

Communication de Monsieur Laurent Stricker



Séance du 14 mars 2014



Le nucléaire, un problème ou une solution ?

C'est un redoutable honneur qui m'est fait de tenter de présenter en 40 minutes un sujet à multiples facettes, scientifiques, techniques, politiques, sociales, environnementales, sanitaires, internationales. Je limiterai mon propos à l'aspect énergétique du nucléaire, laissant de côté les autres applications industrielles ou militaires ainsi que les applications médicales.

Je commencerai ma présentation par un bref aperçu de la question énergétique mondiale, de la place qu'y occupe l'énergie nucléaire, et du cas particulier de la France; je dirai un mot de l'origine de cette énergie, de ses avantages et de ses inconvénients. J'évoquerai les différentes filières de réacteurs, et les travaux concernant les réacteurs du futur. Je développerai ce qu'on entend par sûreté nucléaire et quelles sont les organisations en place pour la contrôler. Je dirai également un mot de la gestion des déchets avant de proposer une conclusion sinon une réponse à la question titre.

D'abord la vue d'ensemble

La planète compte aujourd'hui 7 milliards d'habitants dont 1 à 1,2 milliard n'ont pas accès à l'électricité et la plupart des prévisions s'accorde sur un chiffre de 9 milliards à l'horizon 2050.

La question de l'énergie est avec celle de l'accès à l'eau et celle de la sécurité alimentaire un défi pour le XXI^{ème} siècle. Actuellement l'approvisionnement en énergie primaire fait appel à 75 % à des combustibles d'origine fossile : pétrole, charbon et gaz.

La production d'électricité quant à elle provient à 40 % du charbon, à 20 % du gaz, à 5 % du pétrole, à 14 % du nucléaire et à 20 % d'énergies renouvelables dont 16 % d'hydraulique. C'est-à-dire que l'électricité produite dans le monde est en moyenne pour 2/3 d'origine fossile et pour un tiers non carbonée. La situation est évidemment très différente d'un pays à l'autre, la France ayant un mix non carboné à 90 %.

On assiste à des déplacements entre les différentes sources d'énergie, avec une montée significative de la part du gaz et des énergies renouvelables dans la production d'électricité.

Une récente étude allemande effectuée par Siemens et l'Université Technique de Munich prévoit une augmentation de 50 % de la demande mondiale en électricité d'ici 2030, ce qui correspond à une croissance relativement modeste de 3 % par an. Par ailleurs, le Congrès Mondial de l'Energie, réuni à Séoul en octobre dernier, ainsi que l'Agence Internationale de l'Energie, l'IAE, considèrent que le charbon supplantera le pétrole comme première source d'énergie primaire d'ici 2020. « Au secours le charbon revient ! » titrait le journal « l'Opinion » le 4 janvier dernier.

Le marché chinois qui est responsable de 50 % de la croissance de la demande mondiale toutes énergies confondues représente les 2/3 de la croissance globale de la demande en charbon; à titre d'ordre de grandeur, la Chine met en service chaque année l'équivalent de la capacité de production d'électricité de la France, soit près de 130 000 MW. L'Inde est dans la même logique : le coût du charbon est bas, trois fois moins cher que le Gaz Naturel Liquéfié et deux fois moins cher que le gaz en Europe. L'IAE indique 130 ans de réserves. A cela s'ajoute l'exportation de charbon américain dont les centrales s'alimentent de plus en plus au gaz de schiste depuis environ 5 ans et qui concurrence en Europe le gaz russe, norvégien et qatari.

On assiste ainsi à un double déplacement des centres de gravité :

- L'essentiel de la croissance de la demande en énergie provient maintenant des pays hors OCDE, principalement Chine et Inde ;
- Les Etats-Unis qui importent aujourd'hui 20 % de leurs besoins en énergie sont en train de devenir autosuffisants et devraient être exportateurs à partir de 2035 voire plus tôt.

Les conséquences pour l'industrie européenne sont importantes : on assiste d'ores et déjà à une réinternalisation de la chimie lourde aux USA avec des fermetures d'usines chimiques et de raffineries en France qui voient se fermer le marché américain. La question du prix du baril reste posée, mais on peut

imaginer que des prix élevés conviennent à la fois aux Américains, aux Russes, aux Iraniens ce qui donne un éclairage intéressant aux accords signés avec l'Iran fin 2013.

Quelle est la place du nucléaire dans ce paysage ?

Il procure au niveau mondial 14 % de l'électricité et le Conseil Mondial de l'Energie considère cette valeur, selon le scénario retenu, soit comme devant rester stable, soit devant croître significativement dans les trois ou quatre décennies à venir après que des prévisions plus ambitieuses aient été revues à la baisse suite à l'accident de Fukushima en mars 2011.

Si on examine une carte du monde où 436 réacteurs sont actuellement en service, on constate que de nombreux pays ont décidé soit de poursuivre leurs programmes, soit de commencer de tels programmes, même si d'autres, principalement en Europe de l'ouest, ont différé leur décision, ou plus rarement, stoppé leurs programmes à plus ou moins longue échéance.

On constate également qu'à fin 2013, 72 réacteurs étaient en construction. Pour la construction d'installations de production d'électricité d'origine nucléaire, on considère trois types de compagnies d'électricité :

- Celles qui exploitent déjà de telles installations dans des pays fortement industrialisés. C'est le cas notamment aux USA, en France, en Belgique, aux Pays-Bas, en Russie, en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Suède, en Espagne, en République Tchèque, en Slovaquie, en Hongrie, en Roumanie, en Slovénie, au Japon, en Corée du Sud, en Finlande, en Chine, en Inde, en Argentine, au Brésil, en République Sud-Africaine. Tous ces pays ont des centrales en fonctionnement et, pour la plupart, d'autres en cours de construction ou en projet. Sur les 72 réacteurs en construction dans le monde, 30 se trouvent en Chine, où de l'ordre de soixante-dix autres sont en projet, 9 sont en construction en Russie et 7 en Inde. Au Royaume-Uni, l'accord franco-britannique pour la construction de deux réacteurs EPR^[1] à Hinkley Point dans le Somerset, et de deux autres en option à Sizewell, annoncé fin 2013, attend le feu vert de Bruxelles pour devenir effectif.
- Deuxième catégorie, les compagnies "nouvelles venues" dans des pays ayant l'expérience de l'exploitation de centrales nucléaires, avec des infrastructures industrielles, des universités capables de former des ingénieurs et des techniciens, et disposant d'une autorité de sûreté : c'est le cas de nouvelles compagnies chinoises et indiennes qui prennent part aux constructions de centrales citées plus haut.

