

Les politiques de sûreté nucléaire

No one is in a position to demonstrate that a reactor accident with consequent escape of fission products to the environment will never happen.

Clifford K. Beck, 1967, cité par Walker (2000)

Prenez toutes les autres (techniques) depuis la Révolution Industrielle : elles ont toutes connu des accidents graves.

Massé (1981)

Après avoir étudié les méthodes d'analyse de la sûreté, nous nous intéressons à présent aux politiques publiques qui visent d'une part à établir des objectifs pour la sûreté des installations nucléaires au nom de la société, et de l'autre à s'assurer que ces objectifs de sûreté sont atteints. Ceci passe par la surveillance et le contrôle de la conception, de l'exploitation, des éventuelles modifications, de l'arrêt et du démantèlement des installations nucléaires, ainsi que la préparation à la gestion des accidents, un ensemble de domaines auquel on donne parfois le nom de contrôle de la sûreté nucléaire¹.

Il est usuel, dans les sciences sociales et en particulier en économie, d'étudier les politiques publiques sous deux angles : celui des mesures elles-mêmes, des objectifs qu'elles prétendent atteindre et des moyens qu'elles mettent en œuvre ; et celui des institutions chargées de les concevoir, de les adopter et de les implémenter. Nous adoptons tour à tour ces deux points de vue, en nous intéressant principalement aux cas des États-Unis et de la France.

Nous ne nous donnons pas pour objectif d'étudier l'ensemble de ce sujet en détail et avec profondeur, mais simplement d'établir quelques observations susceptibles d'apporter des éléments de réponse à notre interrogation principale : comment les décisions relatives à la sûreté nucléaire sont-elles prises à partir des approches analytiques décrites dans les parties précédentes ? Pour cela,

1. Quitte à anticiper sur le contenu de ce chapitre, notons ici qu'en France, l'ASN est une autorité de contrôle alors que son équivalent aux États-Unis, la NRC, est une agence de régulation.

il nous semble nécessaire de revenir sur la période historique qui a vu la naissance de l'industrie nucléaire civile et l'élaboration des premières politiques de sûreté. Bien entendu, il ne s'agit pas de proposer ici une lecture historique novatrice, mais de rappeler quelques éléments largement reconnus par les historiens, et qui nous semblent importants pour la compréhension des questions et des approches actuelles de sûreté nucléaire. Nos principales sources sont des témoignages d'acteurs de cette époque (notamment Goldschmidt (1980), Jeanneney (1981), Massé (1981), Tanguy (1988) et Boiteux (1993) en France, Okrent (1981) aux États-Unis) ainsi que des travaux de recherche plus récents (Balogh (1991), Walker (1992, 2000) et surtout Foasso (2003), auquel nous empruntons largement son récit historique de la naissance de la sûreté nucléaire).

La première partie du chapitre traite des années 1945-1967, au cours desquelles se sont posées les premiers problèmes de décision relatifs à l'existence d'une l'industrie nucléaire, et dont la sûreté ne représentait qu'un aspect. La deuxième et la troisième parties décrivent la constitution de la politique de sûreté respectivement aux États-Unis et en France, depuis la fin des années 1960 à nos jours. La dernière partie propose une discussion d'ensemble de la manière dont les risques liés aux activités nucléaires civiles sont pris en compte dans ces deux pays.

4.1 Les décisions initiales (1945-1967)

4.1.1 La difficile séparation entre atomes pour la guerre et atomes pour la paix (1945-1953)

4.1.1.1 Une technologie développée en marge de la course aux armements atomiques

Dans l'immédiat après-guerre, les principales puissances alliées, bien que conscientes des nombreuses potentialités de la technologie nucléaire naissante dans le domaine civil, avaient accordé une totale priorité à ses applications militaires.

La loi américaine de 1946 (*Atomic Energy Act* ou loi Mac Mahon), qui définissait le cadre du développement de l'énergie nucléaire aux États-Unis, mettait en place une politique du secret et du contrôle qui a été qualifié d'isolationnisme atomique (Goldschmidt, 1980). L'objectif était de maintenir l'exclusivité dont jouissaient les États-Unis en limitant l'accès des autres pays à la fois aux connaissances techniques et aux ressources en minerai d'uranium nécessaires à la réalisation de la fission. Sur le plan intérieur, la loi réservait à l'État fédéral le monopole de l'activité nucléaire, concentrée dans la production industrielle et l'amélioration de l'armement atomique. Les applications commerciales étaient interdites. Afin de contrôler et d'orienter le développement de la puissance atomique dans le pays, la loi créait une agence spécifique, l'*Atomic Energy Commission* (AEC), qu'elle plaçait sous le contrôle d'un comité mixte du Congrès.

L'AEC reprenait des mains de l'armée l'immense complexe industriel mis sur pied pendant la

guerre pour mener à bien le projet Manhattan et fabriquer en quantité suffisante les deux substances employées dans les bombes atomiques : l'uranium 235 et le plutonium². Ce complexe comprenait notamment les deux grandes centrales (piles dans le vocabulaire de l'époque) de Hanford, dans l'état de Washington, qui étaient destinées à produire du plutonium et dont la chaleur produite était évacuée par les eaux de la rivière Columbia, sans aucune tentative de la récupérer. L'Agence entreprenait également de financer et d'orienter les projets de recherche militaire dans le domaine atomique, notamment ceux s'intéressant à la combustion contrôlée à des fins de propulsion. C'est au sein de l'un de ces projets, celui de sous-marin nucléaire, que fut mis au point en 1953 un réacteur utilisant des éléments d'uranium métal gainés de zirconium, modéré et refroidi à l'eau ordinaire et ancêtre de la majorité des réacteurs en fonctionnement dans le monde.

L'orientation militariste américaine était partagée par le Royaume-Uni et l'URSS, pays les plus avancés après les États-Unis dans la maîtrise de la technologie nucléaire au sortir de la guerre (avec le Canada).

Au Royaume-Uni, le développement militaire et civil de l'énergie atomique était placé dès 1946 sous l'autorité d'un *Controller of Production* attaché au *Ministry of Supply*. Bien que handicapé par le retrait américain, le pays conservait suffisamment d'autonomie pour s'engager seul dans la fabrication de la bombe, notamment en construisant deux réacteurs destinés à la production de plutonium à Windscale. Ces réacteurs utilisaient l'uranium naturel, étaient modérés par le graphite et refroidis par air, ce qui permettait d'envisager une récupération aisée de la chaleur dégagée. Leur succès de la méthode de refroidissement par gaz conduisit à la décision, prise en deux temps en 1953 et 1955, de construire à Calder Hall huit centrales « à double objectif » : d'une part accroître la production militaire de plutonium, et de l'autre produire de l'électricité. En 1954, la décision était prise de placer le monopole de l'énergie nucléaire sous la supervision d'une autorité indépendante inspirée du modèle de l'AEC, la *United Kingdom Atomic Energy Authority* (UK AEA). En 1956, la première centrale à uranium naturel, graphite et gaz carbonique (UNGG) voyait le jour.

2. Deux éléments se prêtent facilement à la fission nucléaire : l'uranium 235 et le plutonium 239. Une masse de quelques kilos de l'une ou l'autre suffit à entretenir une réaction en chaîne, que celle-ci soit orientée vers l'explosion ou contrôlée, par freinage et absorption des neutrons émis, à des fins de récupération de la chaleur et de production d'électricité.

L'uranium 235 est présent à raison de sept parties pour mille dans l'uranium naturel, dont l'essentiel est constitué d'isotope 238. Pour entretenir une réaction en chaîne explosive, il doit être bien plus concentré, et donc au préalable isolé par un procédé de séparation isotopique pour produire de l'uranium enrichi de qualité militaire. Dans une réaction contrôlée, toutefois, la relative pauvreté de la matière fissile en uranium 235 peut être compensée dans une certaine mesure par le freinage des neutrons issus de la fission, qui augmente leur capacité à provoquer de nouvelles réactions. Pour cela, l'uranium doit être placé en présence d'un modérateur qui ralentisse les neutrons sans trop les absorber. Diverses substances ont cette propriété : l'eau lourde, composée d'oxygène et de deutérium (isotope de masse 2 de l'hydrogène) et le graphite (carbone pur) permettent d'obtenir une réaction en chaîne dans une masse de plusieurs tonnes d'uranium naturel ; l'eau ordinaire suffit si la teneur de l'uranium en isotope 235 est portée à 3,5% au minimum, et des quantités moindres de combustible sont alors nécessaires, ce qui permet de réduire significativement la taille des réacteurs.

Le plutonium n'existe pas à l'état naturel mais il est obtenu comme résidu de la combustion de l'uranium, par transmutation de l'isotope 238.

La matière fissile concentrée utilisée dans les bombes peut donc être obtenue de deux façons : par séparation de l'uranium 235 dans des usines d'enrichissement ou par production de plutonium dans des centrales.

