

Le nucléaire civil a 54 ans. Et après...

Introduction

La fission de l'atome d'Uranium a été découverte en Allemagne en 1938. Peu après la deuxième guerre mondiale allait donner le départ à l'énergie atomique. La première « pile » atomique a vu le jour à l'université de Chicago le 2 décembre 1942. Dans ces premières années, tous les efforts ont été dirigés vers la production de Plutonium (un des corps produits à partir de l'uranium par le flux de neutrons) pour obtenir les bombes d'Hiroshima et de Nagasaki.

La réaction des scientifiques, dans les années qui suivirent, fut à l'origine de la première Conférence Internationale pour les Usages Pacifiques de l'Énergie Atomique, tenue à Genève du 8 au 20 août 1955. Elle rassembla 1500 délégués, 1350 observateurs et 900 journalistes provenant de 73 pays... Lors de cette conférence, on entendit le Dr Homi Bhabha, un indien, déclarer que l'énergie nucléaire constituerait. Pour tous les pays en développement un formidable raccourci vers l'industrialisation. Cette nouvelle science de l'atome allait permettre à l'humanité d'entrer dans une ère nouvelle où l'énergie serait inépuisable...

C'est ainsi que l'usage pacifique de l'énergie nucléaire a commencé. Mais il n'a pas respecté les prophéties de 1955..

Progressivement, plusieurs pays ont cherché à utiliser l'énergie des piles atomiques, nommées plus tard réacteurs nucléaires, pour la production d'électricité et on a vu apparaître, au début des années 60 les premières centrales nucléaires de production d'électricité. Ces premiers réacteurs utilisaient l'uranium naturel.

Il me faut, maintenant, entrer un petit peu dans la technique... L'uranium est un élément qui existe sous trois formes atomiques (des isotopes) : U234, U235 et U238. L'U238 constitue la plus grande part de l'uranium naturel, l'U235, qui en constitue 0,7% étant le seul qui présente une capacité de fission, c'est-à-dire que, si son noyau est frappé par un neutron, il devient si instable qu'il se casse en deux en dégageant une forte énergie et deux ou trois nouveaux neutrons. La radioactivité naturelle de l'U235 produit aussi des neutrons. Cependant, comme le monde des atomes est très bizarre, pour provoquer une fission le neutron doit être ralenti très fortement. Cette fonction est assurée, dans un réacteur nucléaire, par ce qu'on appelle un modérateur.

L'utilisation d'uranium naturel, pauvre en U235, impose que les neutrons soient les plus efficaces possibles et nécessite des modérateurs très performants. En pratique deux seuls ont été utilisés :

- Le graphite, qui a donné naissance aux réacteurs Graphite-Gaz (construits par exemple en France dans les années 50, puis retirés du service, mais toujours en service au Royaume-Uni) et Graphite-Eau (réacteur RBMK, type Tchernobyl).

- L'eau lourde, encore utilisée dans les réacteurs CANDU et dans de nombreux réacteurs de recherche.

On appelle eau lourde le produit dans lequel l'atome d'hydrogène (H_2) est remplacé par un atome de deutérium. Alors que le noyau d'hydrogène est composé d'un seul proton, le deutérium est composé d'un proton et d'un neutron. Le deutérium est présent dans la nature, mais sous une très faible proportion (0,03%). Au moment de la guerre de 40, quand les recherches sur les piles atomiques battaient leur plein, il n'existait qu'une seule usine capable de produire de l'eau lourde assez pure, en Norvège. Peut-être certains d'entre vous se souviennent du film « La bataille de l'eau lourde ».

Un autre concept important, dont je parlerai plus tard est la demi-vie. La radioactivité est un phénomène physique au cours duquel des noyaux atomiques instables dégagent de l'énergie sous forme de rayonnements, pour se transformer en des noyaux atomiques plus stables ayant perdu une partie de leur masse (permettez-moi de ne pas être plus précis). La radioactivité est réglée comme du papier à musique : le taux de décomposition des noyaux est une constante physique (qui sert d'ailleurs pour les horloges atomiques, qui ont une précision extraordinaire). On appelle demi-vie le temps qu'il faut pour que la moitié des atomes initiaux se soient transformés. Les demi-vies s'étalent entre quelques microsecondes et des milliards d'années.

Ça va? Je ne vous ai pas encore fait bailler?

