

L'énergie nucléaire

Paul REUSS

1. PRINCIPES PHYSIQUES DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

1.1. CONSTITUTION DES ATOMES ET DES NOYAUX

Toute la matière qui nous entoure est constituée d'atomes. Très approximativement, mais l'image nous suffira, un atome peut être imaginé comme un minuscule système solaire, formé d'un noyau tout petit mais où se trouve concentrée presque toute la masse de l'atome, entouré d'un très léger nuage d'électrons.

Le noyau est composé de deux sortes de particules appelées nucléons : d'une part des protons portant chacun une charge électrique élémentaire positive, d'autre part des neutrons très semblables, hormis le fait qu'ils ne portent pas de charge électrique. Les électrons, eux, près de deux mille fois plus petits, portent chacun une charge électrique élémentaire négative.

Comme l'atome est normalement électriquement neutre, il y a le même nombre Z de protons dans le noyau que d'électrons autour. Ce nombre, appelé numéro atomique, peut aller de 1 à 92 et définit l'élément chimique ; par exemple, les atomes d'hydrogène ont un proton et un électron ; à l'autre extrême de la table des éléments naturels qu'avait établie Mendeleïev, se trouve l'uranium : 92 protons et 92 électrons.

Pour un même élément caractérisé par Z , on peut souvent repérer des atomes différant par le nombre N de neutrons associés aux Z protons du noyau : dans ce cas, on parle d'isotopes et on les distingue par le nombre A de nucléons ($A = Z + N$), appelé nombre de masse car il caractérise approximativement la masse de l'atome.

Par exemple, l'hydrogène naturel a deux isotopes, l'hydrogène 1 (1 proton, 1 électron, 0 neutron) et l'hydrogène 2, également appelé deutérium (1 proton, 1 électron, 1 neutron) ; de même, l'uranium naturel a deux isotopes principaux, l'uranium 235 (92 protons, 92 électrons, 143 neutrons) et l'uranium 238 (92 protons, 92 électrons, 146 neutrons).

1.2. ÉNERGIE DE LIAISON DES NOYAUX

La cohésion de l'atome est assurée par des forces de liaison. Les électrons restent liés au noyau grâce aux forces électriques attractives entre charges positives (les protons du noyau) et négatives (électrons). Ces mêmes forces électriques, répulsives entre les charges toutes positives des protons, auraient tendance à faire exploser le noyau ; mais sa cohésion est assurée par une autre force, dite « nucléaire », qui a pour caractéristiques, comme une forte colle, d'être extrêmement intense mais à très courte portée, c'est-à-dire intervenant seulement au contact entre deux nucléons.

Grâce à cette force nucléaire, le noyau, tel une goutte d'eau, prend une forme à peu près sphérique. Pour assurer le meilleur compromis entre les forces attractives et répulsives, il faut que la proportion neutron/proton soit adéquate, environ 50/50 pour les petits noyaux et 60/40 pour les gros.

