

Chapitre 34

L'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl

Le 26 avril 1986, à 1 heure 23 minutes et 44 secondes (heure locale), le réacteur de la quatrième tranche de la centrale nucléaire russe de Tchernobyl explosait. Cet accident est de loin le plus grave survenu dans une installation nucléaire civile; il a entraîné:

- deux morts immédiates par polytraumatismes;
- des syndromes aigus d'exposition aux radiations pour 134 personnes, dont 28 mourront dans les deux mois qui suivirent l'accident;
- l'évacuation de 115 000 personnes dans les jours qui ont suivi, et de 230 000 personnes supplémentaires jusqu'en 1995;
- l'irradiation et la contamination de millions d'individus à des niveaux significatifs mais souvent difficiles à préciser;
- l'apparition, depuis 1990, de cancers de la thyroïde chez des personnes contaminées lorsqu'elles étaient enfants dans les régions les plus touchées d'Ukraine, du Bélarus et de Russie; plusieurs milliers de cas de tels cancers ont été répertoriés, ainsi qu'une quinzaine de décès;
- une large détérioration de l'état sanitaire des populations les plus exposées;
- une contamination importante et à long terme de vastes zones des territoires d'Ukraine, du Bélarus et de Russie;

- de grandes perturbations économiques, sociales et psychologiques, mais aussi institutionnelles et politiques dans ces mêmes pays;
- une contamination mesurable dans beaucoup de pays européens dont la France.

Plus de 300 000 personnes, les « liquidateurs », ont dû intervenir en 1986 et 1987 pour réaliser une première décontamination du site dans des conditions de radioprotection précaires. Le nombre de personnes impliquées dans la décontamination des sols dans un rayon de 30 km et dans la construction du premier sarcophage s'élève au total à plus de 500 000.

Les tranches de la centrale de Tchernobyl appartenaient à la filière RBMK⁸⁸⁴ dont les caractéristiques particulières sont la mise en œuvre d'uranium faiblement enrichi, la modération neutronique par le graphite et le refroidissement par de l'eau bouillante circulant dans des tubes de force. On ne trouve ce modèle de réacteurs qu'en Russie, Ukraine et Lituanie, pays qui faisaient partie de l'Union soviétique.

Lors de l'accident, un essai était en cours sur le réacteur dans des conditions très spécifiques, en dehors du domaine normal d'exploitation: faible puissance, avec certains systèmes indisponibles ou mis hors service.

Pourtant, comme après l'accident de Three Mile Island, il faut aller au-delà de quelques réflexions sur la conception des réacteurs RBMK et les erreurs des opérateurs du réacteur accidenté. C'est ainsi que, à partir de ce qui était présenté initialement comme le résultat d'une accumulation d'erreurs humaines, ont été développées progressivement:

- une réflexion profonde sur les caractéristiques minimales d'une bonne organisation de la sûreté dans un pays,
- l'explicitation de la notion de culture de sûreté,
- une approche plus réaliste mais plus complète des évaluations des rejets accidentels possibles et de leurs effets,
- la mise en évidence de possibilités d'accidents de réactivité dans les installations occidentales de type REP,
- des exigences de transparence de l'information pour les personnes du public.

Les éléments fournis dans le présent chapitre sur le déroulement de l'accident, l'analyse des causes et les enseignements tirés s'appuient notamment sur le rapport INSAG-7 de 1992⁸⁸⁵, qui inclut en annexes deux rapports: le premier est celui qui a été établi en 1991 par une commission d'experts (State Committee for the Supervision of Safety in Industry and Nuclear Power [SCSSINP]), à la demande de l'ex-URSS et le second celui qui a été établi en 1991 par un groupe de travail d'experts soviétiques.

884. *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalny.*

885. « The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1 » – Safety series No. 75-INSAG-7 – 1992.

34.1. La centrale nucléaire de Tchernobyl et la filière RBMK

La centrale nucléaire de Tchernobyl se trouve à la limite nord de l'Ukraine, à une centaine de kilomètres au nord de Kiev, à proximité alors d'une ville nouvelle relativement importante, Pripyat, qui hébergeait les personnels de la centrale et leurs familles. La limite du Bélarus est proche, 10 à 15 kilomètres au nord; celle de la Russie se trouve à 150 kilomètres au nord-est.