- Celles enfin, troisième catégorie, qui sont nouvelles venues dans des pays n'ayant pas d'expérience dans ce domaine, ce qui pose la question de la suffisance des capacités industrielles pour la construction et la maintenance, et la question de l'existence des organismes de formation et de la création d'une autorité de sûreté. C'est le cas des pays ayant récemment soit annoncé leur intention de s'engager dans de tels programmes, soit venant de signer des accords dans ce sens avec un fournisseur : la Jordanie, la Turquie, le Vietnam, l'Égypte, la Biélorussie, le Bangladesh, la Pologne, les Emirats Arabes Unis, l'Arabie Saoudite et d'autres, soit à fin 2013 une vingtaine de projets de réacteurs selon l'AIEA^[2].
- Je dois ajouter une quatrième catégorie comprenant des pays qui exploitent aujourd'hui des centrales nucléaires construites par des pays de la première catégorie, mais avec des infrastructures industrielles et des autorités de sûreté insuffisamment développées. C'est le cas du Pakistan, sous embargo du fait de la non signature du Traité de Non Prolifération nucléaire, de l'Iran et de l'Arménie.

La condition essentielle, incontournable, est celle de la sûreté nucléaire, je vais y revenir.

Quelle est la situation en France ?

Comme vous le savez, le débat national sur la transition énergétique s'est achevé le 18 juillet dernier par la publication d'une synthèse et un projet de loi devrait être débattu à la fin de cette année. Une trame de ce projet a été publiée par le ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie en décembre dernier.

Le ministre, M. Philippe Martin, a déclaré mi 2013 devant l'Union Française de l'Électricité, je le cite : « Quatre objectifs fondamentaux sont à concilier impérativement dans le texte de loi : la lutte contre le changement climatique, la relance de la compétitivité économique, le maintien de la sécurité d'approvisionnement et la préservation de l'équilibre du système électrique ». Vaste programme !

On peut regretter que la question des prix de l'énergie n'ait pas fait partie du débat de même que les questions liées aux bâtiments et aux transports alors que ces deux secteurs absorbent les $\frac{3}{4}$ de l'énergie finale consommée.

La situation en France est meilleure que celle du reste du monde : en effet au niveau mondial, l'énergie primaire provient à 75 % des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz), grandes émettrices de gaz à effet de serre, alors qu'en

France cette part n'est que, si on peut dire, de 50 % du fait que l'électricité est produite essentiellement à partir du nucléaire et de l'hydraulique.

Les axes de progrès paraissent dès lors clairs : améliorer l'efficacité énergétique pour maîtriser la consommation et substituer le recours aux énergies carbonées fossiles par des énergies non carbonées : énergies renouvelables et nucléaire.

Qu'en est-il alors, me direz-vous, de l'engagement du président de la République du principe d'une réduction de 75 % à 50 % de la part du nucléaire dans la production d'électricité en 2025 ? Bernard Bigot, Administrateur Général du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives) et membre associé national de notre compagnie, considère bien sûr que l'important est de réduire la part des énergies fossiles émettrices de CO₂ dans le mix énergétique. Il fait le calcul suivant : aujourd'hui, schématiquement, l'énergie primaire se répartit à égalité (50 % - 50 %) entre les transports utilisant les énergies fossiles d'une part, et l'électricité d'autre part, elle-même produite à 75 % à partir du nucléaire. Demain, la cible est d'accroître l'utilisation de l'électricité, énergie non carbonée en France pour passer de 50 % à 75 % et de réduire ainsi l'utilisation des énergies fossiles de 50 % à 25 %. Appliquant le principe de passer de 75 % à 50 % la part du nucléaire dans la production d'électricité, on aura alors 50 % de 75 %, soit en considérant, toujours schématiquement, une production stable, la même puissance installée : aujourd'hui : 75 % de 50 % = 50 % de 75 % demain. D'où le non arrêt d'installations – sous réserve de leur niveau de sûreté – qui, entre autres avantages, participent à la réduction des émissions de CO₂.

Un mot sur les coûts, puisque le coût de l'énergie est un facteur de compétitivité de nos industries nationales. On conçoit bien que le produit intérieur brut soit corrélé à la consommation d'énergie. Jean-Marc Jancovici, ingénieur spécialisé dans la thématique énergie-climat, franchit un pas supplémentaire et considère que l'augmentation de la consommation d'énergie entraîne un accroissement du PIB.

Permettez- moi de citer le Professeur François Ramade, Professeur Emérite d'Écologie à l'Université de Paris-Sud 11 et Président d'honneur de la Société Française d'Écologie, à propos de la substitution aux hydrocarbures : « (Elle) représente dès à présent un impératif catégorique et résulte de ce qu'il existe une corrélation absolue entre l'accès à une énergie abondante et bon marché et l'activité économique. En conséquence (je cite toujours), toute raréfaction de l'énergie et toute hausse concomitante de son prix provoque fatalement une période de récession économique. » Fin de citation. Les 50 % d'énergies primaires fossiles sont importées pour un montant de 70 milliards d'Euros, soit l'équivalent du déficit de la balance commerciale française. L'uranium

permettant de produire les 75 % de l'électricité française est lui aussi importé, pour un montant de 0,7 milliard d'Euros soit 100 fois moins, ce coût étant d'ailleurs très largement compensé par les 2 milliards d'Euros que rapportent les exportations d'électricité vers nos voisins.