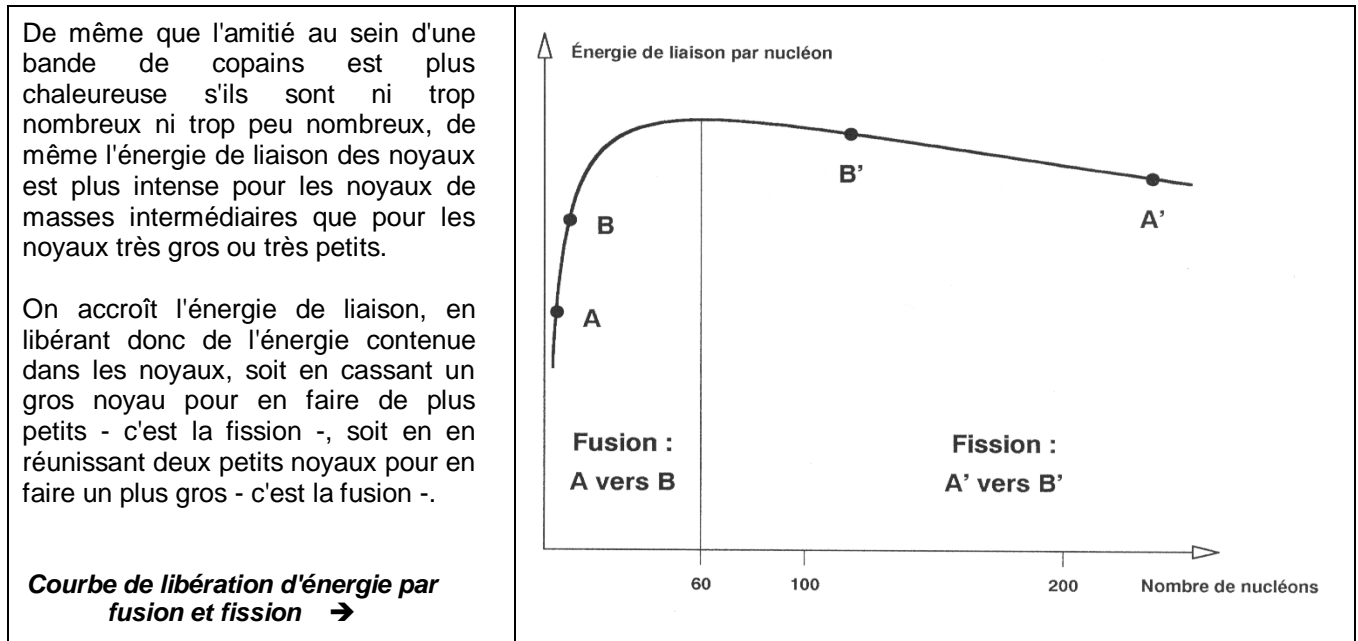
C'est la raison pour laquelle chaque élément n'a qu'un petit nombre d'isotopes stables ; les autres isotopes, ceux pour lesquels la proportion n'est pas optimale, sont radioactifs, c'est-à-dire se transforment spontanément, selon une loi probabiliste exponentielle et à un rythme variable selon les exemples, pour se transformer en un noyau stable.

De même, les noyaux trop gros se désintègrent par radioactivité (généralement en éjectant quatre nucléons) pour réduire leur masse. Les noyaux sont d'autant plus stables que l'énergie de liaison est grande (voir la courbe ci-dessous quand on va de A vers B).

La stabilité se traduit par un maximum de l'énergie de liaison (l'énergie de liaison est l'énergie qu'il faudrait fournir pour casser la liaison) : si un processus peut accroître l'énergie de liaison, il libère de l'énergie s'il se produit. C'est comme un rocher qui chute du sommet d'une montagne : en se rapprochant du sol, il accroît sa liaison avec la Terre et libère de l'énergie lui permettant d'acquérir une vitesse de plus en plus grande.

2. FISSION ET FUSION

2.1. PRINCIPE



Ces deux processus, s'ils se sont réalisés, produisent une quantité phénoménale d'énergie, typiquement, à masse égale, un million de fois plus qu'une réaction chimique telle la combustion du charbon.

2.2. FISSION INDUITE PAR NEUTRON ET RÉACTION EN CHAÎNE

L'histoire a voulu que les premières applications de l'énergie de fission soient associées aux bombes qui anéantirent Hiroshima et Nagasaki en août 1945. Malgré les spectaculaires réalisations pacifiques pour la production d'électricité qui ont suivi les années de guerre, ce "péché originel" est resté attaché aux mots "atomique" et "nucléaire".

Le neutron va s'avérer le "projectile" adéquat pour provoquer la fission : ne portant pas de charge électrique, il peut s'approcher sans difficulté d'un noyau "cible" ; sensible à la force nucléaire, il peut se lier aux autres nucléons et, ce faisant, dégager dans le noyau l'énergie de la liaison et ainsi le déstabiliser ; si cette perturbation est suffisante, la fission se produit. Il se trouve que la fission libère quelques neutrons à l'état libre, en moyenne deux ou trois : au cours de leur pérégrination dans le système, l'un ou l'autre de ces neutrons ira peut-être percuter un autre noyau lourd, provoquant sa fission, libérant quelques nouveaux neutrons, susceptibles d'induire de nouvelles fissions et ainsi de suite : c'est la réaction en chaîne.

Cette réaction en chaîne peut être explosive : c'est ce qui sera réalisé dans une bombe. Dans un réacteur, au contraire, la réaction est maîtrisée, et même autocontrôlée, ce qui conduira à un rythme constant de fissions, donc à une puissance délivrée constante. Par construction, un réacteur ne peut pas devenir une bombe.