La situation était différente en France. Cette dernière avait pris un certain retard par rapport aux États-Unis et au Royaume-Uni sur les plans scientifique et technique durant la guerre, qu'il s'agissait pour elle de compenser avant toute autre chose. Elle fut donc la seule à placer le développement nucléaire sous l'égide d'un organisme civil à vocation principalement scientifique. Créé dès 1945, le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) se vit confier un mandat mixte : explorer les possibilités de la fission à la fois à des fins de Défense nationale et dans la production d'électricité. En raison des faibles quantités d'uranium naturel dont la France disposait dans le contexte international de l'époque, l'ambition initiale devait être limitée à la construction de réacteurs de recherche à faible puissance, notamment celle de la pile Zœ (puissance Zéro, Oxyde d'uranium, Eau lourde) entreprise dès 1946 dans le centre de Fontenay-aux-Roses. Ce n'est qu'au début des années 1950, grâce notamment à la découverte de minerai d'uranium dans le Limousin et sous l'impulsion du premier plan quinquennal, que la France s'est engagée dans la production à vaste échelle de plutonium destiné, en particulier, à mettre au point la bombe française. Le Plan prévoyait notamment la construction de deux grandes centrales modérées au graphite à Marcoule, initialement sans récupération de la chaleur. Ce schéma fut toutefois modifié en 1953 avec l'ajout d'une unité de production d'électricité, permise grâce à l'adoption d'une méthode de refroidissement par gaz carbonique comprimé mise en œuvre dans la deuxième pile expérimentale de Saclay. La France s'engageait ainsi, parallèlement au Royaume-Uni, dans la filière à double objectif UNGG³.

4.1.1.2 Un tournant politique

Le discours *Atoms for Peace*, prononcé en décembre 1953 par le président Eisenhower devant l'Assemblée générale des Nations unies, est souvent présenté comme l'acte de naissance politique des applications nucléaires civiles. Or *Atoms for Peace* constituait avant tout l'élément-clé d'une stratégie (en partie couronnée de succès) de détente et de repositionnement des États-Unis dans un monde encore traumatisé par l'usage de la bombe atomique à Hiroshima et Nagasaki. L'Union Soviétique avait créé une surprise et un émoi considérables parmi les pays occidentaux en réalisant sa première explosion nucléaire quelques années plus tôt, en août 1949. Les États-Unis avaient répliqué en 1950 en annonçant leur intention de fabriquer une bombe à hydrogène d'une puissance considérablement plus élevée que les armes existantes. En 1952, le Royaume-Uni était à son tour parvenu à faire exploser une bombe nucléaire. Enfin, en 1953, l'Union Soviétique avait de nouveau créé la surprise en provoquant une explosion thermonucléaire qui indiquait qu'elle était proche, elle aussi, de maîtriser la bombe H. L'escalade ainsi engagée entre les deux grandes puissances était coûteuse, périlleuse et produisait un effet déplorable pour l'image des États-Unis dans le monde.

3. Entre 1952 et 1966, le CEA construisit au total neuf réacteurs UNGG, notamment celui de Chinon qui était, au moment de sa mise en œuvre, l'unité de production d'électricité la plus puissante au monde. Ces réacteurs sont aujourd'hui tous déclassés.

Mais surtout, elle démontrait l'échec de la politique américaine d'isolationnisme, qui semblait handicaper le développement du pays dans un secteur prometteur sans avoir les effets escomptés sur le plan militaire.

La proposition d'Eisenhower consistait en une *réaffectation* des substances fissiles employées dans la production d'armements à des usages pacifiques, sous l'égide d'un organisme international qui veillerait à la coordination du programme dans les pays concernés. Favorablement accueillie par l'Union Soviétique, elle a finalement conduit à trois avancées importantes en matière de coopération internationale dans le domaine nucléaire : la levée du secret et la reprise de la collaboration scientifique, notamment à l'occasion de deux grandes conférences internationales sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, tenues à Genève en 1955 et 1958 ; la création, obtenue des soviétiques en contrepartie du point précédent, de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, chargée du contrôle international de l'usage civil de l'énergie nucléaire ; enfin, l'institution de l'énergie nucléaire comme l'un des axes de reconstruction et de réunification de l'Europe de l'Ouest, incarné par la communauté européenne Euratom (1957) et par l'Agence Européenne de l'Énergie Nucléaire (1958), affiliée à l'Organisation Européenne de Coopération Économique⁴ qui supervisait la distribution des fonds du Plan Marshall.

Aux États-Unis, la révision de l'*Atomic Energy Act*, décidée en 1954 dans le prolongement du discours d'Eisenhower, modifiait radicalement la donne nucléaire intérieure : l'AEC était chargée de promouvoir l'utilisation civile de l'énergie nucléaire, notamment en encourageant l'arrivée d'acteurs privés, qui pouvaient désormais obtenir des licences pour la construction et l'exploitation de centrales nucléaires. Dès 1953, le promoteur et pilote du projet de sous-marin nucléaire, le commandant de marine Rickover, obtint l'accord de l'AEC pour la construction d'une première centrale civile reprenant le principe du réacteur sous-marin pour produire de l'électricité. La construction en fut confiée à la firme privée Westinghouse et en décembre 1957, le premier réacteur à eau pressurisée (REP)⁵ américain entra en fonctionnement à Shippingport (Pennsylvanie).

Le rôle de promotion joué par l'AEC et, d'une façon plus générale, par les autorités publiques américaines, alla en se renforçant au long des années 1950 en raison des réticences affichées par les entreprises privées de production d'électricité. Il apparaissait, d'une part, que la plupart de celles-ci avaient une taille insuffisante pour supporter les coûts fixes induits par la fabrication et l'exploitation d'une centrale. Lors de la construction de la centrale de Shippingport, une solution originale avait été trouvée à ce problème sous forme d'un montage public-privé : l'AEC avait financé la construction du réacteur proprement dit et en restait propriétaire ; elle avait également proposé une mise à disposition gratuite du combustible durant les premières années d'exploitation ; de son

4. Préfigurations respectives de L'Agence de l'Énergie Nucléaire (AEN) et de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE).

5. *Pressurized water reactor* (PWR) en américain.

côté, l'opérateur privé en charge de l'exploitation avait couvert les coûts de construction de la partie non nucléaire et s'était engagé à acheter à prix élevé la chaleur produite. La technologie des REP mise en œuvre à Shippingport n'était cependant pas compétitive à cette époque et l'AEC y avait eu recours pour des motifs de prestige international. Ses adversaires l'estimaient trop grossière et sans avenir, au point où ils avait détourné son acronyme anglais en *Power Without Reason* (Balogh, 1991, p.107). L'AEC lança donc dès 1955 un programme de « démonstration » de puissance à travers lequel elle proposait un certain nombre d'avantages supplémentaires aux entreprises désireuses de se lancer dans l'aventure, notamment de financer une part importante des coûts de recherche et de développement de futures centrales. En 1956, une nouvelle loi fut adoptée qui exemptait de la législation sur la concurrence les opérateurs désireux de s'allier pour partager les coûts de construction et les bénéfices technologiques d'une centrale. Il restait, néanmoins, le problème des risques financiers liés à un possible accident nucléaire. L'industrie de l'assurance proposait alors une couverture de la responsabilité civile à hauteur de 60 millions de dollars, ce qui était estimé très inférieur aux dommages engendrés par un accident grave (voir ci-dessous). En 1957, le Congrès des États-Unis adopta le *Price-Anderson Act* qui garantissait aux opérateurs de centrales nucléaires une prise en charge intégrale par l'État des dommages au-delà de ce plafond, à hauteur de 500 millions de dollars. La loi fut adoptée initialement pour une durée de dix ans, qui devait suffire, aux yeux du législateur, à montrer la sûreté de fonctionnement des centrales et rendre le risque nucléaire totalement assurable⁶.

Il convient de noter que la politique américaine de soutien à l'émergence d'une industrie électronucléaire attire l'attention en raison à la fois de l'ampleur du revirement de 1953-54 et de l'organisation du secteur de l'électricité, principalement privé et faiblement concentré. Dans les autres pays engagés dans la construction de centrales civiles (ou à double objectif), cette politique était tout aussi marquée mais moins visible, car elle avait été mise en place de façon plus progressive au sein de structures verticalement intégrées et contrôlées par l'État. En particulier, ces États ont tous accepté de tenir le rôle d'assureurs en dernier ressort au bénéfice de l'industrie électronucléaire, généralement de façon implicite.

6. Ce schéma assurantiel a été depuis reconduit six fois, et il s'étend désormais jusqu'en 2025. La subvention qu'il procure aux opérateurs de centrales a été récemment estimée à 600 000 dollars par réacteur et par année par l'office du budget du Congrès (CBO, 2008). L'étude, qui se fonde sur les probabilités d'accident produites par l'EPS de niveau 2 de la centrale de Surry (NRC, 1990) *sans* prendre en compte les incertitudes afférentes (notamment celle liées à l'incomplétude de l'analyse), évalue à $3 \cdot 10^{-8}$ la probabilité d'un accident entraînant des dommages de 500 milliards de dollars.

4.1.2 Naissance des doctrines de sûreté (1954-1967)

4.1.2.1 Considérations de sûreté lors du développement des premières centrales

Les agences telles que l'AEC, le CEA et la UK AEA avaient, en marge de leur mission principale de promotion de la technologie nucléaire, également la charge d'en contrôler les dangers. Aux États-Unis, l'AEC mit ainsi en place dès 1947 le *Reactor Safeguards Committee* (RSC), constitué de scientifiques renommés, afin de la conseiller au sujet de la sûreté des centrales nucléaires.

