

# Que s'est-il passé à Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima Daiichi ? Et où en est-on aujourd'hui ?

Par Jean-Christophe NIEL  
et Jean COUTURIER  
IRSN

Un certain nombre d'objectifs, de principes et d'approches visant la sûreté et la protection radiologique des personnes (travailleurs et personnes du public) et de l'environnement sont pris en compte pour la conception et l'exploitation des réacteurs électronucléaires.

De façon générale, la sûreté bénéficie d'améliorations continues tenant compte des évolutions sur la perception des risques, des nouvelles connaissances acquises sur certains phénomènes complexes susceptibles de se produire dans les réacteurs et de l'expérience acquise en matière d'exploitation des réacteurs (« retour d'expérience »), notamment les enseignements tirés des trois « grands » accidents survenus dans les centrales nucléaires de Three Mile Island (1979), Tchernobyl (1986) et Fukushima Daiichi (2011).

Ces trois accidents, caractérisés par la fusion du cœur des réacteurs, illustrent les enseignements de natures extrêmement diverses qui peuvent être tirés de l'expérience d'exploitation des réacteurs électronucléaires. Toutes les dispositions concrètes qui en ont résulté visent, *in fine*, un renforcement de la prévention et de la limitation des conséquences d'accidents dans de telles installations. En outre, depuis les années 1990, la prise en compte des accidents avec fusion du cœur dans la conception des réacteurs de nouvelles générations est un principe adopté au plan international.

Le développement au plan mondial des réacteurs électronucléaires a commencé à la fin des années 1950. Pour la conception et l'exploitation de ces réacteurs, les objectifs de production d'électricité ont été complétés par des objectifs, des principes et des approches visant la sûreté et la radioprotection des personnes (travailleurs et personnes du public) : cela découle du potentiel de dangers que représentent de telles installations, mobilisant d'importantes quantités de substances radioactives<sup>(1)</sup>. À cet égard, l'une des premières approches adoptées a été l'interposition de plusieurs « barrières » physiques de confinement entre, d'une part, les substances radioactives et, d'autre part, les personnes et l'environnement. Elle a été complétée par la prise en compte, pour la conception de ces réacteurs, d'événements postulés ayant pour origine des défaillances matérielles ou humaines ou des agressions d'origine interne ou externe (incendie, séisme, inondation...), afin de prévoir les dispositions permettant d'en réduire autant que cela est raisonnablement possible les conséquences et d'assurer le confinement par au moins l'une de ces « barrières ».

Les approches en matière de sûreté se sont affinées au fil du temps pour tenir compte de l'expérience d'exploitation des réacteurs (« retour d'expérience ») – notamment des trois « grands » accidents présentés ci-après –, des nouvelles connaissances acquises sur certains phénomènes complexes susceptibles de se produire dans les réacteurs et des évolutions à caractère socio-politique sur la perception des risques. Les approches indiquées ci-dessus sont englobées, depuis les années 1990, dans une approche plus large, celle de défense en profondeur [1].

## Accident du réacteur n°2 de la centrale nucléaire de Three Mile Island

### Déroulement de l'accident

Le 28 mars 1979, un accident a affecté le réacteur à eau sous pression n°2 (TMI-2) de la centrale nucléaire de Three Mile Island (États-Unis, État de Pennsylvanie) [2]. Une vanne de décharge du pressuriseur du circuit primaire, qui s'était ouverte automatiquement pour limiter un pic de pression dans ledit circuit résultant d'incidents affectant le circuit secondaire, ne s'est pas refermée, bien que l'ordre de refermeture ait été émis par le système de contrôle-commande. Or, les équipes présentes en salle

(1) Telles que les produits résultant de la fission de l'uranium 235.

de commande ne disposaient comme information que de l'ordre de refermeture de la vanne et non sa position réelle, ce qui a nui à leur perception de l'état de l'installation. Du fait des multiples alarmes qui se sont déclenchées en salle de commande et de l'absence de hiérarchisation des informations, les équipes ont éprouvé des difficultés pour identifier les informations pertinentes, d'autant que certaines étaient erronées (comme la position de la vanne évoquée ci-dessus). La décision d'arrêt de l'injection de sécurité d'eau dans le circuit primaire a découlé en partie de cette information erronée, ce qui a conduit au sous-refroidissement du cœur.

