétiques est loin d'être négligeable, quelles que soient les précautions prises. Mais là aussi, l'énergie nucléaire se compare au mieux par rapport aux autres sources, éolien compris, quels que soient les chiffres que l'on examine pour dresser ce triste bilan si, évidemment, on se réfère au nombre de kWh produits par chaque source.

Dans ce contexte énergétique, il faut avoir présent à l'esprit que 57% des sources d'énergie consommées aujourd'hui (gaz et pétrole) vont disparaître d'ici à 50 ans (du moins leur production économique comme on la connaît présentement). Par ailleurs, 23% proviennent du charbon dont il faut diminuer la consommation pour des raisons de pollution de la planète (c'est vrai aussi pour le gaz et le pétrole), ce qui fait que 80% de l'énergie utilisée en 2012 a pour origine les combustibles fossiles, émetteurs, entre autres, de dioxyde de carbone CO₂ (ou gaz carbonique) : une tonne de charbon rejette 3,6 tonnes de CO₂ soit 1 900 m³ !

Il faut toutefois souligner qu'il existe des réserves importantes de gaz et pétrole mais ce sont des ressources coûteuses et polluantes à exploiter. Il s'agit d'aller récupérer le pétrole dans les sables asphaltiques et les schistes bitumineux et le gaz également dans les schistes. Dans certains pays, le respect de l'environnement passe après l'intérêt national : le Canada, par exemple, vient de dénoncer le protocole de Kyoto, au moment où il exploite à fond son gaz **de schiste** !

En France, nous nous trouvons assis sur une réserve gigantesque de gaz de schiste : les estimations les plus sérieuses aujourd'hui conduisent à plus de 5 000 milliards de m³ (soit 4,3 Gtep au minimum : 25 ans de notre consommation d'énergie primaire, toutes sources confondues !). Comme le dit Michel Rocard : « La France est bénie des Dieux ! ».

Nous ne sommes pas le seul pays à en avoir dans son sous-sol ; la Chine, les États-Unis, le Canada, l'Argentine, le Mexique et l'Afrique du Sud en possède des réserves encore plus abondantes. Mais, en Europe, c'est surtout la France et la Pologne qui se partagent les gisements les plus riches. Or, la France est le seul pays, non seulement à ne pas l'exploiter, mais encore à ne même pas envisager un essai d'exploitation, ne serait-ce que sur 1 km² ! Il faut dire aussi que nous sommes les seuls à avoir inscrit le « principe de précaution » dans notre Constitution et que c'est à ce titre que nous ne bougeons pas dans ce domaine. À défaut d'être exportateur de gaz, on pourrait ainsi s'affranchir d'une partie des 72 milliards d'euros que nous coûtent nos importations de combustibles fossiles (l'équivalent du déficit de notre commerce extérieur !). En effet, rien qu'aux USA, selon M. Porter⁵, économiste à l'Université de Harvard, l'exploitation des gisements de gaz naturel contribue à hauteur de 430 milliards de dollars par an à l'économie américaine grâce à la baisse de la facture énergétique et aux revenus des 2,7 millions d'emplois créés dans cette industrie. Même si il y a une différence d'un facteur 5 entre la population américaine et la population française, environ 80 milliards d'euros d'économie et la création de plus de 500 000 emplois dans notre pays devraient faire rêver nos politiques !!

Cela ne nous empêche pas de nous intéresser à cette exploitation de gaz ... chez les autres ! Le 8 juin 2014, Laurent Fabius est allé négocier en Algérie l'aide de la France à la prospection du gaz de schiste. De deux choses l'une : ou bien il n'y a aucun risque à exploiter cette source d'énergie et alors il faut le faire, ou bien cette exploitation est dangereuse à en croire les écologistes et il ne faut surtout pas encourager d'autres pays à le faire en particulier en les aidant à prospecter, voire en leur en achetant !

En dehors des combustibles fossiles, les autres ressources représentent aujourd'hui 20% de l'énergie, soit 2 Gtep/an alors qu'il en faudrait au minimum 30 Gtep/an dans 40 ans. Disons-le tout de suite : on ne pourra pas multiplier d'ici là leur production par 15. Ceci signifie que l'on continuera à exploiter les combustibles fossiles et notamment le charbon, au détriment du respect environnemental promis tout en développant les autres sources d'énergie non émettrices de CO₂.

⁵ Relevé dans la revue « L'Express n° 3337 du 17 juin 2015

Toutefois, le nucléaire a-t-il encore sa place après les accidents du Japon ?

Pour mesurer l'étendue du problème, regardons les « disponibilités » de la planète à l'horizon 2050 en comparaison à l'énergie consommée en 2000 (*voir tableau page suivante*). Cependant, il faut bien voir que les comparaisons entre sources d'énergie sont très difficiles à faire car on ne dispose pas de toutes les données. Ainsi, en France, pour des raisons de transparence, on a depuis le Rapport de la Cour des comptes du 31 janvier 2012, le coût de l'énergie nucléaire, depuis la mise en place et la construction de la filière nucléaire française (58 réacteurs pour une puissance totale de 62 510 MW) jusqu'au démantèlement et stockage des déchets ultimes pour environ 220 milliards d'euros. Mais on ne dispose de ces données pour aucune autre source d'énergie !

On peut toutefois faire des comparaisons entre sources d'énergie (*voir tableau ci-dessous*). C'est toutefois très difficile car il faudrait disposer des coûts de démantèlement et stockage des déchets pour toutes les sources d'énergie or, mais ces chiffres ne sont disponibles que pour l'énergie nucléaire ! Nous reviendrons là-dessus plus loin.

	Énergie 2000 Gtep (a)	Énergie 2050 Gtep (a)	Rejets de CO ₂ (kg/MW)	Emprise au sol par MW fourni (b)	Coût du MWh
Éolien	0,02	3	380	8 ha	80-90 € (on-shore) 160-180 € (off-shore)
Solaire	0,001	3 (c)	400	4 ha	150 € (fermes) 300 € (particuliers)
Biomasse	1	4	100-300	1 ha	110-130 €
Hydraulique	0,25	2,5 (d)	100	30 ha	60-80 €
Géothermie	0,05	1	5-10 (g)	1 ha	120-150 €
Énergies fossiles	8,3	12 (e)	430-890	0,2 ha	80-120 € (gaz) (f) 80-150 € (charbon) 160-1000 € (pétrole)
Nucléaire	0,6	?	5-10 (g)	0,07 ha	49-78 € (h)
Total	2000 : 10,22 Gtep/an			2050 (hors nucléaire) : 25,5 Gtep/an	

(Sources : SLA conseil ; Cap Gemini ; EDF ; Agence internationale de l'énergie ; Rapport de la Cour des Comptes 2012)

1 Gtep = 11,6 milliards de MWh

- a – Les données de ces 2 premières colonnes sont extraites du livre « Peut-on sortir du nucléaire ? » auteurs : J. Foos et Y. de Saint Jacob ; Éd. Hermann, Paris, oct. 2011
- b – « Emprise au sol » : moyenne des surfaces occupées selon les sources d'énergie
« MW fourni » indique qu'il a été tenu compte du facteur de charge
- c – 2 Gtep pour le solaire thermique et 1 Gtep pour le solaire photovoltaïque
- d – 1,5 Gtep pour l'hydroélectricité et 1 Gtep pour les énergies issues de la mer
- e – 4 Gtep pour la fourniture d'électricité (thermique classique) et 8 pour les autres applications (notamment le chauffage et le transport)
- f – Les écarts indiqués ici pour les énergies fossiles, sont dus essentiellement au coût, estimé ou non, du stockage du CO₂
- g – Rejets dus aux constructions des installations et à leur maintenance puis démantèlement
- h – La variation des coûts est due à la différence des scénarios concernant le démantèlement.

Il convient de faire quelques commentaires sur les données de ce tableau en envisageant ces énergies l'une après l'autre.

L'éolien.

Cette source d'énergie mérite d'être développée au maximum, mais pas n'importe comment, ni n'importe où ! Compte tenu de son rendement, de l'immobilisation maximale des sols qu'il est possible d'envisager et, enfin, d'une implantation off-shore dans les profondeurs d'eau limitées à 40 mètres pour des raisons technologiques, sa production potentielle électrique est au maximum de 3 Gtep/an (ce qui représente une occupation des sols égale à 25 fois la surface de la France). Comme pour le photovoltaïque, cette source d'électricité souffre toutefois d'un gros défaut : elle est intermittente et si, à la rigueur, on peut anticiper le manque de soleil, le vent, lui, souffle où il veut et quand il veut.

Pour ne donner qu'un seul exemple, lors de la consommation électrique en France du 8 février 2012, la plus forte jamais enregistrée, alors que la puissance éolienne installée est de 6 640 MW, au pic de consommation de 19 heures, là où il fallait faire « feu de tout bois », les éoliennes ne fournissaient que 1 579 MW soit le quart seulement de leur potentiel alors que durant l'heure de plus basse consommation, entre 4 et 5 heures du matin, là où on aurait pu s'en passer, l'éolien fournissait un peu plus de 3 000 MW sur les 6 640⁶. Ceci explique pourquoi on parle toujours de « puissance installée » pour les énergies intermittentes et non d'énergie produite. C'est donc une énergie non seulement intermittente mais sur laquelle on ne saurait compter.

Avec ses 9 120 MW installés (5 558 éoliennes), l'énergie produite en 2014 a été de 17 TWh pour un potentiel de 79,9 TWh soit un rendement de 21% (d'après RTE : chiffres constants depuis des années. C'est comme si, toute l'année, seule une éolienne sur cinq fournissait de l'électricité ! En effet, une éolienne ne peut tourner que dans un intervalle de vitesses de vent réduit : entre 50 et 90 km/h (en dessous de 50 km/h, le vent est trop faible ; au-dessus de 90 km/h, il faut stopper l'éolienne qui risquerait alors de casser).

Ces intermittence et manque de fiabilité de la production électrique par éolienne nécessitent la mise en place de centrales au fuel ou à gaz qui démarrent quand le vent ne souffle pas ou souffle trop fort ! On peut donc considérer qu'un kWh « éolien », assisté de son « alter ego » fonctionnant au combustible fossile, rejette autant de CO₂ qu'un kWh produit par un cycle combiné à gaz. C'est ainsi que la France est en train d'installer sur son territoire 11 700 MW de gaz, certes pour tenter de remplacer quelques vieilles centrales à charbon très polluantes mais surtout pour pallier les déficiences de l'éolien. À cause de ce développement de l'éolien dans notre pays, la France va se mettre à rejeter plus de CO₂ dans l'atmosphère qu'auparavant. Voilà le paradoxe auquel on est confronté.

Le solaire

On peut envisager par le même raisonnement, une production identique pour le solaire qui rassemble à la fois la production d'énergie thermique (pour 2 Gtep) et celle d'électricité via les cellules photovoltaïques (pas plus d'un Gtep car on aura alors épuisé toutes les ressources en métaux rares indispensables à la fabrication des cellules !). Le bilan en CO₂ est de l'ordre de 400 grammes par kWh produit, 100 grammes lors de la production des cellules et 300 grammes en raison de l'intermittence de production. Il faut en effet, considérer, comme pour l'éolien, l'obligation d'ajouter des centrales à gaz qui démarrent lorsqu'il n'y a pas de soleil : là aussi, un kWh « solaire » rejette autant de CO₂ que celui produit par un cycle combiné à gaz ! De plus, l'utilisation intensive de métaux lourds dans cette industrie conduira iné-

⁶ On peut retrouver toutes ces valeurs sur le site : www.rte-france.com.

vitablement à une pollution plus importante en ces métaux dans l'environnement (2,4 millions de tonnes de métaux lourds devraient être rejetées en Chine et en Inde du fait de l'utilisation de cette énergie d'ici 2022⁷). Enfin, compte tenu de l'énergie qu'il aura fallu investir pour la production des cellules, on estime à 5 ans environ le retour sur « investissement énergétique » ce qui est loin d'être négligeable, au regard de leur durée de vie (20 ans environ). Les rendements 2013 et 2014 de la production électrique d'origine photovoltaïque ont été de 11%.

Compte tenu de l'intermittence de leur production, le développement des énergies renouvelables, éolienne et photovoltaïque, devrait impérativement passer tout d'abord par une amélioration des possibilités de stockage de l'énergie. C'est un objectif incontournable !