À partir du début des années 1950, des doctrines de sûreté sont venues progressivement s'ajouter aux simples pratiques d'ingénierie mises en œuvre au cours de la décennie précédente dans la construction et le fonctionnement des réacteurs militaires ou de recherche. La tâche des premiers régulateurs de la sûreté était redoutable, puisqu'aucune technologie ne s'était jusqu'à lors développée aussi vite et n'avait représenté autant de promesses et de dangers à la fois. Les intéressés, qui étaient souvent des scientifiques engagés dans le développement des premiers réacteurs, étaient bien sûr conscients de ces dangers, comme en témoigne l'extrait suivant d'une lettre d'Edward Teller, père de la bombe H américaine, premier président du RCS et pionnier de la sûreté nucléaire, au président du comité mixte du Congrès :

"nuclear plants contain radioactive poisons. In a nuclear accident, these poisons may be liberated into the atmosphere or into the water supply. In fact, the radioactive poisons produced in a powerful nuclear reactor will retain a dangerous concentration even after they have been carried downwind to a distance of ten miles. Some danger might possibly persist to distances as great as 100 miles" (Teller, 1953).

Ces spécialistes semblaient cependant très confiants dans leur capacité à contrôler ces dangers. Dans la même lettre, Teller déclarait ainsi :

"The main factors which influence reactor safety are, in my opinion, reasonably well understood. There have been in the past a few minor incidents, all of which have been caused by neglect of clearly formulated safety rules. Such occasional accidents cannot be avoided. It is rather remarkable that they have occurred in such a small number of instances. I want to emphasize in particular that the operation of nuclear reactors is not mysterious and that the irregularities are no more unexpected than accidents which happen on account of disregard of traffic regulations"(Teller, 1953).

De même, on pouvait lire dans le premier rapport de la UK AEA en 1954 :

"The first important thing to recognise is that it is impossible for an 'atomic explosion' to take place in a power reactor. If nuclear power facilities are properly designed any accidents that may occur will be no more dangerous than accidents in other industries. [...] The reactors that will be built for the commercial production of electricity will

present no more danger for people living nearby than many existing industrial works that are sited within built-up areas. Nevertheless the first stations, even though they will be of inherently safe design, will not be built in heavily built-up areas" (cité par Foasso (2003, p. 103)).

En France, quelques années plus tard, le premier Cours de Génie Atomique élaboré au CEA professait :

« Les installations atomiques posent des problèmes de sûreté qui sont dans leur ensemble du même ordre de grandeur que ceux posés par certaines installations classiques. C'est ainsi que l'explosion dans un grand port d'un navire chargé de munitions ou d'essence, ou l'incendie d'un dépôt de gaz asphyxiants au milieu d'une ville, peuvent entraîner autant de morts, de maladies incurables ou de dégâts matériels qu'un grave incident nucléaire sur un navire ou une centrale atomique. Cependant, certains facteurs conduisent à attacher à la sûreté en matière atomique une importance encore plus grande qu'en matière classique : [...] les répercussions psychologiques d'accidents nucléaires peuvent être plus grandes étant donné la sensibilité des opinions publiques en ce domaine » (De Valthaire, 1960).

D'un point de vue actuel, l'analogie entre une technologie aussi complexe que celle des réacteurs nucléaires, pour laquelle on ne disposait alors d'aucun recul historique et d'autres issues de la révolution industrielle, totalement maîtrisées et étudiées depuis des décennies sur le plan statistique⁷ est surprenante. Elle semble témoigner d'une confiance excessive dans la compréhension de la sûreté des réacteurs et d'une représentation assez naïve des interactions entre homme et machine. En revanche, l'importance accordée aux aspects psychologiques et aux réactions de l'opinion publique peuvent paraître surprenantes d'actualité.

L'éclairage historique privilégie cependant une tout autre interprétation de ces déclarations (Foasso, 2003, pp. 78 et suivantes). La préoccupation des opinions publiques occidentales en matière nucléaire ne se portait alors pas vers les centrales, mais vers l'arme atomique. Or, comme nous l'avons vu, la technologie nucléaire civile avait été dérivée des usages militaires, et lui était encore étroitement associée. Les scientifiques appelés à conseiller les autorités publiques en matière de sûreté étaient alors partagés entre deux objectifs : d'une part, de contribuer au développement de l'énergie nucléaire civile en démystifiant son usage, et notamment en luttant contre son association, dans l'esprit du public, à la bombe atomique ; d'autre part d'imposer une approche rigoureuse de la sûreté nucléaire, quitte à retarder pour cela le développement industriel. La thèse selon laquelle il était à la fois possible et nécessaire de garantir la sûreté des centrales nucléaires (à quelques

7. À titre d'exemple, les premières statistiques fédérales d'accidents de la route ont été collectées aux États-Unis au cours des années 1910 (Eastman, 1984).

incidents mineurs près, tous dus à la négligence des hommes) permettait de ménager ces deux objectifs.

Pour protéger les populations, les premières préférences des scientifiques américains s'inscrivaient dans la droite ligne du projet Manhattan, dont le principe central de sûreté était d'éloigner les sites nucléaires, qui n'étaient alors pas confinés, des zones densément habitées. En 1950, le RSC édicta une première règle de sûreté en ce sens concernant le choix des sites devant accueillir des centrales nucléaires de puissance. La règle définissait le rayon d'une zone d'exclusion autour d'une centrale en fonction de la puissance thermique de celle-ci.

La conception restrictive des scientifiques ne convenait cependant pas aux responsables industriels car elle limitait le choix de sites adaptés, imposait l'achat de surfaces considérables de terrain et supposait aussi la construction d'importantes lignes électriques dans l'hypothèse de construction de centrales civiles. En 1951, l'AEC se dota d'un second comité d'experts, cette fois provenant en large part de l'industrie et traitant spécifiquement du problème des sites, l'*Industrial Committee on Reactor Location Problems*. Deux ans plus tard, les deux comités fusionnèrent au sein de l'*Advisory Committee on Reactor Safeguards* (ACRS), placé sous la direction C. Rogers McCullough. McCullough était un ingénieur ayant mené une grande partie de sa carrière au sein de la firme Monsanto. Tout en assurant la présidence de l'ACRS, il fut successivement employé par Monsanto, puis par l'AEC elle-même et de nouveau par Monsanto entre 1953 et 1957, fournissant ainsi un exemple précoce des relations délicates entre agences réglementaires, entreprises privées et experts⁸ (Balogh, 1991, p.132).

Il faut noter que les responsables industriels étaient également nombreux à considérer qu'en raison de l'analogie avec la bombe atomique, les premières phases du développement de l'industrie nucléaire seraient particulièrement sensibles ; c'est d'ailleurs probablement l'un des facteurs qui expliquaient leur réserve. Dans des conditions où un accident important pouvait constituer un faux pas fatal, un niveau élevé de sûreté devait non seulement être conciliable avec leurs objectifs économiques, mais même en faire partie. Dans les termes de la théorie économique, les coûts sociaux d'un accident étaient donc, au moins en partie, internalisés durant cette phase sensible de décollage de la technologie. La divergence des industriels avec les scientifiques portait sur les moyens à mettre en œuvre pour la sûreté des centrales. L'alternative qu'ils préconisaient à l'éloignement était le confinement : entourer les réacteurs d'un bâtiment étanche et résistant à la pression qui permettrait de retenir les gaz radioactifs émis par un éventuel accident. Selon la communication de deux ingénieurs de la General Electric Company à la première conférence de Genève, la présence d'une telle enceinte et de dispositifs supplémentaires de protection permettrait de rendre les centrales « intrinsèquement sûres » (Parker et Healey, 1955).

8. Désignées en anglais par l'expression des « portes tournantes » (*revolving doors*).

La nouvelle loi de 1954 clarifia les responsabilités de l'AEC en matière de sûreté, qui continuaient à coexister avec les objectifs de développement des usages à la fois civils et militaires de l'énergie nucléaire : la Commission devait veiller à avoir une *assurance raisonnable* que les applications industrielles n'engendreraient pas de *risque indu* pour la santé et la sécurité de la population.

Dans les deux années qui suivirent, le premier réel débat sur la sûreté des centrales divisa la communauté nucléaire américaine. Il portait sur l'arbitrage souhaitable entre l'importance de la zone d'exclusion autour d'une centrale et les dispositifs de sûreté dont elle était équipée (notamment l'enceinte de confinement). La bataille fut gagnée par les partisans des dispositifs de sûreté et en 1956, l'AEC décida d'un assouplissement de ses règles de localisation alors même que la puissance des centrales en conception s'accroissait de façon marquée.

La loi de 1954 avait également défini les étapes de la procédure d'obtention d'une licence de construction et d'exploitation de centrale nucléaire, qui comprenaient notamment la réalisation d'un rapport préliminaire des dangers (*preliminary hazards summary report*). Pour les opérateurs privés, il s'agissait désormais de *démontrer* qu'ils avaient pris des dispositions suffisantes pour garantir la sûreté de leur centrale, même si le régulateur ne disposait pas encore pour cela d'une doctrine formelle transcrite sous forme de principes, de normes et de mesures.