La quatrième tranche de la centrale était l'un des 14 réacteurs en service de 1 000 MWe (3 200 MWh) de la filière RBMK. Ce type de réacteur étant assez différent des réacteurs occidentaux, il est nécessaire de le décrire rapidement (voir la figure 34.1). Il s'agit d'un réacteur à neutrons thermiques modéré par du graphite, chargé d'éléments combustibles à base d'oxyde d'uranium enrichi à 2 % en uranium 235, gainés en alliage zirconium-niobium. L'empilement de graphite est de grandes dimensions (11,8 mètres de diamètre et 7 mètres de hauteur). Le refroidissement est réalisé par de l'eau qui passe à l'ébullition en circulant de bas en haut dans des tubes de force (environ 1 700), eux-mêmes en alliage zirconium-niobium. L'ensemble repose sur une structure mécanosoudée contenue dans une cavité en béton de 21,60 mètres de côté et de 25,50 mètres de hauteur.

Au-dessus du réacteur, une machine permet le déchargement et le chargement du combustible dans les tubes de force lorsque le réacteur est en fonctionnement.

La maîtrise de la réactivité et de la puissance est assurée par 211 barres absorbantes qui occupent des tubes de force analogues aux précédents, répartis dans tout le cœur du réacteur. Ces barres sont actionnées par des mécanismes situés au-dessus du cœur, sous le plancher de protection du hall. Elles sont constituées d'anneaux de carbure de bore, avec, en partie basse, un prolongateur de graphite de 4,5 mètres de longueur.

Les barres sont entraînées par des moteurs, tant pour leur extraction que pour leur insertion dans le cœur du réacteur. Leur vitesse maximale était de 0,4 m/s. Il fallait donc de 18 à 20 secondes pour obtenir une insertion complète à partir d'une position haute des barres.

Deux boucles indépendantes assurent le refroidissement du réacteur; elles évacuent chacune l'énergie produite par la moitié du cœur. Chaque boucle comprend deux ballons séparateurs (de 30 mètres de longueur et 2,30 mètres de diamètre) et quatre pompes de recirculation (trois en fonctionnement et une en réserve). Le mélange d'eau et de vapeur qui sort de chaque tube de force après passage dans le réacteur arrive directement par une tuyauterie dans un des ballons séparateurs.

L'eau retourne par 12 tuyauteries vers les collecteurs et les pompes de recirculation qui alimentent les tubes de force par un système de sous-collecteurs et de tuyauteries. Pour chaque boucle, il y a 22 sous-collecteurs de 300 mm de diamètre.

L'eau entre dans le cœur du réacteur à 270 °C, s'échauffe sur 2,50 mètres de hauteur et bout dans la partie supérieure du cœur. À sa sortie, le titre de la vapeur

à pleine puissance est de 14,5 %. La pression à la sortie du réacteur est de 70 bars et la température de 285 °C. Le débit de chaque tube de force peut être réglé par une vanne, de façon à obtenir une distribution de puissance convenable.

Chaque boucle alimente un groupe turboalternateur de 500 MWe.

Le massif de graphite n'est refroidi que par l'intermédiaire des tubes de force. Sa température est donc élevée en fonctionnement, sauf au contact des tubes des barres absorbantes et dans le réflecteur.

Un circuit de refroidissement de secours permet de refroidir le cœur en cas de brèche dans le circuit principal de refroidissement (rupture d'une tuyauterie du circuit de circulation, rupture d'un conduit de vapeur ou rupture d'une tuyauterie d'alimentation en eau).

