Maîtriser l'énergie nucléaire

Auteur :
BARRÉ Bertrand, Professeur émérite à l'INSTN (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires), ancien Directeur des Réacteurs Nucléaires au CEA.

20-09-2018

Un réacteur nucléaire transforme en électricité la chaleur produite dans son combustible par la fission de noyaux d'uranium. Cette production d'électricité est modulable en fonction de la demande. En marche normale, les réacteurs nucléaires sont particulièrement respectueux de l'environnement, notamment en ce qui concerne les gaz à effet de serre. Depuis les années 1950, les réacteurs ont évolué en « générations », tirant les leçons des rares accidents pour renforcer leur sûreté et leur robustesse. Les déchets radioactifs sont produits en volume limité ce qui permet leur confinement à très long terme, mais leur gestion reste sujette à controverse.

Dans cet article, nous décrirons la réaction de fission à l'origine de l'énergie utilisée par environ 450 réacteurs nucléaires dans le monde pour produire 11 % de l'électricité mondiale, le fonctionnement de ce type de machines, et leurs impacts positifs et négatifs sur l'environnement. Avant d'aborder ce texte, il est conseillé de prendre connaissance de l'article « Radioactivité et réactions nucléaires ».

1. La fission nucléaire

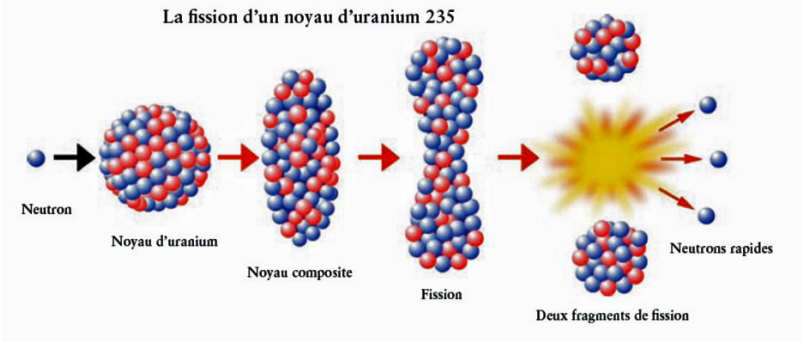

Figure 1. La fission d'un noyau d'uranium 235 [B. Barré PR., Bauquis, éditeur disparu]

Lorsque quelques noyaux très lourds (uranium ^{233}U et ^{235}U, plutonium ^{239}Pu et ^{241}Pu) absorbent un neutron, ils sont tellement déstabilisés qu'ils se coupent, la plupart du temps, en deux **fragments** : c'est la **fission** nucléaire. On dit que ces noyaux sont **fissiles**. Lors du processus de fission, un certain nombre de neutrons, 2 ou 3, sont éjectés à grand vitesse, de l'ordre de 20 000 km/s. La somme des masses des fragments de fission et des nouveaux neutrons est inférieure à la somme des masses du noyau initial et du neutron qu'il a absorbé : comme Einstein nous l'a appris, à cette petite perte de masse correspond un énorme relâchement d'énergie, selon la fameuse formule $E = mc^2$ qu'il serait plus correct d'écrire $\Delta E = -c^2\Delta m$, où ΔE représente l'énergie libérée, Δm, la différence entre masse finale et initiale, et c, la vitesse de la lumière dans le vide.

Cette énergie apparaît surtout sous forme d'énergie cinétique des fragments qui se séparent à grande vitesse, mais quand ceux-ci bousculent les atomes voisins, tout se transforme en chaleur (lire « L'énergie »). Nous verrons que les réacteurs nucléaires dits électrogènes utilisent cette chaleur pour produire de l'électricité. Une réaction chimique élémentaire dégage typiquement une énergie de quelques électron-volts (eV). Une fission dégage **200 millions** d'électron-volts (200 MeV). La fission d'un gramme d'uranium produit ainsi plus d'énergie que la combustion d'une tonne de pétrole.

Après une fission, si les nouveaux neutrons rencontrent d'autres noyaux fissiles, ceux-ci peuvent à leur tour se fissionner, donnant ainsi naissance à une **réaction en chaîne**. Si cette chaîne se développe exponentiellement, elle dégage très vite une énergie énorme : c'est le principe des bombes atomiques. Si le nombre de neutrons est maintenu constant, la puissance dégagée est stable : c'est ce que l'on réalise dans une centrale nucléaire.

C'est **Enrico Fermi** qui constata le premier (en 1934) que si l'on ralentissait les neutrons, par chocs élastiques sur des noyaux légers (de paraffine), avant de les diriger vers un matériau cible, celui-ci se mettait à absorber beaucoup plus les neutrons. On appelle ce ralentissement, **modération** ou **thermalisation** parce que la vitesse du neutron descend au niveau de celle que l'agitation thermique confère aux noyaux du matériau **modérateur**. Ce phénomène joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la plupart des réacteurs nucléaires, ceux que l'on appelle réacteurs thermiques, par opposition aux réacteurs « à neutrons rapides » RNR.