4.1.2.2 La lente marche vers la quantification de l'incertitude

Dans un article présenté à la première conférence de Genève en 1955, trois membres de l'ACRS faisaient une synthèse de la doctrine du Comité en matière de sûreté. Cet article évoquait déjà les trois fonctions de sûreté décrits au chapitre précédent (la sous-criticité, le refroidissement et le confinement), faisait la preuve d'une parfaite compréhension des conséquences catastrophiques d'un accident majeur et proposait une définition de la sûreté où pointait déjà la notion de risque résiduel acceptable : « ce que l'on entend par sûreté du réacteur, c'est le fait de réduire ces dangers à un risque calculé et acceptable aussi minime que possible » (McCullough, Mills et Teller (1955) cités par Foasso (2003, p.81)).

Mais quel était ce risque ? L'étude WASH-740 publiée par l'AEC en 1957 tentait pour la première fois d'évaluer les conséquences maximales d'un accident nucléaire en se plaçant sous l'hypothèse que les dispositifs de sûreté avaient failli. En considérant un réacteur d'environ 150 MWe situé à 30 kilomètres d'une ville d'un million d'habitants, et un accident où la moitié des produits de fission présents dans le cœur en fin de cycle du combustible seraient dispersés, elle évaluait les dommages à 3 400 morts, 40 000 personnes contaminées, 400 000 km^2 de terres agricoles contaminées et un coût total de 7 milliards de dollars de l'époque. L'étude s'ouvrait par un chapitre sur la probabilité d'un tel accident, pour exclure en termes définitifs la possibilité de la connaître, tout en énumérant avec une remarquable prescience les trois méthodes qui permettraient au moins, vingt ans plus tard, son

évaluation :

"The probability of occurrence of publicly hazardous accidents in nuclear power reactor plants is exceedingly low. [...] One fact must be stated at the outset : no-one knows or will ever know the exact magnitude of this low probability of a publicly hazardous reactor accident. In trying to establish some estimation of this quantity, three possible approaches might be used :

1. Operate enough reactors for a sufficient length of time to obtain an indication of the accident probability.
2. Give careful consideration and approximate numerical values to all separate factors which would either prevent or cause such an accident, then try to calculate, or guess, the composite result of these factors and hence the likelihood of occurrence of accidents.
3. Obtain a weighted average of the best judgements and judicious opinions of the most experienced and knowledgeable experts in the field" (AEC, 1957, p.3).

L'étude estimait ces pistes impraticables car trop incertaines, mais les explorait malgré tout, certes pas de façon approfondie mais assez pour citer, à titre d'exemple, des probabilités subjectives attribuées par des experts à différents scénarios accidentels. Concernant un accident majeur avec rejets massifs de substances radioactives, ces probabilités étaient comprises entre 10^{-5} et 10^{-9} par réacteur et par an, et l'étude proposait même un calcul en espérance sur la base de la borne supérieure de cet intervalle : le résultat était de trois personnes tuées en moyenne par an par de tels accidents dans le pays, que l'étude comparait aux 40 000 victimes des accidents de la circulation. L'étude estimait ensuite que l'objectif ultime des évaluations de sûreté n'était pas de calculer les probabilités d'accident, mais de s'assurer que ces probabilités étaient extrêmement faibles. Le chapitre se terminait sur ces mots :

"Thus, since there is protection against 'credible' accidents, no damages to the public will occur unless 'incredible' accidents take place. It must be recognized, of course, that errors in judgement can be committed, with resulting occurrence of what was believed to be an "incredible" accident. Nevertheless, the consistent and rigorous execution of these procedures for every reactor warrants *a considerable degree of confidence* that safeguards against serious accidents have been incorporated, and that the probabilities of such occurrences are small" (AEC, 1957, p.6, nous soulignons).

L'étude WASH-740 constituait une analyse remarquable par sa relative objectivité et par l'étendue des phénomènes examinés. Toutefois, comme le montrent ces extraits, elle annonçait déjà l'inconfort de la position de analystes de sûreté face à la notion de probabilité et préfigurait le « cadre de la probabilité de fréquence » (voir la sous-section 3.4.2.2) : la probabilité d'un accident est ici considérée comme une grandeur objective qu'il est impossible de connaître, mais éventuellement possible

d'estimer ; pour cela, on peut s'en remettre à des croyances d'experts, c'est-à-dire des probabilités subjectives ; mais l'incertitude du résultat (c'est-à-dire, en l'espèce, les écarts entre probabilités subjectives) rend son utilisation délicate ; on attribue finalement une probabilité subjective élevée (un degré de confiance considérable, sans plus de précision) au fait que la probabilité objective d'accident est petite.

L'argument de WASH-740 à propos de la faiblesse très probable de la probabilité d'accident ne permit pas de compenser l'impact des conséquences catastrophiques que décrivait l'étude, et sa publication conduisit à une série de réactions très négatives. L'AEC tenta de les circonscrire rapidement, tout en prolongeant le raisonnement amorcé dans WASH-740, à travers le concept d'Accident maximum crédible (AMC). L'AMC constituait l'événement le moins vraisemblable et le plus grave auquel on estimait devoir se préparer. Pour l'obtenir, on devait commencer par passer en revue tous les scénarios d'accident que l'on parvenait à identifier pour une installation, puis écarter ceux qui semblaient tout à fait improbables selon le jugement subjectif d'experts. Il n'était plus nécessaire de considérer l'éventualité de ces accidents possibles mais « incroyables » et de chercher à prévoir leurs conséquences.

Le concept d'AMC a joué un rôle fondamental dans la constitution de l'approche déterministe de la sûreté en fournissant un ancrage à l'activité naissante de contrôle et de régulation. Les industriels étaient désormais vigoureusement engagés dans le développement de l'énergie nucléaire, et exigeaient de disposer de normes sur lesquelles s'appuyer⁹. L'AEC, pour sa part, avait besoin de concepts opérationnels qui puissent être appliqués de façon uniforme aux différents types de centrales à l'étude. En 1958, un article de représentants de l'AEC à la deuxième conférence internationale de Genève décrivait les premiers éléments d'une doctrine où étaient énoncés certains des principes futurs de l'approche déterministe, et où l'AMC jouait un rôle fondamental (Beck, Mann et Morris, 1958) :

- la nécessité de vérifier la qualité non seulement de conception, mais aussi de réalisation et de conduite de l'installation ;
- l'intégration de systèmes de protection mutuellement indépendants (notamment différents confinements de la matière radioactive) ;
- enfin, en se plaçant sous l'hypothèse de l'accident maximal, la garantie que ses conséquences (en termes de doses reçues par une personne située à l'extérieur de la centrale) ne dépasseraient pas une certaine limite considérée acceptable.

Dans une autre contribution présentée à la même conférence, Farmer et deux de ses collègues de la UK AEA présentèrent cependant les prémisses d'une approche alternative (Farmer, Fletcher et Fry,

9. Selon les mots de François Cogné, spécialiste français de la sûreté et directeur de l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire : « Devant la montée des demandes des spécialistes de la sûreté, les concepteurs et les réalisateurs, telles des grenouilles qui demandent un roi, ont été les premiers à demander de figer les règles, de "baliser le champ de mines" ; ils ont été servis, tout particulièrement aux États-Unis » (Cogné, 1984, p.21).

1958). L'objectif, dans leur esprit, était de « réduire les risques jusqu'à un niveau de probabilité assez bas pour être socialement et économiquement acceptable ». Il fallait donc s'intéresser au risque, ce qui excluait de sélectionner les événements sur la base de leur seule probabilité comme le supposait la méthode de l'AMC. Pour cela, il fallait se donner un modèle théorique de l'installation, fondée sur l'analyse conceptuelle des défaillances et sur les probabilités. Cette représentation devrait être validée ou amendée sur la base de l'expérience d'exploitation des centrales, et l'on pourrait notamment extrapoler la probabilité des défaillances importantes et rares à partir de l'observation de dysfonctionnements et d'erreurs mineures et plus fréquentes. Ceci supposait que soit créé un système de classification des événements importants pour la sûreté et que les données correspondantes soient recueillies dans toutes les centrales en fonctionnement. Les britanniques ont été les premiers à mettre effectivement sur pied un tel système en 1959. Outre qu'elle posait ainsi les fondements de l'approche probabiliste, la contribution de Farmer, Fletcher et Fry comportait un certain nombre de propositions qui firent date :

- définir un domaine de fonctionnement sûr et équiper le réacteur de systèmes de contrôle et d'instrumentation qui le ramènent à l'intérieur de ce domaine à chaque fois qu'il en sort ;
- agir à la fois sur la probabilité des accidents, définis par une excursion du réacteur hors de son domaine de fonctionnement sûr, et sur leurs conséquences pour le réacteur et pour les hommes ;
- concevoir l'enveloppe du combustible et celle du fluide réfrigérant comme deux barrières étanches successives empêchant la dispersion des radionucléides ;
- préférer au principe de sûreté intrinsèque, qui suppose une très grande fiabilité des systèmes de contrôle et de protection, celui de redondance.

On peut distinguer là des aspects importants de ce qui sera progressivement formalisé comme la méthode de la défense en profondeur : le premier niveau de la défense, les principes de prévention et de maîtrise, la méthode des barrières formalisée par la suite par les analystes français, et enfin le principe de défaillance unique.