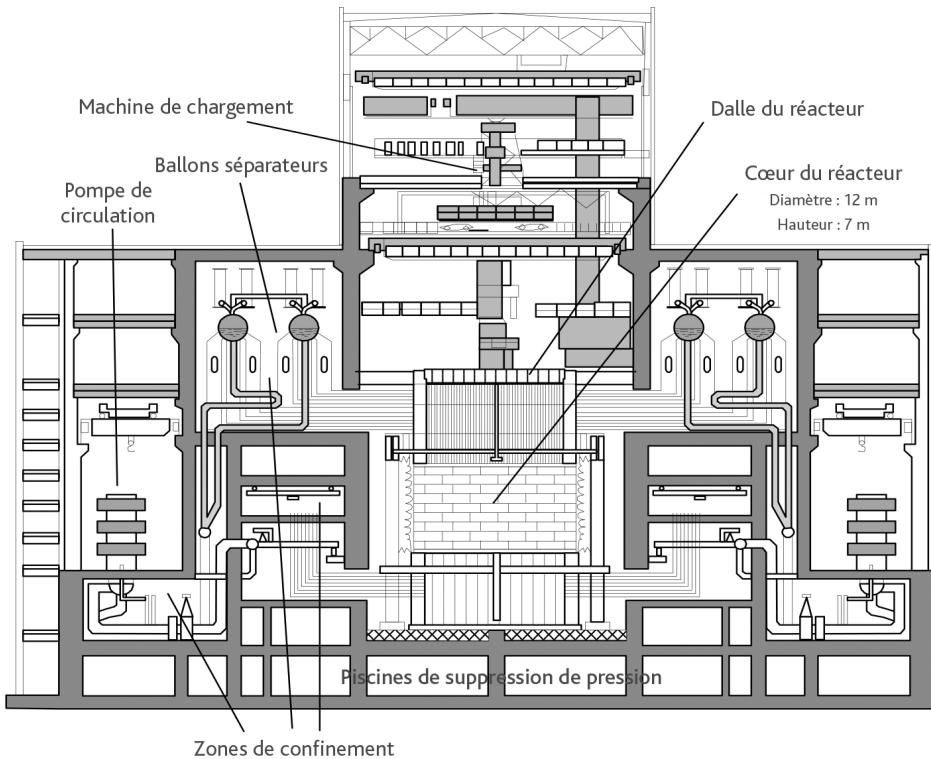


Figure 34.1. Coupe simplifiée d'une tranche RBMK de 1 000 MWe. IRSN.

Comme pour les installations occidentales, les brèches considérées pour la définition des caractéristiques du circuit de refroidissement de secours sont postulées dans les tuyauteries, les sous-collecteurs et les collecteurs, à l'exclusion des plus grosses capacités comme les ballons séparateurs. Rappelons de plus qu'il n'y a pas de cuve sous pression mais des tubes de force individualisés.

L'accident de dimensionnement des systèmes de sauvegarde et de confinement est la rupture d'un collecteur de 900 mm de diamètre, avec la perte des alimentations électriques externes et la prise en compte d'une défaillance unique. Pour ce qui concerne le cœur lui-même et son circuit de refroidissement, ce choix n'est pas différent de celui fait pour les réacteurs à eau sous pression occidentaux.

Par contre, le confinement est de conception modulaire, c'est-à-dire qu'il est assuré par plusieurs compartiments étanches permettant le confinement de différentes zones à l'égard des accidents qui y sont considérés (en particulier la pression engendrée par une brèche). Quatre zones essentielles sont ainsi définies: celle des tuyauteries alimentant les tubes de force, celle des tuyauteries et des pompes principales, celle des tuyauteries de vapeur et le cœur lui-même.

Les modules sont reliés directement ou indirectement aux piscines de suppression de pression, destinées à condenser la vapeur issue des brèches, implantées sous la cavité qui contient le cœur du réacteur.

Selon ses concepteurs russes, les avantages de ce type de réacteur sont l'absence de cuve sous pression, l'absence de générateur de vapeur, le renouvellement du combustible de manière continue et donc la souplesse du cycle du combustible, la possibilité de régler le débit de refroidissement canal par canal.

Les inconvénients sont non seulement la complexité du système de distribution et de collecte du fluide de refroidissement, la forte accumulation d'énergie thermique dans les structures métalliques, le graphite et le combustible, mais surtout la difficulté et la complexité de la maîtrise du niveau et de la distribution de puissance.

Ce dernier point appelle quelques commentaires supplémentaires. Comme cela a été noté plus haut, le cœur d'un réacteur de type RBMK de 1 000 MWe est de très grande taille: 11,8 mètres de diamètre, 7 mètres de hauteur. Des oscillations de puissance radiales et azimutales dues à l'« effet xénon » se produisent très facilement dans un cœur de cette dimension. La maîtrise de ces oscillations nécessite de très nombreux détecteurs et sollicite une part importante des barres absorbantes. Compte tenu de la sensibilité des détecteurs situés dans le cœur, la distribution fine de la puissance ne peut être déterminée qu'au-delà de 10 % de la puissance nominale; en deçà, les opérateurs ne disposent que d'une information globale donnée par des détecteurs extérieurs situés au plan médian.

De plus, la quantité de graphite comparée à celle du combustible et leur disposition font que le ralentissement des neutrons est très largement assuré. Dans ces conditions, si l'absorption des neutrons est faible dans le cœur (peu de barres absorbantes insérées, faible quantité d'uranium 235 dans le combustible due au faible enrichissement initial ou au taux de combustion du combustible), l'eau de refroidissement n'a plus aucun rôle de modération à jouer, contrairement à ce qui se passe dans les réacteurs à eau sous pression comme ceux du parc électronucléaire français, volontairement sous-modérés. Du point de vue neutronique, l'eau n'a donc que les caractéristiques d'un absorbant.