La biomasse

La biomasse, c'est environ 1 Gtep en 2000, ce qui représente tout de même 10% du total de l'énergie primaire. Il y a « la biomasse-chaleur » : c'est la combustion du bois, de la paille, des ordures ménagères, etc. Elle est très utilisée malgré un rendement énergétique faible. Il ne faut pas oublier que cette combustion qui se fait parfois dans de mauvaises conditions, est responsable, selon l'OMS (l'Organisation Mondiale de la Santé) de 1 500 morts par jour, essentiellement dans les Pays en voie de développement.

Mais c'est surtout dans les transports, comme biocarburant, que l'on voit aujourd'hui un développement important pour pallier la déficience attendue des hydrocarbures. On entend souvent dire que l'on tient là le carburant idéal : certes sa combustion envoie du gaz carbonique dans l'atmosphère mais cette émission est compensée par l'absorption de la même quantité de gaz pendant sa croissance : le bilan « carbone » semble donc nul. Ce n'est évidemment pas vrai, car la plante n'est pas isolée : pour produire des végétaux, il faut mettre du carburant dans le tracteur, fabriquer des engrais (ce qui est très énergivore), broyer et purifier le produit de la culture et, pour la filière alcool, distiller le produit obtenu. On est loin d'un bilan équilibré ou alors, on reprend les traditions agricoles en vigueur avant la révolution industrielle !

Alors que la production d'énergie était de 1 Gtep en 2000, on peut supposer que cette production pourrait atteindre 4 Gtep/an en 2050 (ce qui représente tout de même 25 fois la surface de la France en terres cultivables immobilisées pour la production des biocarburants !).

Les énergies de l'eau

Nous sommes toujours dans le domaine de l'énergie renouvelable mais celle-ci a l'avantage d'être beaucoup moins intermittente que les deux sources précédentes. Il faut distinguer l'énergie hydroélectrique classique (les barrages) et les énergies de la mer. Ces dernières sont multiples : énergie marémotrice, houlomotrice, osmotique ou énergie thermique. Elles souffrent toutefois d'une technologie lourde à mettre en œuvre, de problèmes de maintenance qui vont s'avérer délicats à gérer compte tenu des conditions d'exploitation ; enfin tout dépendra, comme les marins le savent bien, des caprices de la mer. La technique a parfois ses limites ; des expériences passées sont là pour nous le rappeler.

Le facteur de charge des centrales hydroélectriques est variable ; c'est ainsi qu'avec ses 25 400 MW installés, l'hydraulique représente 21,8% de la puissance totale installée en

⁷ 386 000 tonnes en Chine (pour 1,8 GW installé en 2020) et 2,03 millions de tonnes en Inde pour 12 GW installés en 2022. Ref. : www.bitsofscience.org/solar-power-lead-emissions-2937/ ; cité par le numéro de novembre 2011 de « Sciences et avenir ».

France mais seulement 11,6% de l'énergie produite.⁸ Elle est toutefois très souple d'utilisation. Il faut y ajouter la possibilité de stockage d'énergie via les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). L'exemple le plus connu en France est celui du barrage de Grand-Maison. Sa puissance maximale est de 1 820 MW. Le facteur de charge atteint les 70%.

Sur le plan environnemental, plusieurs aspects sont à considérer. L'emprise au sol est très importante (30 ha/MW) et l'implantation de tels barrages provoquent des déplacements importants de population. Ainsi, le barrage des Trois Gorges en Chine, d'une puissance installée de 22 500 MW a eu pour conséquence le déplacement de plus d'un million et demi de personnes et la destruction de 20 villes et 1000 villages ainsi que l'engloutissement de 1 300 sites historiques et archéologiques (on avait déjà rencontré ces tristes disparitions avec l'édification du barrage d'Assouan, par exemple). De plus, la sédimentation rapide du réservoir paralyse en partie le fonctionnement du barrage. Chaque année, un demi-milliard de tonnes de vase se déposent dans les gorges du fleuve, notamment, dans le lac de rétention et les spécialistes estiment que la pression sédimentaire devrait bientôt affecter son potentiel hydroélectrique à hauteur de 50%. Malgré tout, le gouvernement chinois a prévu de mettre en service une autre centrale hydroélectrique de 14 000 MW d'ici 2 ans.

Par ailleurs, l'impact des barrages sur le réchauffement planétaire n'est pas négligeable. Le problème réside dans la biomasse contenue dans les lacs artificiels. Lorsque les terrains sont inondés, de grandes quantités de matière organique restent accumulées sous les flots. En zone tropicale, dans l'eau tiède des bassins de retenue, cette matière se décompose en émettant du dioxyde de carbone et du méthane (17 fois plus nocif que le CO₂). Ceci justifie l'impact estimé de rejets de gaz à effet de serre non négligeables indiqués dans le tableau ci-dessus. C'est bien sûr une moyenne annuelle car cela ne touche que les lacs de retenue de formation récente.

Il y a enfin les ruptures dramatiques (on en compte une par décennie) qui en font la source d'énergie la plus meurtrière au Monde, bien avant le charbon. Certaines de ces catastrophes sont dans toutes les mémoires.

En France, la rupture du barrage de Malpasset, en décembre 1959, faisant 423 morts est encore présente dans toutes les mémoires de ceux qui ont pu en être témoins. Plus récemment, il y a eu 2 600 morts en Italie en 1963 et plus de 15 000 morts en Inde en 1979.

En 2000, la production hydraulique était de 0,23 Gtep au niveau mondial. L'étude prospective est aisée à faire : si on veut installer des barrages partout où c'est possible sur la planète, il y a un facteur 6 par rapport à la situation de 2000 (encore faut-il s'affranchir des oppositions vives que l'on constate aujourd'hui aux projets de nouveaux barrages). Cela signifie que la production maximale en 2050 (ou avant) ne peut être que de 1,5 Gtep qui s'ajoutent au Gtep des énergies marines.

La géothermie

La température de la Terre augmente d'un degré pour 30 mètres de profondeur. Il est certain qu'il convient d'exploiter au maximum cette richesse thermique inépuisable toutefois difficile à exploiter à grande échelle.

Il y a bien sûr les pompes à chaleur dont le développement ne peut être qu'encouragé. Mais il faut remarquer que cette application, souvent affectée à la géothermie, utilise en fait la chaleur solaire, dans la mesure où elle est exploitée à faible profondeur.

⁸ D'après le « Mémento sur l'énergie » ; CEA. 2011

Il y a aussi la production d'électricité : 10 GW installés en 2000 (20 Mtep/an) ; on est alors là, parmi d'autres applications, dans la récupération de chaleur en grande profondeur, essentiellement par fracturation hydraulique sauf, bien entendu, dans les pays fortement volcaniques. On peut prévoir, en 2050 une production annuelle de 1 Gtep au niveau mondial.

Les combustibles fossiles

Si on pose la question : « *Quelle source d'énergie a vu sa consommation grimper de 55% au cours de la première décennie de ce siècle ?* », il y a fort à parier que les réponses vont se concentrer autour des énergies renouvelables. En fait, la bonne réponse est : « *le charbon* ». Ainsi, alors que chaque année, le record de rejets de gaz à effet de serre est battu, malgré les décisions et les souhaits de nombreux pays, il y a loin entre cette volonté et la pratique. Pourquoi les combustibles fossiles, si décriés sur un plan pratique, sont-ils aussi indispensables ?

Une ville d'un million d'habitants consomme une puissance électrique d'un gigawatt (ce qui correspond à une consommation horaire d'électricité d'un kWh par habitant). Seule une centrale thermique peut fournir une telle puissance électrique aussi bien sur le plan économique qu'écologique. En effet, les autres sources d'énergie (solaire, éolien, hydraulique) nécessitent une surface plus grande que la cité elle-même, pour fournir une telle demande d'électricité.

Si on considère, pour l'instant, uniquement les centrales thermiques classiques électrogènes, elles ont produit en 2000, 2,5 Gtep soit 25% de l'énergie totale. Ce faisant, il ne faut pas oublier qu'elles ont rejeté chaque année dans l'atmosphère des dizaines de millions de tonnes de poussières, de dioxyde de soufre, de dioxyde d'azote et 10 milliards de tonnes de gaz carbonique (soit 5 300 milliards de m³). Pour toutes ces raisons, il faudrait essayer de diminuer l'utilisation des combustibles fossiles pour produire la vapeur. Malheureusement, compte tenu des contraintes que nous venons de développer, ce ne sera pas possible ; il faudra même l'augmenter et passer au minimum à 4 Gtep/an en 2050 !

Par ailleurs, même si on développe les biocarburants, on ne s'affranchira pas des combustibles fossiles, que ce soit pour du transport terrestre, maritime ou aérien. Il y a aussi la chaleur, usage domestique ou autre qui, à l'échelle de la planète, représente une part importante de la consommation d'énergie. Ces deux rubriques, transport et chaleur, représentent 55% de l'énergie totale aujourd'hui. Même si, compte tenu de l'accroissement de la demande énergétique, ce pourcentage va diminuer dans le futur, en termes de consommation, il faut là-aussi songer à l'augmenter un peu, 8 Gtep/an semble un minimum. Ceci signifie toutefois que le transport et la fourniture de chaleur vont devenir beaucoup plus chers, en raison de la rarefaction de ces ressources et du coût du stockage du CO₂. ***Il faut s'y préparer.***

Les économies d'énergie

Il est vital de faire des économies d'énergie, là où c'est le plus facile. C'est évidemment dans nos pays industrialisés où il suffit de considérer nos attitudes quotidiennes pour se rendre compte du nombre de gestes simples qui seraient à même de permettre des économies importantes. Dans le domaine de l'habitat, il conviendrait de mettre en place un programme de recherche important (et coordonné) pour améliorer l'isolation des habitations. Au final, en se servant d'un appareil électrique, on utilise 15% environ de l'énergie primaire, le reste est perdu en production (où les rendements sont loin des 100% comme on l'a vu), transport, stockage, etc. Là aussi, à chaque étape, une amélioration est possible.

Aujourd'hui, si des actions ponctuelles sont entreprises, elles restent disjointes et peu efficaces. La recherche, là comme ailleurs dans le stockage et le transport de l'énergie, peut

apporter une contribution importante. Les améliorations dans le domaine de l'habitat sont sources d'emplois nombreux. Leur création se révélera bénéficiaire à terme.

Toutefois, le combat sera difficile : l'utilisation de l'ordinateur aujourd'hui sur la planète consomme autant d'énergie que tout le transport aérien mondial ! Si on peut supposer que le trafic de ce dernier va se stabiliser, l'utilisation de l'informatique va exploser dans les pays émergents.

Comme le souligne le rapport de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Techniques sur « l'avenir de la filière nucléaire en France » (1^{er} décembre 2011) : « Le téléchargement sur son ordinateur de la version électronique d'un quotidien consomme autant d'électricité qu'une lessive ; une recherche sur le site Google est équivalente à une heure de lumière dispensée par une ampoule à économie d'énergie. Un chercheur de l'université de Dresde aurait montré que le fonctionnement de l'Internet pourrait, dans vingt-cinq ans, consommer autant d'énergie que l'humanité tout entière aujourd'hui ! ».

On voit bien par-là que ces efforts d'économie ne résoudre pas le problème. Moyennant quoi, on peut tabler au maximum sur une économie de 1,5 Gtep (ce qui est considérable : cela représenterait 15% de notre énergie primaire d'aujourd'hui !).

Bilan énergétique

Arrivé à ce stade, on peut faire le bilan suivant : à l'exception du nucléaire, on a utilisé toutes les sources d'énergie possibles et on peut supposer que le maximum a été fait pour économiser l'énergie. On aura dû résoudre le problème du stockage de l'énergie à grande échelle et non pas comme on le fait aujourd'hui : c'est un défi qu'il faut réussir si on veut développer comme il convient les énergies renouvelables et intermittentes. Malgré tout, bien qu'on n'ait tenu ni les promesses de développement durable ni celles du protocole de Kyoto, ni même lésiné sur le coût du MWh, tous calculs faits, on arrive, en tenant compte des économies d'énergie, à une production annuelle de **27 Gtep**. Il manque encore 5,5 Gtep/an pour respecter le scénario le moins énergivore (qui n'est pas, encore une fois, celui que l'on suit depuis plus de 15 ans !).