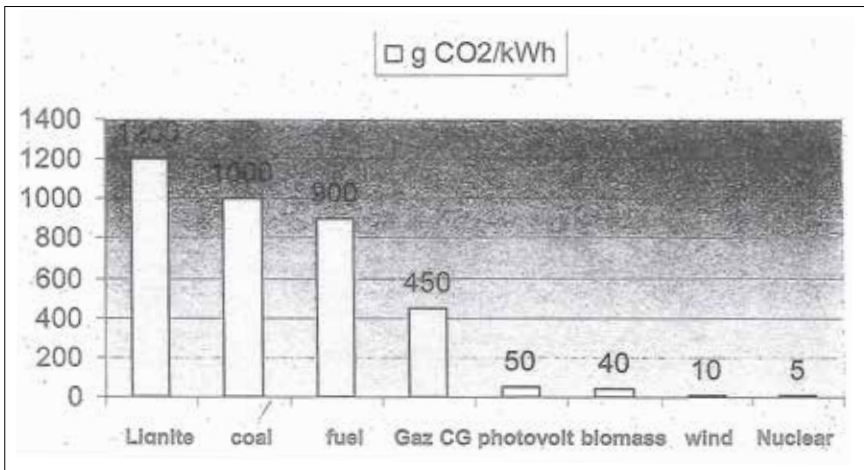
Concernant les coûts, je ne détaillerai pas les prix de l'électricité, subventionnés ou non, selon la source d'énergie utilisée, je me bornerai à rappeler quelques éléments structurants :

- Le coût du nucléaire réside principalement (pour 65 %) dans les investissements de l'ordre de 2 500 Euros par kW installé, les coûts d'exploitation et de combustibles restant modérés. C'est pour cette raison que le coût de l'électricité d'origine nucléaire est prédictible, ce qui est un argument important pour les industriels. Le poids de cet investissement initial est un obstacle pour les compagnies de petite taille qui ne peuvent se permettre d'investir de telles sommes sur plusieurs années avant de voir le premier euro de retour sur investissement.
- Les cycles combinés à gaz, au contraire, ne nécessitent qu'un investissement modeste, inférieur à 30 % du coût total du Kwh, mais dépendent à 70 % du prix du gaz, pouvant varier rapidement;
- Les énergies renouvelables, dont la source d'énergie est certes gratuite, mais qui nécessitent elles aussi des investissements importants, ont le défaut d'être intermittentes, ce qui oblige à disposer d'une puissance installée équivalente en réserve, ou à pouvoir stocker l'électricité, d'où l'importance des recherches dans ce domaine;
- Le coût des « externalités » (les détriments à l'environnement par exemple ou le démantèlement des installations en fin d'exploitation) n'est en général pas pris en compte, sauf dans le cas du nucléaire où le prix de vente de l'électricité comprend le coût de la gestion des déchets et celui du démantèlement. Le coût des émissions de CO₂ pour la planète en est la meilleure illustration. La figure ci-dessous montre l'écart considérable à cet égard entre les sources fossiles, y compris le gaz, même s'il est significativement moins polluant que le charbon, et les énergies décarbonées : renouvelables et nucléaire.

Les énergies respectueuses du climat dégagent de 5 grammes de gaz carbonique par kWh produit pour le nucléaire à 50 grammes pour le solaire photovoltaïque alors que les énergies fossiles en dégagent presque 100 fois plus pour le gaz, deux cents fois plus pour le charbon et encore davantage pour le lignite.

Au chapitre des aspects positifs du nucléaire, on doit noter que 95 % de la valeur ajoutée pour fabriquer un kWh sont réalisés en France par des emplois hautement qualifiés et que les sociétés françaises exportent annuellement pour 6 milliards d'Euros d'équipements, produits et services nucléaires.

Il est parfois objecté que l'indépendance énergétique n'est pas assurée puisque l'uranium est importé. Il est exact qu'EDF importe l'uranium, mais les sources d'approvisionnement sont très diversifiées (Australie et Canada où se situent les réserves les plus importantes et réputés politiquement stables, Kazakhstan, Niger, et dans une moindre mesure Malawi, Namibie, Ouzbékistan, Russie et USA). De plus, la durée des stocks stratégiques se mesure en années alors que la capacité de stockage des hydrocarbures est de l'ordre de trois mois de consommation.



Un mot sur l'origine de cette source d'énergie

On se doute que la célèbre relation d'Einstein $E=mc^2$, -- également entrevue par Paul Langevin-- y est pour quelque chose. Sans faire de calcul et sachant que la vitesse de la lumière est d'environ 300 000 km par seconde, on voit bien qu'une très petite masse donne une énorme quantité d'énergie puisqu'elle est multipliée par le carré de 300 millions (en m/s) soit 9 suivi de 16 zéros.

On sait aussi que le combustible utilisé dans les réacteurs nucléaires est l'uranium. Après les découvertes majeures sur la radioactivité et le noyau atomique à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle qui ont valu le prix Nobel de physique à Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie en 1903 et au Néo-zélandais Ernest Rutherford en 1908, les physiciens ont fait des essais de

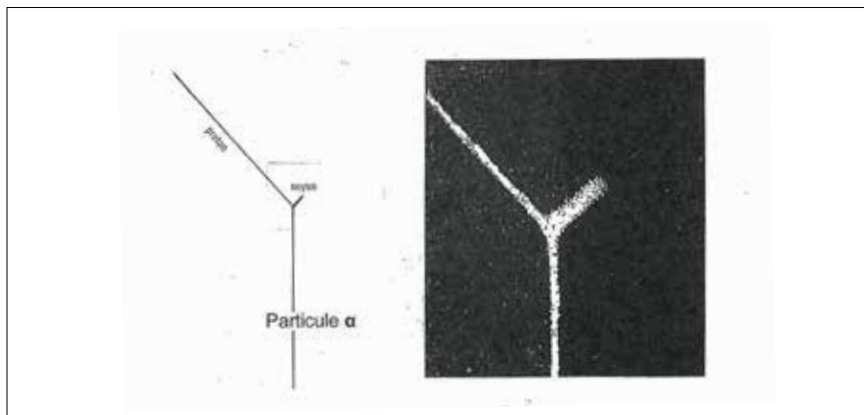
« bombardements » de noyaux atomiques avec diverses particules, en particulier des particules alpha. Par exemple une particule alpha (un noyau d'hélium formé de 2 protons + 2 neutrons) projetée sur un noyau d'azote 14 (7 protons + 7 neutrons) donne comme résultat un proton isolé qui est éjecté, plus un nouveau noyau comportant 8 protons + 9 neutrons : c'est de l'oxygène ! Le vieux rêve des alchimistes est devenu réalité !