Tout échauffement, diminuant sa densité, diminue l'absorption globale des neutrons du cœur. *A fortiori*, l'ébullition d'une partie de cette eau à 70 bars, qui représente une baisse d'un facteur 20 de sa densité, augmente la proportion de neutrons disponibles pour provoquer des fissions. La puissance du réacteur a alors tendance à croître, amplifiant le phénomène.

Le coefficient de puissance lié à la température de l'eau est donc positif dans une partie du domaine de fonctionnement. Celui correspondant au taux de vaporisation (on dit généralement taux de vide) l'est bien sûr aussi puisqu'il s'agit du même phénomène.

Cet effet n'est heureusement pas le seul et l'effet neutronique d'une augmentation de la température du combustible lui-même est toujours négatif grâce à l'effet Doppler, dont la valeur absolue augmente avec la température.

Le coefficient global de puissance, somme des deux effets précités et de quelques autres de moindre importance, est négatif pour les puissances élevées, mais positif pour les puissances inférieures à 700 MW thermiques. De plus, ce coefficient est d'autant plus positif que les barres absorbantes sont retirées du cœur.

Il convient également de noter que dans les RBMK, lorsque les barres absorbantes sont très hautes, leur insertion commence par remplacer de l'eau par du graphite dans des zones où le flux neutronique est élevé, ce qui introduit de la réactivité au lieu d'en retirer. Cet effet a été observé dès 1983 à la centrale d'Ignalina mais si son caractère nocif semble avoir été signalé aux autres sites sur lesquels fonctionnaient des tranches de la filière RBMK, dont celui de Tchernobyl, aucune modification ou mesure restrictive d'exploitation n'a été adoptée et le sujet fut oublié.

Enfin, au plan thermohydraulique, il faut noter qu'une même augmentation de puissance donne d'autant plus de vapeur que la puissance initiale est faible, le débit massique du fluide de refroidissement étant sensiblement proportionnel à la puissance.

Cet ensemble de données physiques aurait dû se traduire par deux contraintes strictes de sûreté dans les documents d'exploitation des réacteurs RBMK :

- ne pas fonctionner de façon continue en dessous de 700 MWth; cette contrainte n'était pas formalisée;
- maintenir, en fonctionnement normal, l'équivalent de 30 barres absorbantes insérées dans le cœur. Cette deuxième contrainte, inscrite dans les documents de conduite, était perçue comme nécessaire à la maîtrise de la distribution de puissance et non comme globalement nécessaire à la sûreté de l'installation. Cet équivalent de 30 barres insérées limitait de plus l'effet de réactivité positif résultant de l'insertion des embouts en graphite lorsque l'on insérait d'autres barres.

L'équivalent de barres insérées dans le cœur était associé à une notion de « marge de réactivité en fonctionnement » (*Operating Reactivity Margin – ORM*) qui, pour reprendre les termes de l'INSAG-7, était peu précise et mal comprise par les opérateurs.

En outre, les éléments à la disposition des opérateurs dans les documents de conduite indiquaient que :

- en régime stable, la marge de réactivité ne devait pas être inférieure à l'équivalent de 26 à 30 barres absorbantes insérées ;
- le fonctionnement avec un équivalent de moins de 26 barres absorbantes insérées devait faire l'objet d'une autorisation du chef d'installation,
- à un équivalent de 15 barres absorbantes insérées ou moins, le réacteur devait être arrêté immédiatement.

Les RBMK étaient équipés d'un calculateur de l'ORM ; toutefois, ce calculateur n'avait pas la capacité de fournir l'information en temps réel, notamment lors de transitoires rapides, le cycle de calcul étant de plusieurs minutes (10 à 15 minutes dans les textes de l'INSAG, 5 minutes dans les rapports soviétiques). En outre, l'information n'était accessible que dans un local situé à 50 mètres du pupitre de commande.

34.2. Le déroulement de l'accident

Il est important de noter en remarque préliminaire que, dans la description du déroulement des faits rapportée dans les rapports soviétiques et dans le rapport INSAG-7, les valeurs de la marge de réactivité, exprimée en équivalent d'un nombre de barres absorbantes totalement insérées, sont issues de calculs réalisés *a posteriori*. En tout état de cause, lors du déroulement de l'essai, il est apparu que personne ne semble avoir pris connaissance de l'information donnée par le calculateur sur la marge de réactivité, qui, de surcroît, compte tenu du temps de calcul, pouvait correspondre à un état antérieur de plusieurs minutes.

