

**Séance publique hors les murs du 12 mars 2015**  
**Grand Salon de l'Hôtel de Ville de Nancy**



**Communication de**  
**Monsieur Laurent Stricker**



**Quel avenir pour l'énergie nucléaire ?**

Introduction

Monsieur le ministre, mes chers confrères, mesdames et messieurs, c'est un plaisir, mais surtout un honneur qui m'est fait de pouvoir partager avec vous quelques réflexions sur l'avenir de l'énergie nucléaire, dans ce lieu prestigieux qui rappelle à travers le roi Stanislas et la Pologne les travaux de Marie Curie et de son mari puis de sa fille Irène dont le mari Frédéric Joliot-Curie a déposé en mai 1939 plusieurs brevets décrivant ce qu'il a appelé un "dispositif de production d'énergie" c'est à dire un réacteur nucléaire.

Trois quarts de siècle plus tard, que répondre à la question du futur de cette énergie ?

N'aura-t-elle aucun avenir comme le voudraient certains ?

Sera-t-elle la solution ou une partie de la solution au réchauffement climatique ?

Les experts du domaine de l'énergie voient dans le nucléaire une ressource à comparer à d'autres : comparaison des quantités disponibles et de la répartition géographique des ressources minières, comparaison des coûts d'accès respectifs à ces ressources, comparaison des risques associés à leur extraction, à leur transport et à leur utilisation, analyse de leur influence sur le réchauffement climatique etc ....

Après une brève introduction sur le mix énergétique mondial, j'aborderai successivement : Les conditions de l'utilisation de l'énergie nucléaire, les sujets d'inquiétude que sont les accidents nucléaires et la gestion des déchets radioactifs, le retour d'expérience et la sûreté nucléaire, pour finir avec le passé, le présent et l'avenir de l'énergie nucléaire et tenter de conclure.

D'abord un mot sur les besoins et les ressources énergétiques utilisables ou utilisées : L'énergie est un bien vital tant au niveau individuel qu'au niveau des économies des états. La planète compte aujourd'hui 7 milliards d'habitants dont 1,5 à 2 milliards n'ont pas accès à l'électricité et la plupart des prévisions s'accorde sur une population de 9 milliards d'habitants 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 vingt et unième siècle. L'essentiel de la croissance de la demande en énergie provient maintenant des pays hors OCDE, principalement la Chine et l'Inde et 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.

Actuellement l'approvisionnement mondial en énergie primaire fait appel pour 75 % à des combustibles d'origine fossile : pétrole, charbon et gaz. Quant à la production d'électricité 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 décarbonnée. La situation est évidemment très différente d'un pays à l'autre, la France ayant un mix énergétique décarbonné à 90 %.

La question du prix du baril reste stratégique. La chute récente de son prix est certes un ballon d'oxygène pour les pays importateurs, dont le nôtre, mais il se traduit aussi par de graves conséquences pour des pays comme le Venezuela et l'Algérie dont l'économie est entièrement dépendante de leurs exportations pétrolières. L'approvisionnement en gaz est lui aussi stratégique comme en témoigne par exemple la récente décision de la Russie de se retirer du projet de gazoduc dit "South Stream" dont EDF et l'Italien ENI étaient partenaires aux côtés du Russe Gazprom, ou encore la menace russe de cesser les livraisons de gaz à l'Europe via l'Ukraine.

Le constat des tensions géopolitiques liées aux ressources en pétrole et en gaz pourrait justifier le choix du développement du nucléaire partout où il n'y pas de ressources nationales, notamment fossiles. De plus si on ajoute la prise en compte des risques sur l'écosystème des océans et sur le déplacement massif de populations que va engendrer la montée du niveau des océans, on voit que les énergies vertueuses de ce point de vue, mesurées en grammes de CO<sub>2</sub> émis par

kWh produit sont les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. Ces 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.