Certains autres noyaux lourds ne sont pas fissiles, mais après absorption d'un neutron ils se désintègrent par radioactivité bêta [1] et leur "petits-fils" qui en résulte est fissile. Ces noyaux, dits **fertiles,** sont le thorium ^{232}Th qui devient uranium ^{233}U, et l'uranium^{238}U qui devient plutonium ^{239}Pu.

Intéressons-nous maintenant aux fragments de fission. La plupart sont radioactifs et se désintègrent plus ou moins vite, donnant naissance à d'autres noyaux, souvent eux-aussi radioactifs. On appelle **produits de fission** le mélange des fragments encore survivants et des descendants de fragments. La grande majorité des produits de fission n'ont pas d'usage et constituent l'essentiel des déchets radioactifs « de haute activité » (nous parlerons plus loin de leur gestion). Outre les produits de fission, les déchets comprennent aussi quelques noyaux lourds qui proviennent d'une absorption de neutron sans fission : neptunium, américium et curium. On les appelle **actinides mineurs** (AM), et leur longue période [1] radioactive pose un problème spécifique que nous évoquerons.

Au fur et à mesure qu'un réacteur produit de l'énergie, les produits de fission s'accumulent dans son cœur. Quand on arrête la réaction en chaîne, ces produits de fission continuent à se désintégrer en dégageant une **puissance résiduelle** significative au début mais qui va en décroissant. Un réacteur typique dégage ainsi 5 % de sa puissance nominale après 10 s d'arrêt, 0,5 % après une journée, 0,3 % après une semaine, soit 9 MW thermique pour une centrale de 1000 MW électrique. Ce phénomène, spécifique des réacteurs nucléaires, est sans doute le problème de sûreté principal : **quand on arrête la machine, il faut encore refroidir le cœur** pendant plusieurs semaines sous peine de voir celui-ci fondre, ce qui est précisément arrivé aux centrales de Three Mile Island (Etats-Unis) et Fukushima (Japon) lors d'accidents que nous décrirons par la suite.

2. Les réacteurs nucléaires

2.1. Centrale électrique, réacteur

Nous garderons la désignation populaire de **centrale** pour désigner une unité de production d'électricité, bien que l'électricien parle plutôt de **tranche** et exploite souvent plusieurs tranches sur un centre de production. Il y a des centrales hydrauliques, des centrales thermiques « classiques » dont l'énergie provient de la combustion de charbon, de gaz ou plus rarement de nos jours, de fioul lourd, et des centrales nucléaires.

A l'exception des turbines à gaz simples, les centrales thermiques transforment, dans leur chaudière, de l'eau liquide en vapeur sous haute pression. Cette vapeur se détend dans une turbine dont elle met les aubes en rotation, puis revient à l'état liquide dans un condenseur dont les tubes sont parcourus par de l'eau de refroidissement. L'eau condensée est alors renvoyée dans la chaudière pour un nouveau cycle eau-vapeur. L'axe de la turbine (souvent constituée de plusieurs « corps ») est solidaire de celui d'un alternateur dont la rotation produit le courant électrique. On désigne l'ensemble des corps de turbine et de l'alternateur sous le nom **groupe turboalternateur**. L'électricité produite est envoyée dans une sous-station électrique, un transformateur qui augmente son voltage, avant d'être envoyée sur le réseau de transport à haute tension (les pertes sur les lignes de transport sont d'autant plus faibles que la tension est élevée).

Une centrale nucléaire est une centrale thermique dont l'énergie qui alimente le cycle eau-vapeur provient d'une réaction en chaîne de fission entretenue dans le cœur d'un **réacteur nucléaire**.

2.2. Combustible nucléaire, cœur

Par analogie avec les autres centrales thermiques, et bien que la combustion n'y joue aucun rôle, on appelle **combustible nucléaire** le matériau fissile qui dégage la chaleur recherchée. Il faut donc qu'il contienne des noyaux fissiles d'uranium ou de plutonium. Le combustible le plus utilisé est une céramique frittée (agglomérée) à partir de poudre d'oxydes en poudre et formée en **pastille** cylindrique.

Le combustible est contenu dans des **assemblages** dont la fonction est double : d'une part **transférer** efficacement la chaleur dégagée par les réactions nucléaires à un fluide **caloporteur** (gaz ou liquide) qui transmettra celle-ci à l'installation de production d'électricité et maintiendra le combustible à la température souhaitée, d'autre part, **maintenir confinés** les divers éléments radioactifs produits dans le combustible.

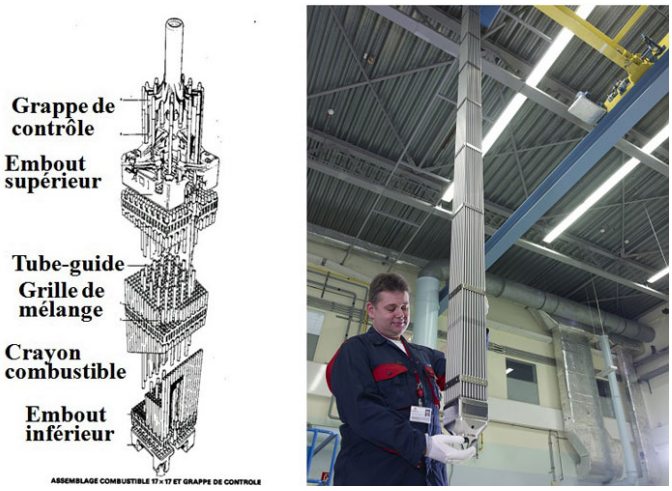

Figure 2. Assemblage du combustible nucléaire dans un réacteur à eau pressurisé (REP) [104366 /© AREVA / BRAUNE Michael]