Particule α + Azote 14 \rightarrow Oxygène 17 + proton

Il s'agit là de la première réaction nucléaire effectuée en laboratoire en 1919 par Ernest Rutherford : Il a utilisé du polonium comme source de rayonnement alpha et a observé les protons éjectés sans parvenir à décrire complètement le phénomène. C'est en 1925 que Blackett ayant enregistré les photographies de 400 000 trajectoires de particules alpha sur 20 000 plaques photographiques, a observé 8 collisions particule-noyau !

Le neutron, dont l'existence avait été postulée par Rutherford dès 1920 et découvert par James Chadwick en 1932, a lui aussi été utilisé comme projectile. Non chargé électriquement comme la particule alpha, il devait lui être plus facile d'atteindre un noyau chargé positivement.

Les physiciens Enrico Fermi (Prix Nobel 1938), qui travaillait en 1934 sur l'absorption de neutrons par l'uranium, Irène et Frédéric Joliot-Curie qui créent le premier nucléide artificiel, le phosphore 30, en bombardant de l'aluminium avec des particules alpha, Lise Meitner et Otto Frisch qui émettent l'hypothèse d'une possible fission et les chimistes Otto Hahn et Fritz Strassmann mettent en évidence théoriquement et expérimentalement le phénomène de fission nucléaire en 1938. C'est la fin de l'atome « insécable ».



Photographie de Blackett (d'après Yves Chelet)

On sait maintenant que l'absorption d'un neutron par l'uranium 238 conduit au Plutonium 239, un des nombreux radionucléides artificiels créés (environ 1 200 à comparer aux 325 nucléides naturels) : Le neutron est absorbé par le noyau d'uranium 238 pour donner un noyau d'uranium 239, instable, qui se désintègre avec une période de 23 minutes pour donner, par radioactivité bêta moins, un noyau de neptunium 93 (transformation d'un neutron en proton avec émission d'un électron pour conserver la charge électrique ; je ne mentionne pas l'émission d'un neutrino qui accompagne toujours la radioactivité bêta). Ce noyau de neptunium 239 est lui aussi instable et se désintègre de la même manière avec une période de 2,3 jours pour donner le plutonium 239 qui a une période de 24 000 ans et a la particularité d'être fissile, comme l'uranium 235, seul isotope naturel qui soit fissile.

neutron + Uranium 238 → Uranium 239 → Neptunium 239 → Plutonium 239

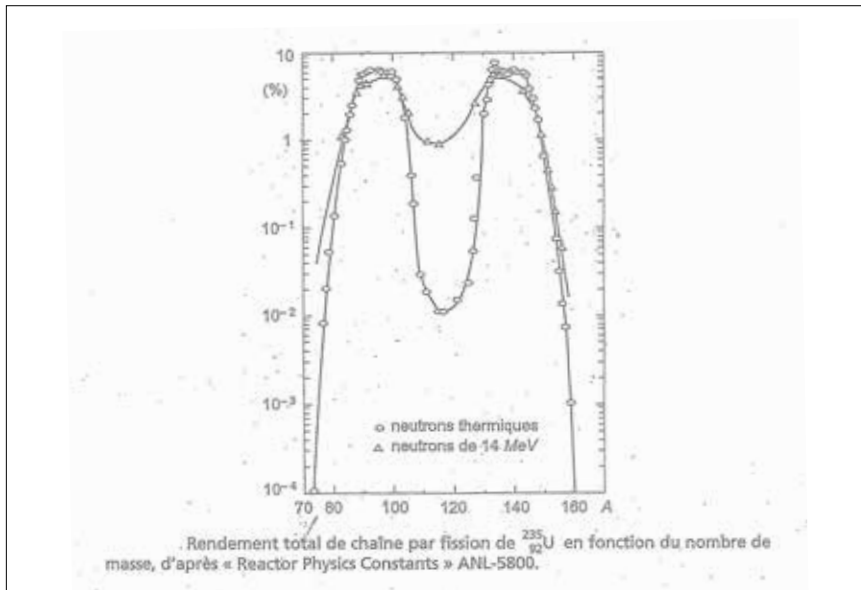
La réaction de fission est la suivante :

Le neutron incident est absorbé par le noyau d'uranium 235 qui ne devient pas, ou rarement, un noyau d'uranium 236 comme Fermi s'y attendait, mais qui se scinde en deux parties appelées fragments ou produits de fission avec éjection de quelques neutrons (0 à 7 avec une moyenne de 2,4) et production d'énergie. On peut observer par exemple :

neutron + Uranium 235 → Baryum 137 + Krypton 96 + 3 neutrons + 200 MeV^[3]

L'exemple ci-dessus donne comme produits de fission un noyau de baryum 137 et un noyau de krypton 96 : on retrouve bien le nombre total de nucléons (protons + neutrons) $1 + 235 = 137 + 96 + 3$ ainsi que le nombre de protons : 92 (pour l'uranium) = 56 (pour le baryum) + 36 (pour le krypton). Historiquement c'est la présence de baryum, étonnante a priori car le noyau est bien plus léger que le noyau cible d'uranium, détecté par le chimiste Otto Hahn qui disait « si c'était de la chimie, je dirais sans hésiter qu'il s'agit de baryum, mais avec la physique nucléaire ... ». Les produits de fissions ne sont évidemment pas identiques à chaque fission. Ils se répartissent selon une courbe dite en « dos de chameau » (voir figure ci-après) et sont le plus souvent radioactifs avec une période plus ou moins longue et émettent donc de l'énergie sous forme de rayonnement. On verra que l'évacuation de cette énergie est un aspect fondamental de la sûreté nucléaire.

Et d'où vient l'énergie nucléaire proprement dite ? Elle provient de la différence de cohésion des noyaux des produits de fission et du noyau d'uranium. En effet la masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le compose



C'est ce qu'on appelle « le défaut de masse » qui représente l'énergie qui lie les nucléons entre eux, à courte distance, et est plus intense que la répulsion électrique qui existe entre les protons chargés positivement. Cette énergie de liaison par nucléon dépend du noyau considéré. Le bilan comparant l'énergie de liaison présente dans le noyau d'uranium 235 et celle présente dans les deux produits de fission donne un excédent de l'ordre de 200 MeV.