En pratique, parmi les noyaux de la nature, seul l'isotope 235 de l'uranium subit facilement la fission, et peut donc être utilisé soit dans une bombe, soit dans un réacteur. Il faut y ajouter quelques noyaux artificiels pouvant jouer le même rôle : les principaux sont le plutonium 239, l'uranium 233.

2.3. FUSION

Comparativement à la fission, la fusion est plus difficile à obtenir car il faut mettre en contact deux noyaux pour que la force nucléaire les réunisse ; mais la répulsion électrique s'oppose à ce rapprochement. La seule solution connue pour réaliser la fusion est de porter les réactifs à une très haute température, de l'ordre de cent millions

de degrés, de façon que les collisions entre les noyaux alors dépouillés de leurs électrons soient suffisamment violentes pour surpasser la répulsion.

En utilisant deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium (naturel) et le tritium (radioactif, artificiel), on sait faire cela dans les bombes dites "à hydrogène" où une bombe à fission sert d'"allumette" pour chauffer les réactifs ; les physiciens tentent de maîtriser la réaction dans des machines à plasma (matière à très haute température), telle la machine ITER en cours de construction, et espèrent aboutir un jour à des réacteurs industriels producteurs d'énergie.

3. PLACE DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE

3.1. HISTORIQUE DES DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La saga de l'énergie nucléaire de fission démarra avec les travaux de Fermi et son équipe en 1942, puis la construction de réacteurs à graphite destinés à produire le plutonium nécessaire aux bombes.

Dès la fin des hostilités, de nombreux pays se sont lancés dans d'ambitieux programmes de développement de l'énergie nucléaire à usage pacifique. En France, par exemple, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) fut créé dès le 18 octobre 1945 par une ordonnance signée par le général De Gaulle. Trois ans plus tard, les chercheurs du CEA faisaient « diverger » (démarrer) à Fontenay-aux-Roses le petit réacteur à eau lourde appelé « Zoé » (aujourd'hui transformé en musée). Un effort de recherche et développement, puis d'industrialisation des filières UNGG¹, à neutrons rapides et REP² suivit. La plupart des pays industrialisés menèrent également des recherches et, pour beaucoup d'entre eux, des constructions de réacteurs de puissance.

La France, cependant, mena l'effort le plus notable à la suite de décisions politiques volontaristes, prises au début des années 1970, pour engager un vaste programme d'équipement en réacteurs à eau sous pression, avec les usines associées, de façon à pallier l'absence quasi totale de sources d'énergie fossiles sur le territoire national. Aujourd'hui la France se détache nettement en termes de pourcentage de nucléaire dans la production d'électricité : environ 75 %. Les 25 % restant sont assurés par l'hydraulique, le gaz et les énergies renouvelables). Cela lui assure une indépendance énergétique sans laquelle elle serait dépendante d'autres nations.

3.2. PLACE DE L'ÉLECTRONUCLÉAIRE, AUJOURD'HUI DANS LE MONDE

Bien que relativement loin dans le classement en terme de pourcentage de nucléaire pour la production d'énergie électrique, et bien que n'ayant pas démarré de centrale nucléaire depuis plus de vingt ans, les États-Unis restent en tête si l'on considère le nombre de réacteurs ou la puissance installée. Dans le peloton de tête, on peut aussi repérer le Japon qui, comme la France, ne dispose pas d'énergie fossile, qui a arrêté presque tous ses réacteurs après l'accident de Fukushima mais souhaite maintenant relancer sa production d'énergie d'origine nucléaire.

De même sont concernés la Russie et ses anciens satellites ; plusieurs pays d'Extrême-Orient (Corée du Sud, Taïwan, Chine...) ont aussi des programmes ambitieux. La situation des pays de l'Union européenne est très contrastée : certains (Royaume-Uni, Belgique, Finlande, Espagne...), comme la France, ont développé la technologie nucléaire ; d'autres (Italie) ont renoncé au nucléaire, ou parlent de le faire (Allemagne, Suisse ...) ; enfin, d'autres (Danemark, Irlande, Portugal, Grèce...) ne s'y sont pas lancés.