La tranche n° 4 de la centrale de Tchernobyl était en service depuis décembre 1983. Un arrêt du réacteur était prévu le 25 avril 1986 afin d'effectuer des opérations d'entretien impossibles pendant le fonctionnement. Il était aussi prévu de réaliser un essai particulier juste avant l'arrêt de la tranche : il s'agissait de vérifier la possibilité, en cas de perte du réseau électrique extérieur, d'alimenter pendant quelques dizaines de secondes, avant la reprise en secours par les groupes électrogènes, les pompes principales de recirculation du réacteur par l'un des groupes turboalternateurs ralentissant sur son inertie⁸⁸⁶. Des essais de ce genre avaient déjà été effectués pour la tranche n° 4 mais des difficultés électriques les avaient perturbés. Un nouveau système de régulation avait été installé. L'essai devait être effectué en partant d'une puissance thermique de 700 à 1 000 MW.

La baisse de puissance commence le 25 avril. Vers 13 heures, le réacteur n'est plus qu'à 1 600 MWth, soit à mi-puissance. L'un des groupes turboalternateurs est

886. Cet essai faisait partie des essais de démarrage, mais n'avait pas été réalisé pour le réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl. Il avait été réalisé pour d'autres réacteurs, de 1982 à 1986, sans incident rapporté.

alors découplé. Conformément au programme d'essai, le circuit de refroidissement de secours du cœur est isolé sans que la raison de cet isolement soit très claire.

À ce moment, les services extérieurs à la centrale organisant la production et la distribution d'électricité demandent à celle-ci d'arrêter la baisse de puissance et de continuer à alimenter le réseau avec 500 MWe. Le réacteur reste ainsi à mi-puissance pendant 9 heures. Pendant ce palier, l'empoisonnement du cœur par le xénon a eu le temps de croître jusqu'à sa valeur maximale à cette puissance. Pour compenser cet effet, des barres absorbantes ont été progressivement extraites. Par ailleurs, personne n'a remis le refroidissement de secours en service pendant cette période, le fonctionnement prolongé avec un système de sûreté inhibé n'étant pas ressenti comme quelque chose de grave.

Vers 23 heures, la réduction de puissance reprend. Une heure et demie plus tard, au moment du basculement du système de régulation automatique de puissance au système manuel, le passage se fait mal. La puissance tombe à 30 MWth. Il n'y a donc plus de contrôle automatique. L'empoisonnement du cœur par le xénon augmente à nouveau. La production de vapeur dans le cœur est très faible. Il faut donc encore extraire un grand nombre de barres absorbantes pour remonter un peu la puissance, qui est stabilisée à 200 MWth le 26 avril vers 1 heure du matin.

Le réacteur ne fonctionne plus alors à l'intérieur du domaine stable requis en termes de marge de réactivité (la puissance est inférieure à 700 MWth – la marge de réactivité est à ce moment-là inférieure à l'équivalent de 30 barres insérées); l'équipe présente décide de faire l'essai prévu, en suivant les indications du programme initial.

Deux pompes de circulation complémentaires sont mises en service à 1 h 03 et 1 h 07, ce qui provoque une très forte augmentation du débit dans le cœur, au-delà des valeurs autorisées. La puissance du cœur étant inférieure à celle qui était escomptée lors de la préparation de l'essai, la pression de la vapeur et le niveau de l'eau dans les ballons séparateurs sont difficiles à maintenir dans les plages normales. Le personnel bloque alors les signaux d'arrêt d'urgence liés à ces paramètres, conformément au programme d'essai.

À 1 h 22, compte tenu de l'accumulation de xénon, il n'y aurait eu, selon des calculs réalisés après l'accident, que l'équivalent de six à huit barres insérées dans le cœur alors qu'un arrêt immédiat était requis dès qu'il n'y avait plus que l'équivalent de 15 barres insérées. En tout état de cause, l'arrêt immédiat n'est pas effectué; le personnel décide de faire l'essai et, dans le but de pouvoir le répéter si nécessaire, bloque le signal d'arrêt d'urgence du réacteur lié à l'arrêt du deuxième groupe turboalternateur.

À 1 h 23, les vannes d'admission de la vapeur à la turbine sont fermées mais le réacteur n'est pas arrêté. Les pompes de circulation alimentées par le groupe turboalternateur ralentissent, le débit diminue, l'eau chauffe et se vaporise. L'effet de vide libère de la réactivité. La puissance du cœur augmente et provoque encore plus de vapeur. La situation est divergente.

À 1 heure 23 minutes et 40 secondes, le chef opérateur donne l'ordre manuel d'insertion rapide des barres mais l'effet produit est l'inverse de celui qui était escompté: la partie basse des barres absorbantes qui pénètre dans le cœur est le prolongateur de graphite, qui prend la place qu'occupait l'eau dans les tubes de force, ce qui provoque une augmentation significative de la réactivité du cœur. L'excursion de puissance provoquée par l'augmentation du taux de vide est «aidée» par l'introduction des barres de commande!