### Conséquences de l'accident

Plusieurs années d'études de cet accident et les inspections télévisuelles dans la cuve du réacteur ont permis de découvrir que près de la moitié du cœur avait fondu et que 20 % avaient coulé au fond de la cuve. Bien qu'endommagée, la cuve n'a pas été percée et la partie fondue du cœur est restée confinée dans la cuve (voir la Figure 1 ci-après). L'enceinte de confinement est restée intègre et le relâchement de produits radioactifs dans l'environnement (par un bâtiment auxiliaire) est resté très limité.

Le cœur endommagé et les matériaux fondus ont été entièrement retirés de la cuve. L'enceinte de confinement a également été nettoyée. Mais le réacteur est destiné à être démantelé. L'accident de TMI-2 provoqua des mouvements de contestation dans le public et conduisit les États-Unis à abandonner la construction de nouvelles centrales.

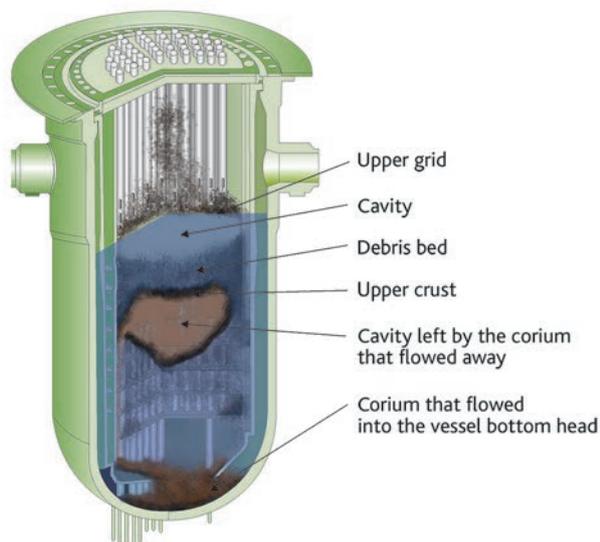


Figure 1 : Simulation de l'état final du cœur du réacteur TMI-2 [1] (photo©IRSN – Médiathèque IRSN).

### Enseignements tirés de l'accident

L'accident de TMI-2 a fait prendre conscience qu'une fusion du cœur pouvait survenir dans un réacteur malgré un haut niveau de prévention (la fusion du cœur n'était cependant pas prise en compte dans les bases de conception de leur confinement). Néanmoins, des évaluations des risques liées aux centrales nucléaires aux États-Unis, notamment

ceux de fusion du cœur, étaient déjà menées avant l'accident de TMI-2 ([3] et [4]). Dans le rapport [4], les risques étaient évalués en termes de probabilités : ce type d'évaluation va connaître, après l'accident, un développement important dans les pays équipés de réacteurs électronucléaires. Dénommées études probabilistes de sûreté, elles vont permettre d'apporter de judicieux éclairages sur les approches de sûreté mises en œuvre, que ce soit au stade de la conception des réacteurs ou au cours de leur exploitation, dans le cadre de réexamens périodiques par exemple. En France, elles vont permettre d'objectiver certains risques et conduire, dans les années 1980 et 1990, à des modifications substantielles des réacteurs : peuvent notamment être citées l'installation de recombineurs passifs d'hydrogène dans les enceintes de confinement – pour éviter l'explosion de l'hydrogène<sup>(2)</sup> en cas de fusion du cœur – et l'installation de dispositifs d'éventage-filtration de ces enceintes – pour éviter qu'une augmentation excessive de pression dans ces enceintes ne conduise à des rejets directs non filtrés de substances radioactives dans l'environnement.

Par ailleurs, en France, si le principe de plans d'urgence autour des sites était acquis avant même l'accident de TMI-2, cet accident accélérera leur mise en place, sous le nom de plans particuliers d'intervention destinés aux pouvoirs publics et complétés par des plans d'urgence interne de la responsabilité des exploitants.