Physiquement, au moment où le noyau se casse en deux, c'est la répulsion électrique entre les deux noyaux créés et chargés positivement qui l'emporte. Les deux noyaux se repoussent à grande vitesse de l'ordre de 12 000 km/s et sont rapidement ralentis et arrêtés par la matrice du combustible qui s'échauffe, par frottement en quelque sorte. Il suffit ensuite de transporter les calories ainsi créées vers des dispositifs turbogénérateurs pour les transformer en énergie électrique.

Deux derniers points avant d'abandonner la physique. Frédéric Joliot, qui avait montré avec l'aide de Hans von Halban et de Lew Kowarski que chaque fission produit 2 à 3 neutrons entrevoit, de même que Szilard et Wigner aux USA, la possibilité d'une réaction en chaîne, chaque neutron émis pouvant à son tour provoquer une nouvelle fission et émettre 2 à 3 nouveaux neutrons et ainsi de suite. En mai 1939, présentant des applications considérables tant civiles que militaires, il déposa trois brevets au nom de la Caisse Nationale de

la Recherche Scientifique, l'ancêtre du CNRS. Le principe de fonctionnement d'un « dispositif de production d'énergie » était correctement décrit, même si les connaissances de l'époque étaient évidemment encore très incomplètes.

Voyons rapidement ce principe : On a vu qu'un neutron entrant au contact d'un noyau d'uranium 235 pouvait le briser en deux produits de fission avec l'éjection de 2,4 neutrons en moyenne. Que peuvent devenir ces neutrons ? Ils peuvent « fuir » à l'extérieur du dispositif, être absorbés par le caloporteur utilisé, l'eau par exemple, être absorbés par les structures, ou encore produire une nouvelle fission. On appelle « facteur de multiplication » le nombre moyen de fissions obtenues à partir d'une fission initiale. Si ce facteur de multiplication, appelé k est inférieur à 1, le nombre de fissions diminue avec le temps, et la puissance générée également. On dit que le réacteur est sous-critique. Si $k=1$, le nombre de fissions est constant, la puissance est stable, le réacteur est « critique ». Si k est supérieur à 1, le nombre de fissions augmente ainsi que la puissance, le réacteur est « sur-critique », on dit qu'il diverge.

Reste toutefois une question de cinétique de la réaction en chaîne. L'émission instantanée des neutrons rend ou plutôt rendrait la réaction incontrôlable, la puissance croissant exponentiellement de manière explosive. Heureusement, la nature est bien faite et il se trouve, comme l'a découvert le physicien américain Richard Brooke Roberts peu de temps après le dépôt des brevets de Joliot, qu'une petite partie des neutrons est émise non pas au moment de la fission, mais quelques secondes ou dizaines de secondes après. Ce sont les « neutrons retardés » par opposition aux « neutrons prompts » émis immédiatement. Ces neutrons retardés sont émis par des produits de fission dits « précurseurs » comme par exemple le Brome 87 de période 56 secondes qui donne par décroissance radioactive bêta du krypton 87, métastable, qui dévient du krypton 86 (stable) en émettant un neutron. Autre exemple, l'iode 137 de période 23 secondes, qui donne du xénon 136 avec émission d'un neutron retardé. Cette proportion (0,65 %) de neutrons retardés va permettre le contrôle de la réaction en chaîne.

Dernière notion de physique nécessaire à la compréhension du fonctionnement d'un réacteur nucléaire. Les neutrons émis qu'ils soient prompts ou retardés sont émis avec une grande énergie (14 MeV). Or la réaction de fission de l'uranium 235 se produit surtout avec des neutrons de faible énergie, des neutrons « lents » ou « thermiques » (0,025 eV). Il faut donc ralentir les neutrons émis. Le ralentissement est obtenu par chocs successifs des neutrons sur les noyaux environnants. La mécanique nous dit que ce ralentissement est plus efficace lorsque le neutron heurte un noyau léger, typiquement le noyau d'hydrogène composé d'un seul proton, de masse proche de celle du neutron.

Encore faut-il que le noyau n'absorbe pas le neutron incident comme le fait par exemple le noyau d'uranium 238 comme on l'a vu. C'est pourquoi le deutérium est privilégié, son noyau composé d'un proton et d'un neutron reste léger et a moins tendance à absorber le neutron incident, puisqu'en quelque sorte, la place est déjà prise. Cet hydrogène « lourd » combiné à l'oxygène forme de l'eau aux mêmes caractéristiques chimiques que l'eau ordinaire mais aux propriétés nucléaires particulières. Vous avez entendu parler de la bataille de l'eau lourde dans la course à l'arme nucléaire à la fin de la seconde guerre mondiale. Le choix de l'élément ralentisseur, on parle de « modérateur », est un élément important de la conception d'un réacteur nucléaire.

D'autres noyaux absorbants, dits « neutrophages » comme le bore, le cadmium, le gadolinium, l'indium, l'hafnium... sont utilisés pour contrôler la réaction en chaîne. D'autres sont issus de la fission et interfèrent avec la réaction en chaîne : on parle de « poisons neutroniques » c'est le cas du xénon 135 de période 9,17 heures et du Samarium 149, stable.

On a donc une économie globale permettant d'entretenir la réaction en chaîne en combinant un combustible, l'uranium 235 présent à seulement 0,7 % dans l'uranium naturel et un modérateur qui ne soit pas trop absorbant : ce sont les réacteurs à uranium naturel modérés au graphite ou à l'eau lourde. On peut aussi utiliser l'eau « légère » mais il faut alors compenser son effet absorbant en ayant davantage de neutrons disponibles, c'est-à-dire en augmentant la proportion d'uranium 235 de 0,7 % à 3 ou 4 % dans le combustible qui est alors dit « enrichi ».

Les types de réacteurs : les filières

Elles sont définies par ces deux caractéristiques, uranium naturel ou enrichi, et nature du modérateur, auxquelles on adjoint un élément supplémentaire, le caloporteur qui comme son nom l'indique va transporter les calories du cœur du réacteur où a lieu la réaction en chaîne, au dispositif de fabrication d'électricité. Ce caloporteur, qui doit aussi être aussi peu absorbant que possible, peut être liquide : eau, lourde ou légère, sodium, ou gazeux : gaz carbonique ou hélium. On peut ainsi nommer les générations de réacteurs construits ou à venir en France depuis le début des années soixante :

La première génération essentiellement uranium naturel graphite gaz (UNGG), G1, refroidi à l'air libre ! G2 et G3 à Marcoule clairement destinés au programme militaire, l'électricité n'étant qu'un sous-produit, le directeur de la recherche d'EDF, Claude Bienvenu, ayant eu l'idée de mettre en place une turbine et un alternateur pour récupérer l'énergie produite, procédé

jugé comme sans avenir par nombre de ses collègues ! Il faut dire que c'était l'époque d'un pétrole tellement bon marché qu'EDF avait conçu des centrales à moindre rendement, moins chères à construire et rentables du fait du faible coût proportionnel du combustible.