Parc électronucléaire mondial (ventilation par filières) : Puissance installée en GWe et nombres d'unités au 31 décembre 2011

Filière	Puissance Installée (GWe)	Nombre d'unités
Graphite-gaz (Magnox et AGR)	8,8	17
Graphite-eau (RBMK)	10,2	15
REP (PWR) et VVER	248,4	270
REB (BWR)	77,7	84
Eau lourde (CANDU)	23,1	47
Rapide	0,6	2
	368,8	435

¹ UNGG = réacteur fonctionnant à l'Uranium Naturel, modéré au Graphite et refroidi au Gaz

² REP = Réacteur à Eau Pressurisée

**Parc électronucléaire mondial (ventilation par pays) :
Puissance (installée, en construction et arrêtée) en GWe et nombres d'unités
au 31 décembre 2011 ;
Part du nucléaire dans la production d'électricité en 2011**

Pays	Installé	En construction	Arrêté	Électricité nucléaire (%)
États-Unis	101,5 (104)	1,2 (1)	9,8 (28)	19
France	63,1 (58)	1,6 (1)	3,8 (12)	78
Japon	44,2 (50)	2,7 (2)	4,3 (9)	18
Russie	23,6 (33)	8,2 (10)	0,9 (5)	18
Corée du Sud	18,8 (21)	3,6 (3)	–	35
Ukraine	13,1 (15)	1,9 (2)	3,5 (4)	47
Canada	12,6 (18)	–	0,5 (3)	15
Allemagne	12,1 (9)	–	14,3 (27)	18
Chine	11,8 (16)	26,6 (26)	–	2
Royaume-Uni	10,0 (18)	–	3,5 (27)	18
Suède	9,3 (10)	–	–	40
Espagne	7,6 (8)	–	1,2 (3)	19
Belgique	5,9 (7)	–	0,6 (2)	54
Taiwan	5,0 (6)	2,6 (2)	0,0 (1)	19
Inde	4,4 (20)	4,8 (7)	–	4
Rép. Tchèque	3,8 (6)	–	–	33
Suisse	3,3 (5)	–	–	41
Finlande	2,7 (4)	1,6 (1)	0,0 (1)	32
Bulgarie	1,9 (2)	–	–	33
Hongrie	1,9 (4)	–	1,6 (4)	43
Brésil	1,9 (2)	1,2 (1)	–	3
Slovaquie	1,8 (4)	0,8 (2)	–	54
Afrique du Sud	1,8 (2)	–	0,9 (3)	5
Roumanie	1,3 (2)	–	–	19
Mexique	1,3 (2)	–	–	4
Argentine	0,9 (2)	0,7 (1)	–	5
Iran	0,9 (1)	–	–	0
Pakistan	0,7 (3)	0,6 (2)	–	4
Slovénie	0,7 (1)	–	–	42
Pays-Bas	0,5 (1)	–	0,1 (1)	4
Arménie	0,4 (1)	–	0,4 (1)	33
Lituanie	–	–	2,4 (2)	–
Italie	–	–	1,4 (4)	–
Kazakhstan	–	–	0,1 (1)	–
Monde	368,8 (435)	58,1 (61)	49,2 (138)	13