Malgré cette critique en creux du concept d'AMC, celui-ci s'imposa durant les années 1958-1967 comme le fondement des normes de sûreté, particulièrement aux États-Unis. Farmer reprit l'attaque en 1964, lors de la troisième conférence internationale de Genève, puis lors d'un colloque sur la sûreté des réacteurs organisé en 1967 par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, cette fois de façon plus frontale :

'There is no logical way of differentiating between "credible" and "incredible" accidents; the "incredible" is often made up of a combination of very ordinary events - for example, the breakdown or deterioration that occurs in normal plant and their measuring instruments; and the "credible" may actually be exceedingly improbable. The

logical way of dealing with this situation is to seek to assess the whole spectrum of risks in a quantity-related manner' (Farmer, 1967, p.304).

Le cœur de la critique de Farmer était donc l'absence d'une démarche systématique d'identification des scénarios accidentels fondés sur une représentation théorique des centrales. Les tenants de l'AMC justifiaient leur démarche en arguant que la prise en compte de l'accident maximal, que l'on considérait être la perte de réfrigérant, permettait de bénéficier par la même occasion d'une protection contre les accidents plus fréquents et moins graves. Farmer leur répondait que des événements plus fréquents et moins graves pourraient bien se combiner pour aboutir à un accident « incroyable ».

Dans le même article, Farmer représentait pour la première fois son célèbre diagramme, dans lequel il définissait la limite d'acceptabilité des risques sous forme d'une droite décroissante dans le plan (rejets, fréquence). Il fixait arbitrairement la pente de cette droite à $-1,5$, de sorte qu'un accroissement des rejets de deux ordres de grandeur devait être compensé par une réduction de la fréquence de trois ordres de grandeur. Il justifiait ce coefficient d'une part par la non linéarité de la relation entre rejets et conséquences sanitaires finales, et de l'autre par une attitude d'aversion pour le risque.

4.1.2.3 Le rattrapage français

À partir de la fin des années 1950, sous l'effet des deux conférences de Genève et de l'accident de Windscale¹⁰, le CEA décida de renforcer l'organisation de la sûreté de ses installations nucléaires. En 1960, il se dota d'une Commission de sûreté des installations atomiques (CSIA), qui rassemblait ses directeurs et s'appuyait sur des sous-commissions spécialisées. La plus importante de celles-ci était la sous-commission à la sûreté des piles (SCSP), placée sous la direction de Jean Bourgeois, pionnier de la sûreté nucléaire en France et également chef du Département d'étude des piles à partir de 1962. Bourgeois constitua progressivement un groupe d'experts en sûreté, le Groupe Technique à la Sûreté des Piles, qui allait forger la doctrine française de sûreté nucléaire.

Initialement très influencés par les conceptions américaines, les experts français prirent peu à peu leurs distances dans le sillage de leurs confrères britanniques, avant de se démarquer également de ces derniers pour élaborer leur propre doctrine. Celle-ci était caractérisée par un mélange de prudence et de pragmatisme.

Les experts français partageaient les réserves de Farmer à l'égard de la notion d'AMC, sans toutefois avoir de concept de substitution sur lequel s'appuyer. Ils se montraient également plus

10. Le 7 et le 8 octobre 1957, au cours d'une opération de routine dite « recuit Winger » dans la pile n°1 de la centrale de Windscale, une série d'erreurs d'interprétation et de manœuvre des opérateurs conduisirent à une augmentation incontrôlée de la température du cœur, qui prit feu. Il fallut presque quatre jours aux équipes de secours pour détecter le feu et le maîtriser en noyant le cœur à l'aide de lances à incendie. Un nuage radioactif se forma par évaporation de l'eau et, dans les jours suivants, des traces de retombées furent observées au Royaume-Uni, en Belgique, en Allemagne et en Norvège.

réservés que les britanniques à l'égard de la possibilité de construire des centrales nucléaires à proximité de zones fortement peuplées. Ils contribuèrent notamment au développement de la démarche déterministe de sûreté en formalisant la méthode dite des barrières (voir la sous-section 3.3.1), que Farmer, Fletch et Fry avaient évoquée dans leur article de 1958.

L'organisation des instances françaises en charge de la sûreté était caractéristique d'une méthode qualifiée plus tard de *French cooking*. L'objectif n'était pas d'édicter des règles, mais d'instaurer un « dialogue technique » afin de trouver des solutions pratiques aux problèmes de sûreté. Organe interne au CEA, le CSIA était certes constitué sur le mode d'un tribunal : tout projet de construction, de mise en route ou de modification d'une installation était soumis à son autorisation préalable. Cependant, son mode de fonctionnement était fondé sur la coopération entre responsables de la sûreté et du développement¹¹ et la recherche d'un compromis technique permettant « l'obtention dans le domaine des radiations d'une sûreté aussi parfaite que *possible* » (CEA (1960), cité par Foasso (2003, p.131) ; nous soulignons).

4.2 La politique de la sûreté nucléaire aux États-Unis

4.2.1 Crise et sortie de crise (1967-1986)

4.2.1.1 Un essoufflement institutionnel et doctrinal

Avec le développement de l'industrie nucléaire civile et la montée des préoccupations de sûreté, il est devenu patent que le double mandat des agences nucléaires les exposait à un conflit d'intérêts permanent. Cette contradiction interne était particulièrement forte dans le cas de l'AEC. À la fin des années 1960, la crédibilité de la Commission fut sérieusement entamée par une série de faux pas dans lesquels ses organes de décision choisirent délibérément de sous-estimer le risque qu'ils étaient censés contrôler.

Deux controverses

À la fin des années 1960, la branche « réglementaire » de la Commission était consciente que l'hypothèse d'accidents plus graves que l'AMC ne pouvait plus être ignorée, comme en témoigne la déclaration de Beck, directeur adjoint à la réglementation, placée en exergue à ce chapitre. Les préoccupations étaient d'autant plus fortes que les unités entrant alors en exploitation étaient d'une puissance considérablement plus élevée que celles qui avaient permis la mise au point de la défense en profondeur, et qu'elles se situaient plus près de zones densément peuplées. En raison de l'augmentation de la masse de combustible présente dans le cœur, on craignait alors qu'une fusion du cœur n'entraînât inévitablement le percement de la cuve, la défaillance de l'enceinte et des rejets

11. Ces deux figures allant jusqu'à se confondre dans une même personne dans le cas de Jean Bourgeois.

massifs. Pour la branche « industrielle » de la Commission, toutefois, l'hypothèse de fusion ne devait pas être prise en compte dans la réglementation.

En 1967, le rapport d'un comité d'experts réuni par l'AEC confirmait que dans un scénario d'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP, équivalent de l'anglais *Loss of Coolant Accident* ou LOCA) doublé d'une défaillance du système de refroidissement de secours, la matière fissile ne pourrait être retenue à l'intérieur de l'enceinte (Walker, 2000)¹². En 1970-71, des tests réalisés sur le réacteur d'essais d'Idaho jetèrent un doute sérieux sur la capacité du système de refroidissement de secours (*Emergency Core Cooling System*, ECCS) à compenser les effets d'une perte de réfrigérant primaire et, plus fondamentalement encore, sur la validité de l'approche suivie dans l'analyse de la sûreté. En pleine période de développement de l'énergie nucléaire, le trouble de l'AEC fut tel qu'elle choisit de ne pas divulguer les résultats des tests pendant quelques temps. En 1971, après cinq années de travail, la Commission adopta un ensemble de critères destinés à couvrir tous les aspects de la conception des centrales nucléaires, les *General design criteria* portés en annexe du titre 10 partie 50 du code de réglementation fédérale (10CFR50). Parmi ceux-ci, l'un portait sur le système de refroidissement de secours. Il exigeait que l'ECCS puisse compenser les effets d'un accident de perte de réfrigérant primaire, aussi grave soit-il, et qu'il réponde au critère de défaillance unique.

Alors que le débat sur l'efficacité de l'ECCS, et donc sur la probabilité d'accidents graves, battait son plein, la Commission se trouva engagée dans une deuxième controverse majeure. La réglementation imposait alors aux installations nucléaires des seuils de rejets (en fonctionnement normal) sur la base de la limite d'exposition du public recommandée par la Commission Internationale de Protection Radiologique (0,5 rem par an) et de l'hypothèse extrêmement conservatrice d'une présence permanente à proximité de la centrale (24 heures par jour, 365 jours par an). De surcroît, les rejets effectifs des centrales ne dépassaient guère quelques pour-cent des seuils autorisés. Cela ne suffit pas à protéger la réglementation des interrogations sur l'effet de l'exposition à de faibles doses de substances cancérigènes, qui devint à cette époque l'une des questions les plus incertaines et les plus ouvertes à la controverse dans le domaine de l'analyse des risques sanitaires (et le reste à ce jour). En analysant les données épidémiologiques de populations exposées aux explosions nucléaires de Hiroshima et de Nagasaki d'une part, et à l'imagerie médicale par rayons X d'autres part, Gofman et Templin, deux scientifiques renommés¹³, montrèrent en 1969 qu'il existait une réponse positive même à de très faibles doses de rayonnements, et que ceux-ci avaient de ce fait un effet mutagène

12. C'est à cet époque qu'a été imaginée le scénario du « syndrome chinois » : un cœur de réacteur en fusion qui traverserait non seulement la cuve et le radier de l'enceinte de confinement, mais... la planète entière, pour refaire surface en Chine !