La planète va donc manquer d'énergie en 2050. Malgré les événements tragiques récents au Japon, elle ne se passera pas du nucléaire. L'Europe de l'Ouest peut vouloir en sortir, le reste de la planète ne pourra l'éviter : le nucléaire vient de vivre un séisme, le monde est contraint de lui éviter un tsunami.

4 - La place du nucléaire

Il convient tout d'abord de revenir sur les accidents de Fukushima :

Rappelons la chronologie des faits. Le Japon a été frappé le 11 mars 2011 par un séisme de force 9, donc parmi les plus forts enregistrés à ce jour dans le monde, et suivi d'un raz de marée d'une ampleur exceptionnelle. Un barrage a cédé ; les bateaux, trains, avions, automobiles ont été balayés comme des fétus de paille. Nous avons vu des raffineries en feu, des canalisations de gaz éventrées. Je m'étonne d'ailleurs que les écologistes n'aient pas immédiatement demandé que l'on vide instantanément tous les barrages de la planète, que l'on stoppe tout transport aérien, maritime, fluvial, routier et ferroviaire, que l'on gèle toute exploitation d'hydrocarbures, au nom du principe de précaution. Car le bilan est effroyable : 26 000 morts.

On évoque le chiffre de 500 milliards de dollars de dégâts mais il augmentera sans doute. En termes de pollution, nous avons tous vu les centaines de milliers de tonnes de débris dériver dans le Pacifique et rejoindre soit les côtes américaines soit le « tourbillon de déchets » du Pacifique. Cela va durer des années.

À Fukushima, à l'instant du tremblement de terre, les barres de commande et de sécurité des réacteurs en activité ont arrêté immédiatement les réactions de fission. Dans le même instant, les diesels de secours se sont mis en route automatiquement pour alimenter en électricité et assurer le refroidissement.

Malheureusement, 55 minutes après, le tsunami est arrivé et les diesels se sont arrêtés, complètement noyés par la vague géante dont la hauteur, par la suite, a été estimée à 17 mètres à cet endroit.

L'électricité ayant disparu, il faut imaginer les ingénieurs et techniciens travaillant dans l'obscurité, n'ayant plus que leurs torches électriques pour suivre l'évolution des réacteurs ! Et travaillant dans l'angoisse de ne pas savoir si leurs proches avaient survécu au séisme et au tsunami car tout moyen de communication avait été coupé. Après 2 jours de flottement au cours desquels l'exploitant Tepco a hésité à refroidir les réacteurs à l'eau de mer car ils auraient été inutilisables par la suite, cette Société a tout fait pour tenter de maîtriser la situation.

Deux années ont passé. On ne peut être qu'admiratif devant le travail déjà accompli par les Japonais dans tout le pays. Même deux ans après, les dégâts dus au tsunami sont encore visibles à l'extérieur des bâtiments : « *Sur la route qui passe entre l'océan Pacifique et l'arrière des quatre bâtiments réacteur endommagés, les tuyaux sont déformés, des escaliers tordus et un véhicule encore encastré dans le sol. En plus de noyer les générateurs de secours, le tsunami a frappé de plein fouet des bâtiments réacteur à peine surélevés par rapport au niveau de la mer* »⁹.

*Il aurait sans doute suffi d'installer les diesels de secours en hauteur, à l'abri d'une vague géante, pour que tous ces accidents, dus à un arrêt du refroidissement des combustibles, n'arrivent pas. Ainsi, la centrale nucléaire d'Onagawa, pourtant beaucoup plus proche de l'épicentre du séisme mais située légèrement plus en hauteur, n'a pas connu les mêmes problèmes ! On estime pourtant aujourd'hui que la vague de tsunami approchait les 30 mètres à cet endroit. **Ceci doit servir de leçon dans le monde entier : c'est un des retours d'expérience de cette catastrophe.***

À Fukushima, les réacteurs sont maintenant refroidis ; les cœurs qui, certes, ont fondu, n'ont pas percé l'enceinte de confinement qui a donc parfaitement rempli son rôle. Même si les ingénieurs de la centrale ont été conduits au début à relâcher des rejets gazeux radioactifs, ils ont toujours maîtrisé la situation. Ce n'est pas comme à Tchernobyl où une effroyable explosion chimique a rejeté des quantités énormes de radioactivité.

Les explosions à Fukushima, suivies en direct sur les télévisions du monde entier, et qui ont donc frappé les esprits, étaient des explosions d'hydrogène, liées au fait que ce gaz explosif s'était accumulé sous le plafond de tôles. S'il avait été prévu de le relâcher au lieu de le laisser s'accumuler, ces explosions n'auraient pas eu lieu. Ce genre de toit n'existe pas sur nos réacteurs qui ne sont pas du même type.

Abordons un sujet tabou dans les médias ! Pour l'instant, ces accidents n'ont provoqué aucun décès dû à l'irradiation ou la contamination radioactive. Seize techniciens ont toutefois reçu des doses qui sont susceptibles de déclencher un cancer dans les décennies qui viennent.

Quant aux populations concernées, les doses maximales reçues ont été faibles, fort heureusement et rien n'indique, a priori qu'il puisse y avoir une conséquence quelconque sur

⁹ Marie Linton et Guillaume Bression ; mis en ligne le 6 mars 2013 sur le site sciencesetavenir.fr

le plan de la santé ; un surcroît bien légitime de contrôles et d'examens peut toutefois conduire à déceler quelques cas de cancers curables, sans qu'il soit possible d'établir un lien avec l'accident, comme on l'a vu ailleurs. Il n'y a, en tout cas, aucune raison sanitaire pour empêcher les populations japonaises de réintégrer leurs territoires dès lors que l'excès de dose d'irradiation constaté (25 mSv/an au maximum) est inférieur d'un facteur 10 aux doses de radioactivité naturelle mesurées dans certaines régions du globe où vivent sans problème des populations depuis des siècles (certaines zones au Brésil ou en Inde atteignent 260 mSv/an).

Toutefois, il est certain que l'impact du tsunami, en termes de pollutions de toutes sortes, aussi bien terrestres que maritimes doit être sans commune mesure avec celui de l'accident de Fukushima. Pourquoi parle-t-on toujours de la radioactivité et non de la pollution chimique ? Tout simplement parce que la radioactivité se détecte beaucoup mieux et de façon beaucoup plus sensible qu'une espèce chimique. Ainsi, la mesure de 1 000 Bq de césium-137 correspond à la détection de 0,31 milliardième de gramme de cet élément. On ne peut pas détecter par voie chimique une quantité aussi faible de césium mais on sait mesurer une activité bien inférieure à 1 000 Bq ! Et de façon extrêmement simple et facile. De la même façon, les journalistes font l'amalgame entre les deux et parlent souvent des 26 000 morts de Fukushima alors que toutes ces victimes sont dues au tsunami y compris les trois personnes qui ont été emportées sur le site de la centrale de Fukushima et qui ont péri noyées !

En matière de pollution environnementale, l'impact de l'accident de Fukushima, liée à la radioactivité, face à celui du tsunami qui a déposé et/ou entraîné de nombreux déchets, par milliers (voire millions) de tonnes, est peut-être l'arbre qui cache la forêt !

Un seul exemple parmi d'autres : le séisme du Japon a entraîné la libération d'un tiers des émissions annuelles de deux gaz à effet de serre particulièrement agressifs : le HCFC-22 contenu dans les réfrigérateurs et climatiseurs et le CFC-11 qui servait à la fabrication des mousses isolantes de polyuréthane. Ils ont été émis, nous dit la revue « Sciences et avenir qui publie cet article dans son numéro 820 de juin 2015¹⁰, lors de la destruction des appareils et matériaux qui les contenaient.

Face à un accident de ce type, qu'en est-il des réacteurs français ?

Il est certain que nous devons tous nous interroger sur les conséquences d'un accident nucléaire majeur et faire en sorte que ses effets, si cela devait arriver, soient les plus faibles possibles. Il est en particulier inconcevable d'imaginer que des populations doivent être évacuées pour des décennies des territoires où elles ont vécu et où reposent leurs ancêtres. D'où l'importance du retour d'expérience de Fukushima. On peut toutefois souligner, dès à présent, que nos réacteurs, s'ils sont de la même génération que ceux des Japonais présentent un certain nombre de perfectionnements que n'ont pas ces derniers.

Ceci est dû en partie à une culture de sûreté particulièrement acérée dans notre pays, surveillée et entretenue en cela de façon drastique par notre Autorité de Sûreté. Deux exemples simplement qui différencient nos réacteurs : la présence, dans les réacteurs français, de « bacs à sable » qui, en cas de relâchement de gaz pour diminuer la pression à l'intérieur de l'enceinte, comme cela a eu lieu à Fukushima, ne laisserait échapper que le millième environ de la radioactivité libérée sans ces filtres. Par ailleurs, des recombineurs d'hydrogène ont été installés dans nos réacteurs pour éviter des explosions comme celles qui ont eu lieu au Japon.

Le réacteur de III^e génération, l'EPR, outre ces équipements qui, bien sûr, y ont été installés, bénéficie d'autres systèmes intéressant la sûreté comme la « zone d'étalement du

¹⁰ Source : Takuya Saito, National Institute for Environmental Studies

corium » situé sous le réacteur et qui arrêterait toute progression éventuelle de ce dernier dans le sous-sol (il faut se rendre compte que l'on serait dans ce cas, au-delà des accidents nucléaires constatés jusque-là puisque une telle situation n'est jamais arrivée, même si elle a été frôlée à Tchernobyl). De plus, une protection dite « coque d'avion » résisterait à une agression extérieure du type de celle du 11 septembre 2001 aux États-Unis.

Enfin, les diesels de secours qui équipent tous les réacteurs en France se trouveront à l'avenir dans des bâtiments étanches et situés en hauteur. Ainsi, EDF va procéder à l'installation de groupes électrogènes "d'ultime secours" auprès de chaque réacteur (GUS). Le but : permettre aux pompes des systèmes de refroidissement de fonctionner quelles que soient les circonstances. De même, un appoint en eau de secours supplémentaire devrait être mis en place. 58 diesels seront installés sur l'ensemble des réacteurs avant 2018. Le principe est de disposer, en cas d'accident et dans l'attente de l'arrivée de la FARN (Force d'action rapide du nucléaire) dans les 24 heures, de moyen de secours supplémentaires.

Ceci, pour éviter ce qui est arrivé au Japon, même si on est loin d'une situation sismique identique à celle du Pays du Soleil Levant. Ainsi, nos réacteurs seront à l'abri d'une perte totale d'énergie quelles que soient les conditions naturelles ou autres qui auront conduit à une perturbation du fonctionnement des réacteurs.

Quel avenir pour l'énergie nucléaire, au niveau de la planète ?

1 Gtep de nucléaire correspond à 1 000 réacteurs de type EPR de 1 600 MW (ou, bien évidemment, 1 600 réacteurs de 1 000 MWe comme l'Atméa 1 décrit dans l'encadré ci-dessous). Même dans un contexte très optimiste concernant le nucléaire (ce qui n'est pas le cas dans le monde de l'OCDE en 2013), il ne sera guère techniquement possible d'installer d'ici 40 ans une production de plus de 3 Gtep/an de nucléaire (***ce qui ne le met qu'au niveau de l'éolien ou du solaire tel que nous l'avons prévu en 2050 !***). L'humanité va donc se trouver en pénurie d'énergie d'ici 2050.

438 réacteurs sont en activité dans le monde, 86 en construction (dont une trentaine en Chine, les autres principalement en Russie et en Inde), 155 sont planifiées dans le monde (dont 38 en Europe de l'Est et 82 en Asie !). Au niveau de la planète, on projette de passer de 380 GW installés en 2005 à 800 GW en 2030. Les USA voient, eux, une perspective mondiale à 1 000 GW d'ici cette date dont 300/1 000 pour eux.

De même, la Chine a déclaré vouloir installer 80 GW de nucléaire d'ici 2020 et 200 GW en 2030 (pour l'instant, en 2015, il y a 322 réacteurs nucléaires en projet dans le Monde dont 136 en Chine, 35 en Inde, 16 en Arabie Saoudite). Tous ces événements récents nous montrent qu'il sera très difficile, même si le contexte redevient plus favorable pour le nucléaire, d'installer d'ici 2030 un millier de réacteurs de type EPR. Il en faudrait donc au moins deux milliers de plus d'ici 2050.