La conception d'un assemblage est spécifique d'un modèle donné de réacteur, ce qui peut conduire à des formes et des dimensions très variées. Un assemblage typique (voir Figure 2) est constitué d'un faisceau de tubes métalliques étanches dans lesquels sont empilées des pastilles de combustible. On appelle ces tubes des **crayons**, et leur enveloppe métallique, la **gaine**. L'ensemble du combustible d'un réacteur est contenu dans plusieurs assemblages, qui constituent le **cœur** du réacteur. Le nombre d'assemblages d'un cœur varie beaucoup en fonction du type de réacteur considéré et, bien sûr, de sa puissance.

2.3. Une réaction en chaîne sous contrôle

Pour entretenir une réaction en chaîne dans un réacteur nucléaire, il faut qu'à chaque instant le nombre de neutrons produits dans le cœur par les fissions soit exactement égal au nombre de neutrons qui disparaissent dans le cœur ou s'en échappent. Le rapport de la production à la disparition est appelé **coefficient de multiplication**, noté K, et il doit donc être rigoureusement égal à 1. Cet état est appelé **criticité**, et le réacteur est dit **critique**.

Si ce nombre K est inférieur à 1, les neutrons disparaissent rapidement, la réaction en chaîne s'arrête et donc le réacteur aussi :

on dit que le cœur est **sous-critique**. A l'inverse, si K est supérieur à 1, le nombre de neutrons va augmenter très rapidement (et donc les fissions aussi, ainsi que l'énergie dégagée dans le cœur) et la réaction en chaîne va «s'emballer». On dit alors que le cœur est **sur-critique**.

Pour conserver en permanence le réacteur à l'état critique (K = 1), on introduit (ou on retire), selon les besoins, des **poisons** ou **absorbants** neutroniques, éléments composés de noyaux qui absorbent des neutrons. On utilise généralement 3 types d'absorbants :

des **barres** mobiles, appelées barres ou **grappes** de contrôle, que l'on fait pénétrer plus ou moins dans le cœur ;

des produits absorbants dissous dans le caloporteur et dont on peut faire varier la concentration au cours du temps. On parle alors d'empoisonnement homogène.

Des produits absorbants dispersés dans le combustible lui-même et qui disparaissent progressivement. On les appelle **poisons consommables**.

2.4. D'indispensables neutrons retardés

L'intervalle de temps qui sépare deux fissions successives lors d'une réaction en chaîne est excessivement court (même les neutrons les plus lents voyagent encore à 2 km/s !) : il n'y a aucun procédé qui permette d'ajuster la quantité de poison dans le cœur sur cette durée. Heureusement, parmi les produits de fission, il en est qui ont un neutron en trop, mais qui, au lieu de s'en débarrasser en le transformant en proton par désintégration bêta (lire « Radioactivité et réactions nucléaires »), l'éjectent purement et simplement, après un délai qui peut se mesurer en minutes.

Ce sont ces neutrons **retardés** (par opposition aux neutrons **prompts** émis lors même de la fission) qui donnent le temps nécessaire pour ajuster les poisons, monter ou descendre les barres de contrôle par exemple, et permettent de contrôler la puissance du réacteur. Sans neutron retardé, pas de contrôle de la réaction en chaîne, et donc pas de réacteur nucléaire.

La fission d'un noyau de plutonium donne plus de neutrons (2,9 neutrons) que celle d'un noyau d'uranium ^{235}U (2,4 neutrons). En revanche, la proportion de neutrons retardés est moindre dans la fission du plutonium (0,21 % au lieu de 0,64 %), ce qui veut dire qu'un cœur au plutonium est plus « nerveux ».

3. Les « générations » de réacteurs nucléaires

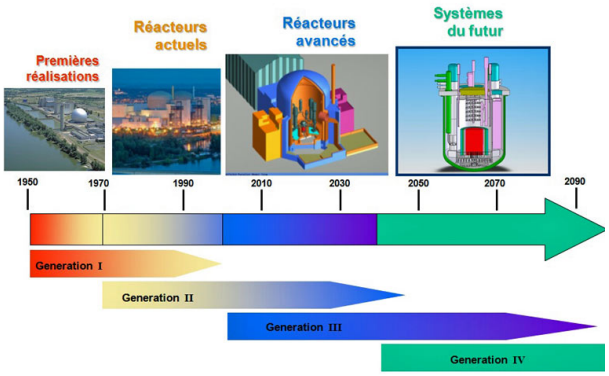

Figure 3. Les 4 générations de réacteurs nucléaires [montage auteur, montage BB photos EDF et AREVA, schémas AREVA et CEA].