Le programme de la filière française UNGG mise au point par le Commissariat à l'Energie Atomique s'est poursuivi à Chinon 1, la fameuse sphère qui a été transformée en musée, puis Chinon 2 et 3, Saint-Laurent 1 et 2 et Bugey 1 dans l'Ain. Le projet d'une centrale à Fessenheim qu'il était prévu de construire sur le même modèle a été annulé au profit d'une installation de génération 2.

Font également partie de cette première génération la centrale franco-belge de Chooz dans les Ardennes, de technologie américaine, uranium enrichi- eau sous pression, issue des applications navales ; la centrale de Brennilis dans le parc naturel des Monts d'Arrée utilisant initialement de l'uranium naturel, du graphite et de l'eau lourde ; Rapsodie à Marcoule réacteur expérimental à neutrons rapides, sans modérateur et nécessitant un enrichissement élevé en uranium 235, de l'ordre de 20 %. Suivront Phénix qui a fonctionné jusqu'en 2009 et Superphénix arrêté en 1998 sur décision politique du gouvernement Jospin.

Suivent les réacteurs de deuxième génération, décidés par le gouvernement Messmer à la suite du premier choc pétrolier en 1974. Deux technologies déjà exploitées aux USA ont été mises en concurrence : celle des réacteurs à eau sous pression (REP) et celle des réacteurs à eau bouillante (REB). Le projet REB de Saint-Laurent a finalement été abandonné pour bâtir une filière unique, sous licence américaine de Westinghouse, standardisée, de 34 unités, les 34 « tranches » de 900 MW, suivies de 20 tranches de 1300 MW puis de 4 tranches de 1500 MW, construites en un temps record EDF mettant sur le réseau 6 tranches par an et même 8 en 1980.

Vient ensuite la génération III avec l'EPR, pour European Pressurized Reactor, d'AREVA en cours de construction à Flamanville, en Finlande et en Chine et son concurrent Westinghouse-Toshiba l'AP 1000 en cours de construction en Chine et aux USA.

Les réacteurs de génération suivante pourraient être déployés à partir de 2030/2040. Les programmes concernant ces réacteurs du futur sont menés dans le cadre de coopérations internationales : C'est le cas du programme « GIF » (Generation IV International Forum) qui développe les réacteurs de quatrième génération et qui regroupe 38 pays. Six types de réacteurs sont étudiés, avec un premier prototype de réacteur rapide refroidi au sodium planifié en France pour une mise en service prévue au début des années 20 (réacteur ASTRID).

Enfin plusieurs pays dont les USA, la France, la Russie et la Chine développent des réacteurs de petite taille appelés SMR pour Small Modular Reactors. Ces réacteurs ne bénéficient pas de l'effet de taille, mais l'investissement initial est moindre et ils sont adaptés à des réseaux de taille limitée ou à des productions isolées. Ils sont souvent dérivés des réacteurs utilisés dans la marine (sous-marins, porte-avions, brise-glace.....).

La fusion est encore au stade de recherche et développement avec le projet ITER, (International Thermonuclear Experimental Reactor), réacteur utilisant non la fission nucléaire, mais la fusion nucléaire. Ce réacteur qui en cours de construction à Cadarache dans le sud-est de la France fait l'objet d'un traité signé par la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Japon, la Russie, l'Union Européenne et les USA soit 34 pays.

Je voudrais terminer ce tour d'horizon des générations de réacteurs en décrivant succinctement les réacteurs de la « génération zéro » qui ont fonctionné il y environ 2 milliards d'années, bien avant l'apparition de l'homme ! Il s'agit de réacteurs « fossiles », découverts en 1972 à Oklo au Gabon. A ce moment là la proportion d'uranium 235, dont la période est de 700 millions d'années, était encore de 3,6 % (pour 0,7 % aujourd'hui). Il se trouve que la concentration d'uranium dans ce secteur est élevée de l'ordre de 20 %, ce qui rare mais pas unique, on rencontre des teneurs similaires au Canada. Il ne manque plus que le modérateur, rôle facilement joué par les infiltrations d'eau, pour que, en l'absence de matériaux absorbants de neutrons, la réaction en chaîne, initiée par les fissions naturelles de l'uranium, s'entretienne.

Les géologues qui prospectaient pour localiser des gisements d'uranium exploitables ont été étonnés de constater que le rapport isotopique du minerai était inférieur à la valeur attendue de 0,7 % : de l'Uranium 235 manquait à l'appel. Ils ont ensuite détecté des produits de fission dont la présence ne s'expliquait pas par la géologie. Il est intéressant de constater que dans le milieu argileux présent à Oklo, sans évidemment aucune précaution prise, les produits de fissions ont très peu migré sur des temps de l'ordre de deux milliards d'années depuis l'endroit où ils ont été créés.

Cela dit, le nucléaire est une industrie à risque et un niveau de sûreté irréprochable est indispensable.

Quelle sûreté pour les installations nucléaires ?

On définit la sûreté nucléaire comme l'ensemble des dispositions prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets. Il s'agit des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires ainsi qu'au transport des substances radioactives.

On parle aussi de sécurité nucléaire qui regroupe la sûreté, la radioprotection et la lutte contre les actes de malveillance.

On distingue trois fonctions de sûreté :

- le contrôle de la réactivité, première fonction, c'est-à-dire la maîtrise en toutes circonstances du facteur de multiplication k qui caractérise la réaction en chaîne ;
- le contrôle du refroidissement du réacteur, deuxième fonction, qui, on l'a vu, continue à dégager l'énergie des produits de fission radioactifs même après l'arrêt de la réaction en chaîne; c'est ce qu'on appelle la puissance résiduelle ;
- le contrôle du confinement, troisième fonction, pour maintenir la radioactivité des produits de fission à l'intérieur du réacteur, la contamination à long terme de territoires étant considérée comme inacceptable.