Selon les différents calculs réalisés *a posteriori*, la puissance instantanée du réacteur aurait pu atteindre 100 fois, voire près de 500 fois, sa valeur nominale en quelques secondes. La réaction en chaîne s'est arrêtée par l'effet de réactivité négatif dû à l'échauffement du combustible (effet Doppler) et du fait de la destruction du cœur.

La description de la suite des événements résulte d'observations visuelles, de mesures de rayonnement hors du site, de la connaissance existante du comportement du combustible lors d'accidents de réactivité, de calculs post-accidentels et d'hypothèses. Il reste difficile d'affirmer que le scénario présenté dans les paragraphes suivants est parfaitement conforme à la réalité, en particulier quant à l'ordre de certains phénomènes.

L'excursion de puissance provoque un fort dépôt d'énergie dans des pastilles de combustible qui se fragmentent en très fines particules; de l'oxyde d'uranium se trouve libéré sous forme pulvérulente dans les canaux. Il y a alors interaction entre les particules très chaudes et dispersées de combustible et l'eau, ce qui provoque une vaporisation massive, une augmentation de pression et probablement une explosion de vapeur (ces phénomènes sont décrits au chapitre 17). L'explosion résultante provoque la rupture de certains tubes de force, ce qui entraîne le soulèvement de la dalle supérieure du réacteur (de 2 000 tonnes); ce soulèvement rompt les autres canaux et les tuyauteries horizontales amenant la vapeur aux collecteurs, et entraîne les barres de commande. L'énergie libérée par l'explosion a été estimée équivalente à celle de l'explosion de 30 à 40 tonnes de TNT.

Une deuxième explosion survient peu après. Elle pourrait être due à une déflagration de l'hydrogène formé par réaction de l'eau avec le zirconium des gaines et des tubes de force et mélangé à l'air après ouverture du cœur. Elle pourrait également être due à l'effet de réactivité provoqué par l'ébullition généralisée de l'eau passant de 70 bars à la pression atmosphérique après la rupture de tous les tubes de force.

Les superstructures du réacteur sont détruites.

Du fait de l'explosion, des débris incandescents fusent du cœur du réacteur dont la partie supérieure est à l'air libre et allument 30 foyers d'incendie dans l'installation et la tranche voisine. Les équipes de la centrale et les pompiers venus de Pripyat et de Tchernobyl (à 15 km de la centrale) interviennent très rapidement et éteignent la totalité des feux en moins de trois heures et demie. Ils ne disposent pas de protections efficaces contre la contamination et les brûlures, dont les effets s'ajoutent à ceux de l'exposition externe; 28 d'entre eux mourront dans les jours qui suivent, s'ajoutant

aux deux personnes présentes sur la dalle supérieure du réacteur et tuées directement par brûlures et polytraumatismes lors de l'accident.

Très vite, de l'eau est injectée dans le cœur dégradé pour le refroidir et éviter l'inflammation du graphite mais cette tentative échoue.

En effet, les examens réalisés après l'accident suggèrent que des températures très élevées ont été atteintes dans le cœur du réacteur (au-delà de 2 600 °C) et qu'une partie du cœur a fondu. Pendant les six jours qui ont suivi l'explosion, ces matériaux en fusion se sont écoulés et se sont accumulés sous le cœur formant une croûte en forme de creuset au-dessus de la dalle inférieure en béton. Cette croûte stable et isolante sur le plan thermique aurait tenu quatre jours et se serait rompue environ dix jours après l'explosion, laissant les matériaux fondus atteindre la dalle inférieure en béton. Les matériaux en fusion se seraient alors refroidis et solidifiés, entraînant une réduction de l'émission de substances radioactives. La dalle de 1,8 mètre d'épaisseur a été attaquée par les matériaux en fusion sur un mètre.

De plus, à 5 heures du matin (soit environ 3 h 30 après l'explosion), le graphite prend feu. Il est possible que l'échauffement des zones froides de l'empilement de graphite ait provoqué un « effet Wigner »⁸⁸⁷, qui contribue à la libération d'énergie et est très favorable à l'inflammation du graphite. De nombreux pompiers vont recevoir un surcroît d'irradiation en tentant d'éteindre ce feu. L'énorme masse de graphite brûlera pendant une dizaine de jours et le feu est sans doute pour une grande part, après l'explosion, à l'origine de la dispersion de substances radioactives à haute altitude dans l'atmosphère, qui ont contaminé une large partie de l'Europe.