Depuis 1999, on a pris l'habitude de décrire l'évolution des filières de réacteurs nucléaires en termes de **génération I, II, III ou IV** (voir Figure 3).

Par « première génération », on désigne le foisonnement initial de prototypes des années 50-60, tous différents, aujourd'hui pratiquement tous arrêtés et à divers stades de **démantèlement**.

La Génération II regroupe les filières de réacteurs actuellement en fonctionnement, qui fournissent 11 % de l'électricité mondiale. Ces réacteurs sont robustes, fiables et compétitifs. La grande majorité de ces réacteurs utilisent de l'eau ordinaire comme caloporteur.

C'est l'accident de Tchernobyl, que nous décrirons plus loin, qui est à l'origine de la Génération III en cours de construction : on

exige en effet de ces réacteurs que s'il y survient l'accident majeur de fusion totale du cœur, la radioactivité reste confinée à l'intérieur du site, c'est-à-dire, en fait, à l'intérieur du bâtiment réacteur. L'EPR (Evolutionary Power Reactor) de conception franco-allemande est l'archétype du réacteur de génération III. C'est un REP de forte puissance, 1650 MWe, fortement protégé et muni de systèmes de sauvegarde très redondants qui lui assurent robustesse et sûreté. Les deux premiers EPR en construction en Finlande et en France ont connu de grandes difficultés de construction, résultant en délais et surcoûts considérables. Les deux suivants, en fin de construction en Chine, n'ont pas ces déboires car ils profitent du retour d'expérience des premiers.

Enfin, alors qu'on arrête la génération I, qu'on exploite la génération II et que l'on construit la génération III, le « tuilage » continue, et l'on prépare la génération IV dans l'objectif qu'elle puisse être commercialisée vers 2050.

On attend de la génération IV qu'elle réponde aux exigences d'un contexte qui sera différent de celui d'aujourd'hui. On en attend une meilleure utilisation des matières fissiles, une gestion plus efficace des déchets radioactifs à vie longue, une meilleure résistance à la prolifération [2], une sûreté au moins aussi poussée que celle de la génération III, et la capacité de s'ouvrir à d'autres applications que la seule fourniture d'électricité : dessalement de l'eau de mer, production de chaleur pour l'industrie, production d'hydrogène pour fabriquer ou améliorer des carburants de synthèse, etc.

Le RNR français Superphénix, qui fonctionna de 1985 à 1997 était un précurseur de la génération IV.

GIF, le Forum international Génération IV qui regroupe 15 pays impliqués dans la technologie nucléaire, a esquissé les portraits-robots de 6 réacteurs « souhaitables » afin de guider la recherche & développement qui permettra à certains d'entre eux d'être mûrs pour l'industrialisation à l'échéance considérée.

4. La fusion contrôlée

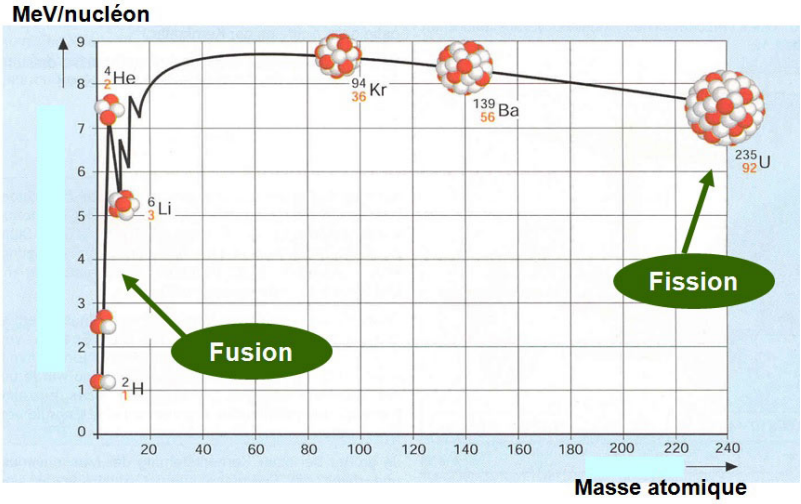

Figure 4 . Energie de liaison par nucléon dans les noyaux. La cohésion du noyau est d'autant plus forte que cette énergie de liaison est forte. La cohésion est augmentée soit par fusion d'éléments légers, soit par fission d'éléments lourds, libérant la différence d'énergie de liaison.

Quand un noyau lourd est fissionné, la perte de masse des composants libère une énergie considérable. De même (ou inversement), la fusion de deux noyaux très légers entraine une perte de masse et une libération d'énergie encore plus considérable (ramenée à la masse des composants). C'est ce type de réaction qui se produit au cœur des étoiles (Figure 4).

La fission et la fusion ont toutes deux été découvertes en 1938, mais alors que le premier réacteur électrogène à fission a été mis en service en 1954, l'utilisation de la fusion pour produire de l'électricité est encore aujourd'hui une perspective lointaine.

Le problème est que les noyaux légers en question ont une charge électrique positive et donc se repoussent. Au cœur des étoiles, les forces gigantesques de la gravité résolvent ce problème, mais sur Terre il faut trouver une autre méthode. Dans les bombes H, c'est le rayonnement intense d'une bombe atomique « classique » qui amorce la fusion : ce n'est pas transposable à la production contrôlée d'électricité.