13. John W. Gofman était un chimiste et bio-physicien qui avait effectué sa thèse au début des années 1940 sous la direction de Glenn Seaborg, responsable de la découverte du plutonium, puis travaillé avec lui au sein du projet Manhattan. À la demande de Seaborg, devenu entre-temps directeur de l'AEC, il avait créé en 1963 un département de recherche biomédicale au Lawrence Livermore National Laboratory pour étudier les effets sanitaires des radiations ionisantes.

et cancérigène nettement plus important qu'on ne le pensait précédemment. S'appuyant sur ces résultats, Gofman et Templin estimaient que si l'ensemble de la population américaine était exposée aux seuils de rejets de l'AEC, il en résulterait 32 000 cas supplémentaires de cancers fatals par an. En dépit du caractère totalement irréaliste de cette hypothèse, le travail de Gofman et Templin eut un grand retentissement. L'AEC commença par défendre ses positions pendant deux ans, avant de les abandonner brusquement en juin 1971 en proposant des objectifs de conception des centrales qui conduisaient à une division par cent des niveaux de rejets admissibles. Or ce revirement, loin de convaincre les critiques qui lui reprochaient de se montrer trop conciliante avec les points de vue des industriels, lui aliéna en outre ces derniers, ainsi qu'un bon nombre d'experts de la radioprotection.

La fin d'une ambivalence ?

Le sentiment général à l'égard de l'énergie nucléaire, encore positif au milieu des années 1960 ¹⁴, l'était désormais beaucoup moins. Avec le débat sur les faibles doses, les centrales devenaient suspectes non plus seulement en raison des risques d'accident, mais même dans leurs conditions normales de fonctionnement. Individus et associations utilisaient de plus en plus fréquemment l'ensemble des dispositions que la législation américaine mettait à leur disposition pour contester les décisions publiques et arrêter les projets les projets industriels.

En 1970, la Cour d'appel du District de Columbia ordonna l'arrêt de la construction d'une centrale à Clavert Cliffs (Maryland) et condamna l'AEC pour non respect de la législation sur l'environnement. La révision de la procédure d'octroi de licences suite à cette décision entraîna un gel des permis de construction de centrales pendant dix-huit mois.

En 1972, en vue de préparer la révision du Price-Anderson Act, le sénateur Pastore, président du comité mixte du Congrès, demanda à l'AEC de lancer une analyse générale sur la sûreté des centrales nucléaires. Consciente de la caducité de son cadre méthodologique et de la nécessité d'examiner de plus près les scénarios d'accident de perte de réfrigérant primaire (LOCA), l'AEC saisit cette occasion pour confier à Norman Rasmussen, professeur au *Massachusetts Institute of Technology*, une étude d'un genre nouveau dont l'objectif était de parvenir à une quantification des risques d'accident.

Mais la faiblesse de la Commission constituait désormais un handicap pour l'énergie nucléaire civile. À l'occasion de la survenue du premier choc pétrolier, le Président Nixon demanda au Congrès la création d'une nouvelle agence qui pourrait se concentrer sur les aspects réglementaires et accélérer la délivrance de licences. En 1974, le Congrès adopta l'Energy Reorganization Act, qui démantelait l'AEC et instituait la Nuclear Regulatory Commission (NRC), avec pour charge les seules fonctions réglementaires de l'ancienne Commission.

14. Les premières manifestations publiques hostiles à l'énergie nucléaire semblent avoir eu lieu en 1965 en Californie, où il avait été décidé de construire des centrales dans des zones sismiques (Foasso, 2003, p.138).

Ces turbulences n'étaient pas spécifiques aux États-Unis, même si elles y étaient particulièrement visibles. Au Royaume-Uni, le gouvernement décida également de séparer ses activités de développement de l'énergie nucléaire et de celles de surveillance de la sûreté, qui furent placées sous la responsabilité du *Nuclear Installations Inspectorate* au sein du *Health and Safety Executive* en 1975. Des évolutions similaires avaient lieu en France à la même époque.

4.2.1.2 La naissance difficile de la méthode probabiliste

Le travail de Rasmussen

Après trois ans de travail de l'équipe rassemblée autour de Norman Rasmussen, l'étude WASH-1400 fut publiée en octobre 1975 par la nouvelle Commission (une version préliminaire en avait été mise en circulation un an plus tôt). Outre la méthodologie et les évaluations que nous avons décrites au chapitre précédent, elle comportait une comparaison de risques exprimés en termes d'espérance de perte de vie d'un individu moyen aux États-Unis, à la manière de l'article publié quelques années plus tôt par Chauncey Starr (Starr, 1969). Les accidents des centrales nucléaires y étaient mis en regard d'événements tels que les cyclones, les tremblements de terre, les chutes de météorite, les accidents de la circulation, les chutes d'avions, les incendies, les explosions, etc. Les estimations indiquaient que le risque lié au fonctionnement de cent centrales nucléaires était largement inférieur à ceux de l'automobile, du transport aérien ou des cyclones. Parmi les aléas considérés, seul la chute de météorites engendrait des risques comparables : une chance sur dix mille de faire dix morts, et une sur dix millions d'en faire dix mille. Ces conclusions étaient délibérément mises en avant, notamment dans la note de synthèse (*executive summary*) du document.

Ces conclusions valurent à l'étude de fortes critiques. Après s'être penché sur la version préliminaire du rapport, un groupe de scientifiques réunis par l'*American Physical Society* (APS) souligna notamment le peu de sens qu'il y avait à extrapoler ainsi des calculs où la prise en compte des conséquences sanitaires avait été limitée aux 24 premières heures d'exposition. En juin 1976, la Commission des affaires intérieures de la Chambre des représentants organisa des auditions au sujet de l'étude, au cours desquelles il fut estimé que ses conclusions, par l'impression de certitude et de complétude qu'elles laissaient, étaient abusives. Visiblement embarrassée par cette tournure, la NRC demanda une évaluation officielle à un groupe de scientifiques dirigés par Harold Lewis, qui avait aussi été le premier signataire du rapport de l'APS. En septembre 1978, le comité Lewis rendit son rapport. Sur le fond, celui-ci portait, comme nous l'avons vu, un regard nuancé sur WASH-1400 : s'il critiquait certains de ses parti pris, notamment dans le traitement des incertitudes ou l'inclusion d'hypothèses conservatrices dans des calculs réalistes, il saluait également une avancée très importante dans les techniques d'analyse des risques d'accident. Son désaccord portait surtout sur la présentation des résultats et les interprétations auxquelles celle-ci avait conduit :

"There have been instances in which WASH-1400 has been misused as a vehicle to judge the acceptability of reactor risks. In other cases it may have been used prematurely as an estimate of the absolute risk of reactor accidents without full realization of the wide band of uncertainties involved. Such use should be discouraged" (Lewis et al., 1978).

La critique portait également sur un autre aspect de l'exploitation des résultats de WASH-1400 : la comparaison de risques sans prise en compte des autres coûts et des bénéfices qui leur étaient associés. En notant que l'opinion publique formait son jugement sur l'énergie nucléaire en considérant non seulement les risques de pertes humaines liées aux accidents graves des réacteurs, mais aussi l'ensemble du cycle du combustible, les aspects économiques ou environnementaux, ainsi que les questions de prolifération, le rapport Lewis prenait pour cible ultime la notion d'acceptabilité du risque telle qu'elle avait été façonnée par les travaux de Farmer et Starr.

Une révolution méthodologique à entreprendre, des appréciations négatives (même si elles ne portaient pas sur le cœur du rapport), un contexte institutionnel et politique instable : il n'en fallait pas plus pour que la jeune NRC choisisse de se désolidariser des conclusions et même des estimations avancées par WASH-1400. Cette infortune aurait probablement condamné l'ensemble de l'approche probabiliste pour quelque temps si n'était survenu, à peine deux mois après la déclaration de la NRC, l'accident de Three Mile Island (TMI).

Le tournant de TMI

Bien qu'il n'ait pas donné lieu à des rejets significatifs, l'accident de TMI constitua un choc considérable aux États-Unis en montrant que les promesses de sûreté totale étaient effectivement intenables. La Commission d'enquête nommée par le Président des États-Unis critiqua sévèrement la NRC, en dénonçant dans sa politique une forme de présomption de sûreté :

"if the country wishes, for larger reasons, to confront the risks that are inherently associated with nuclear power, fundamental changes are necessary if those risks are to be kept within tolerable limits. [...] After many years of operation of nuclear power plants, with no evidence that any member of the general public has been hurt, the belief that nuclear power plants are sufficiently safe grew into a conviction. [...] The Commission is convinced that this attitude must be changed to one that says nuclear power is by its very nature potentially dangerous, and, therefore, one must continually question whether the safeguards already in place are sufficient to prevent major accidents" (Kemeny et al., 1979).