La panoplie des procédures de conduite sera élargie pour couvrir notamment des situations hypothétiques de défaillance de systèmes redondants (perte totale des sources électriques, par exemple). Par ailleurs, les difficultés rencontrées par les opérateurs du réacteur TMI-2 conduira en France à une réforme profonde du principe directeur des procédures de conduite, qui va passer d'une approche « événementielle » – c'est-à-dire fondée sur des scénarios prédéterminés – à une approche « par états » – c'est-à-dire fondée sur la valeur de quelques paramètres essentiels représentatifs de l'état réel du réacteur et de celui de ses « barrières » de confinement.

Pour la conception des réacteurs, tout particulièrement celle des réacteurs de 1 450 MWe (palier dit N4) dont la construction était programmée dans les années 1980, les enseignements tirés de l'accident de TMI-2 vont conduire à de gros efforts en termes d'interface homme-machine, notamment en termes d'ergonomie de la salle de commande, sans toutefois aller jusqu'à la prise en compte des accidents avec fusion du cœur dès la conception de ces réacteurs.

## Accident du réacteur n°4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl

### Déroulement de l'accident

Le 26 avril 1986, le réacteur n°4 de la centrale nucléaire russe de Tchernobyl, située au nord de l'Ukraine, explosait [5]. Cet accident est de loin le plus grave ayant affecté

(2) Hydrogène produit par l'oxydation, à haute température et en présence d'eau-vapeur, du matériau de gainage du combustible, à base de zirconium.

un réacteur électronucléaire. Il s'agissait d'un réacteur du type soviétique RBMK, qui diffèrent sur un certain nombre de points des réacteurs à eau sous pression (les réacteurs de ce type utilisent du graphite pour modérer les neutrons et étaient refroidis par de l'eau en ébullition dans le cœur).

Un arrêt du réacteur était prévu pour le 25 avril 1986 afin d'effectuer des opérations d'entretien. Il était aussi prévu de réaliser un essai particulier juste avant cet arrêt : il s'agissait de vérifier la possibilité, en cas de perte du réseau électrique extérieur, d'alimenter pendant quelques dizaines de seconde, avant la reprise en secours par les groupes électrogènes, les pompes principales de recirculation de l'eau dans le réacteur par l'un des groupes turboalternateurs ralentissant sur son inertie.

Différents facteurs ont conduit à l'accident lors de l'essai : isolement du circuit de refroidissement de secours au début de l'essai (sans raison claire) ; accumulation de xénon dans le cœur (absorbant neutronique) ; contrôle automatique du réacteur inadapté et réacteur amené dans une plage de fonctionnement neutroniquement instable ; décision de poursuivre néanmoins l'essai, blocage volontaire de l'arrêt d'urgence ; et, ultérieurement, lorsque finalement il fut décidé de faire chuter les éléments absorbants dans le cœur du réacteur, augmentation brutale de la réactivité du cœur du fait que la partie inférieure de ces éléments était en graphite et non en bore. La puissance du réacteur aurait atteint, en quelques secondes, plus d'une centaine de fois sa valeur nominale ; la réaction en chaîne s'est arrêtée sous l'effet de l'échauffement du combustible (effet dit Doppler) et du fait de la destruction du cœur et de la dispersion du combustible.

### Conséquences de l'accident

L'explosion du réacteur a entraîné des rejets massifs et non filtrés de substances radioactives dans l'environnement ([6] et [7]), notamment d'iode 131<sup>(3)</sup> et de césium 137<sup>(4)</sup>. De surcroît, l'explosion du réacteur, la très haute température du combustible et le feu de graphite qui dura une dizaine de jours ont entraîné la dispersion à haute altitude des gaz, des aérosols et des particules, ce qui a conduit à une diffusion des substances radioactives à l'échelle européenne (Pays nordiques, dans un premier temps).

Concernant les dépôts radioactifs au sol (notamment de césium 137), qui participent à l'exposition (externe, voire aussi interne par la chaîne alimentaire) des individus, les cartes de contamination réalisées en 1990-1991 ont montré que l'oblast de Gomel (au Belarus) a été particulièrement touché, en particulier dans ses parties sud et nord-est. C'est également le cas en Russie, autour et au nord de Novozybkov. Plus loin encore en Russie, les régions de Bryansk-Kaluga-Tula-Orel, bien que situées à cinq cents kilomètres environ du lieu de l'accident, ont, elles aussi, été affectées par une contamination significative au césium.