On fonde l'essentiel des espoirs sur la mise à très haute température (100 **millions** de degrés) d'un plasma de deutérium et de

tritium, deux isotopes de l'hydrogène dont le noyau comprend respectivement un ou deux neutrons [3]. Les vitesses des noyaux à ces températures permettent de vaincre la répulsion électrostatique. Bien sûr, à cette température, ce plasma ne doit avoir aucun contact avec une paroi matérielle : on le confine par une combinaison de champs magnétiques et électrique dans une machine appelée **tokamak**. ITER, la plus puissante de ces machines, est en cours de construction à Cadarache depuis 2005 dans un cadre très multinational. Vers 2027, ITER devrait produire son premier plasma deutérium-tritium : on aura alors plus ou moins atteint pour la fusion l'équivalent pour la fission de l'expérience de Fermi en décembre 1942.

5. Nucléaire et environnement

5.1. Gaz à effet de serre

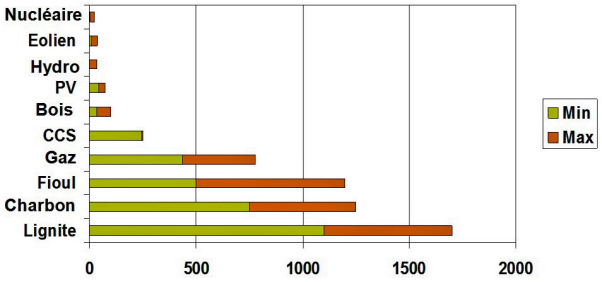

Figure 5. Émission de gaz à effets de serre de différentes sources d'électricité, exprimées en g de CO2 par kWh. Les fourchettes Min et Max reflète des différences dans les méthodes d'évaluation [figure de Bertrand Barré à partir de données de D. Weisser, IAEA mai 2006]

En terme d'environnement, un des avantages majeurs de l'électricité nucléaire est que sa production – dans une analyse complète de cycle de vie – occasionne très peu de relâchement de gaz à effet de serre, gaz responsables du changement climatique, comme illustré sur le diagramme de la figure 5.

5.2. Effluents gazeux et rejets liquides

Hors accident, les centrales nucléaires sont caractérisées par de très faibles rejets radioactifs dans l'environnement, rejets étroitement surveillés. La quantité totale de radioactivité rejetée dans l'atmosphère par une centrale nucléaire est inférieure à celle rejetée par une centrale au charbon, du fait des impuretés uranium et thorium contenues dans celui-ci.

Avant que l'on systématise le traitement de certaines eaux minérales bien connues par passage sur résines échangeuses d'ions, elles auraient été trop radioactives pour être autorisées comme rejet liquide d'une centrale.

5.3. Rejets thermiques

A la sortie de toute centrale thermique, nucléaire ou autre, l'eau est rejetée à une température plus élevée qu'à l'entrée. Pour les centrales en bord de mer, ceci n'est pas un problème. Pour les centrales refroidies par des fleuves ou rivières, la différence de température est limitée par la réglementation à un niveau qui ne risque pas de perturber la faune aquatique. Ceci amène souvent à ne pas rejeter l'eau dans l'environnement sans l'avoir refroidie par évaporation dans ces gros **aéroréfrigérants** dont on repère le panache de loin (panache dû à la condensation dans l'atmosphère de cette eau de rivière évaporée). En France, on associe ces tours aux centrales nucléaires mais en Allemagne ces mêmes tours signalent le plus souvent des centrales au charbon.

5.4. Déchets radioactifs

Si les effluents et rejets sont dilués dans l'environnement, du fait de leur radioactivité minime, les déchets radioactifs sont, au contraire, concentrés et immobilisés dans des matrices appropriées à leur nature. Ces colis solides sont entreposés sous contrôle en attendant leur stockage dans des conditions qui garantissent leur **confinement** pendant la durée où ils présentent un danger.

On appelle **substance radioactive** une substance qui contient des radioéléments dont la quantité ou la concentration nécessite des mesures de protection. Les **déchets radioactifs** sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation n'est prévue ou envisagée. En France, la gestion ultime des déchets est assurée par l'**ANDRA**, Agence nationale de gestion des déchets radioactifs, sous le contrôle de l'**ASN**, Autorité de sûreté nucléaire.

Concernant les déchets radioactifs, la classification française usuelle repose sur deux paramètres importants pour définir le mode de gestion approprié : le **niveau d'activité**, qui correspond au nombre de désintégrations par unité de temps des éléments radioactifs contenus dans le déchet et la **période radioactive** de ces radioéléments. On distingue, en particulier, les déchets dont la radioactivité provient principalement des radioéléments dont la période est inférieure à 31 ans (déchets dits à vie courte – VC) des déchets dont la radioactivité provient principalement de radioéléments dont la période est supérieure à 31 ans (déchets dits à

vie longue – VL).

Les déchets à vie très courte, provenant principalement du secteur médical ou de la recherche sont entreposés sur leur site d'utilisation le temps de leur décroissance radioactive.