Il semble que, même le Japon qui aura perdu au moins 4 réacteurs d'un coup (en dehors de toutes les autres pertes !) n'aura guère d'autres alternatives que d'en reconstruire. Après avoir, dans un premier temps (janvier 2012) porté la durée de vie de ses réacteurs à 60 ans (comme l'ont fait les Américains depuis plusieurs années), il déclarait, un mois après, qu'il comptait arrêter tous ces réacteurs sous la poussée des manifestants.

Fin 2014, plus de 40 pays envisagent d'avoir recours à l'énergie nucléaire dans les années qui viennent.¹¹ Le 10 février 2012, seize pays de l'Union Européenne viennent de réaffirmer leur attachement au nucléaire dans leur mix énergétique¹². Une vingtaine de modèles de réacteurs de III^e génération, conçus par plusieurs pays dont la Chine, la Corée du Sud, la France, le Japon, la Russie et les USA, sont en démonstration ou en construction dans le Monde. La Chine est en train de signer un accord de coopération avec la France pour développer un dérivé de l'Atméa 1, réacteur de III^e génération de 1000 MW de puissance électrique, réacteur co-développé par Areva et MHI (Mitsubishi Heavy Industry). Le Royaume-Uni vient aussi de concrétiser un projet de construction de plusieurs EPR sur son sol.

Aux États-Unis, en février 2012, la Société Southern Nuclear vient de se voir autoriser l'achèvement des travaux de construction déjà bien entamés des réacteurs 3 et 4 de Vogtle. Il est prévu que ces réacteurs entrent en service à partir de 2016. Ce seront les premiers réacteurs nucléaires à entrer en service aux États-Unis depuis l'inauguration de la centrale de River Bend, en Louisiane, en 1986.

Les quelques manifestations japonaises contre son industrie nucléaire, début 2012, sont compréhensibles mais cela ne changera pas la politique énergétique nipponne qui se trouve, de plus, dans un contexte de reconstruction d'une région ravagée par le tsunami de mars 2011. Cette décision ne pourra tenir avec le temps ! Déjà, en mars 2013, le nouveau gouvernement japonais envisage le redémarrage de 26 réacteurs nucléaires ainsi que la construction de nouveaux réacteurs nucléaires, en tirant les enseignements des accidents de Fukushima, en particulier en tenant compte de la force destructrice de la sismicité au Japon sur les 400 000 dernières années (déclaration, le 9 mars 2013, de la nouvelle autorité japonaise de régulation nucléaire (NRA), mise en place en septembre dernier).

Il faudra bien évidemment tirer les enseignements des derniers accidents en termes de sûreté pour tous les réacteurs de la planète, même si le coût en est très élevé (bien que l'impact sur le coût du kWh soit faible). Que ces accidents aient eu lieu dans des conditions naturelles terribles ne peut pas être une excuse même si c'est une raison compréhensible.

Après un recul qui semble inéluctable, on peut penser que les événements survenus au Japon vont, au contraire, « booster » le développement et la commercialisation de l'EPR¹³. Tous ceux qui, jusque-là, le trouvaient « trop cher car trop sûr » vont changer d'avis. On ne peut plus dire aujourd'hui qu'un réacteur est « trop sûr » !

L'industrie française est particulièrement bien placée pour relever ce défi ; c'est en effet la seule à avoir continué, ces dernières décennies, à construire des centrales. C'est donc celle qui a le meilleur retour d'expérience, ce qui est primordial dans ce domaine où, plus que jamais, la sûreté doit être privilégiée. C'est un marché de près de 10 000 milliards de dollars sur lequel les entreprises françaises se doivent d'être présente ; rien que pour cette raison, il faut maintenir dans notre pays, une industrie nucléaire forte

¹¹ Afrique du Sud, Algérie, Argentine, Bangladesh, Biélorussie, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, Corée du Sud, Émirats-Arabis-Unis, Espagne, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Japon, Jordanie, Kazakhstan, Lettonie, Lituanie, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Philippines, Pologne, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Taiwan, Turquie, Ukraine, USA, Vietnam.

¹² Les seize pays de l'Union Européenne cités ci-dessus, dans la note (7)

¹³ Ce sigle signifiait à l'origine : « **European Pressurised Reactor** » mais il est devenu « **Evolutionary Power Reactor** ». Ainsi, ce réacteur s'appelle maintenant aux États-Unis : US EPR.

5 - La place de la France dans ce défi énergétique

Un peu d'histoire

On peut légitimement se poser la question de savoir pourquoi la France est le pays qui possède la part d'électricité nucléaire la plus importante au Monde¹⁴. Notre pays a une culture nucléaire qui date des débuts de la découverte du phénomène naturel de radioactivité par Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie.

Dès mars 1945, Raoul Dautry, ministre du Gouvernement provisoire, montre au Général de Gaulle, Président de ce gouvernement, ce que cette énergie nouvelle peut apporter à la restructuration de notre pays exsangue et à sa Défense Nationale. C'est ainsi qu'est créé en octobre de cette même année, le CEA (aujourd'hui : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives). On voit bien que, dès cette création, le civil et le militaire sont liés dans cette recherche scientifique qui aboutit à une industrie performante.

La première pile atomique française, « Zoé », diverge au Fort de Chatillon en décembre 1948. Si les premiers réacteurs électrogènes démarrent leur production en 1966, de nombreux essais nucléaires militaires ont déjà eu lieu à cette date. C'est l'indépendance nationale, liée à notre insuffisance de ressources énergétiques qui vont conduire le général de Gaulle, revenu au pouvoir, puis Georges Pompidou, à développer le programme électronucléaire français tel qu'on le connaît aujourd'hui.

Le nucléaire aujourd'hui en France

La France est reconnue au niveau mondial pour son industrie nucléaire qui maîtrise à la fois tout le cycle du combustible nucléaire et qui a été l'élément moteur de la conception du réacteur de III^e génération le plus sûr jamais conçu : l'EPR. Son coût plus élevé que ses concurrents étrangers est dû essentiellement à sa sûreté. Cet argument financier qui avait joué contre lui avant Fukushima devrait maintenant être au contraire un atout décisif. Il faut bien voir qu'on ne se lance pas dans la conception de tels réacteurs sans une expérience qui s'appuie sur une continuité aussi bien dans la conception que dans le fonctionnement d'un parc de réacteurs.

Par ailleurs, les perspectives de développement des réacteurs de IV^e génération s'appuient sur la disponibilité (du moins pour les « surgénérateurs ») de plutonium issu du retraitement de combustibles usés. Ceci explique pourquoi les Américains qui, avaient abandonné le retraitement suite à des difficultés techniques d'exploitation liées à la complexité de cette industrie, ont à l'époque laissé le champ libre aux Français.

Le besoin qu'éprouvent les États-Unis aujourd'hui à s'appuyer sur le retraitement de leurs combustibles les conduit tout naturellement à s'intéresser à nouveau à ces réacteurs de IV^e génération. L'arrêt en France, sous la pression des écologistes, de Superphénix qui était un réacteur de ce type, au moment où les Américains souhaitent relancer cette filière n'a pu que les réjouir puisque cet arrêt leur a permis de reconquérir la suprématie sur cette filière. Espérons que l'Histoire ne se reproduira pas !

¹⁴ Tout est relatif : c'est encore le Suédois aujourd'hui qui consomme le plus de kWh « nucléaires » par habitant (6 815kWh/hab. contre 6 460 pour le Français)

L'EPR : 4 ans de retard ? Un budget qui a beaucoup augmenté ??

« Dérive du calendrier, avec un quasi-doublement du temps de travaux prévu, dérive budgétaire avec un coût final estimé à 10 milliards d'euros, soit 6,5 milliards de plus que le coût annoncé à l'origine », entend-on souvent.

Pour ce qui concerne la dérive du calendrier, on peut dire que la raison peut en être un défaut de communication. Alors que les réacteurs « 1 500 MWe-palier N4 », les plus proches de l'EPR, ont été construits en 10 ans en moyenne (maxi : 155 mois soit pratiquement 13 ans) sans que cela ait ému qui que ce soit, pourquoi a-t-on dit que l'on construirait cette tête de série en 54 mois soit en 4 ans ½ ? La durée de construction va être également de 10 ans, malgré des aménagements non prévus au départ et qui correspondent au retour d'expérience de l'accident de Fukushima. On aurait pu annoncer au départ que l'on espérait le construire en 10 ans, ce qui correspondait déjà à une bonne performance et tous (sauf peut-être les anti-nucléaires) auraient pu à juste titre se féliciter et crier à l'exploit. Au lieu de cela, on traîne un vague sentiment de retard par rapport à cette annonce présumptueuse.

Quant au coût, l'important n'est pas son prix de construction brut mais plutôt celui ramené au nombre de kWh fournis. Si on compare à d'autres sources d'énergie renouvelable, pour le même nombre de kWh fournis, il faut comparer ces 10 milliards d'euros à 27,5 milliards pour le photovoltaïque, 14 pour l'éolien on-shore et 19 pour l'éolien off-shore !¹⁵ Bien sûr, il faut y rajouter le coût du combustible pour le réacteur nucléaire mais on reste loin des coûts du renouvelable malgré tout. Quant aux surfaces de sol nécessaires pour l'exploitation de ces sources d'énergie, elles vont de 51 ha pour l'EPR à 22 400 ha pour le photovoltaïque (soit la surface totale d'un département comme la Seine-Saint-Denis qui n'est pas le plus petit de nos départements !) en passant par 6 000 ha pour l'éolien.

Quant à la différence de coût entre la première estimation et le prix final, on peut malicieusement remarquer qu'il correspond à peu de choses près à ce que l'État doit rembourser à EDF (5 milliards d'euros), en grande partie pour compenser certaines charges de service public assumées par EDF, comme le financement des énergies renouvelables.

Bien évidemment, aujourd'hui, un argument en faveur du nucléaire est la très faible (voire inexistante) émission de gaz à effet de serre (voir le tableau de la page suivante) mais ce n'est pas le seul avantage comme le montre l'exemple suivant.

En mars 2013, la France vient de se placer au troisième rang au classement des meilleurs systèmes énergétiques mondiaux, premier palmarès établi sur la question par le Forum économique mondial, dans le cadre d'une étude réalisée en collaboration avec la Société Accenture¹⁶. La France se place derrière la Norvège et la Suède, et devant les 102 autres pays étudiés.

Parmi les critères retenus pour ce classement¹⁷ : « l'accès à l'énergie, le développement durable, et la compétitivité énergétique ». L'accès à l'énergie recouvre la sécurité d'approvisionnement, la dépendance énergétique, ou encore le taux d'électrification. Le critère de développement durable comprend les émissions de CO₂ et de particules polluantes, la consommation des véhicules ou la part d'énergie décarbonée dans le mix. Enfin pour mesurer la compétitivité énergétique, Accenture a étudié la consommation d'énergie nécessaire pour un point de croissance du PIB, le prix de l'électricité pour les industriels, les distorsions liées à la fiscalité ou encore la facture énergétique.

¹⁵ Voir, pour la démonstration de cette estimation ma chronique n°30 : « Le député vert, l'EPR et la règle de trois »

¹⁶ Accenture est une entreprise internationale de conseil en management, technologies et externalisation

¹⁷ D'après un article d'Anne Feitz, paru dans « *Les échos* » du 6 mars 2013

Quelques chiffres sur les émissions de CO₂ (: 1995)*

	Émissions CO ₂ (g/kWh)			tonne CO ₂ /habitant		
	1971	1990	2008	1971	1990	2008
Allemagne	840	553	441	12,5	12,0	9,7
Belgique	863	344	249	12,1	10,8	10,4
Espagne	373	427	326	3,5	5,3	7,0
<i>France</i>	<i>539</i>	<i>109</i>	<i>83</i>	<i>8,2</i>	<i>7,0</i>	<i>5,7</i>
Italie	463	575	398	5,4	7,0	7,2
Luxembourg	2 402	2 588	315	45,1	27,4	21,3
Royaume-Uni	912	672	487	11,2	9,7	8,3
U. E. 27	----	415 *	351	9,5	8,0*	7,7
États-Unis	765	708	535	20,7	19,4	18,4
Canada	217	203	181	15,5	15,6	16,5
Japon	602	434	436	7,2	8,6	9,0

Source : Mémento sur l'énergie CEA - 2013

Sans surprise, c'est le poids du nucléaire dans le mix énergétique français qui explique le bon classement de l'Hexagone. Notre pays se situe même au deuxième rang mondial sur le critère de développement durable, derrière la Suède (*voir la note 10*). Les énergies décarbonées représentent 51% de l'énergie primaire utilisée en France, dont 42 % liées au nucléaire. Ce taux monte à 90% pour la seule production d'électricité : selon le bilan établi par RTE (Réseau de Transport d'Electricité) pour 2013, celle-ci provient à 73,6% du nucléaire, à 13,6% de l'hydraulique, à 2,2% de l'éolien et à 0,8% du solaire photovoltaïque.