(3) L'iode 131 a une période radioactive de huit jours. L'iode 131 et le césium 137 sont les isotopes qui contribuent le plus aux effets de la radioactivité sur l'homme et l'environnement.

(4) Période radioactive de trente ans.

La population de la localité la plus proche de la centrale, la ville de Pripyat (49 000 habitants), ne sera évacuée que le 27 avril. Au total, c'est environ 115 000 personnes vivant dans un rayon de trente kilomètres autour de la centrale, correspondant à la zone dite d'exclusion<sup>(5)</sup>, qui seront évacuées.

L'influence de l'exposition radiologique externe directe liée au panache a été faible par rapport à l'exposition interne due aux aérosols et à l'ingestion de produits alimentaires et à l'exposition externe due aux dépôts (tout particulièrement les iodes et les césiums). Les doses reçues et leurs effets ont été estimés ([6]) pour différentes catégories de populations (des « liquidateurs » aux personnes des pays européens) :

- 134 personnes membres du personnel de la centrale et les premiers intervenants extérieurs ont reçu des doses conduisant à des syndromes aigus d'irradiation : 2 d'entre elles sont décédées dans les premières heures ayant suivi l'accident (victimes de traumatismes physiques, de brûlures thermiques et des effets des rayonnements), 28 décéderont dans les trois mois qui suivirent l'accident et 19 autres entre 1987 et 2004 ;
- l'absence de prise de contre-mesures rapides en réaction à la contamination du lait par l'iode 131 a conduit à la concentration d'une importante dose de cet élément radioactif dans la thyroïde des personnes vivant dans les zones les plus contaminées de Biélorussie, d'Ukraine et de Russie ; cela explique une large part des 6 848 cancers de la thyroïde diagnostiqués entre 1991 et 2005 parmi des personnes qui étaient des enfants ou des adolescents au moment de l'accident, dont 15 sont mortes. Une augmentation régulière des cancers de la thyroïde est encore observée après 2005.

L'augmentation de l'incidence d'autres types de cancers, notamment la leucémie, mais aussi de pathologies non cancéreuses comme la cataracte ou des maladies cardio-vasculaires a également été rapportée dans certaines études. Il n'existe cependant pas de preuve tangible d'une hausse de ces pathologies dans les populations exposées.

Trente ans après l'accident, il est impossible de dresser un bilan sanitaire exhaustif et définitif, du fait que les résultats disponibles sont limités en raison de la qualité contestable des études épidémiologiques réalisées et qu'il est difficile d'identifier précisément les populations exposées ainsi que les incertitudes associées aux estimations dosimétriques. Surtout, la surveillance des populations et la réalisation de bilans sanitaires sont rendues extrêmement compliquées par les changements socio-économiques majeurs survenus dans les régions concernées suite à la chute de l'Union soviétique.

(5) Cette zone d'exclusion, toujours en vigueur, est aussi appelée officiellement « zone d'aliénation de la centrale nucléaire de Tchernobyl ». Elle couvre une superficie de 2 600 km<sup>2</sup>, à cheval sur les territoires ukrainien et biélorusse. Un retour des populations n'y est pas envisageable avant longtemps ; les éléments radioactifs tels que le césium 137 ou le strontium 90 n'ont en effet perdu que la moitié de leur activité depuis 1986.

Les réacteurs de type RBMK feront l'objet, dans un cadre communautaire européen <sup>(6)</sup>, d'améliorations substantielles de leur sûreté, mais, progressivement, un certain nombre d'entre eux seront définitivement arrêtés. Les restes du réacteur n°4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl seront surmontés d'un sarcophage de protection, lui-même recouvert en 2016 d'un autre sarcophage plus efficace (voir la Figure 2 ci-dessous).



Figure 2 : Le nouveau sarcophage du réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl (photo©Wikipédia).

### Enseignements tirés de l'accident

L'accident de Tchernobyl a eu des conséquences très importantes au plan international. En premier lieu, il a conduit au développement de la notion de « culture de sûreté » [8] : cette notion prône, notamment, d'accorder une place primordiale à la sûreté dans l'exploitation des installations nucléaires, et ce à tous les niveaux organisationnels, et l'adoption d'une attitude interrogative comme garante d'une bonne sûreté.