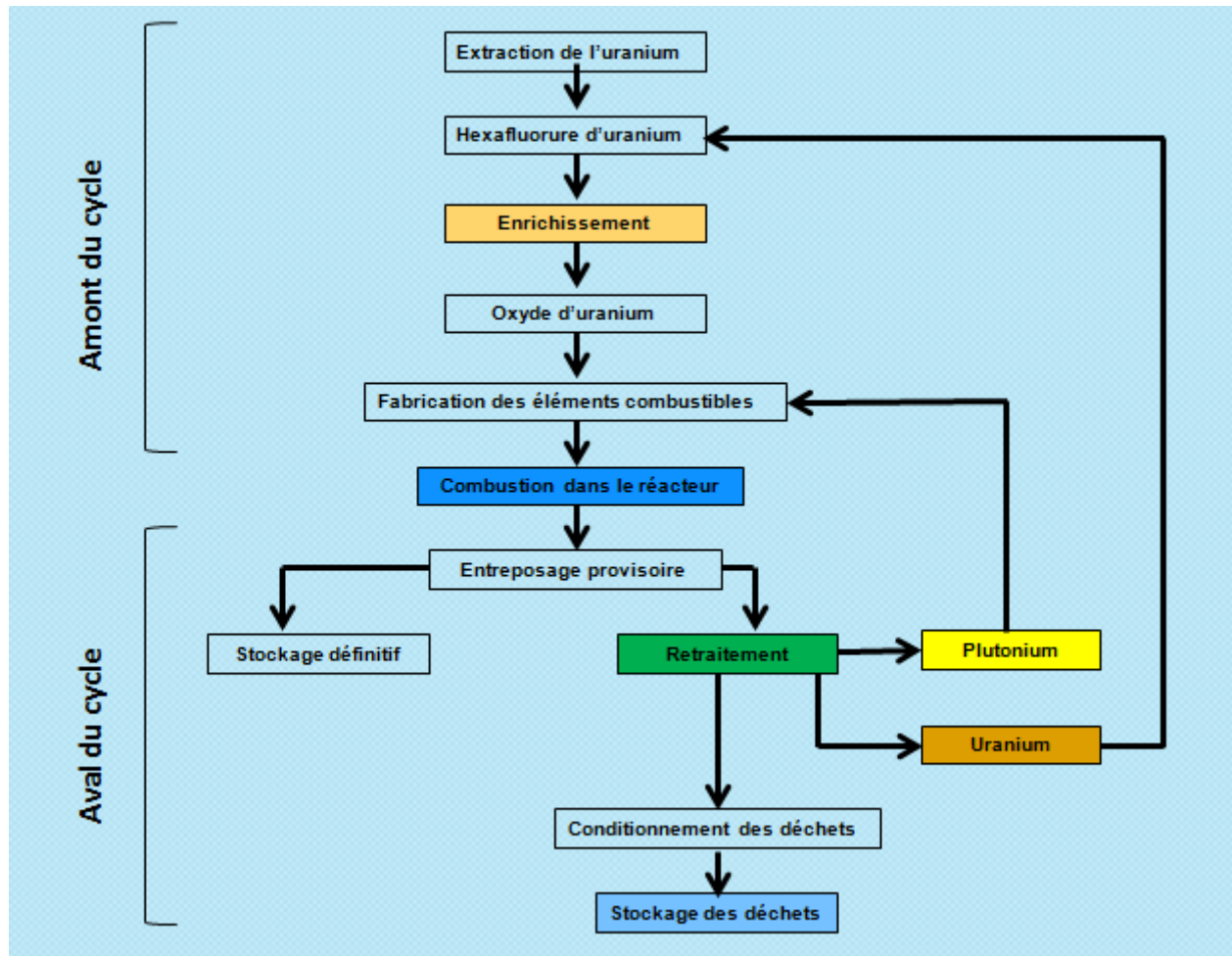
4. ASPECTS INDUSTRIELS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE

4.1. LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

Outre les réacteurs eux-mêmes, la mise en place de l'énergie électronucléaire suppose tout un ensemble d'usines et d'installations nécessaires pour ce qu'on appelle le « cycle du combustible ».

Il s'agit, en amont, de tout ce qui va de la mine d'uranium jusqu'aux éléments de combustible à charger en cœur : extraction et purification du minerai, enrichissement, conversion en oxyde et fabrication du combustible. En aval, après quelques années de « refroidissement » en piscine pour laisser baisser le niveau de radioactivité, le combustible est entreposé et, s'il y a lieu, retraité avant le stockage définitif soit des assemblages en l'état, soit des déchets non recyclables.

Les pays qui ont le plus développé l'énergie nucléaire, tels la France, ont aussi mis en place tout ou partie des installations du cycle ; d'autres, préfèrent acheter à l'extérieur leur combustible et, éventuellement, font retraiter les éléments irradiés.



Le cycle du combustible nucléaire pour les réacteurs à eau

4.2. ÉCONOMIE DU NUCLÉAIRE

Le choix d'une source d'énergie fait intervenir de nombreux aspects : technologiques, politiques, environnementaux... ; le premier critère est évidemment celui du coût de l'électricité produite.