Le coût du kWh en France

Depuis 2011, le prix de notre kWh a beaucoup augmenté. Il suffit de comparer nos factures d'électricité sur les dernières années. Par exemple, en 2010, le surcoût « énergies renouvelables » (taxe CSPE) était de 0,4 c€ pour un kWh facturé à 7,9 c€. En 2011, alors que le kWh est à 8,07 c€ (2% d'augmentation), ce surcoût a plus que doublé : 0,9 c€.

Cette même année 2011, une seconde taxe¹⁸, appelée TCFE, « Taxe sur la Consommation Finale d'Électricité » est imposée aux clients. Cette taxe trouve son origine dans une exigence européenne à l'encontre de la France, dont le mode de taxation de l'électricité n'était pas conforme au droit européen. Nous ne discuterons évidemment pas du bien-fondé de cette taxe et de son prétexte à création mais c'est le consommateur français qui paye (+0,821 c€. cette première année).

En 2012, voici qu'arrive une troisième taxe, la CTA : Contribution Tarifaire d'Acheminement (d'Électricité ou de gaz). La CTA est une taxe sur l'électricité et le gaz naturel servant à financer les retraites des employés des industries électrique et gazière. Ainsi la CSPE (0,9 c€/kWh) n'a pas augmenté mais la TCFE (0,905 c€/kWh) a augmenté de 9 % et la CTA représente, elle, 1,5 c€/kWh ! D'un coup, comme ça, la première année.

Ce qui fait que ces « Taxes et contributions » qui représentaient de 4 à 7 % du prix du kWh entre 2001 et 2009, affichaient une augmentation de +18% l'année suivante, +22% en 201 +41% en 2012 (écart d'une année à l'autre). En 2015, le montant des diverses taxes sur le kWh reviendra à doubler le coût de production et transport de ce dernier (hors TVA) !

Et ce n'est pas fini : L'État doit rembourser, comme on l'a écrit plus haut, à EDF la somme de ...5 milliards d'euros pour compenser certaines charges de service public assumées par EDF comme le financement des énergies renouvelables. Et qui va payer ?

1 milliard d'euros d'investissement dans le nucléaire, avec un amortissement simplement sur 10 ans conduit à un surcoût est de 0,02 c€ soit 40 fois moins que ce que nous impose le recours au renouvelable et des centaines de fois moins le montant actuel de ces taxes !

¹⁸ Les chiffres donnés ici correspondent évidemment à ma propre facture. C'est à chacun, s'il le souhaite, de vérifier les siens et de faire ses propres calculs !

Autre argument important, aujourd'hui, pour le consommateur français, le prix de l'électricité - qui s'appuie à 75% sur le nucléaire - tourne autour de 13 centimes d'euro. Il est d'environ 20 c€ pour un Italien et 28 pour un Allemand. Dans son rapport du 31 janvier 2012, la Cour des Comptes a estimé que ce prix de l'électricité devrait augmenter de 10% en « réponse à l'évolution des coûts d'entretien et de mise en forme des installations ». Pour une sûreté encore accrue, cette augmentation représente moins que le surcoût dû aux énergies renouvelables que nous subissons depuis plusieurs années (et de plus en plus).

Doit-on baisser de façon drastique la part du nucléaire en France ?

Malgré tout ce qui vient d'être dit ci-dessus, certains hommes politiques préconisent aujourd'hui que l'effort français pour baisser la part du nucléaire en France (passer de 75 à 50% de nucléaire d'ici 2025) soit équivalent à l'effort que font les Allemands pour sortir complètement du nucléaire mais en partant de plus bas (de 25% à 0 d'ici 2022).

Vingt-quatre réacteurs seraient ainsi arrêtés d'ici 2025. Ce nombre n'a pas été choisi au hasard ; il correspond à peu près en termes de puissance électrique, à celle dont les Allemands vont s'affranchir en fermant leurs 17 réacteurs. On s'alignerait sur la décision d'Outre-Rhin. Mais notons que cela correspond à bien plus qu'une réduction à 50% du mix électrique.

En effet, en période de pointe, la production nucléaire française avoisine justement ces 50% fatidiques (58% le jour de plus forte consommation, le 8 février 2012 alors que pratiquement tous les réacteurs nucléaires fonctionnaient à plein régime). Bien sûr, c'est pendant les jours de grand froid, en période de pointe, mais cela mérite d'être noté. Les « 75% » de production nucléaire sont, au fil des hivers, devenus un mythe...

Combien va coûter aux Allemands l'abandon du nucléaire ?

Estimé, il y a deux ans à 30 milliards d'euros par an sur 8 ans, soit 2 000 euros par an et par foyer, qui s'ajoutent à un coût de l'électricité deux fois plus important que chez nous, on parle en 2015 de 1 200 milliards d'euros ! Ce coût dépasse celui de la réunification du pays ! Outre le fait que l'Allemagne est conduite à importer de l'électricité (et elle importe donc, sans état d'âme, de l'électricité nucléaire), on voit que ceci ne va pas diminuer les rejets de gaz à effet de serre Outre-Rhin (pour l'instant, ces rejets sont de 9,7 tonnes par an et habitant en Allemagne pour ... 5,7 en France !). Ce sera pour l'Allemagne, en 2020, 3 tonnes de plus de rejet de CO₂ par an et habitant en raison de cet abandon du nucléaire : ils occuperont alors la seconde place en Europe derrière le Luxembourg et l'Estonie !)

Comme le signale un chercheur à l'Institut de Technologie de Karlsruhe, « Il faudra que les Allemands acceptent le changement de vie nécessaire. Il faudra par exemple, qu'ils ne consomment de l'électricité qu'à certains moments de la journée »¹⁹. Enfin, les Allemands reconnaissent qu'ils sont en train de supprimer des emplois bien réels alors que les emplois « virtuels » prévus ne sont pas là. C'est même encore plus inquiétant puisque, à la mi-décembre 2011, la société allemande Solon (qui fabriquait des panneaux solaires) déposait le bilan (500 emplois menacés). D'autres ont émigré, en particulier, des sociétés travaillant sur les énergies renouvelables comme Q-Cells pourtant née en Allemagne. De même, SGL Carbon qui construit des fibres de carbone et dont le siège est situé à Wiesbaden, a décidé que sa prochaine usine serait construite aux États-Unis car l'électricité y est moins chère.

La Commission européenne a lancé en mars 2013, une procédure contre l'Allemagne accusée de dispenser les entreprises gourmandes en énergie du paiement de la contribution aux coûts de la transition énergétique liés à l'abandon du nucléaire, a rapporté le quotidien économique Handelsblatt. En effet, la direction générale de la Concurrence de la Commission considère ces exemptions comme des aides publiques !

¹⁹ Cité dans la revue Challenges n°275, p. 65

Alors que l'investissement dans les renouvelables avait permis, il y a quelques années, de créer 370 000 emplois travaillant dans près de 10 000 entreprises en Allemagne, le renchérissement de l'énergie constitue aujourd'hui un frein pour l'emploi dans ce pays. On a beaucoup écrit sur cette éventualité française de sortie du nucléaire. Pour ne pas entrer dans des polémiques en choisissant tel ou tel scénario, contentons-nous de reprendre l'étude allemande.

Fin 2014, la Société Eon vient de se scinder en deux pour pouvoir subsister, isolant ainsi les énergies renouvelables de la production conventionnelle (charbon, gaz, hydraulique, ce qui ne l'a pas empêché, avec ses concurrents (RWE, EnBW, Vattenfall) de supprimer au total 25 000 emplois ces dernières années²⁰.

Leur abandon du nucléaire a été chiffré, comme on l'a vu plus haut, à 1 200 milliards d'euros en 8 ans, hors démantèlement. Ces chiffres concernent le coût des subventions aux énergies renouvelables, les incitations aux économies d'énergie, la construction des centrales à charbon et lignite supplémentaires, l'installation de dizaines de milliers de kilomètres de lignes à haute tension, sans oublier que, là-bas comme ici, personne n'en veut sur le territoire de sa commune !

Bienvenue à Boxberg (District de Dresde – Allemagne)

Nous sommes ici à la frontière polonaise. L'abandon du nucléaire d'ici 2022 et le développement des énergies renouvelables à la production intermittente et imprévisible conduit la République fédérale d'Allemagne à exploiter au maximum les mines de lignite qu'il possède à l'est du pays, conduisant les autorités à raser des villages entiers. Ainsi, la Société suédoise Vattenfall (« chute d'eau » en suédois, un terme qui fleure bon l'écologie) exploite une centrale de 2 575 MW en brûlant 63 000 tonnes de charbon par jour (ces chiffres et les suivants sont tirés de la ref.18 – voir page précédente). Chaque jour, 1 000 tonnes de suie sont rejetées par les 5 cheminées hautes de plus de 150 m dans les forêts environnantes. L'extraction du lignite se fait sur une exploitation de ..78 km². La plus grande excavatrice engloutit 12 000 m³ de terre à chaque heure. Les tapis roulants du pont convoyeur de 28 000 tonnes transportent 25 000 m³ d'un mélange de terre et de charbon, très humide, par heure également ! Il faut 3 kg de lignite pour produire autant d'énergie qu'un kilogramme de charbon.

Voilà ce qui se cache derrière la promotion des énergies vertes.

Cette même décision chez nous conduira aux mêmes résultats si ce n'est que, contrairement aux Allemands, nous avons d'autres contraintes. Les économistes s'accordent à dire que, pour sortir du ravin de la dette, nous devons continuer à faire des efforts pour trouver une centaine de milliards d'euros d'ici 5 ans. Comment les Français pourraient-ils supporter au contraire une dépense nationale supplémentaire de 30 milliards d'euros chaque année, avec un doublement de sa facture d'électricité couplée à de fréquentes coupures de courant alors qu'ils peuvent s'en affranchir ? Il faut enfin souligner que l'investissement dans les énergies renouvelables a coûté 115 milliards € de 1995 à 2011 pour une production de 65 TWh/an à comparer à l'investissement total en France dans le parc nucléaire de 121 milliards d'euros pour une production de 410 TWh/an !

Il est curieux de constater qu'au moment où l'Allemagne décide de sortir du nucléaire, en mars 2011, elle est frappée par un terrible fléau, faisant plus de 40 morts et des milliers d'hospitalisés. Une menace qui ne s'arrêtait pas à la frontière puisqu'elle a essaimé en Europe. Ce n'était ni un accident nucléaire ni le concombre espagnol d'une agriculture trop industrielle. On s'aperçut que le ver était dans le fruit et que l'origine de l'épidémie se trouvait dans une ferme « bio » à Bienenbüttel en Basse-Saxe. On peut penser que cette épidémie « bio » a d'ores et déjà fait plus de décès et d'hospitalisés en Allemagne que Fukushima n'en fera jamais au Japon, si on considère les dommages aux personnes par irradiation et contamination !

²⁰ Cité dans la revue Challenges n°414, p. 41 ; selon cette revue « L'Energiewende (la transition énergétique) pollue l'Allemagne et la ruine »

La part de la France dans la recherche technologique de demain

Sur un autre plan, une politique de recul dans la dynamique qui s'est créée autour de notre industrie nucléaire depuis de nombreuses décennies, reviendrait à perdre notre suprématie dans ce domaine. En particulier, l'arrêt du retraitement mettrait fin à une activité internationale qui contribue à l'image mondiale de notre industrie nucléaire en tant qu'expert dans ce domaine sur toute la filière intégrée.