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) montre dans son rapport 2014 que les pays qui présentent les plus faibles valeurs en CO<sub>2</sub> émis par kWh électrique produit sont ceux qui utilisent l'énergie hydraulique comme le Brésil ou le Pérou, et ceux qui ont un mix hydraulique / nucléaire comme la Suisse, la Suède et la France. On notera dans ce même rapport les progrès effectués en France entre 1980, avec des émissions de l'ordre de 400 g de CO<sub>2</sub> émis par kWh produit, et 2011, avec des émissions inférieures à 100g/kWh, pendant que nos voisins allemands souvent cités en exemple, dépassent toujours les 400 g de CO<sub>2</sub> par kWh malgré la construction massive d'installations éoliennes et solaires). Ce rapport indique aussi que les plus grands émetteurs de CO<sub>2</sub> sont sans surprise l'Inde et la Chine.

Plutôt que de peser longuement avantages et inconvénients de l'énergie nucléaire, j'insisterai sur ce que sont, à mon sens, les conditions nécessaires pour utiliser cette ressource.

### **Conditions d'utilisation de la ressource nucléaire :**

Une première caractéristique est que les centrales nucléaires comme les barrages hydrauliques sont longues à construire, surtout quand il s'agit de tête de série comme à Flamanville : environ 10 ans.

L'exploitation est maintenant prévue dès la conception pour 60 ans et sera suivie d'environ 20 ans pour mener à bien le démantèlement. On arrive ainsi à une durée proche du siècle, soit trois fois la durée de vie professionnelle d'un technicien. C'est la

\* première condition : disposer d'une solide organisation pour assurer la formation et le renouvellement des compétences.

Un siècle c'est aussi N fois, N étant grand, N fois la durée d'un mandat électoral. Il faut donc,

\* deuxième condition : une vision stable, une politique énergétique à long terme et une stabilité des institutions.

Le nucléaire est une industrie de haute technicité faisant appel à des connaissances dans de nombreux domaines : non seulement la physique nucléaire, mais aussi l'électricité, l'électronique, l'informatique industrielle, la mécanique, la métallurgie, les sciences des matériaux, la chimie de l'eau, la corrosion, la géologie, etc.

Il faut donc,

\* troisième condition : un tissu industriel et universitaire local permettant de maîtriser la construction puis d'assurer la maintenance de telles installations.

Quand on pose la question de l'intérêt de l'utilisation de cette ressource énergétique, deux sujets d'inquiétude émergent même dans les pays où l'utilisation du nucléaire est majoritairement approuvée :

le risque d'occurrence d'un accident et ses conséquences et le devenir des déchets radioactifs.

La nature particulière de cette énergie, due en partie au pêché originel d'Hiroshima et Nagasaki, fait que la construction et l'exploitation d'installations nucléaires ne se conçoivent pas sans l'acceptation du public. Il est donc indispensable de donner au public des informations claires sur ces sujets ainsi que sur l'ensemble des questions liées à l'exploitation des centrales. C'est la

\* quatrième condition : la transparence.

Je vais tenter d'apporter ma contribution à votre information sur les sujets clés que sont les accidents nucléaires, la gestion des déchets radioactifs et la sécurité nucléaire. La sécurité nucléaire regroupe la radioprotection, et la lutte contre les actes de malveillance, que je n'aborderai pas ici, ainsi que, le plus important, la sûreté nucléaire.

### **Qu'entend-t-on par sûreté nucléaire ?**

La sûreté nucléaire se définit 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. En France, la loi du 13 juin 2006 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. C'est elle qui 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 au cours de laquelle sont prises en compte les améliorations liées au retour d'expérience et à l'amélioration des connaissances.

Vous savez que l'énergie produite dans un réacteur nucléaire provient de la fission en chaîne, la cassure de noyaux d'uranium, qui dégage de la chaleur et produit deux ou parfois trois noyaux plus petits, appelés produits ou fragments de fission, le plus souvent radioactifs et eux aussi émetteurs de chaleur du fait de cette radioactivité.

On distingue trois fonctions de sûreté et les accidents qui se sont produits sont toujours dus à la défaillance d'une ou de plusieurs de ces fonctions de sûreté.

Quelles sont ces trois fonctions ?

- le contrôle de la réactivité du réacteur, c'est-à-dire la maîtrise en toutes circonstances de la réaction en chaîne ;

- le contrôle du refroidissement du réacteur, car la radioactivité des produits de fission continue à générer de la chaleur même après l'arrêt de la réaction en chaîne; c'est ce qu'on appelle la puissance résiduelle ;

- le contrôle du confinement, pour maintenir la radioactivité des produits de fission à l'intérieur du réacteur, la contamination à long terme de territoires étant considérée à juste titre comme inacceptable.