Les efforts militaires aux États-Unis ont nécessité le développement des techniques d'enrichissement de l'uranium naturel en U^{235} . Il s'agit d'opérations très complexes qui aboutissent à changer les proportions respectives des différents atomes. C'est ainsi qu'à partir des 0.7% d' U^{235} initiaux, on obtient des proportions pouvant aller jusqu'à 95%. C'est ce qui est nécessaire pour la confection des bombes atomiques. Ces opérations emploient massivement des centrifugeuses. C'est ainsi que le commerce des centrifugeuses est fortement contrôlé et que des inquiétudes ont été créées sur les intentions de l'Iran. En ce qui concerne l'industrie nucléaire l'enrichissement est moins poussé (de l'ordre de 3 à 4%), et, puisqu'il y a plus d'atomes à percuter, le modérateur n'a pas besoin d'être aussi performant, ce qui permet d'utiliser l'eau naturelle (dite eau légère). C'est ainsi que les américains ont développé des réacteurs modérés par l'eau légère pour leurs sous-marins nucléaires.

L'uranium enrichi à des valeurs supérieures, de 30 à 90%, est utilisé dans les réacteurs de recherche.

La suite de mon exposé portera d'abord sur l'industrie nucléaire aux fins de production d'électricité, puis sur les réacteurs de recherche et l'une de leurs productions importantes, les isotopes médicaux et enfin quelques mots sur les développements actuels.

L'industrie du nucléaire de puissance

Dans les années 60, la communauté scientifique était encore indécise sur quelle était la meilleure filière pour la production de masse d'électricité nucléaire. À la fin de ces années,

l'industrie américaine a pu profiter des études faites sur les sous-marins et a développé des réacteurs de forte puissance à eau légère. Ils sont connus sous le nom de PWR (Pressurized Water Reactors) et BWR (Boiling Water Reactors). Par la suite, seuls le Royaume-Uni, le Canada et l'URSS ont continué à développer des réacteurs à uranium naturel.

La situation mondiale

À ce jour, 436 réacteurs de production d'électricité sont en service dans le monde, produisant approximativement 15% de l'électricité. La plupart sont des PWRs. La part du nucléaire dans la production d'électricité dépend fortement des pays :

- En France, 78% de l'électricité est d'origine nucléaire. Seul la Lituanie a eu un pourcentage plus important, de l'ordre de 90% avec la centrale d'Ignalina, en cours de fermeture sur ordre de la Communauté Européenne (ce sont des réacteurs RBMK, du même type que Tchernobyl).
- Au Canada, la situation dépend des provinces : 55% au Nouveau Brunswick, 2% au Québec et 40% en Ontario.

52 réacteurs sont en construction à ce jour, essentiellement en extrême orient (Corée et Chine). En France, la construction de Flamanville 3 (sur la côte ouest du Cotentin) est en cours et deux autres réacteurs sont en cours d'autorisation sur des sites non encore définis.

Avec le vieillissement de leur flotte de réacteurs, la demande grandissante d'électricité et les préoccupations environnementales (rejet des centrales à charbon), de nombreux pays occidentaux envisagent la construction de nouvelles centrales. C'est le cas du Canada, où de nouvelles centrales sont envisagées en Ontario, en Alberta et au Nouveau Brunswick.

Les accidents nucléaires

L'histoire du nucléaire civil est marquée par plusieurs accidents, d'importance inégale. Cependant tous ont conduit à améliorer la sûreté des centrales. Les trois plus importants ont été :

- en 1950, l'accident du NRX, à Chalk River. Cet accident a mis en évidence le besoin de munir les réacteurs de systèmes de sûreté distincts des systèmes de production.
- Le 28 mars 1979, l'accident de Three Mile Island, aux USA. Bien que n'ayant pas eu de conséquences sur le public, il a eu de très forts retentissements. Il a mis en évidence les faiblesses des principes de conception « déterministes » qui ne considéraient que les événements mineurs étaient couverts par les événements majeurs. L'analyse dite déterministe est la base de la conception d'une centrale. Elle évalue le comportement de la centrale avec des hypothèses pessimistes. En particulier, un des principes de base de cette analyse est de considérer le pire cas, par exemple la brèche d'une grosse conduite. L'accident de Three Mile Island était dû à une petite brèche... Cela a conduit à la création des Études Probabilistes de Sûreté. Comme je ne vous fais pas un cours d'analyse de sûreté, je n'en dirai pas plus, il faut me faire confiance...