Des matériaux – sable, bore, argile, dolomite, plomb – sont lâchés, mélangés, sur le réacteur, à partir d'hélicoptères, pour tenter d'arrêter l'incendie et les rejets de produits radioactifs. Du 27 avril au 2 mai, 5 000 tonnes de matériaux sont ainsi déversées pour recouvrir progressivement le réacteur, en vue de réduire le débit d'air qui alimente le feu du graphite et le relâchement de produits de fission. Malgré ces efforts, des rejets importants se produisent pendant une dizaine de jours, du 26 avril au 5 mai 1986. Les rejets se poursuivent ensuite pendant une vingtaine de jours, mais ils sont beaucoup plus faibles, le feu de graphite ayant été éteint et les matériaux fondus étant refroidis et partiellement solidifiés.

De l'azote sous pression est injecté sous le réacteur à partir du 5 mai pour refroidir les matériaux fondus et le béton de la dalle inférieure. Un échangeur de chaleur est ensuite placé dans cette zone. Cette disposition a pu contribuer au refroidissement et à la solidification des matériaux en fusion.

887. L'irradiation du graphite par les neutrons provoque des dommages dans le réseau cristallin de ce matériau qui s'accumulent si la température du graphite est inférieure à 350 °C. Ces défauts retiennent chacun une certaine quantité d'énergie. Si la température du graphite devient supérieure à 350 °C, le réseau cristallin reprend sa forme stable et l'énergie stockée est immédiatement libérée. C'est le phénomène qui s'est produit dans le réacteur de Windscale au Royaume-Uni en 1952.

La figure 34.2 montre le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl détruit.



Figure 34.2. Le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl après l'accident.

Dans les mois qui suivent l'accident, des travaux sont réalisés pour isoler la tranche accidentée dans un massif de béton. Les conditions de construction particulièrement difficiles de l'ouvrage donneront à l'étanchéité de ce « sarcophage » une faible tenue dans le temps. Des travaux ont été effectués en 1995 pour limiter la pénétration des eaux de pluie dans ce « sarcophage », en l'attente de travaux plus importants.

Le programme SIP (*Shelter Implementation Plan*), lancé en 1997, a pour objectif final la transformation du site en une zone « écologiquement sûre ». Ses principaux jalons sont :

- Étape 1: stabilisation des structures du « sarcophage » existant.
- Étape 2: construction d'un nouveau « confinement sûr ».

- Étape 3 : démantèlement du « sarcophage » existant et enlèvement des matériaux radioactifs qu'il enferme.

La première étape du projet a été achevée en 2008.

En septembre 2007, un contrat⁸⁸⁸ a été signé pour la construction d'un nouveau confinement recouvrant complètement l'ancien « sarcophage ». En forme d'arche, la nouvelle enceinte est composée d'une ossature métallique de plus de 18 000 tonnes aux dimensions gigantesques : environ 257 mètres de portée, 162 mètres de long et 108 mètres de hauteur.

Avant le début de la construction du nouveau sarcophage, 55 000 m³ de matières contaminées ont été retirées et une chape de béton de 30 cm a été coulée, afin de permettre aux quelques 10 000 personnes qui devaient prendre part aux travaux de travailler dans les conditions les plus sûres possibles.

Le nouveau sarcophage a été définitivement installé à la fin de novembre 2016 (voir la figure 34.3); il recouvre désormais l'ensemble de la tranche n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Mais des travaux se poursuivent à l'intérieur, pour assurer l'étanchéité de ce nouveau sarcophage (notamment la connexion au premier sarcophage par une membrane) et pour préparer l'extraction des débris qui restent sous le premier sarcophage.



Figure 34.3. Le nouveau sarcophage une fois installé, vue prise en 2017. BERD.

888. Le financement est assuré en grande partie par les pays européens et la Banque européenne pour la reconstruction et le développement (BERD).

34.3. Analyse des causes de l'accident et modifications rapidement mises en place pour les RBMK

Les premiers éléments transmis par les responsables russes faisaient peser toute la responsabilité de l'accident sur les opérateurs, en insistant sur les violations des règles de conduite. Il est ensuite apparu (voir le rapport INSAG-7) que ces règles n'existaient pas ou n'étaient ni claires ni comprises et que les véritables causes de la catastrophe sont la conception de l'installation, la pauvreté des études de sûreté, la faiblesse des règles et documents de conduite et de la formation qui en résultaient, ainsi qu'un contrôle insuffisant des autorités de sûreté. De fait, c'est tout le milieu nucléaire soviétique, concepteurs, constructeurs, exploitants mais aussi organismes de sûreté qui a été mis en cause.