La sûreté nucléaire est la

\* cinquième condition, la plus importante, une sûreté irréprochable contrôlée par une autorité compétente et indépendante.

Revenons si vous le voulez bien aux deux sujets d'inquiétude que j'ai évoqués, les accidents nucléaires et la gestion des déchets radioactifs :

### **Les accidents nucléaires d'abord**

On a vu qu'ils étaient causés par la défaillance d'une ou de plusieurs fonctions de sûreté. Le 28 mars 1979, à Three Mile Island («TMI») aux USA près de Harrisburg, le réacteur n°2 s'est trouvé privé de refroidissement, ce qui a entraîné la fusion partielle du cœur et le déversement d'eau fortement radioactive dans le bâtiment abritant le réacteur. La fonction confinement est restée assurée et il n'y a pas eu de conséquences notables à l'extérieur du site. Sur le même site, le réacteur n°1 est toujours en service à ce jour.

Le 26 avril 1986, à Tchernobyl, en URSS, les dispositifs de sécurité du réacteur avaient été débranchés volontairement pour réaliser un essai et les opérateurs ont perdu le contrôle de la réaction nucléaire. Il y a eu 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 en Europe.

Le 11 mars 2011, à Fukushima-Daiichi, au Japon dans la région de Sendai, alors que les installations avaient bien résisté à un séisme majeur (niveau 9 sur l'échelle de Richter) ayant fait plus de 20 000 victimes, le tsunami qui a suivi une heure plus tard a détruit les alimentations électriques des trois réacteurs en fonctionnement au moment du tremblement de terre.

Il y a eu arrêt du refroidissement des cœurs de ces trois réacteurs et détérioration du confinement, avec dispersion de produits radioactifs, mais en quantité très inférieure à Tchernobyl.

Un mot sur les autres centrales proches de l'épicentre du séisme du 11 mars dont on ne parle généralement pas et qui ont résisté au séisme et au tsunami. En partant de Tokyo en direction du nord sur la côte est, on trouve successivement les centrales de Tokai (un réacteur), de Fukushima Daini (4 réacteurs), Fukushima Daïchi (6 réacteurs dont les trois accidentés) et Onagawa (3 réacteurs), la plus proche de l'épicentre. Pour donner une idée de la violence du raz de marée, une vue du centre ville d'Onagawa avant et après le tsunami - une vague de 14 mètres de hauteur - montre que le centre ville a été pratiquement rasé par le passage du tsunami. Je me suis rendu à Onagawa, à l'hôpital situé sur une colline dominant la ville. La hauteur à laquelle est arrivée l'eau au sommet de cette colline est indiquée par une marque sur le mur qui se trouve plus haut que ma taille.

La centrale proche a parfaitement résisté grâce à la construction d'un mur anti-tsunami de 15 mètres, prenant en compte l'historique des événements de ce type dans la région. Les locaux de la centrale nucléaire ont pu accueillir les rescapés de la catastrophe pendant plusieurs semaines.

Un mur de hauteur appropriée a cruellement fait défaut à Fukushima Daïchi.

### **La gestion des déchets radioactifs :**

Je vais revenir sur les enseignements tirés de ces trois accidents, mais d'abord quelques mots sur le second sujet d'inquiétude que sont les déchets radioactifs et leur gestion. On a vu que la fission des noyaux des atomes d'uranium donne naissance à des produits de fission qui sont radioactifs. Ce sont ces produits de fission qui constituent l'essentiel de la radioactivité des déchets qu'on appelle déchets de haute activité. D'autres types de déchets sont produits notamment lors des opérations de maintenance et de démantèlement.

On classe les déchets nucléaires en fonction de leur niveau de radioactivité et de leur durée de vie, c'est à dire du temps au bout duquel ils perdent leur radioactivité par décroissance naturelle. En effet le fait qu'ils soient radioactifs signifie par définition qu'ils se transforment - il se transmutent - et finissent par perdre leur dangerosité après un temps qui peut être long mais qui est connu et fini à l'inverse des déchets chimiques qui sont stables et donc éternels.