Les déchets de très faible activité (TFA), inférieure à 100 Bq/g (soit 20 fois la radioactivité du granit) sont entreposés en surface dans des sites ANDRA dûment autorisés. Ils sont majoritairement issus de l'exploitation, de la maintenance et du démantèlement des centrales nucléaires (ferrailles, gravats, béton), des installations du cycle du combustible et des centres de recherche.

Les déchets de faible activité à vie longue (FAVL) feront l'objet d'une procédure de confinement plus stricte. Ce sont essentiellement des déchets de graphite (démantèlement d'anciennes centrales) et des déchets radifères (minerais radioactifs).

Les déchets de moyenne activité à vie longue (MAVL) et ceux à haute activité (HA) sont encapsulés dans des conteneurs en acier inox qui doivent être stockés à grande profondeur. Ils proviennent principalement des combustibles usés après traitement. Les déchets HA sont intégrés à une matrice de verre avant encapsulage pour limiter l'échauffement produit par leur radioactivité.

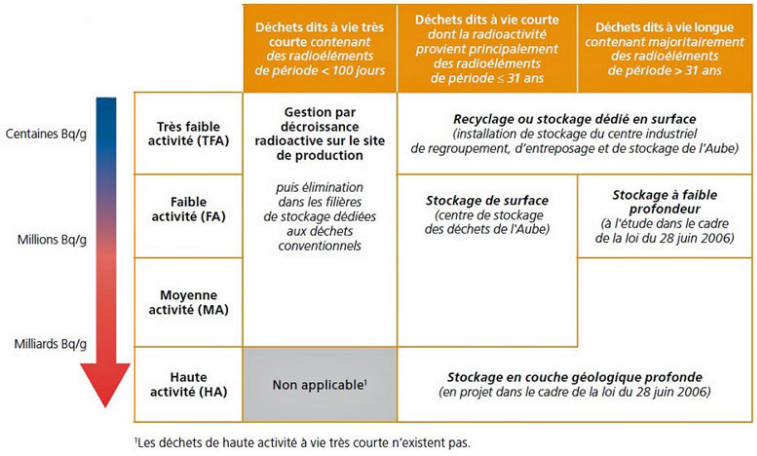

Figure 6. Classification des déchets radioactifs [source ASN]

Ces deux critères, niveau d'activité et période radioactive, permettent de classer les déchets et d'associer à chaque catégorie une ou plusieurs filières de gestion, comme présenté sur la Figure 6. Les déchets les plus dangereux (MAVL et HA) sont les résidus des combustibles nucléaires usés après le traitement qui permet le recyclage de l'uranium et du plutonium. Leur production représente environ 5 % de ce combustible soit une centaine de tonnes par an en France, une quantité somme toute limitée (la capacité de trois camions) qui en facilite le confinement à très long terme. Ils sont vitrifiés et encapsulés dans des containers en inox en attente d'un stockage à grande profondeur dans le centre CIGEO prévu par la loi de 2006 dont la mise en service est prévue par la loi pour 2025.

Pour la gestion ultime des déchets radioactifs, la Grande Bretagne et le Japon ont choisi les mêmes options que la France et la Chine s'apprête à faire de même, la Suède et la Finlande ont choisi le stockage géologique des combustibles usés sans traitement, et la plupart des autres pays entreposent les combustibles usés en attendant de se décider.

6. Accidents des installations nucléaires

6.1. L'échelle de gravité INES

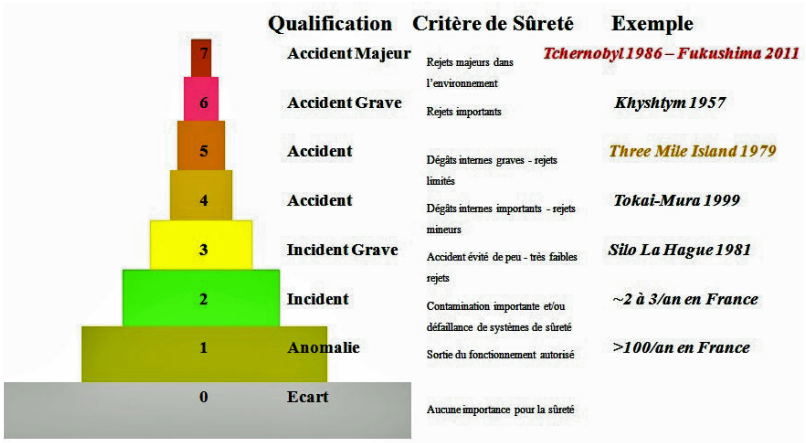

Figure 7. Échelle INES des accidents nucléaires [source: Bertrand Barré]

Les installations nucléaires sont souvent complexes et il n'est pas évident de deviner la gravité d'un incident à la lecture de sa description technique. C'est pourquoi, pour communiquer sur les événements affectant une installation nucléaire, a été créée l'échelle INES (International Nuclear Event Scale), à l'image de l'échelle Richter pour les séismes. L'échelle INES comporte 7 niveaux, de la simple anomalie à l'accident majeur (Figure 7).