Cela signerait notre sortie, de facto, des grands programmes de recherche internationaux où nous comptons parmi les leaders. Si la France en sortait, un développement majeur pour la recherche se ferait sans elle. De plus, cet arrêt conduirait à stopper l'activité d'unités très importantes, comme l'usine « historique » de La Hague, dans le Cotentin, qui emploie directement ou indirectement 5 000 personnes et l'usine Melox, qui fabrique le Mox à Marcoule, dans le Gard, avec 1 300 salariés. Les conséquences financières et sociales seraient très importantes.

Pour l'instant, si la France garde une veille technologique sur l'ensemble des six projets de futurs réacteurs développés dans le cadre du forum GIF IV (*voir le chapitre suivant*), elle a pris une part plus active sur trois d'entre eux. Les deux premiers, dits « à neutrons rapides », sont le GFR (Gas-cooled Fast Reactor) dans le « projet Allegro », et surtout le SFR (Sodium-cooled Fast Reactor), descendant direct de Superphénix. Le gouvernement de François Fillon avait alloué 650 millions d'euros, dans le cadre des investissements d'avenir, aux recherches sur ces réacteurs de IV^e génération.

Pour le projet SFR, on le sait, le CEA envisage un prototype au sodium de 600 MWe avec Astrid²¹ qui devrait être opérationnel pour 2020. On y retrouve toutes les qualités technologiques de Superphénix : séparation et transmutation des éléments radioactifs à vie longue et possibilité de renouveler le combustible à partir de celui qui a été « brûlé » dans ce même réacteur, voire en récupérer plus !

Le troisième projet, ANTARES²², est un réacteur développé par Areva et destiné à produire le carburant de demain : l'hydrogène.

En effet, bien que l'hydrogène soit présent partout, il n'est disponible nulle part. Il n'existe que sous forme combinée à d'autres éléments et il faut donc l'isoler. Les cycles thermodynamiques susceptibles de le produire existent mais ils nécessitent une très haute température de l'ordre de 1 000°C. Le réacteur VHTR (Very High Temperature Reactor), qui fait partie des six réacteurs de cette IV^e génération, assure cette chaleur. Antares sera un réacteur de ce type. Il produira de l'électricité et de l'hydrogène avec un rendement thermodynamique élevé, de l'ordre de 50%.

Cet argumentaire explique que tous les rapports déposés sur ce sujet depuis trois mois convergent vers un statu quo sur l'énergie nucléaire, que ce soit le rapport de l'OPECST, celui de la Cour des Comptes ou encore celui de la Commission Énergies 2050 de février 2012.

Bien qu'émanant de commissions pluralistes, tous ces rapports vont dans le même sens. De même, le Sénat, pourtant à majorité de gauche, a adopté une résolution allant également dans ce sens par 171 voix contre 160, le 10 février 2012.

L'industrie du nucléaire civil n'en est qu'à ses débuts : comparer les réacteurs d'aujourd'hui avec ceux de la fin de ce siècle revient à comparer le TGV avec les trains de 1870 ! En revanche le progrès, quelle que soit la technologie, s'appuie obligatoirement sur l'expérience passée dans le même domaine. Ce sont des gradins franchis un par un. Il est important de le souligner aujourd'hui.

²¹ Astrid : Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration

²² Antares : AREVA New Technology based on Advanced gas-cooled Reactors for Energy Supply

Récemment, Alain Prost faisait remarquer que les courses automobiles n'avaient plus entraîné un seul décès parmi les pilotes sur les pistes depuis le triste accident d'Ayrton Senna, le 1^{er} mai 1994, à Bologne en Italie, lors du grand Prix de Saint Marin. Les plus anciens se souviennent des nombreux morts parmi les pilotes (et le public) qui ont tristement marqué les courses automobiles des années 1950-60.

Pourtant, il ne se passe pas de mois que l'on assiste à des carambolages impressionnants où les voitures sont complètement pulvérisées. Simplement, les progrès de la technologie, liés à une culture de la sécurité où l'objectif principal est de protéger au mieux les pilotes, ont conduit à ces résultats spectaculaires. Nul doute que les mêmes progrès technologiques, liés à la sûreté nucléaire comme dans l'EPR, dédié, comme on le verra plus loin, à l'accident majeur - ce qui signifie que tout y est pensé, dès sa conception, pour l'éviter, même dans les conditions extrêmes -, ont abouti là aussi à une sûreté plus qu'optimisée.

La France, sous la poussée des antinucléaires (une action qui n'est pas neutre et qui arrange bien nos concurrents à l'échelle internationale !), pourrait sortir du nucléaire ; c'est un petit pays qui perdrait alors très vite sa place parmi les grandes nations.

Mais, à l'échelle planétaire, l'énergie nucléaire garde une place stratégique pour l'avenir. Autant rester dans ce train en marche et faire bénéficier les autres pays de notre expérience de pionnier dans cette technologie et de notre culture de sûreté. Ce ne peut être qu'extrêmement profitable pour notre pays et ... pour la planète

Pour qui « roulent » les anti-nucléaires dans notre pays ?

La dépêche de l'Agence Reuters du 16 décembre 2007, que je cite ci-dessous dans son intégralité, est tout de même troublante :

« Titre : « Sortir du nucléaire » se réjouit de l'échec d'Areva

Le collectif français « Sortir du nucléaire » s'est réjoui samedi de la décision de la Chine de choisir Westinghouse Electric au détriment du groupe Areva, pour la réalisation de quatre réacteurs nucléaires civils de 3^{ème} génération.

Pékin a préféré le réacteur à eau pressurisée AP1000 de Westinghouse, groupe racheté au début de l'année par Toshiba, plutôt que l'EPR d'Areva. **Le réseau « Sortir du nucléaire » ne peut que se féliciter de l'échec d'Areva qui espérait vendre son réacteur EPR en Chine, déclare le collectif dans le communiqué** » (fin de citation).

Je pense que, lorsqu'on milite dans une association qui espère la sortie du nucléaire, on se lamente de voir les Chinois acheter des réacteurs nucléaires - à qui que ce soit - mais on ne se réjouit pas de voir son propre pays perdre un marché de plusieurs dizaines de milliards d'euros, qui plus est, pourvoyeur sur notre sol de centaines voire de milliers d'emplois !

6 - Les contraintes de l'énergie nucléaire

Comment imaginer l'industrie nucléaire « post-Fukushima » ? Comment relever toutes les contraintes liées à cette industrie : gérer les ressources en combustibles, assurer la sûreté des centrales au niveau international, régler le problème des déchets hautement radioactifs, financer le démantèlement des réacteurs obsolètes ?

Les ressources en uranium

Si on considère les gisements terrestres actuellement répertoriés (5,5 millions de tonnes), on peut considérer qu'au rythme actuel de consommation, cela correspond à 84 ans de réserve en restant dans des coûts économiquement assez bas ; on passe à environ 4 siècles, si on est prêt à payer plus cher. Il y a toutefois deux autres réserves inexploitées :

- les océans qui en contiennent 1 000 fois plus que l'écorce terrestre (à raison de 3,3 mg/m³). Cependant, il est certain que l'extraction de cet uranium pose des problèmes techniques non encore complètement résolus, même si la recherche technologique avance dans ce domaine comme dans d'autres,
- les phosphates qui en contiennent aussi des quantités importantes. Le potentiel de production annuelle serait de près de 2 500 tonnes aux États-Unis et de 1 000 tonnes au Maroc. Toutefois, le coût d'exploitation n'est pas encore compétitif si on le compare à l'exploitation minière directe d'aujourd'hui mais ces réserves existent.

Enfin, il ne faut pas oublier les réacteurs de IV^e génération dont certains sont conçus pour permettre de récupérer un nouveau combustible après exploitation, comme c'était le cas dans Superphénix.

La France a longtemps exploité ses mines d'uranium dans les massifs granitiques de Bretagne, de Vendée et du Massif central. Elle a suspendu cette exploitation à la fin du siècle dernier, pour des questions de coûts mais, comme pour les phosphates, les réserves existent et peuvent redevenir rentables. Notre pays a aussi acquis des droits de propriété sur des gisements à l'étranger représentant 250 000 tonnes (30 ans de consommation).

Ce problème des ressources a conduit la France à mettre au point un nouveau combustible, le Mox, qui est constitué d'uranium appauvri récupéré quasiment comme un déchet à la sortie de l'usine d'enrichissement - étape essentielle pour la fabrication du combustible nucléaire classique - et de plutonium de retraitement.

L'usine de la Hague qui traite les combustibles usés pour en produire de nouveaux, soit ce Mox, soit du combustible à base d'uranium retraité et ré-enrichi (appelé URE : uranium de retraitement enrichi) est la seule usine au monde à avoir fonctionné (avec celle de Marcoule qui est fermée maintenant) sans problème depuis son entrée en fonction. Les autres usines qui s'étaient développées dans d'autres pays ont éprouvé de nombreuses difficultés technologiques. Il n'est pas impossible que la solide culture que notre pays possède dans ce domaine depuis les découvertes de Becquerel et des Curie, lui ait permis de dominer et maîtriser, depuis plus d'un demi-siècle, cette technologie particulière.

La France retraite à La Hague son propre combustible usé, mais aussi le combustible venu d'autres pays, comme le Japon, la Belgique, l'Australie, les Pays-Bas, l'Espagne, l'Italie, la Suisse et l'Allemagne. En dehors de la France, la Belgique, l'Allemagne, le Japon et la Suisse utilisent du combustible Mox. Les États-Unis, l'Inde, la Russie et la Chine envisagent aussi l'utilisation de ce nouveau combustible. Dans le Monde, d'ores et déjà, 40 réacteurs sont chargés en Mox et 50 réacteurs sont alimentés en URE. En France, cet uranium de retraitement enrichi alimente les 4 réacteurs de la centrale de Cruas et le combustible Mox alimente en partie 24 (et bientôt 26) réacteurs.

*Ainsi, rien que dans notre pays, avec chaque année 120 tonnes de Mox et 75 tonnes d'URE, ce sont **195 tonnes de combustible à l'uranium naturel** qui sont remplacés par des combustibles recyclés (soit une économie de 17% en uranium naturel pour une consommation annuelle de 1 170 tonnes).*

La gestion des déchets radioactifs

Un déchet radioactif est un matériau qui contient ou est contaminé par un (ou des) élément(s) radioactif(s) et pour lequel aucune utilisation ultérieure n'est prévue. Ainsi des combustibles nucléaires usés sortis des réacteurs nucléaires après avoir fourni de l'électricité pendant au moins 3 ans ne sont pas des déchets puisqu'on peut en réutiliser 96% après retraitement.

tement, dans des nouveaux combustibles, comme on vient de le voir²³. Cette définition met fin à une querelle entre industriels et anti-nucléaires, ces derniers souhaitant que la notion de déchets s'étende aux combustibles usés, ce qui, économiquement et écologiquement, était une ineptie !

La gestion de ces déchets n'est pas un problème français mais international. Toutefois, la sensibilité sur la manière de les gérer est très différente selon les pays. C'est ainsi qu'en Europe, si certains pays mènent des recherches approfondies sur plusieurs voies de stockage et de transformations possibles (comme la France, la Belgique, la Suisse ou l'Allemagne), d'autres (comme les pays scandinaves) stockent l'ensemble de leurs combustibles usés, plutonium y compris, sans retraitement, dans de vastes fosses creusées en profondeur, sur le territoire des centrales nucléaires. Cela, sans que ça émeuve les populations.

Il ne semble pas raisonnable (bien que ce soit la voie choisie préférentiellement aujourd'hui) de considérer, même si on les enfouit, le stockage sans problème de ces déchets pour des centaines de milliers d'années alors que l'histoire de l'Humanité n'a que 40 000 ans. L'Homme peut-il s'engager pour l'avenir de la planète dans 100 000, voire 1 000 000 d'années ?

Les déchets qui posent véritablement problème sont ceux qui possèdent une très forte radioactivité et des périodes longues (la période est le temps au bout duquel un radioélément a perdu la moitié de sa radioactivité). Même si leur volume peut sembler faible (en France, un cube de 13 mètres d'arête contiendrait tous ces déchets depuis l'origine de notre industrie nucléaire ; le cube fera 15 mètres d'arête en 2025), il convient d'apporter d'ici une ou deux générations la réponse à la maîtrise de la gestion de ces déchets.

Il paraît possible de contrôler un système pendant trois ou quatre siècles, mais guère plus. Or, la solution existe ; elle s'appelle **la transmutation**. Les recherches sur la transmutation sont engagées depuis plusieurs années. En France, c'est l'un des axes des deux lois sur la gestion des déchets radioactifs (en 1991 puis 2006).