On ignore souvent que pratiquement toute la radioactivité des déchets est concentrée dans un très faible volume : en effet 0,2 % du volume des déchets contient 96 % de la radioactivité. Ces déchets, appelés pour cette

raison déchets HA, pour haute activité, occupent un volume de 3 000 m<sup>3</sup> - une piscine olympique et demie pour 80 % de l'électricité produite depuis le début de l'exploitation de l'énergie nucléaire. Cela correspond à 3 cm<sup>3</sup>, moins de 10 grammes, par famille et par an - à comparer aux 2,5 tonnes de déchets industriels produits annuellement par chaque famille française.

L'essentiel du volume soit 97 % ne contenant que quatre dix millièmes de la radioactivité est constitué des déchets de faible activité à vie longue (FA-VL), ceux de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), et, pour plus de 60 %, les déchets de très faible activité (TFA) qui dans la plupart des pays d'Europe sont considérés comme des déchets classiques étant donné leur très faible niveau de radioactivité. Ils proviennent en grande partie du démantèlement des installations.

Ce classement est utilisé pour définir des modes de stockage adaptés à la dangerosité des différents types de déchets et à leur durée de vie. 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, un dans l'Aisne, à Morvilliers pour les TFA et un dans l'Aube à Soulaines pour les déchets de faible et moyenne activités.

En France, c'est la loi du 28 juin 2006, votée à la quasi unanimité, qui régit l'organisation de l'ANDRA, l'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 activité. Les travaux de recherche ont été menés par l'ANDRA et le CEA en coopération avec des universités françaises et des organismes étrangers, dans le cadre du laboratoire souterrain de Bure en Meuse / Haute Marne. Une nouvelle loi sera nécessaire à l'ouverture du stockage prévue en 2025.

Concernant la sûreté du stockage géologique, solution de référence retenue par tous les pays confrontés à cette question, je ne donnerai que le principe sous-jacent : On sait que la radioactivité décroît lentement pour rejoindre le niveau de la radioactivité naturelle après une durée de l'ordre de 100 000 années. Cette décroissance parfaitement connue et prévisible est en compétition avec la migration des corps radioactifs retenus dans l'argile du stockage. On connaît également ces vitesses de migration, elles ont été vérifiées dans le laboratoire de Bure. Eh bien, c'est la décroissance radioactive qui l'emporte, c'est à dire que même si les corps en question atteignaient la biosphère, ils auraient perdu leur dangerosité radioactive.

On dispose d'un élément de comparaison intéressant avec les réactions nucléaires qui ont eu lieu il y a environ 2 milliards d'années, bien avant l'apparition de l'homme ! Il s'agit en quelque sorte de réacteurs « fossiles », découverts en 1972 à Oklo au Gabon. 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 % (l'uranium naturel est composé actuellement de 0,7 % d'uranium 235, fissile, le combustible des réacteurs actuels, et de 99,3 % d'uranium 238 non fissile). Ces géologues ont ensuite détecté des produits de fission dont la présence ne s'expliquait pas par la géologie et ne pouvaient provenir que de réactions de fissions démarrées spontanément dans des conditions physico-chimiques favorables.

A ce moment là la proportion d'uranium 235, étant donnée sa période radioactive de 700 millions d'années, était encore de 3,6 % (pour 0,7 % aujourd'hui). Il se trouve que la concentration d'uranium du minerai 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.

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 depuis l'endroit où ils ont été créés pendant des durées de l'ordre de deux milliards d'années.

Concernant les coûts du stockage, le dernier rapport de la cour des comptes confirme que tous les coûts sont bien pris en compte. Ils représentent 1 à 2 % de notre facture d'électricité facturée aujourd'hui environ 10 c€/kWh hors taxes. Quand bien même le coût de ce stockage viendrait à doubler, la facture augmenterait de moins de 0,3 c€/kWh.

La provenance des 2/3 des déchets radioactifs est la production d'électricité, la recherche (essentiellement le CEA) en générant 25 %, et la défense 10 %. Les déchets produits par le domaine médical ne représentent que 1 % du volume.