Ce coût dépend des conditions locales, notamment du niveau de développement technologique du pays concerné, et des hypothèses de calcul économique, notamment du taux d'intérêt des capitaux. En ce qui concerne le nucléaire, on peut retenir trois idées essentielles :

- dans la conjoncture française actuelle, l'électricité d'origine nucléaire est compétitive avec celle obtenue à partir des autres sources fossiles, charbon et gaz, surtout pour un fonctionnement « en base » ;
- comme la technologie est plus délicate, la part « investissement » est sensiblement plus élevée ;
- en revanche, la part « combustible » est faible et, dans cette part, le poste « uranium naturel » est lui-même faible : contrairement à celui des autres énergies fossiles, le coût du kilowatt-heure nucléaire est donc très peu sensible aux fluctuations éventuelles des cours de l'uranium et serait peu affecté en cas de crise sur ce marché.

5. NUCLÉAIRE ET SOCIÉTÉ

5.1. LES RISQUES ASSOCIÉS A L'EXPLOITATION DES RÉACTEURS

Outre les réacteurs eux-mêmes, la mise en place de l'énergie électronucléaire suppose tout un ensemble d'usines et d'installations nécessaires pour ce qu'on appelle le « cycle du combustible ».

Comme toute industrie, l'industrie nucléaire présente des risques et a eu à déplorer des accidents. Aux risques usuels (chutes, incendies, inondations, séismes...), s'ajoute, dans ce cas, le risque lié à la radioactivité. En

particulier, il faut tout faire pour éviter que les produits confinés au sein du combustible nucléaire (produits de fission et noyaux lourds transmutés) ne se répandent dans l'environnement.

Les spécialistes ont, dès l'origine, été extrêmement sensibles aux risques que présentent les réacteurs et les autres installations du cycle du combustible nucléaire, notamment le retraitement : cela les a amenés à mettre en oeuvre des actions de prévention tout à fait exceptionnelles par rapport à ce qui se fait dans la plupart des autres branches industrielles. Les statistiques montrent que cet effort a été payant, même si quelques accidents se sont produits, en particulier Three Miles Island en 1979, qui n'a pas fait de victime, Tchernobyl en 1986, dont le bilan complet n'a pas pu être établi (la « cohorte » des « liquidateurs », notamment, n'a pas été suivie médicalement) et plus récemment en 2011, l'accident de Fukushima, provoqué par un tsunami, qui n'a pas fait de victime à proprement parler nucléaire.

La sûreté du nucléaire passe par la prévention (éviter un accident) et par la protection (réduire les conséquences d'un accident s'il se produisait en dépit de toutes les actions de préventions). Cela se décline sur différents modes : la connaissance physique approfondie des systèmes, notamment en séquence accidentelle, la conception, l'exploitation, la maintenance, la sensibilisation et la formation du personnel, la mise au point de plans d'intervention grâce à des exercices...

Le principe général est une « défense en profondeur » : en cas de défaillance à un certain niveau, le relais est assuré à un autre niveau ; ainsi, trois barrières, au moins, sont interposées entre les produits radioactifs et l'environnement : par exemple, pour les réacteurs à eau sous pression, les gaines des crayons combustibles, le circuit primaire, puis l'enceinte (voire la double enceinte) de confinement du bâtiment du réacteur. (C'est parce qu'il n'y a pas d'enceinte de confinement pour les réacteurs RBMK que l'accident de Tchernobyl fut si dramatique ; a contrario, cette enceinte a montré son efficacité dans le cas de Three Mile Island.)

En pratique, la sûreté est contrôlée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) pouvant seule délivrer l'autorisation de mise en fonctionnement d'une installation nucléaire ; cette Autorité s'appuie sur l'Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN). L'ASN, organisme indépendant des ministères, surveille les Installations Nucléaires de Base (INB) durant toute leur existence, notamment en effectuant de nombreuses inspections.

5.2. LE RECYCLAGE DES MATIÈRES FISSILES

Le retraitement en vue du recyclage des matières fissiles est aussi une question qui suscite des interrogations dans l'opinion. En particulier, on peut se demander, d'une part, si l'opération est économiquement rentable, d'autre part, si la gestion de masses relativement importantes de matières sensibles ne présente pas un risque de détournement par des organisations mal intentionnées.