- Le 26 avril 1986, l'accident de Tchernobyl a eu des conséquences désastreuses. Il a mis en évidence des défauts de conception des réacteurs RBMK et les conséquences d'un manque de réglementation. Par exemple, une des causes de l'accident est que les opérateurs, pour faire un essai, avaient désarmé les systèmes d'arrêt d'urgence. Ceci n'aurait pas été possible au Canada car aucune réglementation « occidentale » ne permet de désarmer un système de sûreté. Si cela avait été le cas à Tchernobyl, il n'y aurait pas eu d'accident...

En dehors des conséquences directes sur la santé du public, les conséquences à long terme des accidents sont de deux ordres :

- L'amélioration de la conception des réacteurs, de l'analyse de sûreté et de la réglementation.
- Les réactions du public, qui ont conduit à un arrêt de construction de nouveaux réacteurs. C'est ainsi que les prophéties des scientifiques de 1955 ne se sont pas réalisées...

La sûreté nucléaire

Avec la construction des réacteurs nucléaires, le besoin s'est fait rapidement sentir d'en contrôler les activités et la sûreté. Ce fut le cas au Canada dès 1947, avec la création de la Commission de Contrôle de l'Énergie Atomique, transformée en 2000 en Commission Canadienne de Sûreté Nucléaire.

Les démocraties occidentales ont rapidement fait en sorte que l'organisme de réglementation soit indépendant des industriels, mais aussi des gouvernements. C'est le cas dans la plupart des pays où la décision de construire ou non une centrale est du domaine de la politique et de l'économie, mais où sa sûreté est évaluée indépendamment. Les autorités de sûreté dans le monde ont en général des pouvoirs très élevés, y compris d'arrêter l'exploitation d'une centrale jugée pas assez sûre. Les autorités de sûreté définissent les critères à respecter pour qu'un réacteur reçoive son autorisation de fonctionnement. Quelquefois, comme ça a été le cas il y a un an et demi au sujet du NRU, le parlement contredit l'organisme de réglementation...

L'URSS n'avait pas ce type d'organisme indépendant, comme il a été indiqué il y a un instant pour Tchernobyl.

Les organismes internationaux

Chaque pays a son organisme de réglementation. Cependant, les problèmes de sûreté étant communs à tous deux organismes internationaux ont été créés :

- L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, qui est une agence de l'ONU, a son siège à Vienne en Autriche. Outre des inspections dans le cadre de la non-prolifération nucléaire, l'AIEA propose les services d'experts des états membres aux pays dont les ressources sont insuffisantes ou qui veulent un avis indépendant. L'AIEA produit également des normes qui fixent le consensus des diverses autorités de sûreté et organise des réunions internationales sur certains sujets. C'est ainsi que

j'ai pu voir, lors d'une de ces réunions à Toronto, les délégués Indiens et Pakistanais discuter et plaisanter entre eux...

- L'agence de l'Énergie Nucléaire de l'OCDE comporte un certain nombre de groupes de travail sur la sûreté nucléaire. Elle cherche, en particulier, à harmoniser les réglementations, de sorte qu'un réacteur autorisé dans un pays le soit dans un autre pays. Un des problèmes dans ce cas est celui des normes applicables: par exemple normes ASME (American Society of Mechanical Engineers) et CEI (Commission Électrotechnique Internationale). Nous avons eu un exemple de ce type de problèmes il y a quelques années, lorsqu'un industriel a voulu acheter une vanne en Europe. Il lui en a coûté une jolie somme pour faire homologuer ASME un composant utilisé dans toutes les centrales nucléaires européennes. Il y a donc beaucoup à gagner (ou plutôt à ne pas perdre) dans cette harmonisation.

Les déchets nucléaires

La fission des atomes d'uranium, dans un réacteur, produit un nombre important de nouveaux atomes, en moyenne d'une masse moitié de celui d'Uranium. Dans le jargon du nucléaire, on les appelle les produits de fission. La plupart des ces produits de fission sont extrêmement instables et produisent, par décomposition radioactive, de nouveaux atomes, tout en libérant encore beaucoup d'énergie. La plupart d'entre eux ont des durées de vie très courtes (inférieure à un jour), mais certains ont une durée de vie beaucoup plus longue, se comptant en milliers d'années. Les combustibles usés, qui contiennent ces déchets sont entreposés dans l'enceinte des centrales pendant une vingtaine d'années dans une piscine, puis lorsqu'ils ont perdu la plus grande partie de leur énergie, dans des silos en béton.