Depuis le début de l'ère nucléaire, les réacteurs nucléaires n'ont subi que très peu d'accidents (niveau INES >3), en voici la liste :

Centrale ou réacteur	Pays	Année	Niveau INES
Windscale	Royaume Uni	1957	5
SL1	USA	1961	5
St Laurent	France	1969	4
Lucens	Suisse	1969	4
Three Mile Island	USA	1979	5
St Laurent	France	1980	4
Tchernobyl	URSS	1986	7
Fukushima Daiiichi	Japon	2011	7

Nous n'évoquerons ici que les plus connus, ainsi que les leçons qui en ont été tirées.

6.2. Three Mile Island, TMI, 29 mars 1979

Trompés par une instrumentation ambiguë, les opérateurs de ce réacteur américain ont transformé par leurs interventions néfastes un incident mineur en accident sérieux : un tiers du cœur a fondu, le réacteur presque neuf a été mis hors d'usage, le nettoyage a demandé 14 ans. Le confinement a résisté et les relâchements de radioactivité ont été minimes : Il n'y a eu aucune victime à déplorer, mais l'accident a connu un retentissement considérable dans les médias et le public américain en a été durablement traumatisé.

La grande leçon de TMI est que la sûreté ne dépend pas seulement de la qualité de la machine, mais du couple machine/opérateur. De nombreuses améliorations ont été apportées aux réacteurs nucléaires à travers le monde pour tenir compte du « facteur humain » et partager le retour d'expérience.

6.3. Tchernobyl, 28 avril 1986

Le RBMK est un type particulier de réacteur soviétique conçu pour produire de l'électricité mais aussi du plutonium destiné aux armes nucléaires. Le fonctionnement de RBMK présentait des instabilités à certains régimes. Pour réaliser une expérience de sûreté, les opérateurs ont violé délibérément une série de consignes et provoqué l'emballement de la réaction en chaîne et une **augmentation brutale de puissance** très destructrice. L'explosion de vapeur qui s'en est suivie a détruit un quart du cœur et soufflé le toit du bâtiment. A l'air nu, le graphite du cœur s'est enflammé : l'incendie qui a duré une dizaine de jours a envoyé dans la stratosphère les produits radioactifs volatils qui, au gré des *jetstreams*, ont survolé toute l'Europe, contaminant aléatoirement son territoire en fonction des précipitations et du trajet des aérosols radioactifs.

Une cinquantaine de pompiers et opérateurs sont morts d'irradiation aiguë, et on déplore une vingtaine de morts parmi les milliers d'enfants atteints d'un cancer de la thyroïde provoqué par l'iode radioactif relâché par l'accident. Parmi les « liquidateurs » [4] et les habitants de la ville voisine, Pripyat, il y aura peut-être jusqu'à 4000 morts prématurées par cancer radio induit, mais les dégâts sanitaires dus à l'évacuation sont beaucoup plus importants.

La principale leçon de Tchernobyl a été qu'une telle contamination n'est simplement pas tolérable. En conséquence, les concepteurs de réacteurs ont lancé les centrales dites de troisième génération (EPR, AP 1000, etc.) sur la base d'un critère très exigeant : même la fusion complète du cœur du réacteur ne doit pas entraîner d'évacuation durable des populations voisines.

6.4. Fukushima, 11 mars 2011

Si les deux accidents précédents ont surtout une origine humaine, celui de Fukushima fut provoqué par une catastrophe naturelle. Un séisme exceptionnel (force 9) et le tsunami très puissant qu'il a déclenché ont dévasté la côte nord-est de Honshu, l'île principale du Japon, tuant 20 000 personnes. 14 réacteurs nucléaires étaient répartis sur quatre sites dans la zone dévastée, dont 6 à Fukushima Daiichi. Le séisme a provoqué l'arrêt automatique des réacteurs, mais il a aussi détruit les lignes à haute tension qui reliaient le site de Fukushima Daiichi au réseau. Les 13 diesels de secours alimentant les systèmes de sauvegarde des réacteurs du site ont démarré aussitôt, comme prévu. Mais le tsunami en a ensuite noyé 12, ainsi que les tableaux électriques et les batteries, rendant impossible l'évacuation de la puissance résiduelle (cf. section 1).

Les cœurs des trois réacteurs (parmi six) qui étaient en marche à Fukushima Daiichi lors du séisme ont surchauffé, les gaines du combustible ont réagi avec la vapeur d'eau pour produire de grandes quantités d'hydrogène qui ont provoqué des explosions, et les cœurs ont fondu. Un quatrième réacteur à l'arrêt a été également endommagé.

Les premiers relâchements radioactifs atmosphériques ont été poussés par le vent vers le Pacifique où ils se sont dilués, mais la nuit du 15 mars le vent a tourné et un couloir d'une cinquantaine de kilomètres au nord-ouest du site a été fortement contaminé.

Grâce à des mesures d'évacuation précoce, les populations locales ont été très peu irradiées : on ne s'attend pas à détecter un effet sanitaire des rayonnements sortant du bruit de fond. En revanche, l'évacuation a causé la mort de personnes malades ou âgées.