La Commission chercha également, dans ses recommandations à caractère institutionnel, à impliquer davantage la branche exécutive dans la supervision de l'agence de sûreté et dans les choix stratégiques en matière de sûreté, en demandant notamment que l'agence fasse un rapport annuel

au Président et que ses commissaires soient nommés par celui-ci, et en notant que la question plus vaste des choix énergétiques du pays et de son engagement dans la filière nucléaire devait sans doute être reposée à la lumière de l'accident :

"The Commission's findings with respect to the accident and the regulation of the nuclear industry – particularly the current and potential state of public safety in the presence of nuclear power – have, we believe, implications that bear on the broad question of energy. But the ultimate resolution of the question involves the kind of economic, environmental, and foreign policy considerations that can only be evaluated through the political process" (Kemeny et al., 1979).

De fait, TMI mit un terme au développement de l'industrie nucléaire civile aux États-Unis, qui n'a pas repris à ce jour.

Sur le plan de la méthode, TMI confirma à la fois les doutes déjà sérieux relatifs à la démarche déterministe et son absence de prise en compte de l'hypothèse d'accidents graves, et l'intérêt de l'approche systématique adoptée par Rasmussen et son équipe. À la NRC, où une équipe d'employés venait de passer deux mois à effacer toute mention de WASH-1400 dans les documents officiels, il fallu en consacrer deux de plus à faire machine arrière (Keller et Modarres, 2005, p.280). Les deux principales commissions d'enquête sur les causes de l'accident parvinrent à la conclusion qu'il serait désormais souhaitable de compléter la démarche de sûreté traditionnelle par des analyses probabilistes semblables à WASH-1400 (Kemeny et al., 1979; Rogovin et al., 1980). La seconde recommanda en outre que les accidents dus à des défaillances multiples soient prises en compte dans le dimensionnement des centrales et que des objectifs probabilistes inscrits dans la réglementation donnent une indication claire du niveau de sûreté qui était estimé « assez sûr » (*safe enough*) du point de vue de la puissance publique.

À la suite de l'accident, plusieurs opérateurs de centrales nucléaires entreprirent de leur propre chef des EPS afin, d'une part, de décider d'améliorations techniques de leurs installations et, de l'autre, de disposer d'une mesure du risque pour les populations avoisinantes. Les premières EPS post-TMI furent celles de la centrale de Zion (publiée en 1981) et des tranches 2 et 3 de la centrale d'Indian Point (publiée en 1982)¹⁵. Ces études furent menées pour une large partie par un cabinet de consultants, *Pickard, Lowe and Garrick*, qui joua un rôle important dans la formalisation de la méthodologie des EPS.

La NRC, de son côté, entama en 1979 une conversion progressive, mais jamais démentie, aux méthodes probabilistes. Elle passa commande à l'*American Nuclear Society* et l'*Institute of Electrical and Electronic Engineers* d'un guide de procédure sur les EPS qu'elle publia en 1983 (NRC, 1983). En 1986, elle lança une EPS de cinq centrales américaines qui visait à mettre WASH-1400

15. Il s'agissait des deux centrales les plus proches de grandes métropoles : celle de Zion, fermée depuis 1998, est située à 65 km de la ville de Chicago, et celle d'Indian Point à 50 km de New York.

à jour sur la base des dix années d'expérience opérationnelle et de données supplémentaires et de méthodes affinées. Le résultat, publié en 1990, constitua comme nous l'avons vu un nouvel état de l'art dans le domaine nucléaire, notamment en matière d'élicitation des opinions d'experts (NRC, 1990). En 1986, la NRC répondit aussi à la demande qui lui avait été faite par la commission Rogovin, et assigna aux opérateurs de centrales un objectif probabiliste qui définissait ce qu'était, de son point de vue, un niveau de risque radiologique acceptable (NRC, 1986). Rétrospectivement, cette réglementation peut être considérée comme le point de départ d'une nouvelle doctrine de la sûreté.

4.2.2 L'émergence d'une nouvelle doctrine

4.2.2.1 La conversion à la « décision informée au sujet du risque »

Les *Safety goals for the operation of nuclear power plants* consistaient en deux critères qualitatifs de santé publique, l'un collectif et l'autre individuel, et deux autres les traduisant en termes quantitatifs :

- le fonctionnement des centrales nucléaires ne devait pas engendrer de risque supplémentaire significatif pour la santé et la vie des individus ;
- les risques engendrés par le fonctionnement des centrales nucléaires pour la société dans son ensemble devaient être au plus comparables à ceux créés par toute technologie de génération d'électricité concurrente et viable ;
- le risque de mort rapide causée par un accident de réacteur pour un individu moyen vivant à proximité d'une centrale devait être au plus égal à 0,1 % de la somme des autres risques de mort rapide auxquels les individus américains sont généralement exposés ;
- le risque de cancers mortels causés par le fonctionnement d'une centrale pour la population vivant à sa proximité devait être au plus égal à 0,1 % de la somme des risques de cancers mortels liés à toute autre cause.

Ainsi spécifié, le critère individuel concernait les risques liés aux accidents, alors que le critère collectif portait sur l'ensemble du fonctionnement des centrales, en situation normale comme accidentelle. Le texte du règlement précisait bien que ces objectifs devaient être compris comme une *indication* du niveau de protection de la population que les concepteurs et opérateurs de centrales devaient chercher à atteindre. Comme l'expliquait le président de la NRC en 2001, l'intention n'avait été en aucune manière d'appliquer ces critères dans des décisions spécifiques (par exemple de licence d'exploitation), mais de signaler l'orientation générale de la politique de sûreté aux acteurs de l'industrie et au personnel de la Commission lui-même (Meserve, 2001).

En 1988, avec la *Generic Letter 88-20*, la NRC fit un pas supplémentaire dans la promotion des méthodes probabilistes en demandant aux opérateurs de conduire des examens individuels de

leurs centrales afin d'évaluer les risques d'accidents graves liés à des événements internes (*individual plant examination* ou IPE) ou externes (*individual plant examination of external events* ou IPEEE) (NRC, 1988b et 1988c). La lettre exigeait particulièrement des opérateurs qu'ils améliorent leur compréhension des probabilités d'endommagement du cœur et de relâchement de matière radioactive, et qu'ils agissent si nécessaire afin de réduire ces probabilités. Pour cela, elle leur recommandait de conduire une EPS de niveau 1 complétée par une analyse plus sommaire du comportement de l'enceinte de confinement conformes aux guides établis par la NRC, mais déclarait que sous réserve d'approbation, des méthodes alternatives pouvaient également être utilisées. Elle soulignait cependant que la réalisation d'une EPS pouvait par la suite simplifier certaines démarches réglementaires, et encourageait les opérateurs à y impliquer leurs propres personnels, de façon à les former aux raisonnements et outils probabilistes et à intégrer au mieux la connaissance spécifique qu'ils possédaient de leur centrale.

Le secteur électronucléaire américain avait largement anticipé cette appel. S'ils s'étaient montrés initialement très réservés à l'égard de l'approche probabiliste, en raison notamment du caractère problématique de la notion de risque en droit¹⁶, les industriels s'étaient rapidement convaincus des possibilités qu'elle offrait pour analyser la sûreté de leurs installations, mais aussi tenter d'en convaincre le public et négocier avec la puissance publique un allègement de ses exigences réglementaires¹⁷. Au début des années 1990, une grande majorité de centrales américaines avait fait l'objet d'une évaluation probabiliste spécifique, bien que selon des méthodes et avec des degrés d'approfondissement et une qualité d'ensemble variables.

Cependant, même destinés à un usage très général, les objectifs de sûreté s'avérèrent inapplicables en raison du degré d'incertitude affectant les mesures de risque. En 1990, la NRC fut amenée à adopter, pour son usage interne, des critères de substitution se référant directement aux grandeurs mesurées par les EPS : une probabilité de fusion du cœur (*core damage frequency*, CDF) inférieure à 10^{-4} et une probabilité de rejets rapides et importants (*large early release frequency*,

16. L'étude WASH-1400 et ses prolongements politiques venaient en effet perturber le cadre juridique dans lequel opérait l'industrie nucléaire civile, construit autour de l'association entre la notion de risque indu (*undue risk*) et le concept déterministe d'accident maximum crédible : les analyses de sûreté réglementaires attestaient que toutes les mesures nécessaires avaient été prises dès lors que la population était protégée en cas d'accident de gravité inférieure à celle de l'AMC ; ceux de gravité supérieure étaient exclus.

17. À titre d'exemple, le programme de recherches privées IDCOR (*Industry Degraded Core Rulemaking*) a été lancé dès 1981 pour étudier les questions techniques et réglementaires posées par les scénarios d'accident grave. En 1984, IDCOR était parvenu aux conclusions suivantes : la probabilité de survenue d'un accident grave dans un réacteur à eau légère est extrêmement faible ; dans une telle éventualité, le terme source serait vraisemblablement bien moindre que les études précédentes ne l'ont estimé ; les risques pour la population liés à des accidents graves sont très inférieurs aux niveaux calculés dans différentes études, et également inférieurs aux objectifs de sûreté (à l'époque préliminaires) de la NRC. Sur cette base, il était estimé que « des changements majeurs de conception ou de conduite des réacteurs ne sont pas nécessaires » (Buhl et al., 1987). Dans les années suivantes, IDCOR s'était donné pour objectif de défendre le point de vue de l'industrie auprès de la NRC, notamment en matière de tenue de l'enceinte de confinement et de termes-source, et de développer une approche intégrée pour l'analyse des risques d'accident grave dans chaque centrale. Cette approche, qui a fait l'objet de nombreuses discussions entre les responsables du programme et la NRC, faisait partie des méthodologies admises par la NRC pour la réalisation d'un examen individuel IPE.