Il est intéressant de rapprocher 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 autres % se partageant à 40 % pour l'irradiation médicale, en augmentation du fait de l'accroissement de l'utilisation des scanners, et à 60 % pour l'irradiation naturelle à savoir le rayonnement cosmique, le radon, les sols, l'eau et les



aliments). Par exemple dans cette magnifique salle où nous sommes environ une centaine de personnes depuis une heure, nous avons généré environ 2 milliards 160 millions de désintégrations du seul fait du niveau de radioactivité du corps humain (6 000 Becquerel, c'est-à-dire 6 000 désintégrations par seconde, en moyenne pour chacun d'entre nous, multiplié par 3 600 secondes, multiplié par 100 personnes)

Cela dit, le nucléaire est une industrie à risque et un niveau de sûreté irréprochable est indispensable. Alors quels enseignements a-t-on su tirer des accidents qui se sont malheureusement produits et quels progrès ont été faits en matière de sûreté nucléaire ? Quelles sont les responsabilités aux niveaux national et international ?

### **Retour d'expérience et sûreté nucléaire :**

On a vu que la sûreté nucléaire, définie comme l'ensemble des dispositions prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets, reposait sur trois fonctions : Le contrôle de la réactivité, le contrôle du refroidissement et le contrôle du confinement.

Sans détailler les dispositifs et les organisations, on peut retenir que la sûreté nucléaire s'appuie sur deux concepts : La défense en profondeur et 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 radioactifs et l'extérieur de la centrale nucléaire : D'abord la gaine étanche qui entoure le combustible nucléaire, 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 rupture des deux premières barrières.

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 par site. Suite à l'accident de Fukushima, EDF a décidé, entre autres mesures, de mettre en place un diesel de secours supplémentaire par réacteur.

Le premier responsable de la sûreté, financièrement et pénalement, est l'exploitant nucléaire, en France EDF. Lors de l'accident de Fukushima, tout le monde entendu parler de TEPCO, l'exploitant de la centrale, et peu ou pas du

constructeur General Electric. La première responsabilité de l'exploitant est de maintenir opérationnelles les trois fonctions de sûretés en toutes circonstances. Ceci sous l'étroit contrôle de l'ASN, l'Autorité de Sûreté Nucléaire établie par la loi du 13 juin 2006.

Au niveau international, il existe plusieurs instances concernées par l'industrie nucléaire, comme l'IAE (pour Agence Internationale de l'Energie) et l'AEN (pour Agence de l'Energie Nucléaire qui fait partie de l'OCDE (Organisation pour la Coopération et le Développement Économique).

Les deux organisations les plus importantes pour la sûreté nucléaire sont l'AIEA, l'Agence Internationale de l'Energie atomique et WANO pour World Association of Nuclear Operators. L'AIEA a été créée en 1957 par l'ONU après un discours célèbre prononcé en pleine guerre froide par le président des États Unis Dwight Eisenhower et intitulé «Atom for Peace». Regroupant 160 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.

La deuxième organisation internationale importante pour la sûreté mondiale, WANO, que j'ai eu l'honneur de présider jusqu'au début de l'année 2013 regroupe tous les exploitants d'installations nucléaires commerciales du monde soit environ 120 sociétés présentes dans 31 pays.

Je dois aussi mentionner WENRA pour Western European Nuclear Regulators' Association qui regroupe les autorités de sûreté nucléaire de tous les pays de l'UE plus la Suisse. Cette organisation créée en 1999 à l'initiative de l'ASN, autorité de sûreté française, permet de coordonner et d'harmoniser les pratiques des différents pays. Elle a par exemple publié une prise de position sur le niveau de sûreté pour les nouveaux réacteurs construits dans le monde. Elle a recommandé et obtenu la fermeture de 8 réacteurs chez les candidats à l'adhésion à l'Union Européenne : deux en Lituanie et en Slovaquie et quatre en Bulgarie. Elle a aussi joué un rôle clé dans les évaluations complémentaires de sûreté conduites dans les pays de l'UE peu de temps après l'accident de Fukushima.

La question est en effet mondiale : Les trois accidents de TMI, Tchernobyl et Fukushima 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 d'eux isolé avec un problème à traiter alors que la solution existe et a été mise en œuvre ailleurs. C'est ce qu'on appelle le retour d'expérience. On a constaté notamment que les accidents nucléaires

étaient survenus sur des installations récentes, avec des opérateurs jeunes et étaient initiés par des causes internes aux installations. Cela montre la nécessité d'accompagner les nouveaux entrants, états ou compagnies d'électricité en s'assurant que les conditions que j'ai mentionnées en début d'exposé sont bien remplies.