Les accidents qui se sont produits sont toujours dûs à la perte d'une ou de plusieurs de ces fonctions de sûreté :

A Three Mile Island (TMI), près d'Harrisburg aux USA, le réacteur s'est trouvé privé de refroidissement, ce qui a entraîné la fusion partielle du cœur et le déversement d'eau fortement contaminée dans l'enceinte. Cette enceinte de confinement a joué son rôle et il n'y a pas eu de conséquences à l'extérieur du site.

A Tchernobyl, en URSS, les opérateurs ont perdu le contrôle de la réactivité ce qui a entraîné l'explosion du réacteur qui de plus ne disposait pas d'enceinte de confinement. La conséquence a été la contamination d'une large zone en Ukraine et en Biélorussie et dans une moindre mesure d'Europe.

A Fukushima-Daiichi, il y a eu perte du refroidissement des cœurs de trois réacteurs et détérioration du confinement, avec dispersion de produits radioactifs, mais en quantité très inférieure à celle de Tchernobyl.

Sans détailler les dispositifs et les organisations, on peut retenir que la sûreté nucléaire s'appuie sur deux concepts :

- la défense en profondeur
- la redondance et la diversification

La défense en profondeur peut être illustrée par la mise en place de trois barrières successives entre les produits de fission qui sont radioactifs et l'extérieur de la centrale nucléaire : D'abord la gaine étanche qui entoure le combustible ; puis ce qu'on appelle le circuit primaire, fermé, qui extrait les calories produites dans la cuve et les cède au circuit secondaire sans contact avec la radioactivité, dans des générateurs de vapeur ; enfin la troisième barrière est constituée d'une enceinte étanche pouvant confiner les produits radioactifs en cas de perte des deux premières barrières, ce qui s'est produit à TMI.

La diversification consiste à assurer une même fonction de sûreté par des systèmes différents et indépendants les uns des autres. Un exemple de cette diversification est le nombre de sources électriques dont dispose l'exploitant pour assurer les trois fonctions de sûreté : l'alternateur en fonctionnement normal, deux alimentations haute tension extérieures avec des cheminements différents, deux diesels de secours géographiquement séparés, plus une turbine à gaz ou un diesel supplémentaire. Suite à l'accident de Fukushima, EDF a décidé, entre autres mesures, de mettre en place un diesel de secours supplémentaire par tranche.

En France, c'est la loi du 13 juin 2006 qui établit une autorité de sûreté indépendante chargée de contrôler l'exploitant qui est lui-même le responsable de la sûreté de ses installations. Cette autorité procède à de nombreuses inspections (plus de 300 par an pour les seules installations d'EDF), inopinées ou non. Elle délivre les autorisations de fonctionnement par période de 10 ans, après ce qu'on appelle une visite décennale au cours de laquelle est examinée la conformité de la centrale aux exigences de sûreté et sont prises en compte les améliorations liées au retour d'expérience et à l'amélioration des connaissances.

Organisations internationales en charge du contrôle de la sûreté nucléaire

Au niveau international, l'AIEA, Agence Internationale de l'Energie Atomique a été créée en 1957 par l'ONU après un discours célèbre du président des Etats-Unis Conrad Eisenhower intitulé « Atom for Peace ». Regroupant plus de 150 états, cette agence, par ailleurs en charge du contrôle du respect du traité de non prolifération, édicte des règles et des normes de sûreté nucléaire.

An niveau international toujours, WANO pour World Association of Nuclear Operators, que j'ai eu l'honneur de présider jusqu'au début de l'année 2013, regroupe tous les exploitants d'installations nucléaires commerciales.

La question est mondiale. En effet chaque exploitant a une double responsabilité :

- une responsabilité individuelle pour ses propres installations et

- une part de responsabilité collective en tant que membre de la communauté des exploitants nucléaires.

Les accidents de TMI en 1979, Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011 ont montré qu'un accident où que soit dans le monde avait des conséquences partout dans le monde. Pas seulement parce que la radioactivité émise ne connaît pas les frontières mais aussi par les répercussions économiques qui s'ensuivent.

C'est pourquoi les exploitants se sont organisés pour partager leur expérience et ne laisser aucun d'entre eux isolé avec un problème à traiter alors que la solution existe et a été mise en œuvre ailleurs.

Quelques mois après l'accident de Three Mile Island les exploitants américains (une cinquantaine de compagnies à l'époque) ont créé l'INPO (Institute of Nuclear Power Operations). Un incident similaire à celui qui a conduit à l'accident de TMI avait eu lieu quelques mois auparavant à la centrale de Davis Besse, mais l'information n'avait pas circulé. Les enseignements de cet accident, sans conséquences à l'extérieur de la centrale du fait de la présence d'une enceinte de confinement qui a bien joué son rôle, ont été pris en compte dans le monde occidental, en particulier en France.

Mais ils n'ont pas passé le rideau de fer.

Trois ans après l'accident de Tchernobyl, en mai 1989, quelques mois avant la chute du mur de Berlin, les exploitants du monde entier ont créé WANO pour World Association of Nuclear Operators qui, à l'origine, a servi à l'échange d'informations, mais sans réels pouvoirs.

Après l'accident de Fukushima, WANO a été « refondée » avec l'accord unanime de ses 120 membres représentant plus de 30 pays pour rendre obligatoire la mise en œuvre des recommandations de l'association. Un des programmes obligatoires est l'accueil de revues de pairs qui mobilisent 20 ingénieurs pendant 3 semaines et fournissent un rapport confidentiel à la direction de la centrale et de la compagnie propriétaire. Une visite de suivi est organisée 12 à 18 mois plus tard pour vérifier sur place la prise en compte des recommandations émises.

La sûreté nucléaire a donc une importante composante internationale, même si ce sont les gouvernements qui sont responsables et décideurs pour les installations situées sur leur territoire. On a vu que les réacteurs du futur sont étudiés dans le cadre de coopérations internationales que sont ITER et le programme GIF pour les réacteurs de quatrième génération.

Un dernier point avant de finir ce tour d'horizon :

Le traitement des déchets nucléaires :

C'est un des volets de la sûreté.

Vous savez sans doute qu'un débat public sur le futur centre de stockage des déchets de haute et moyenne activité s'est déroulé jusqu'au 15 décembre dernier. Le bilan en a été présenté le 12 février à Bar-le-Duc.