En ce qui concerne le premier point, nous avons vu qu'une saine utilisation, à long terme, des ressources naturelles que sont l'uranium, puis le thorium, passe par la surgénération, donc par un retraitement systématique. On peut arguer, toutefois, qu'il n'y a pas urgence, puisque les réserves sont suffisantes pour une utilisation de l'uranium, sans recyclage et au rythme actuel, pendant un siècle. En ce qui concerne le second point, le risque paraît limité ainsi que cela est expliqué plus loin. Il paraît clair, en tout cas, que l'utilisation du plutonium en réacteurs n'engendre guère plus de risque d'accident que l'uranium.

5.3. LA GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Le problème du devenir des déchets nucléaires préoccupe également fortement les citoyens sensibilisés. Ce problème se présente à deux niveaux.

La plus grosse partie des déchets des réactions nucléaires sont des produits de fission pour la plupart de périodes courtes ou moyennes (au maximum 30 ans) : ces produits sont stockés en surface et surveillés ; au bout de trois siècles environ, leur radioactivité se sera quasi complètement éteinte, ce qui aura résolu spontanément et totalement le problème.

L'autre partie, essentiellement des noyaux lourds transmutés mais non fissionnés, est constituée de produits de beaucoup plus longues périodes, jusqu'à des millions d'années, mais d'activité relativement modeste. Ce sont ces produits, « légués » à nos lointains descendants, qui posent un problème éthique. La solution la plus évidente consisterait à les stocker à grande profondeur dans des formations géologiques adéquates, en attendant leur lente décroissance radioactive. Une solution plus radicale consisterait à les incinérer.

Des réacteurs spécialisés pour cela ou, mieux, des machines produisant des flux intenses de neutrons par des réactions dites de « spallation » sont étudiés. La loi de 1991 adoptée par le Parlement français a sagement préconisé une période de quinze années de recherches avant que ne soient prises les décisions sur la gestion de ces déchets (ces décisions ne sont pas urgentes car les masses qu'il faut entreposer en attendant sont

modestes et faciles à surveiller). Elle a été prolongée par celle de 2006 préconisant une poursuite des recherches et l'ouverture d'un stockage souterrain (Cigéo).

5.4. LE RISQUE DE PROLIFÉRATION

Après la guerre et les explosions nucléaires au-dessus de deux grandes villes japonaises, puis la « course aux armements », le risque de prolifération a été très vivement perçu par l'opinion. En particulier, c'est essentiellement pour contrôler ce risque qu'a été créée l'Agence internationale à l'énergie atomique (AIEA) : il fallait éviter que l'arme nucléaire puisse être acquise par de trop nombreux pays, en particulier par ceux qui n'auraient pas hésité à s'en servir.

Ce risque de prolifération est réel, certes, comme l'ont montré, les exemples de l'Irak, de la Corée du Nord et d'autres. Acquérir l'arme nucléaire n'est cependant pas une opération aisée : d'une part, il faut se procurer la matière (pour une bombe, une dizaine de kilogrammes de matière fissile de haute qualité isotopique), soit par enrichissement de l'uranium naturel, soit par conversion de l'uranium 238, voire du thorium, une opération difficile, vu les contrôles de l'AIEA ; d'autre part, la technologie d'une explosion efficace est loin d'être simple, même si les principes généraux sont connus - et même, aujourd'hui, disponibles sur Internet ! -, surtout si l'on veut mettre en oeuvre la fusion thermonucléaire.

6. CONCLUSION

Pour un développement durable : l'énergie nucléaire est-elle inévitable ? L'énergie nucléaire de la fission, et peut-être un jour de la fusion, n'est pas la solution unique que certains ont cru y voir. Au contraire, les autres sources d'énergie méritent toutes d'être prises en considération et développées : il est clair que chacune à son « créneau » privilégié d'application.

Cependant, compte tenu des réserves limitées des sources classiques, des potentialités également limitées des énergies renouvelables et des besoins de l'humanité qui ne peuvent que croître, il paraît impensable - sauf à imaginer une source d'énergie totalement inconnue aujourd'hui - de voir l'avenir lointain sans la fission et la surgénération.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Paul Reuss, L'énergie nucléaire PUF, Que sais-je n° 317, 2012.
- [2] Paul REUSS, La neutronique, PUF, Que sais-je n° 3307, 1998.
- [3] CEA, Informations utiles, édition annuelle.
- [4] Élecnucl CEA, Les centrales nucléaires dans le monde, édition 2012.
- [3] Paul REUSS, Parlons nucléaire en 30 questions, La documentation française, 2012.