C'est ainsi que se pose le problème de la gestion des déchets nucléaires. Il faut cependant savoir que, si leur radioactivité est un problème réel, on oublie souvent que leur volume est très faible. Les déchets produits par un réacteur de puissance Canadien ne suffisent pas à remplir une piscine olympique en 20 ans de fonctionnement. Il s'agit donc de traiter de faibles quantités de produits très dangereux, ce qui devrait être plus facile que d'en traiter de grandes quantités.... C'est plus facile à dire qu'à faire...

C'est un débat ouvert et où se mêlent les arguments de la raison et de la passion.

Les réacteurs de recherche

Les réacteurs de recherche présentent une beaucoup plus grande diversité que les réacteurs de puissance. On en trouve 8 au Canada, dans des centres de recherche (par exemple à Chalk River et à Whiteshell) et dans les universités (par exemple à McMaster)

Beaucoup de pays « non nucléaires » (par exemple l'Australie ou l'Égypte) ont des réacteurs de recherche.

Les réacteurs de recherche ont une foule d'applications, allant de la détermination des caractéristiques des combustibles nucléaires à la production de faisceaux de neutrons pour des expériences scientifiques, en passant par l'irradiation de divers matériaux et, en

particulier la production d'isotopes spéciaux. Ils sont également utilisés à des fins d'enseignement et de développements scientifiques.

Je me contenterai aujourd'hui de parler des réacteurs de recherche utilisés pour la production d'isotopes médicaux.

Un brin de technique est encore nécessaire. Veuillez m'en excuser :

On appelle isotopes des corps qui ont les mêmes propriétés chimiques, c'est-à-dire le même nombre de protons, mais une masse atomique différente. C'est-à-dire qu'ils ont un nombre différent de neutrons. Les isotopes d'un corps donné peuvent être stables ou instables. Un exemple bien connu est celui du carbone qui a trois isotopes : le carbone 12, le plus ordinaire, le carbone 13, plus rare, et le carbone 14, radioactif avec une demi-vie de 5730 ans et qui est produit par les rayons cosmiques. Qui n'a jamais entendu parler de datation de fossiles humains au carbone 14? Pratiquement tous les corps naturels ont des isotopes radioactifs. Quelques uns ont des usages bénéfiques, comme le carbone 14 ou le Cobalt 60, d'autres sont dangereux, comme le radon.

Bon, je m'arrête là.

Le développement des méthodes de diagnostic à base de traceurs radioactifs a été très rapide dans le monde, compte tenu de leur grande efficacité et de leur faible prix. Il se trouve que les cellules cancéreuses ont davantage besoin de sang que les cellules normales. Si on introduit un produit radioactif dans le sang, il sera donc facile de mesurer la densité de sang dans toutes les parties du corps en faisant une carte de la radioactivité locale dans le corps du patient. Ces corps radioactifs sont ensuite éliminés naturellement dans l'urine. Ils sont tellement utilisés qu'en pratique, la pollution nucléaire la plus forte au Canada est dans les égouts des hôpitaux de Toronto....

Les isotopes médicaux sont caractérisés par une forte radioactivité et une très faible demi vie (par exemple le Molybdène-99, l'isotope le plus utilisé, a une demi-vie de moins de 3 jours). Ceci permet d'en utiliser de très faibles quantités et de ne pas soumettre les patients à une irradiation de longue durée. Par contre, ils doivent être utilisés très rapidement, car ils commencent à décroître dès qu'ils sont sortis du réacteur. Ceci explique d'une part les circuits de distribution spécialisés (par avion (ils sont confiés au personnel de bord et évitent tout le circuit normal des marchandises) et par courriers spéciaux) et d'autre part le fait qu'il n'est pas possible de les stocker.

Très peu de réacteurs de recherche sont équipés pour la production des isotopes médicaux. C'est ainsi que 70 % des isotopes médicaux sont produits par 2 réacteurs et 94% par 6 réacteurs :

- Le NRU à Chalk River au Canada, avec 40% de la production mondiale,
- Le HFR à Petten, aux Pays-Bas, avec 30%,
- SAFARI, à Prétoria, en Afrique du Sud, avec 10%
- BR2, à Mol, en Belgique, avec 9%,
- OSIRIS, à Saclay, en France, avec 3 % et
- OPAL en Australie avec 2%.