Les difficultés de la communication à l'adresse du public – notamment en France – conduiront également à la création d'une échelle internationale de gravité des événements affectant les installations nucléaires, appelée échelle INES (International Nuclear Event Scale)<sup>(7)</sup>. Par ailleurs, en France, l'accident conduira les pouvoirs publics à prendre un certain nombre d'initiatives favorisant la participation du public à des instances existantes ou créées touchant à la sûreté des installations et des activités dans le domaine nucléaire.

En France, l'accident de Tchernobyl conduira les concepteurs, les exploitants et les organismes de sûreté à étudier de façon approfondie les possibilités d'apport intempestif de réactivité dans les cœurs des réacteurs et à leur maîtrise, et ce même si les réacteurs à eau sous pression diffèrent significativement des RBMK. Ainsi, les risques d'accidents de dilution intempestive du bore (élément qui absorbe les neutrons et qui est utilisé en solution liquide en complément des grappes de contrôle et d'arrêt) ont été particulièrement analysés et des dispositions spécifiques de protection ont été mises en place dans les réacteurs du parc électronucléaire français.

(6) Sur financements de la BERD.

(7) L'accident de TMI-2 sera classé au niveau 5, ceux de Tchernobyl et de Fukushima Daiichi au niveau 7.

Après l'accident de Tchernobyl, l'ensemble des exploitants nucléaires français ont créé un groupement d'intérêt économique, le « Groupe d'intervention robotique sur accident » (INTRA), pour constituer, exploiter et maintenir une flotte d'engins robotisés télé-opérés capables d'intervenir 24 heures sur 24 en cas d'accident nucléaire de grande ampleur dans les installations.

## Accident ayant affecté les réacteurs et les piscines d'entreposage du combustible de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

### Déroulement de l'accident

Le 11 mars 2011, un séisme de magnitude 9 est survenu à 80 kilomètres à l'est de l'île de Honshu au Japon ; il s'en est suivi un tsunami. Ces phénomènes ont affecté gravement le territoire japonais dans la région de Tohoku.

Ces événements ont eu de graves conséquences à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [9], équipée de six réacteurs à eau bouillante : tout d'abord, la perte des sources électriques externes (ce qui a conduit à l'arrêt automatique des réacteurs) suite aux secousses sismiques ; puis l'inondation du site de la centrale, après l'arrivée de la vague du tsunami d'une hauteur supérieure à celle de la digue de protection du site. Les pompes de refroidissement des installations de la centrale ont été noyées, privant ainsi les réacteurs et leurs piscines d'entreposage des combustibles usés (irradiés en réacteur) de leur source normale de refroidissement. L'eau, qui a pénétré dans des locaux, a rendu indisponibles la plupart des groupes électrogènes de secours de la centrale : un seul groupe électrogène a pu servir en alternance sur les réacteurs pour tenter d'évacuer leur puissance résiduelle<sup>(8)</sup>. Un grand nombre des moyens de télécommunication prévus pour l'information des équipes de crise ont eux aussi été inopérants. Quatre des six réacteurs ont été grandement endommagés avec une fusion du cœur et des pertes prolongées de refroidissement des piscines d'entreposage des combustibles usés n'ont pu être évitées. Des explosions (liées *a priori* à la présence d'hydrogène) ont détruit les superstructures des bâtiments (voir la Figure 3 ci-dessous).



Figure 3 : Les superstructures des réacteurs de la centrale de Fukushima Daiichi détruites par les explosions (source : photo©TEPCO (médiathèque IRSN)).

(8) Puissance dégagée après l'arrêt de la réaction nucléaire en chaîne, due à la décroissance radioactive des produits de fission.



Les réservoirs de stockage de l'eau contaminée de la centrale de Fukushima, février 2017.

« La maîtrise des rejets d'eau contaminée vers l'océan Pacifique est une préoccupation majeure qui a conduit l'exploitant à mettre en place des dispositions constructives de grande ampleur : digues, drains, congélation des sols... »

### Conséquences de l'accident

Une quinzaine d'épisodes de rejets ont eu lieu durant une dizaine de jours [10]. S'agissant des iodes, l'activité radiologique des rejets a été environ dix fois plus faible que dans le cas de l'accident de Tchernobyl. L'activité des rejets en césium a elle aussi été moindre.