C'est différent dans le cas de Fukushima où l'initiateur de l'accident est une cause externe, ce qui a conduit les exploitants et les autorités de sûreté à réévaluer les risques liés aux causes externes comme les aléas climatiques.

De fait, 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. 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. C'est de cette époque que date le concept de défense en profondeur, un des concepts de sûreté.

Cela s'est traduit par de nombreuses améliorations. Améliorations techniques, par exemple la mise en place de filtres pouvant retenir le césium radioactif en cas de nécessité de dépressurisation de l'enceinte de confinement ou encore l'installation de recombineurs d'hydrogène pour empêcher toute explosion due au dégagement d'hydrogène. On a tous vu à la télévision une telle explosion lors de l'accident de Fukushima. Améliorations organisationnelles comme les organisations de crise ou la redondance des diagnostics en situations incidentelles ou accidentelles ou encore de nouvelles procédures de pilotage dites "par état" .

Mais ces améliorations n'ont pas passé le rideau de fer et toutes n'ont pas non plus été généralisées, en particulier au Japon où les recombineurs d'hydrogène n'ont été mis en place qu'après l'accident de Fukushima.

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 - World Association of Nuclear Operators - qui, à l'origine, a servi à l'échange d'informations, mais sans réels pouvoirs. A la même époque, en 1991 l'AIEA a défini le concept de "Culture de sûreté" : une attitude interrogative, une démarche rigoureuse et prudente, plus la communication, la transparence.

La sûreté devant être et rester au premier rang des priorités dans les discours et dans les actes tant des gouvernements que des dirigeants des compagnies d'électricité, des ingénieurs et des techniciens.

Après l'accident de Fukushima, WANO a été « refondée » avec l'accord unanime de ses 120 membres pour rendre obligatoire la mise en oeuvre des recommandations de l'association. Un des programmes rendus obligatoires pour les membres de WANO est l'accueil de revues de pairs sur chacun des réacteurs tous les quatre ans. Ces revues 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.

Après cet accident, les autorités de sûreté de la plupart des pays ont mis en place des Évaluations Complémentaires de Sûreté afin de vérifier ce qu'on appelle la résilience des installations, c'est à dire leur capacité à résister, en toutes circonstances, sans conséquences lourdes à l'extérieur des installations. C'est ainsi qu'en France a été constituée la FARN, Force d'Intervention Rapide Nucléaire. Cette organisation permet de projeter, comme disent les militaires, en moins de 24 heures les équipements (pompes, diesels d'alimentation électrique) et les équipes dédiées sur n'importe quel site accidenté pour restaurer le refroidissement du réacteur. Les Etats Unis et la Russie ont des organisations similaires.

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.

La quatrième condition dont j'ai parlé en début d'exposé, à savoir une indispensable transparence est aujourd'hui reconnue partout dans le monde. Cependant les appréciations sur l'importance à donner à tel ou tel événement peuvent différer fortement d'une culture à l'autre. Pour les médias et le public, la compréhension des événements survenant dans les installations nucléaires est facilitée par l'existence depuis 1990 d'une échelle internationale de classification des incidents et accidents. Cette échelle, inspirée de celle créée en France dans les années 80, comporte 7 niveaux plus un niveau zéro pour les événements n'ayant aucun rapport avec la sûreté nucléaire. Par exemple le récent arrêt d'un réacteur de Fessenheim suite à une fuite de vapeur en salle des machines, c'est-à-dire hors du bâtiment abritant le réacteur.

Les niveaux 1 à 3 caractérisent les événements en anomalie, incident et incident sérieux.

Les niveaux 4 à 7 classent les accidents en fonction de leurs conséquences :

\*accident à conséquences locales (niveau 4) comme à la centrale de Saint Laurent en 1980,

\*accident à larges conséquences (niveau 5) par exemple l'incendie de Windscale au Royaume Uni en 1957 ou TMI en 1979,

\*accident sérieux (niveau 6) par exemple l'explosion dans l'usine de retraitement de Mayak en URSS en 1957,

\*accident majeur (niveau 7) comme Tchernobyl et Fukushima.