LERF) inférieure à 10^{-5} .¹⁸

Dans les années suivantes, ce furent les industriels qui firent pression sur la Commission pour qu'elle adopte la démarche probabiliste comme fondement général de sa politique. En 1995, celle-ci publia une déclaration de politique en ce sens, où l'on pouvait notamment lire :

'The use of Probabilistic Risk Assessment technology should be increased in all regulatory matters to the extent supported by the state-of-the-art in PRA methods and data and in a manner that complements the NRC's deterministic approach and supports the NRC's traditional defense-in-depth philosophy' (NRC, 1995).

Dans la terminologie de la Commission, cette nouvelle politique n'était pas basée sur le risque (*risk-based*) mais informée à son sujet (*risk-informed*). Pour la mettre en pratique, la Commission adopta en 1998 une série de guides réglementaires expliquant comment l'information sur le risque devait être prise en compte dans certaines de ses activités de surveillance et de contrôle. Le guide 1.174 définissait ainsi les principes de la « décision informée au sujet du risque » dans le cas d'une modification de l'installation proposée par l'opérateur (NRC, 1998) :

1. le changement proposé doit se conformer aux réglementations existantes, sauf pour celles dont il demanderait explicitement à être exempté ;
2. le changement proposé doit être conforme à la philosophie de la défense en profondeur ;
3. le changement proposé doit maintenir des marges de sûreté suffisantes ;
4. si le changement proposé accroît le risque, cet accroissement doit être faible ;
5. l'impact du changement proposé devra faire l'objet d'un suivi par l'intermédiaire de stratégies de mesure de la performance.

Le quatrième principe constituait la véritable innovation du guide en matière de doctrine, puisque les demandes d'autorisation ne devaient pas être accompagnées, jusqu'à lors, d'une information sur le risque. Dans le guide, le risque y était compris, sauf cas exceptionnel¹⁹, comme le couple formé par les probabilités de fusion du cœur (CDF) et de rejets rapides et importants (LERF), et le quatrième principe était précisé sous la forme de critères quantitatifs :

- une variation de CDF (respectivement LERF) inférieure à 10^{-6} (resp. 10^{-7}) est acceptable et ne nécessite pas de disposer d'une estimation globale de cette probabilité elle-même ;

18. Dans les réacteurs de conception récente à cette époque, la probabilité conditionnelle de perte de confinement de l'enveloppe dans un scénario de fusion du cœur était estimée inférieure à 0,1. Le critère de rejets retenu est bien plus tolérant puisqu'il correspond, si la probabilité de l'ensemble des scénarios de fusion est inférieure à 10^{-4} , à une probabilité conditionnelle de perte de confinement qui puisse aller jusqu'à 0,5 pour les scénarios les plus défavorables (voir à ce propos NRC (1990)). En effet, dans de nombreux scénarios de fusion, la perte de confinement est peu probable.

19. Par exemple, une modification qui affecterait la tenue à long terme de l'enveloppe du confinement ne pourrait pas être évaluée à partir des métriques usuelles et devrait faire l'objet d'une analyse spécifique.

- une variation de CDF (resp. LERF) comprise entre 10^{-6} et 10^{-5} (resp. 10^{-7} et 10^{-6}) n'est acceptable que s'il peut être établi que la probabilité est elle-même inférieure à 10^{-4} (resp. 10^{-5}) ;
- une variation de CDF (resp. LERF) supérieure à 10^{-5} (resp. 10^{-6}) n'est pas acceptable.

Le guide précisait en outre que toute évaluation probabiliste devait faire l'objet d'une analyse d'incertitude d'autant plus complète que le couple (risque, variation proposée) était proche des frontières d'acceptabilité. Dans le cas d'une analyse complète, l'incertitude paramétrique devait être propagée en tenant compte des corrélations possibles entre paramètres, et les niveaux de risque retenus devaient correspondre aux valeurs moyennes des distributions engendrées par ces propagations ; concernant les incertitudes de modélisation et de complétude, il fallait montrer que la décision (au sens du principe 4) n'était pas sensible à des choix alternatifs de modèles et de périmètre de l'analyse, dans la mesure où de telles alternatives pouvaient être raisonnablement envisagées²⁰.

4.2.2.2 Des défis importants

La position de principe affichée en 1995, suivie d'un début de mise en pratique à travers les guides réglementaires de 1998, marquaient clairement un changement de doctrine de la NRC que l'on peut caractériser par trois positions : premièrement, même si elle continuait d'affirmer l'importance de la défense en profondeur et du maintien de marges de sûreté, elle indiquait que c'était désormais l'évaluation du risque qui orientait les considérations de sûreté ; deuxièmement, elle reposait sur une position plus claire que jamais vis-à-vis de la notion d'acceptabilité, en admettant que des modifications structurelles puissent délibérément entraîner une augmentation du risque, tant que celui-ci, majoré d'une marge d'incertitude suffisante, restait en-deçà du niveau considéré acceptable ; troisièmement, elle requérait que cette marge d'incertitude soit évaluée de façon aussi précise et complète que possible à chaque fois que cela serait nécessaire. La règle permettant de juger de cette nécessité reposait sur un principe normatif que l'on pourrait énoncer ainsi : *il y a lieu de rechercher un degré de confiance d'autant plus élevé vis-à-vis d'une évaluation de probabilités que les enjeux de la décision correspondante sont importants*²¹.

Suite à cette déclaration générale, la NRC entreprit de réviser l'ensemble de ses réglementations techniques, règles d'autorisation et procédures de surveillance afin de les fonder sur la prise en compte du risque. Ce chantier, d'une ampleur considérable, nécessita notamment de compléter et d'affiner les objectifs de sûreté qui portaient, comme nous l'avons vu, sur la prévention des accidents de fusion et des rejets massifs. Un nouveau programme de surveillance de la sûreté des réacteurs

²⁰. Ceci correspond aux bonnes pratiques en matière d'analyse de l'incertitude décrites dans la sous-section 3.4.2.3.

²¹. Hill (2009) a proposé un traitement formel et une axiomatisation d'un comportement de ce type face à une incertitude de second ordre.

(*Reactor oversight process*) établit ainsi une nouvelle partition de la sûreté en sept « pierres angulaires » (*cornerstones*) : les événements initiateurs, les systèmes de protection, l'intégrité des barrières, les plans d'urgence, la radioprotection des travailleurs, la radioprotection de la population et la sécurité contre les actes de malveillance. Dans chacun de ces domaines, un ou plusieurs indicateurs de performance (éventuellement composites), assorti d'objectifs détaillés et de règles d'inspection, fut été choisi. À titre d'exemple, l'un des indicateurs retenus dans le domaine des événements initiateurs était le nombre d'arrêts non planifiés au cours des quatre derniers trimestres, sur la base de 7 000 heures de fonctionnement en état critique, avec les critères suivants : contribution négligeable au risque ne nécessitant pas d'action supplémentaire pour moins de trois arrêts (zone verte), contribution limitée justifiant des investigations supplémentaires pour plus de trois et moins de six arrêts (zone blanche), contribution importante nécessitant une intervention pour plus de six et moins de 25 arrêts (zone jaune) et contribution inacceptable pour plus de 25 arrêts (zone rouge).

Un exemple des changements apportés aux réglementations techniques est celui de règles applicables au système d'injection de secours (règlement 10CFR50.46). La règle déterministe précédente exigeait de dimensionner le système pour une grosse brèche du circuit primaire cumulée à une perte des alimentations électriques, tout en le soumettant au critère de défaillance unique. La règle « informée au sujet du risque » consista à demander les cumuls conventionnels pour les brèches inférieures à une taille limite, ainsi qu'un dimensionnement selon des hypothèses réalistes pour les brèches de taille supérieure. Elle découlait des analyses des scénarios de perte de réfrigérant primaire, qui ont constamment indiqué, depuis WASH-1400, une contribution plus importante des brèches de petite taille, due à leur probabilité plus élevée. La réforme offrit en outre aux opérateurs la possibilité de choisir entre l'ancienne et la nouvelle règle.

Le changement de paradigme opéré par la NRC ne se déroula pas sans friction. Aux personnels de la Commission, il imposait une modification radicale de méthodes de travail. Plus fondamentalement, peut-être, il leur inspirait des réserves de nature technique, liées notamment à la portée limitée et l'incomplétude des EPS fournies par les opérateurs, la prise en compte très insuffisante des incertitudes et les problèmes de compatibilité entre les conceptions déterministes et probabilistes (Fleming, 2003).

En réponse aux deux premières préoccupations, la NRC adopta un guide réglementaire concernant la méthodologie des EPS (NRC, 2007) et élaborait un document de référence concernant le traitement des incertitudes (NRC, 2009). L'industrie, de son côté, développa un standard conforme aux prescriptions de la Commission (ASME/ANS, 2009).

Le dernier point soulevait la question délicate de la prééminence nécessaire de l'une des deux