Compte tenu de la dispersion atmosphérique et des conditions météorologiques, les rejets ont principalement touché l'océan Pacifique et assez peu les terres, se limitant à quelques régions situées autour de la préfecture de Fukushima. Les dépôts les plus importants, qui délimitent une trace nord-ouest de 80 kilomètres d'extension, se sont constitués du fait de la concomitance des vents et de fronts pluvieux. Cependant, la majorité des denrées agricoles et d'élevage produites au Japon, y compris dans la préfecture de Fukushima, ont présenté dès avant 2012 des activités massiques en iode et en césium inférieures aux niveaux de commercialisation ; elles ont continué à décroître au cours des années qui ont suivi.

C'est le ruissellement des eaux marines puis douces, qui ont été déversées en grandes quantités sur les réacteurs pour les refroidir, qui a été à l'origine de l'essentiel de la contamination marine. Toutefois, dès le mois de mai 2011, il a pu être constaté que l'activité volumique de l'eau de mer en césium, à moins de 2 kilomètres du site, avait pu significativement décroître grâce aux courants marins ; fin 2018, il était observé des valeurs similaires à celles de mesures réalisées avant l'accident.

Cinq décès ont été attribués à l'accident de façon globale (tsunami...), aucun n'étant attribué à une exposition aux rayonnements ionisants. La population fait l'objet d'un suivi sanitaire, notamment de la fonction thyroïdienne chez les enfants qui ont été exposés aux rejets radioactifs.

En France, les activités radiologiques mesurées de l'air ont très peu dépassé les valeurs normales<sup>(9)</sup>.

Les initiatives de revitalisation et les activités de reconstruction engagées au Japon dans le cadre d'un processus dit de relèvement<sup>(10)</sup> vont de celles menées par les pouvoirs publics au niveau national à des initiatives d'organisations non gouvernementales et de collectivités locales.

La maîtrise des rejets d'eau contaminée vers l'océan Pacifique est une préoccupation majeure qui a conduit l'exploitant à mettre en place des dispositions construc-

(9) Par ailleurs, dans les jours qui ont suivi l'accident, l'IRSN a réalisé des simulations de la dispersion du panache radioactif sur grandes distances, jusqu'en Europe [11].

(10) Le « relèvement » après l'accident comprend : la remédiation des zones touchées par l'accident ; la stabilisation des installations endommagées sur le site et la mise en œuvre des préparatifs nécessaires à leur déclassement ; la gestion des matières contaminées et des déchets radioactifs résultant des déconstructions et assainissements ; la revitalisation des collectivités affectées et l'obtention de l'engagement de l'ensemble des parties prenantes. Par remédiation, on entend toutes les mesures qui peuvent être mises en œuvre pour réduire l'exposition à des rayonnements due à une contamination existante des terres en agissant sur la contamination elle-même (la source) ou sur les voies d'exposition des êtres humains.

tives de grande ampleur : digues, drains, congélation des sols...

Seuls 5 réacteurs électronucléaires sur les 54 existant au Japon sont restés en service après l'accident. Compte tenu des nouvelles normes de sûreté adoptées après cet accident, ils ne sont que 39 à avoir été considérés opérationnels et pouvant donc être redémarrés. À fin 2018, 11 réacteurs de divers électriciens ont été redémarrés avec l'autorisation de l'Autorité de sûreté nucléaire japonaise.

### Enseignements tirés de l'accident

Les enseignements tirés de l'accident de Fukushima Daiichi sont nombreux. Au-delà du fait que la hauteur trop faible de la digue a constitué la cause première de l'accident, ce qui soulignait les enjeux associés au choix du site et de la prise en compte des risques environnementaux – et de la nécessité de les réévaluer périodiquement pour procéder en temps utile aux renforcements jugés nécessaires –, beaucoup d'autres faits méritaient d'être analysés en profondeur (difficultés rencontrées dans la gestion de crise, coordination défailante dans les prises de décisions, et ce y compris au niveau de l'organisation du contrôle de la sûreté au Japon).