L'accident de Fukushima a validé l'essentiel des options de la génération 3, mais illustré la vulnérabilité des réacteurs antérieurs : de nouvelles mesures de renforcement de la robustesse des dispositifs de sauvegarde sont en cours ainsi qu'une amélioration des dispositifs de gestion de crise (par exemple, création par EDF de la force d'action rapide FARN capable d'épauler voire de remplacer les opérateurs au cours d'un accident).

L'accident de Fukushima est aussi en train de nous en apprendre beaucoup sur la décontamination des territoires pour permettre le retour des populations évacuées.

7. Traitement et déclin naturel des pollutions radioactives.

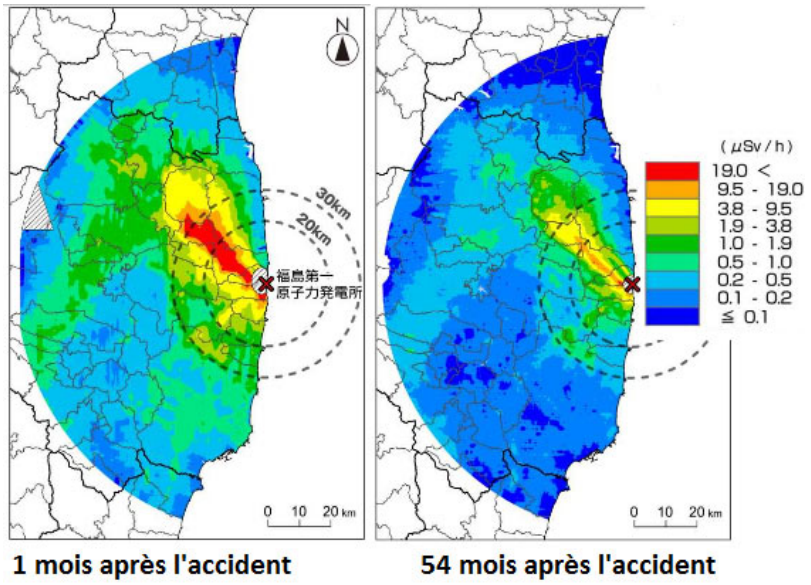

Figure 8. Carte montrant le déclin de la radioactivité du sol après l'accident de Fukushima. Les doses sont exprimées en microsevert/heure (mSv/h). A titre indicatif, le niveau naturel avant accident était de 0,04 mSv/heure et la dose maximale autorisé pour le public en France (lire l'article La radioactivité) est 0,11mSv/h (correspondant à 1 mSv/an). [source NRA, autorité de sûreté japonaise]

Les éléments radioactifs se désintègrent spontanément : au bout de dix périodes [5], leur activité est divisée par mille (2^{10} = 1024). C'est ainsi que les iodes radioactifs responsables des cancers de la thyroïde sont négligeables après deux à trois mois. Passée cette période, ce sont les isotopes du césium ^{134}Cs (période 4 ans) et ^{137}Cs (période 30 ans) qui sont les principaux responsables de la pollution suite à un accident nucléaire.

Mais la nature des sols joue aussi un rôle essentiel que l'on constate dans les zones contaminées par l'accident de Tchernobyl : le césium s'enfonce vite dans les sols argileux dont la radioactivité de surface disparaît en conséquence, alors qu'il est recyclé en permanence par la tourbe. Dans des villages d'Ukraine ou de Belarus, les habitants ont ainsi appris à éviter certaines zones « chaudes » mais savent qu'ils peuvent sans danger vaquer à leurs occupations en dehors de ces zones.

Alors qu'autour de Tchernobyl la zone évacuée reste interdite, 29 ans plus tard, les Japonais font tout pour permettre le retour des populations le plus vite possible, et certaines localités ont ainsi été rouvertes quatre ans après l'accident. Ils mettent en œuvre de nombreuses méthodes de décontamination :

Nettoyage des toits – passage des murs au Karcher

Raclage de la terre sur 5 cm

Labour profond (> 30 cm)

Dépollution par certaines plantes

Défrichages au voisinage des habitations, etc.

Ces méthodes ont prouvé leur efficacité mais génèrent de grandes quantités de déchets à entreposer. Les forêts restent très difficiles à décontaminer, mais personne n'y séjourne en permanence. Quant à l'impact sur la biodiversité naturelle, il semble limité et dépendant des espèces [6], les effets néfastes des radiations étant compensés par la réduction de la pression due aux activités humaines.

Références et notes

Illustration de couverture : Centrale de Saint Alban (document Areva/Y. Geoffray)

[1] Voir définition dans l'article « Radioactivité et réactions nucléaires ».

[2] Pour réduire le risque de détournement du nucléaire civil vers des applications militaires

[3] Les mots « plasma » et « isotope » sont expliqués dans l'article « Radioactivité et réactions nucléaires ».

[4] C'est le nom donné aux personnes qui sont intervenues sur place pour décontaminer les lieux et construire le fameux « sarcophage » pour confiner toute la centrale

[5] Chaque atome radioactif est caractérisé par sa « période » spécifique, temps au bout duquel la moitié des atomes s'est désintégrée.

[6] http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-fukushima-2011/fukushima-2016/D

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** BARRÉ Bertrand (2018), Maîtriser l'énergie nucléaire, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=637

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.