La transmutation

Il s'agit de réduire la nocivité de ces déchets, en les transformant dans certains des réacteurs de IV^e génération, en éléments radioactifs à durée de vie plus courte. Il suffit pour cela de modifier la composition des noyaux, en y ajoutant des neutrons, par exemple, ce qui a pour effet de raccourcir leur durée de vie. Ces déchets ne nécessitent alors qu'un entreposage temporaire, plus compatible avec l'entendement humain. Prenons comme exemple 2 éléments radioactifs à durée de vie très longue, le niobium-94 et le technétium-99.

Si on les stocke en l'état, il faudra attendre des centaines de milliers d'années avant de les voir disparaître. Or, en les irradiant dans un réacteur du même type que Superphénix, ces éléments vont se transformer, en quelques heures pour l'un (le technétium), en 5 années au maximum pour l'autre, en éléments stables. Il suffit donc, dans un premier temps d'isoler chimiquement ces éléments puis de les bombarder chacun séparément par des neutrons pour voir disparaître complètement leur radioactivité en un temps relativement court.

La solution existe donc, même s'il faut faire confiance à la recherche qui sera menée dans les deux générations à venir car la réponse ne sera pas apportée avant 2030, 2040. De même, il est certain qu'il faut attendre la mise en place des réacteurs de IV^e génération. Il faut toutefois relativiser : entre une solution qui consiste à stocker ces déchets pour des centaines de milliers d'années et une autre qui permettra, d'ici 50 ans de n'avoir plus qu'à les entreposer pour 300 à 400 ans maximum, le choix est facile !

²³ On n'en réutilise aujourd'hui qu'une fraction mais le reste est stocké à des fins d'utilisation future.

Sur le plan de la maîtrise au niveau financier enfin, on vient de voir, en France, que la Cour des Comptes a estimé, dans son rapport du 31 janvier 2012, le traitement des déchets à long terme à 28,4 milliards d'euros. Il est certain que seul un stockage sur une durée limitée permet une évaluation crédible ; s'il est en effet difficile de s'engager sur 3 siècles, cela devient impossible sur des centaines de milliers d'années

Le coût du démantèlement des réacteurs obsolètes

Contrairement à n'importe quelle autre industrie – et ce n'est pas réservé à la France – l'industrie nucléaire est la seule à avoir prévu dès la conception de ses réacteurs, le coût du démantèlement et à l'avoir intégré dans le prix de revient du kilowattheure. Il est certain que le principe « pollueur-payeur » concerne ce qu'on peut appeler les charges nucléaires de long terme, de façon à ne pas laisser ce coût aux générations futures. En France, neuf réacteurs d'EDF sont en cours de démantèlement. Leurs dates d'arrêt d'exploitation s'échelonnent entre 1973 (Chinon A) et 1998 (Creys-Malville : Superphénix).

Le retour d'expérience de démantèlements réussis dans le nucléaire existe : des installations ont été rendues à « la vie civile », ce qui signifie que l'on se promène maintenant en tenue civile, sans aucune précaution particulière dans ces installations qui, à l'époque de leur fonctionnement, étaient extrêmement radioactives. La recherche nucléaire française est en passe d'achever l'assainissement de six installations de son Centre de Grenoble, dont trois réacteurs. Ce travail se sera déroulé sur 10 ans et aura coûté 255 millions d'euros.

Pour ces 9 réacteurs à démanteler, EDF a provisionné dans ses comptes 2 milliards d'euros. Sera-ce suffisant ? Le rapport de la Cour des Comptes déjà évoqué parle de 18,4 milliards d'euros mais pour les 58 réacteurs. On pourrait aussi bien se demander si ce ne sera pas trop, ce qui serait une bonne nouvelle ! Pourquoi un tel optimisme ? Tout simplement parce que la vision que nous avons d'un tel démantèlement à l'instant t ne sera peut-être pas celle qu'auront les générations qui nous succèdent. Il est en effet possible que, ce que nous considérons aujourd'hui comme un déchet radioactif, même s'il est très faiblement radioactif, soit considéré au contraire par nos descendants comme un matériau à nouveau exploitable. Dans ce cas, la donne change !

De la même manière, on saura peut-être décontaminer très fortement des matériaux radioactifs, ce qui permettra là aussi de diminuer de façon drastique le volume des déchets à stocker. Il ne s'agit pas là d'un optimisme déplacé mais d'une foi dans la recherche menée par les générations futures.

Enfin, on peut se demander pourquoi raser ces grandes installations créées dans la seconde moitié du XX^e siècle et ne pas les réutiliser, du moins leurs protections en béton. Il faut bien voir qu'aujourd'hui, les réacteurs nucléaires sont conçus pour une durée de fonctionnement de 60 ans au moins. En France, ils sont soumis à des inspections décennales, visites techniques qui sont également ouvertes à des associations anti-nucléaires qui, comme d'autres, font un rapport détaillé en donnant leur avis (qui est écouté) sur le prolongement ou non de l'installation. Mais aux États-Unis ou même au Japon, comme on l'a vu plus haut, les autorisations de fonctionnement ont été d'ores et déjà obtenues sur cette durée.

Il est certain que, 60 ans plus tard, la conception de nouveaux réacteurs sera complètement différente de celle des réacteurs d'aujourd'hui. Il suffit de comparer les premiers réacteurs (il y a justement 60 ans : G1, G2, G3, par exemple à Marcoule) avec l'EPR (conçu, lui, pour au moins 70 ans). Il n'y a rien de comparable ! Il n'est même pas possible d'imaginer une nouvelle génération de réacteurs, au siècle prochain qui serait conçue à l'origine de façon

à ce que certains de ses éléments, parmi les plus importants, puissent être réutilisés dans 70 ou 80 ans, c'est à dire à 3 générations de là.

Tout ce qui pourrait à la rigueur être réutilisé, c'est le terrain mais une fois que celui-ci aura été complètement libéré, ce qui nous ramène au problème précédent. Le démantèlement sera toujours d'importance, la différence dans les coûts ne se fera que sur la stratégie adoptée pour le stockage des divers éléments et matériaux issus du démantèlement.

Le démantèlement, parlons-en !

Pourquoi n'envisage-t-on pas le coût du démantèlement dans les autres industries, en particulier dans le domaine de la fourniture d'électricité ? Deux exemples : les cellules photovoltaïques ont une durée de vie limitée à 20 ans. On aura épuisé, lors de leur fabrication, tous les métaux rares disponibles. Il conviendra donc de les récupérer, ne serait-ce que pour respecter un développement « durable ». Le coût de ce démantèlement sera très élevé et, si on se réfère au MWh produit, bien plus élevé que celui du nucléaire.

De la même façon, pour ce qui concerne l'éolien, on n'envisage que le démantèlement des appareils, mais le béton qui leur sert d'assise (jusqu'à 5 000 tonnes) ? À quand une transparence aussi grande pour les autres sources d'énergie que celle qu'exigent certains à propos du nucléaire ?

La sûreté des réacteurs au niveau mondial

Dans le nucléaire, le « low cost » n'est pas acceptable. L'énergie nucléaire est l'industrie qui a le plus anticipé les problèmes de sécurité et qui a le plus investi dans ce domaine. Avant même le démarrage des centrales, dans les années 1970, on avait tout prévu, tout imaginé, du moins en avait-on l'intime conviction !

Aujourd'hui, à la lumière de Fukushima, et même si l'accident est dû à une cause extérieure à la science nucléaire, il faut réfléchir encore plus et se demander « ce qui peut se passer dans les situations inimaginables ». Par ailleurs, il faut en finir avec une tentation que l'on avait senti poindre ici ou là : faut-il vraiment dépenser autant en sécurité ? Il ne faut plus se poser la question. Une centrale doit être « trop sûre ». Et on ne peut pas transiger à quelques centaines de millions d'euros près dans la fabrication d'un réacteur si l'on pense qu'il y a un doute sur la sûreté.

Une marge financière existe. On a vu plus haut que, si l'on investit 1 milliard d'euros dans la sûreté supplémentaire de notre parc nucléaire, le coût additionnel par kWh est de 0,02 centime d'euro (pour un investissement sur 10 ans seulement, or la durée des réacteurs est beaucoup plus longue).

Avoir une marge, donc une réserve financière, ne signifie pas qu'il faille absolument la dépenser ! Mais gardons en mémoire que s'il y a un réel besoin de financement supplémentaire de sûreté, on peut investir sans bouleverser le modèle économique.

L'EPR est aujourd'hui le réacteur le plus sûr jamais conçu car il a intégré, dès sa conception, la possibilité d'occurrence d'un accident majeur comme ceux survenus à Fukushima, que cet accident soit lié à une catastrophe naturelle exceptionnelle comme au Japon ou soit la conséquence d'agressions externes. Ainsi, il a été prévu une redondance 4.

Redondance 4

Dans le cas d'un moteur auxiliaire, cela signifie que si le moteur tombe en panne, il y en a un autre de secours. Si celui ne démarre pas (pour une raison inconnue), il y en a un troisième, et au cas où celui-ci serait malencontreusement en maintenance, il y en a un quatrième. C'est la seule industrie ou activité de services où il y ait cette redondance 4. Ce n'est pas le cas, pour ne prendre qu'un seul exemple, dans l'aviation civile, même dans les vols transocéaniques.

L'EPR est un réacteur de III^e génération. De nombreux pays proposent ou vont proposer au marché mondial, de tels réacteurs : les Russes, les Coréens du Sud, les Japonais, les Chinois, les Indiens, les Américains. Ces réacteurs vont nous mener à la fin de ce siècle. Mais, il convient d'imaginer dès maintenant la génération future. Là aussi, la sûreté fait partie de ses contraintes.

Intrusion dans les centrales françaises.

En France, fin 2011, Greenpeace a pénétré sur deux sites nucléaires ; aux États-Unis, on ne les verra pas se livrer à de tels exercices : les gardiens sont armés et personne ne peut douter qu'ils tireraient, sans que cela émeuvent les populations. Dans notre pays, personne ne tient à ce qu'on en arrive à de telles extrémités et on en conclut que nos centrales sont mal surveillées !

Il y a 10 ans, le Département de l'énergie des États-Unis (DOE) a proposé la mise en place d'un forum pour réfléchir à long terme à une nouvelle génération : le Forum International Génération IV (GIF IV). Ce forum regroupait 10 pays membres à sa création : Argentine, Brésil, Canada, France, Japon, Corée du Sud, Afrique du Sud, Suisse, Royaume-Uni, USA. Il a été rejoint par la Communauté Européenne en 2003 et par la Russie et la Chine en 2006.

Quatre thèmes majeurs ont été fixés en 2001 pour ces nouveaux réacteurs :

- Sûreté et fiabilité,
- Non-prolifération (c'est-à-dire ne pas pouvoir faire fonctionner ces réacteurs à des fins militaires),
- Développement durable : assurer de meilleurs rendements pour optimiser l'utilisation des ressources naturelles et minimiser les déchets,
- Compétitivité : diminuer les coûts de construction et d'exploitation des réacteurs mais aussi ouverture à de nouvelles applications.

Une autre demande très importante était fixée : chaque réacteur devra être conçu pour être associé à un cycle complet du combustible, incluant notamment le retraitement et la gestion des déchets. C'est un concept loin d'être étranger à la culture nucléaire française ! En effet, un projet d'avant-garde avait déjà été développé dans les années 1970 en France. Il s'agissait de construire une centrale de 4 réacteurs « surgénérateurs », à laquelle était associée une usine de retraitement des combustibles usés et de fabrication de nouveaux combustibles. Les déchets étaient « brûlés » dans la couverture du réacteur.

Parmi les 6 projets de réacteurs complètement nouveaux, 3 sont des surgénérateurs, c'est-à-dire des réacteurs qui sont susceptibles de fournir un nouveau combustible à partir de celui qui aura « brûlé » pour fournir de la chaleur et donc de l'électricité.

On le voit, l'avenir est assuré pour les générations qui nous succèdent et les contraintes du nucléaire évoquées ci-dessus (ressources, sûreté, gestion des déchets) sont au cœur des conceptions de ces nouveaux réacteurs²⁴.