Dans les mois qui ont suivi l'accident, des *stress tests* ont été diligentés en Europe sur les réacteurs électronucléaires. En France, ils se sont traduits par les « évaluations complémentaires de sûreté » : les objectifs étaient d'évaluer la capacité de résistance des réacteurs à des aléas d'ampleur supérieure (aléas extrêmes) à ceux retenus dans les bases de conception de ces installations ou lors des réexamens décennaux, et de définir si nécessaire les améliorations pouvant leur être apportées. Cela a conduit à deux ensembles de dispositions :

- la constitution par Électricité de France d'une force d'action rapide nucléaire (FARN), qui comprend quatre « bases matériel nationales » disposant de moyens mobiles (groupes électrogènes, pompes, etc.) pouvant être acheminés vers n'importe quelle centrale française dans un délai de 24 heures ;
- la mise en place, dans chaque centrale, d'un « noyau dur » d'équipements pouvant résister à des aléas extrêmes, permettant aux exploitants des réacteurs de les ramener à un état d'arrêt sûr (maintien à long terme de la sous-criticité des combustibles en cœur et en piscine d'entreposage, de l'évacuation de la puissance résiduelle, du confinement).

En règle générale, l'accident de Fukushima Daiichi a conduit, dans le monde, à prévoir des moyens de secours complémentaires « sécurisés », c'est le cas notamment aux États-Unis avec la mise en place par les exploitants de dispositions regroupées sous le nom générique FLEX.

L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima a aussi conduit à des évolutions dans les approches de sûreté. La prise en compte d'aléas extrêmes et de leurs effets induits<sup>(11)</sup> est ainsi préconisée dans le cadre d'un « domaine étendu de conception », cela aussi bien dans les

derniers textes de l'AIEA ou de l'association WENRA<sup>(12)</sup>, que, plus récemment, dans le guide français ASN n°22 établi conjointement avec l'IRSN.

## Conclusion

Les éléments qui précèdent relatifs aux trois « grands » accidents ayant concerné des réacteurs électronucléaires illustrent les enseignements de natures extrêmement diverses qui peuvent être tirés de l'expérience d'exploitation des réacteurs électronucléaires. Toutes les dispositions concrètes qui en ont résulté visent, *in fine*, à un renforcement de la prévention et de la limitation des conséquences d'accidents dans les installations nucléaires, cela dans le cadre d'un processus d'amélioration continue de leur niveau de sûreté. En outre, la prise en compte des accidents avec fusion du cœur dans la conception de réacteurs de nouvelles générations est, depuis les années 1990, un principe adopté au plan international.

## Références bibliographiques

- [1] INSAG-10 (1996), "Defence in Depth in Nuclear Safety, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group".
- [2] JACQUEMAIN D. (2013), « Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance – État des connaissances », sous-chapitre 7.1, IRSN/EDP Sciences, collection « Sciences et techniques ».
- [3] WASH-740 (1957), "Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants".
- [4] Professor RASMUSSEN N. C. *et al.* (October 1975), "Reactor safety study. An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants", WASH-1400 (NUREG-75/014).
- [5] « 1986-2016 : Tchernobyl, 30 ans après », rapport IRSN : [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/2016-Tchernobyl-30ans-apres](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/2016-Tchernobyl-30ans-apres)
- [6] UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes: [http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076\\_Report\\_2008\\_Annex\\_D.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf)
- [7] RENAUD Ph., CHAMPION D. & BRENOT J. (2007), « Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français : conséquences environnementales et exposition des personnes », IRSN/Lavoisier, collection « Sciences et techniques ».
- [8] INSAG-4 (1991), "Safety Culture, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group".
- [9] Rapport IRSN/DG/2012-001 (2012), « Fukushima, un an après – Premières analyses de l'accident et de ses conséquences ».
- [10] United Nation Scientific Committee on the effects on atomic radiation, report to the general assembly, vol. 1, annex A: levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great est-japan earthquake and tsunami, 2013, [https://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418\\_Report\\_2013\\_Annex\\_A.pdf](https://www.unscear.org/docs/reports/2013/13-85418_Report_2013_Annex_A.pdf)
- [11] Simulations par l'IRSN de la dispersion du panache radioactif de Fukushima Daiichi à grandes distances, jusqu'en Europe : [http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france\\_30mars.aspx](http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_30mars.aspx) (dernière mise à jour : en date du 8 avril 2011).

(11) Perte totale des alimentations électriques, de la source froide...

(12) Western European Association Regulators.