Il existe déjà des centres de stockage pour les déchets de moyenne, faible et très faible activité. Un dans la Manche, en phase de surveillance, et deux dans l'Aube à Morvilliers et Soulaines.

C'est la loi du 28 juin 2006, votée à la quasi unanimité, qui régit l'organisation de l'ANDRA, Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs. Cette loi fait suite à celle du 30 décembre 1991, dite loi Bataille et qui donnait 15 ans aux acteurs concernés pour proposer des solutions de gestion des déchets de haute et très haute activité. Une nouvelle loi sera nécessaire à l'ouverture du stockage prévue en 2025.

Il est important de noter que la presque totalité de la radioactivité est concentrée dans moins de 1 % du volume des déchets et que 90 % du volume sont des déchets de faible ou très faible et moyenne activité à vie courte.

La provenance de ces déchets est pour 60 % la production d'électricité, les déchets produits par le domaine médical ne représentant que 1 % du volume.

Si on rapproche cette répartition de celle de l'origine de l'exposition du corps humain aux radiations, on constate que l'industrie et le militaire confondus ne représentent que 1 % de cette exposition, les 99 % restant se partageant à 60 % pour l'irradiation naturelle (rayonnement cosmique, radon, sols, eaux et aliments) et à 40 % pour l'irradiation médicale, en augmentation du fait de l'accroissement de l'utilisation des scanners.

Quoi qu'il en soit, l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques requiert une exigence de sûreté et de transparence irréprochable. C'est une nécessité absolue qui s'impose à tous les acteurs depuis les gouvernements et les instances internationales jusqu'aux responsables des installations et aux ingénieurs et techniciens qui les exploitent.

Pour proposer une conclusion

Je citerai à nouveau François Ramade, Président d'Honneur de la Société Française d'Ecologie, je le cite : « On ne soulignera jamais assez que dans le contexte actuel de changements climatiques globaux liés à l'usage massif des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire est celle qui permet de lutter le plus efficacement contre le réchauffement planétaire car elle présente le bilan le

plus favorable en matière de réduction des émissions de gaz de serre, son bilan carbone se situant au plus bas niveau, bien au dessous du solaire et même de l'éolien !». Fin de citation.

Patrick Moore, cofondateur de Greenpeace en 1971, dans un article intitulé «L'énergie nucléaire une énergie verte ?» écrivait : «Je crois que le nucléaire pourrait s'avérer la source énergétique clé qui protégera notre planète des effets négatifs du changement climatique, peut-être le problème environnemental le plus important auquel nous sommes confrontés aujourd'hui».

Le même message avait été délivré par James Lovelock, fondateur du mouvement Gaïa, à la une du journal Le Monde du 1er juin 2004, je le cite : «Je suis moi-même écologiste et j'implore mes amis engagés dans ces mouvements d'abandonner leur opposition butée»

Enfin pour terminer sur une note nationale, je reprendrai les mots de l'auteur de Fahrenheit 451, Ray Bradbury interrogé sur l'environnement : «Contre la pollution, il faut que nous fassions appel aux Français, qui sont déjà venus sauver notre révolution avec La Fayette. Vous êtes la seule nation qui repose sur l'énergie nucléaire et vous pouvez nous apprendre à construire des centrales nucléaires dans tous les états de l'Union, moins polluantes que nos ressources actuelles, pétrole et charbon. Ainsi, vous sauverez nos vies et les Etats-Unis et la France peuvent retomber amoureux.»

Il n'est pas nécessaire d'insister à nouveau sur le rôle crucial de l'énergie pour le bien-être de l'humanité et donc sur l'ardente nécessité d'utiliser à bon escient toutes les ressources disponibles en privilégiant les énergies respectueuses du climat, de l'environnement et de la sûreté.

Le nucléaire n'est évidemment pas la solution universelle aux besoins de l'humanité, mais il est difficile d'imaginer une solution satisfaisante et durable répondant à tous les enjeux sans recours à une part de nucléaire. Une condition : une sûreté irréprochable.

Merci de votre attention.

Notes

- [1] EPR pour European Pressurized Reactor
 [2] AIEA pour Agence Internationale de l'Énergie Atomique
 [3] MeV pour Mega électron-volt. L'électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré dans un champ électrique par une différence de potentiel de 1 volt.
 1 électron-volt = $1,602 \cdot 10^{-19}$ joule. Un MeV = un million d'électrons-volts.



Ouvrages Consultés

- J-M Béluve, *Nucléaire Civil, Le Rebond !* éditions Liber Media, 2011.
 C. Bataille et C. Birraux, **Déchets nucléaires : se méfier du paradoxe de la tranquillité**, rapport de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 2012. *Dictionnaire des sciences et techniques nucléaires*, dirigé par B. Bigot et G. Santarini, éditions Omnisciences (CEA), 2008.
 E. Klein, *En cherchant Majorana*, éditions Flammarion, 2013.
 Pr Pierre Bey, Pr Jean-Pierre Gérard, Pr Martin Schlumberger, Faut-il avoir peur de la radioactivité ?, éditions Odile Jacob, 2013.
 Yves Chelet, *L'énergie Nucléaire*, éditions du Seuil, 1975.
 J-M Cosset et R. Huynh, *La fantastique histoire du Radium*, éditions Ouest-France, 2011.
 J.-M. Jancovici, La transition énergétique, certes, mais quelle transition ?, www.Manicore.com , 2012.
 Bruno Comby, *Le nucléaire, avenir de l'écologie ?*, éditions FIX de Guibert , 1995.
 F. Lévêque, *Nucléaire On/off*, éditions Dunod, 2013.
 Noëlle Lorient, *Irène Joliot-Curie*, éditions Presses de la Renaissance, 1991.
 Serge Marguet, *La physique des réacteurs nucléaires*, éditions Lavoisier, 2011.
 P. Reuss, *Du noyau atomique au réacteur nucléaire*, éditions EDP sciences, 2013.
 F. Ramade, Quelle place pour le nucléaire dans la transition énergétique ? www.agoravox.fr, 2013.
La neutronique, ouvrage collectif de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA, éditions Le Moniteur, 2013.
 Agence Internationale de l'Énergie 2013, *World Energy Outlook 2013*.