Ces réacteurs sont vieux : NRU a 52 ans, HFR a 47 ans, SAFARI a 44 ans, BR2 a 48 ans, OSIRIS a 43 ans... Seul OPAL est récent, mis en service en novembre 2006. Il en résulte que ces réacteurs sont peu fiables et sujets à des réparations qui peuvent être importantes. La situation actuelle, avec NRU arrêté pour encore plus de 6 mois et HFR, arrêté 2 mois cette année et qui doit être encore arrêté pour au moins 6 mois l'an prochain, tous les deux suite à la découverte de corrosion dans des parties des réacteurs noyées dans du béton, est dramatique, 70% de la production mondiale étant perdue....

Un des résultats positifs de cette grave crise est le fourmillement d'idées, et probablement de déblocage de fonds, pour rajeunir les moyens de production des isotopes médicaux. C'est ainsi que l'université McMaster demande en ce moment des fonds pour le personnel et l'équipement lui permettant de produire des isotopes médicaux.

Les filières futures

Après la catastrophe de Tchernobyl, la construction de nouveaux réacteurs dans les pays occidentaux s'est arrêtée. Elle a continué, à un rythme ralenti, dans les pays orientaux (Corée et Chine en particulier).

Les concepteurs de réacteurs, tels qu'AREVA en France ou Westinghouse aux États-Unis, eux, ne se sont pas arrêtés. La situation actuelle, avec la croissance de la demande en énergie et les préoccupations environnementales, voit de nouveau la construction de nouvelles centrales.

Les nouveaux réacteurs en construction ou en phase terminale de conception, dits de génération 3, sont basés sur les mêmes principes que les réacteurs actuellement en service, l'évolution étant surtout sur plus de simplicité et une plus grande sûreté. En moyenne, les nouveaux réacteurs (tels que l'EPR, l'AP-1000 ou l'ACR) devraient être 100 fois plus sûrs que les réacteurs en service à ce jour.

Il y a à ce jour un EPR en construction en Finlande, à Olkiluto, et un en France à Flamanville. Un AP-1000 est en construction en Chine.

Des filières différentes dans leur principe, dites de génération 4, sont en phase de conception et, pour certains, en expérimentation. Je n'entrerai pas dans ces détails, mais plusieurs de ces conceptions sont dites « intrinsèquement sûres », c'est à dire qu'un accident nucléaire n'est théoriquement pas possible. Les hypothèses les plus optimistes les voient prendre du service vers 2030. Un de leurs objectifs est de produire, outre de l'électricité, de l'hydrogène avec un haut rendement.

Enfin, l'avenir plus lointain est la fusion nucléaire. Contrairement à la fission, où l'énergie est produite par la cassure en deux d'un noyau, la fusion produit son énergie par « collage » de deux noyaux en un seul. L'énergie produite est gigantesque. Cela demande des pressions énormes et des températures de plusieurs millions de degrés. C'est ce qui fait briller le soleil... Beaucoup de travail est fait sur le sujet. La dernière machine, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) en construction à Cadarache en France devrait être

capable de produire plus d'énergie qu'elle en consomme pendant quelques centaines de secondes. Mais je pense qu'aucun de nous, dans cette salle, ne verra une centrale de production d'électricité à fusion opérationnelle.....

Pour terminer, puisque je suis ici dans le cadre de la Société des amis Canada-France, je vous indiquerai que le Canada et la France ont de très bons liens sur le nucléaire.

Tout d'abord, entre organismes de réglementation. La CCSN et L'ASN (autorité de Sûreté Nucléaire) française ont conclu des accords de coopération. C'est ainsi qu'en mai dernier, 5 personnes sont venues de France pour nous présenter leur expérience sur les caractéristiques et la sûreté de l'EPR. Nous avons en outre des rapports constants et amicaux dans le cadre des activités de l'AIEA et de L'OCDE.
Je serai de nouveau à Paris la semaine prochaine.

Les industriels, en particulier Hydro-Québec ont des accords de coopération et d'échange d'expérience avec EDF.

Monsieur Philippe Hessel, Ingénieur, diplômé de l'École nationale supérieure d'Électronique et de radioélectricité, Grenoble, Spécialiste technique, Fiabilité et études probabilistes de sûreté, Commission canadienne de sûreté nucléaire
Déjeuner-conférence de la Société des Amis Canada-France
Le 20 septembre 2009