La grande majorité des événements se situe au niveau 0 ou 1, plus rarement au niveau 2 et très rarement au dessus.

### **Passé, présent et futur de l'énergie nucléaire**

Alors, quel avenir pour l'énergie nucléaire ? Héritage des décisions passées, la situation actuelle est la suivante : Après la mise en service du premier réacteur électrogène à Obninsk en URSS en 1954, les réacteurs de première génération sont construits dans les années 50 et 60. Ceux de deuxième génération sont mis en service dans les années 70 et 80 et ceux de troisième génération sont actuellement en construction. 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 : les 28 de l'Union Européenne plus l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, le Japon, la République Sud-Africaine, la Russie, la Suisse et les USA .

Six types de réacteurs sont étudiés, trois réacteurs à neutrons rapides, surgénérateurs, c'est-à-dire produisant plus de combustible qu'ils n'en consomment, un réacteur à très haute température et un réacteur à eau supercritique ayant un meilleur rendement thermodynamique que les réacteurs actuels, et un réacteur à sels fondus intégrant le cycle du combustible. Un premier prototype de réacteur rapide de quatrième génération, refroidi au sodium est planifié en France pour une mise en service prévue au début des années 20.

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. Les USA tentent d'être les leaders sur ce marché. 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-glaces...)

La fusion est encore au stade de recherche et développement avec le projet ITER, (International Thermonuclear Experimental Reactor), réacteur utilisant non la fission nucléaire de gros noyaux (uranium, plutonium ou thorium), mais la fusion nucléaire de noyaux légers deutérium, lithium et hélium. 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.

Pour la France, la première génération comprend principalement les réacteurs UNGG, Uranium Naturel comme combustible, Graphite comme modérateur facilitant la réaction nucléaire et Gaz comme caloporteur entre le réacteur où est créée l'énergie et l'ensemble turbine alternateur qui la transforme en électricité. Ils sont tous à l'arrêt et en cours de démantèlement.

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 (BWR). Le projet BWR de Saint Laurent a finalement été abandonné pour bâtir une filière unique, sous licence américaine de Westinghouse, standardisée, de 34 unités, les « tranches » de 900 MW, suivies de 20 tranches de 1 300 MW puis de 4 tranches de 1 500 MW, construites en un temps record EDF mettant sur le réseau 6 tranches par an et même 8 en 1981.

La génération 3 est celle de l'EPR, European Pressurised Reactor en cours de construction à Flamanville dans la Manche, en Finlande, en Chine et bientôt en Angleterre. La ministre en charge de l'énergie veut programmer la construction de ces réacteurs, et le nouveau PDG d'EDF l'a annoncé le mois dernier lors de la publication des résultats de l'entreprise. Cette prise de position se comprend aisément quand on sait que les énergies primaires fossiles sont importées pour un montant annuel 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, lui aussi importé, représente un coût 100 fois plus faible soit 0,7 milliard d'Euros, ce coût étant d'ailleurs très largement compensé par les 2 milliards d'Euros que rapportent les exportations d'électricité vers nos voisins. Au chapitre des aspects positifs du nucléaire, on doit noter que 95 % de la valeur ajoutée pour fabriquer un kWh est réalisée 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.

Avec son parc nucléaire de 58 réacteurs, notre pays est largement en tête pour la proportion d'électricité d'origine nucléaire dans le mix énergétique.

Il est suivi de la Belgique, la Slovaquie, la Hongrie, la Suède et l'Ukraine. Les États Unis sont au 16<sup>e</sup> rang et le Japon en queue de liste avec ses 54 réacteurs toujours à l'arrêt. Toutefois l'Institute of Energy Economics of Japan annonce un objectif de 25% d'électricité d'origine nucléaire, chiffre récemment confirmé par le premier ministre japonais.

En nombre de réacteurs, les États Unis sont au premier rang suivis de la France, du Japon, de la Russie, de la Chine et de la Corée du Sud. La pyramide des âges des réacteurs, montre deux pics, un vers 40 ans avec la flotte américaine, l'autre vers 30 ans comprenant notamment le parc français.