Dès aujourd'hui, la sûreté des réacteurs doit concerner tous les pays, sinon les pays qui appliqueront des mesures drastiques subiront une distorsion de compétitivité sans être pour autant protégés d'un accident venu d'ailleurs puisqu'on sait que les conséquences de catastrophes nucléaires ne connaissent pas de frontières.

²⁴ Ce projet eut une première réalisation : Superphénix. On se rappelle qu'il fut arrêté en 1997 par Lionel Jospin alors Premier Ministre, sous la pression des Verts menés par Dominique Voynet...

L'idéal, de ce point de vue, serait d'avoir un gendarme international, une sorte d'AIEA civil, ayant l'autorité pour faire respecter les normes internationales par tous les pays. Est-ce possible de la mettre en place de façon internationale ? C'est un autre problème... Cette instance devrait être très ferme, compte tenu des enjeux financiers et avoir une autorité incontestée. Son indépendance doit être complète. Elle pourrait s'appuyer sur le modèle de l'Autorité de sûreté nucléaire française. Ses compétences, son autorité et son indépendance sont reconnues sur un plan international.

La sûreté des transports de matières radioactives

Les transports de matières radioactives n'ont pas été rangés parmi les contraintes du nucléaire car ces transports dont seuls quelques-uns sont extrêmement médiatisés, ne présentent aucun problème de sûreté. Ils se font pour 60% par la route ; le rail et la voie maritime assurent les autres.

Quelques chiffres : les matières radioactives représentent 2% des colis de matières dangereuses transportées chaque année, soit 300 000 colis. 15 000 d'entre eux concernent l'activité nucléaire électrogène. Le reste provient d'applications médicales (les traceurs radioactifs utilisés en particulier dans le diagnostic), l'industrie, la recherche.

La sûreté de ces transports repose essentiellement sur les emballages. Ceux-ci sont soumis à des contraintes de résistance et d'étanchéité drastiques. Les valeurs de limitations de débit de dose à l'extérieur du colis sont contrôlées par l'exploitant et les organismes de sûreté mais aussi par des associations de défense de l'environnement. En France, aucun des accidents survenus depuis les débuts de l'industrie nucléaire n'a eu de conséquences sanitaires ou environnementales. Le seul accident resté dans les mémoires a été le naufrage du Montlouis, en 1984 dans la Manche. Ce bateau transportait de l'uranium naturel, à l'état d'hexafluorure ; tous les conteneurs ont été récupérés et aucune pollution maritime ou autre n'a été constatée.

On se rend bien compte que les manifestations parfois hystériques que nous présentent les médias, ne reposent pas sur un danger potentiel mais sont motivées par une opposition à cette énergie.

En matière d'accident de transport, personne n'a oublié la catastrophe de Los Alfaques (Tarragone ; Espagne) survenue le 11 juillet 1978. L'explosion, à proximité d'un terrain de camping, d'un camion-citerne transportant 25 tonnes de propène fit 217 morts et 200 grands brûlés. Cela n'a guère ému les écologistes et le transport de ces matières inflammables n'est pourtant toujours pas soumis aux mêmes contraintes que les transports de matières radioactives, même si des progrès ont été faits depuis ce drame humain.

En revanche, utiliser sur une grande échelle, l'énergie nucléaire pour la navigation maritime (ou fluviale !) civile peut représenter un danger. En effet, il est certain qu'on n'est jamais à l'abri d'un naufrage. Les exemples se comptent par milliers depuis les débuts de l'humanité ; le récent naufrage du « Concordia » corrobore ce sentiment d'insécurité pour ce transport. Jusque-là, les applications n'ont concerné que quelques bâtiments militaires (sous-marins ou porte-avions) qui utilisent le nucléaire comme une source d'énergie permettant une grande autonomie (un porte-avion nucléaire peut naviguer pendant des années sans changer de combustible alors que son homologue « classique » consomme la cargaison d'un pétrolier tous les 3 jours !). Les seuls autres bâtiments nucléaires « civils » sont quelques brise-glace.

Lorsque le baril de pétrole a franchi pour la première fois la barre symbolique des 100 dollars, la question s'est posée d'installer sur les paquebots modernes, des réacteurs nucléaires. Il faudra résoudre bien des problèmes avant de se lancer dans de telles applications ! On voit que la sûreté nucléaire ne touche pas que les centrales électrogènes.

La non-prolifération

Dans la mesure où les premières manifestations de l'énergie nucléaire ont été l'usage d'armes « atomiques » et où tout l'équilibre de la guerre froide a reposé sur la fabrication d'armements de ce type, il est certain que la communauté internationale s'est toujours montrée vigilante vis-à-vis de la prolifération de matières nucléaires susceptibles d'être utilisées à des fins militaires. Elle s'est dotée d'organismes de surveillance qui fonctionnent avec cet objectif. Cette lutte contre la prolifération nucléaire repose sur le Traité de Non-Prolifération Nucléaire (TNP)

Le Traité de non-prolifération : TNP

Ce traité garantit l'accès à l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire aux États non dotés de l'armement nucléaire à condition qu'ils renoncent à développer un usage militaire de cette énergie. Les cinq États dotés de l'arme nucléaire sont la Chine, les États-Unis, la France, la Russie et le Royaume-Uni. Le TNP a été signé le 1^{er} juillet 1968 et est entré en vigueur en 1970. La France a adhéré au TNP en 1992. 192 pays sont signataires. 3 pays ayant développé l'arme nucléaire ne l'ont pas signé (Inde, Israël et Pakistan). La Corée du Nord s'est retirée en janvier 2003.

L'organisme garant de cette non-prolifération est l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), organisation intergouvernementale créée par décision de l'Assemblée générale des Nations-Unies. L'AIEA a pour rôle d'encourager et de faciliter le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques et de garantir que les éléments fissiles ne soient pas utilisés de manière à servir à des fins militaires. Appuyée par la volonté de tous les pays signataires, cette Agence accomplit sa mission avec beaucoup de vigilance. Comme nous l'avons déjà souligné plus haut, il conviendrait de mettre en place un organisme équivalent pour contrôler demain le nucléaire civil.

Conclusion et Propositions

Comme on l'a vu tout au long de cet essai, l'énergie est un véritable atout pour l'humanité. Or, nous allons connaître une pénurie d'énergie dans l'avenir puisque, même en développant au maximum toutes les sources d'énergie possibles, malgré des efforts drastiques concernant les économies d'énergie, on n'arrive pas à maintenir le « scénario du XX^e siècle » et donc la croissance que nous avons connue pendant cette période.

L'humanité ne s'affranchira donc pas d'une source d'énergie, quelle qu'elle soit. Compte tenu des contraintes du nucléaire, en particulier en matière de sûreté et de non-prolifération, il est certain que nous avons intérêt à rester leader dans ce domaine. Pour cela, il faut maintenir un parc nucléaire à la hauteur de ce qu'il est aujourd'hui.

Les avantages sont nombreux :

- une électricité bon marché et fiable qui est une des conditions du développement de nombreuses entreprises dans bien des domaines (y compris dans celui des énergies renouvelables qui compte aujourd'hui 550 entreprises pour 10 millions d'euros de chiffres d'affaires et 80 000 emplois),
- des rejets de gaz à effet de serre limités, nous plaçant parmi les « excellents élèves » de la planète,
- des emplois pérennes par centaines de milliers,
- le respect du développement durable grâce au retraitement des combustibles usés et à l'avènement des réacteurs surgénérateurs de IV^e génération,
- une position de leader dans cette industrie et la recherche qui y est attachée, grâce à notre expérience de plus d'un siècle dans ce domaine.

Notre culture en matière de sûreté, de gestion des déchets, de transparence et de vigilance citoyenne doivent servir de modèle aux nations qui se lancent dans le développement de cette industrie. Notre abandon du nucléaire et donc de toutes ces valeurs ne pourrait être que gravement préjudiciable pour l'environnement de notre planète dans le futur.

Prix HT de l'électricité chez nos voisins européens
en €/MWh au 1^{er} semestre 2009²⁵

(1): à usage industriel
(2): à usage domestique

	1	2
Allemagne	97,5	113,2
Belgique	102,6	111,1
Espagne	109,8	115,4
France	64,7	70,2
Italie	?	143,5
Luxembourg	109,6	115,7
Royaume-Uni	107,7	111,7

Source : Mémento sur l'énergie CEA - 2011

Maintenir notre place de leader dans cette très haute technologie nécessite de former dans ce domaine ultra-spécialisé des centaines d'ingénieurs et de techniciens supérieurs chaque année.

Il conviendrait de se pencher de façon plus efficace sur une des voies gestions des déchets ultimes, ceux qui sont les plus radioactifs, voie qui utilise la transmutation de ces déchets afin de diminuer de façon importante leur durée de vie. Ne pas les stocker pour des centaines de milliers d'années, mais les entreposer pour 3 ou 4 siècles seulement est le défi qu'il faut réussir pour regagner la confiance de l'opinion publique. L'autre challenge dans lequel on est engagé concerne la sûreté accrue de nos centrales, sur toute la planète. Ce qui est réalisé chez nous doit l'être aussi dans tous les pays qui veulent s'équiper en réacteurs électrogènes nucléaires.

De même, il convient, comme nous l'avons développé plus haut, de créer une instance internationale, reconnue par tous les pays et indépendante qui aurait l'autorité nécessaire et indispensable pour faire respecter les normes internationales par tous les pays.

On a vu que le maintien d'une puissance énergétique nucléaire telle qu'elle est aujourd'hui dans notre pays (autour de 63-65 GWe) ne signifie pas qu'il ne faut pas développer les autres énergies et modifier notre mix énergétique (lors des fortes demandes, le nucléaire est à moins de 60% !).

Les économies d'énergie que nous devons réaliser passent par un habitat rénové en matière d'isolation des habitations. Il n'est pas logique qu'un degré de moins dans les températures conduisent à une dépense de 2 300 MW supplémentaires dans notre pays alors que chez nos voisins d'Outre-Rhin, cette augmentation n'est que de 600 MW ! Là aussi, c'est une source d'emplois importante à la condition que nous restions dans une économie où l'énergie reste bon marché.

²⁵ Depuis, le kWh allemand a encore augmenté de 23% pour 4% en France, essentiellement, chez nous, pour payer les surcoûts dus aux énergies renouvelables (voir l'encadré p. 18)

Le développement des énergies renouvelables qu'il convient d'encourager passe tout d'abord par une amélioration des possibilités de stockage de l'énergie ; pas de demi-mesure : d'un facteur 1 000 au moins par rapport à ce qu'on sait faire aujourd'hui. C'est la seule façon de devenir acteur mais cela impose un programme de recherche important, totalement innovant, coordonné et international mais dans lequel la France a toute sa place.

Un autre programme de recherche essentiel pour pallier la déficience d'un combustible fossile qui deviendra hors de prix d'ici 20 ans dans les transports : améliorer le stockage de l'hydrogène et pour cela conduire une recherche innovante sur des matériaux qui résistent à l'action de ce gaz, pour son stockage et son transport. Là encore, la France, en se proposant comme pays animateur dans le projet de réacteur VHTR de IV^e génération et en promouvant le prototype Antarès, est à la pointe de cette recherche innovante.

Enfin, ne pas négliger une source d'énergie abondante qui dort dans notre sous-sol et dont l'exploitation nous éviterait une importation qui va devenir de plus en plus coûteuse : le gaz de schiste. Son exploitation, à des fins purement expérimentales dans un premier temps nous permettrait de mettre au point la méthode d'extraction la moins polluante pour l'environnement. Il ne faut pas se leurrer : ce qui est vrai pour la Planète (on ne pourra s'affranchir d'aucune source d'énergie) est vrai aussi pour nous. On exploitera ce gaz, de toute façon. Autant prévoir cette exploitation de façon sereine et rigoureuse. Là aussi, nous pouvons être un modèle aux yeux du Monde.

Voilà dix propositions qui doivent nous permettre d'affronter l'avenir avec les meilleurs atouts.

Ainsi, l'énergie peut nous maintenir dans le cercle des grandes nations surtout grâce à l'intelligence de nos ingénieurs, chercheurs et techniciens, passés, présents et futurs. Ils nous ont permis de dominer une énergie dont la planète ne peut se passer mais dont l'utilisation ne souffre aucune maladresse. Il nous appartient de confier cette richesse technologique aux générations futures. Il est aussi de notre rôle de ne négliger aucune autre ressource énergétique.

novembre 2016