Si on regarde maintenant la tendance en matière de construction, on observe des projets lancés entre 2007 et 2010, on parlait alors de renaissance du nucléaire. Fukushima a donné un coup de frein ou d'arrêt à de nombreux projets; on avait constaté le même ralentissement après l'accident de TMI en 1979.

Il y avait fin 2014, 69 réacteurs en construction, dont 25 en Chine, 9 en Russie, 6 en Inde, 5 aux USA et en Corée. Je lisais récemment un article dans la presse parlant du gel des projets nucléaires dans le monde : je vous laisse apprécier ! Encore faut-il remporter les marchés, vous avez vu qu'AREVA avait fort à faire avec la concurrence des Coréens, des Russes, des Japonais et maintenant des Chinois. Ces projets font que la répartition des centrales nucléaires voit son centre de gravité se déplacer des USA et de l'Europe de l'ouest vers l'Asie et dans une moindre mesure l'Europe de l'est.

Si on observe le paysage mondial, on voit que de nombreux pays ont décidé soit de poursuivre leurs programmes avec des installations en service et d'autres en construction ou en projet), soit d'exploiter les installations en service sans en construire d'autres, soit de commencer de tels programmes. C'est généralement pour des considérations de coûts et d'indépendance énergétique, ou pour des pays comme l'Arabie Saoudite, pour préserver ses réserves pétrolières. Des pays ont déclaré des projets à l'AIEA par exemple, la Turquie, l'Arabie Saoudite, la Pologne, le Vietnam ou la Jordanie ), alors que d'autres, principalement en Europe de l'ouest, ont différé leur décision, ou plus rarement, stoppé leurs programmes à plus ou moins longue échéance (l'Allemagne, la Suisse et l'Italie).

Ainsi au niveau mondial, le nucléaire procure 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 ce qui concerne les ressources minières, les réacteurs de conception actuelle ont 200 ans de combustible disponible en n'utilisant que les gisements d'uranium actuellement exploités, sans compter le thorium. Les sources d'approvisionnement sont très diversifiées et les réserves se trouvent le plus souvent dans des pays politiquement stables comme l'Australie et Canada où se situent les réserves les plus importantes. Cette durée passe à 10 000 ans avec l'utilisation des réacteurs de génération IV dits « surgénérateurs » qui transforment l'uranium 238 très abondant - 99,3% du minerai - mais non fissile en plutonium qui est fissile. On va bien au-delà de cette durée si on parvient à maîtriser la fusion nucléaire.

Alors, le recours à l'énergie nucléaire doit-il être banni compte tenu des dangers qu'il représente ou au contraire encouragé au titre d'une énergie abondante et décarbonée ?

## Conclusion

Pour conclure, je donnerai la parole à François Ramade, Professeur Émérite d'Écologie à l'Université de Paris-Sud et Président d'honneur de la Société Française d'Ecologie. Je le cite 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.

Le coût de l'énergie est bien sûr un facteur de compétitivité de nos industries nationales et on conçoit bien que le produit intérieur brut soit corrélé à la consommation d'énergie. On peut en effet représenter la richesse économique d'un pays par le PIB, produit intérieur brut, par habitant. Faisant intervenir l'énergie, sans faire de grandes équations, on voit que cette richesse est le produit de l'efficacité énergétique de l'économie (le PIB rapporté à l'énergie utilisée) par l'énergie disponible par habitant. Dès lors, toute réduction de cette énergie disponible par habitant entraîne une diminution de la richesse économique si elle n'est pas compensée par une amélioration, a minima dans les mêmes proportions, de l'efficacité énergétique.



François Ramade poursuit, je le cite à nouveau : « 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.

Il n'y a pas que les économistes de cet avis. James Lovelock, fondateur du mouvement Gaïa, écrivait il y a 10 ans à la une du journal *Le Monde* du 1<sup>er</sup> juin 2004, je le cite : « Je suis moi-même écologiste et j'implore mes amis engagés dans ces mouvements d'abandonner leur opposition butée ».

Le même message avait été délivré par Patrick Moore, co-fondateur de Greenpeace en 1971, dans un article intitulé « L'énergie nucléaire une énergie verte ? », il 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 ».