Dans la phase de préparation de l'essai, ses implications sur la sûreté ne semblent pas avoir été vues. Le programme prévoyait pourtant d'importantes dérogations aux règles d'exploitation, comme l'arrêt du système d'injection d'eau de sécurité et la mise en service des huit pompes de recirculation, ce qui représentait une nette diminution du niveau de sûreté. Ce programme n'avait pas fait l'objet d'un examen par le groupe de sûreté de la centrale et devait être mené par un ingénieur électricien.

Au cours de l'essai, de nombreux moyens de protection automatiques ont été successivement inhibés; il s'agit:

- de l'injection de sécurité,
- de l'arrêt d'urgence en cas d'alarme de niveau ou de pression dans les ballons séparateurs,
- de l'arrêt d'urgence en cas d'arrêt du deuxième turboalternateur.

De plus, les opérateurs ont poursuivi le fonctionnement alors même que l'installation était hors des limites mentionnées plus ou moins clairement dans les documents de conduite. On notera en particulier:

- un fonctionnement sans injection de sécurité pendant neuf heures,
- un fonctionnement prolongé à une puissance inférieure à 700 MWth,
- une marge en termes de réactivité largement inférieure à l'équivalent de 30 barres absorbantes insérées dans le cœur, et même inférieure à l'équivalent de 15 barres insérées,
- la poursuite du fonctionnement malgré la consigne d'arrêt immédiat qui aurait dû être appliquée du fait de cette insertion insuffisante.

Les opérateurs ont agi comme s'ils n'avaient aucune idée des conséquences possibles d'un non-respect de ces conditions d'exploitation.

Ces pratiques ne semblent pas avoir été exceptionnelles. Elles ne pouvaient donc qu'être connues et tolérées des responsables de la centrale et des inspecteurs résidents de l'autorité de sûreté.

En amont de ces erreurs d'exploitation, les erreurs de conception relevées pour ce type de réacteur sont :

- l'instabilité du cœur à faible puissance, due au coefficient de vide très positif de l'eau de refroidissement ;
- l'absence d'un véritable arrêt d'urgence rapide et sans effet initial pervers ;
- la faible automatisation des actions de protection et les larges possibilités d'inhibition. La confiance était bien plus accordée aux opérateurs qu'aux automatismes, considérés, à l'époque des premières réalisations, comme moins fiables.

Très rapidement⁸⁸⁹ après l'accident, différentes dispositions ont été définies par les concepteurs pour rendre les réacteurs RBMK moins vulnérables aux erreurs et violations de procédures.

L'enrichissement de l'uranium a été augmenté de 2 % à 2,4 % et le cœur doté de barres absorbantes supplémentaires (30 dans un premier temps, nombre qui sera porté à 80 dans un second temps). Cela a augmenté l'absorption des neutrons dans le cœur et diminué les effets positifs de réactivité.

Toutes les barres absorbantes ont été affectées d'une limite minimale d'insertion de 1,20 mètre, 70 à 80 barres devaient désormais rester dans le cœur. Ces deux dispositions réduisaient le coefficient de vide positif et plaçaient les barres dans une position immédiatement efficace. Leur temps d'introduction a par ailleurs été ramené de 19 à 2,5 secondes. Enfin elles ont été modifiées pour éliminer l'effet de réactivité positif en début d'introduction.

La marge de réactivité en fonctionnement (ORM) a été strictement fixée à un équivalent de 43 à 48 barres insérées, selon les réacteurs, et non plus à un équivalent de 30 ou 15 comme avant l'accident. Le calculateur de cette marge a fait l'objet de modifications avec report de l'information en salle de commande.

Par ailleurs, des modifications ont été apportées au système de dépressurisation pour augmenter sa capacité d'évacuation de puissance.

34.4. Devenir des autres tranches du site

Les autres tranches du site de Tchernobyl sont maintenant toutes à l'arrêt et la construction des réacteurs n° 5 et n° 6, qui avait démarré en 1981, a été abandonnée.

Les réacteurs n° 1, n° 2 et n° 3 ont été déchargés. Le combustible est entreposé en piscine dans une installation construite sur le site. Une installation de stockage à sec de ces combustibles est construite sur le site ; le refroidissement est assuré par une

889. Le rapport INSAG-7 et les rapports soviétiques soulignent que, bien avant l'accident de Tchernobyl, les concepteurs n'étaient pas dans l'ignorance des risques liés aux caractéristiques propres des RBMK, sans pour autant que cela se traduise concrètement par des modifications ou des restrictions d'exploitation.

circulation d'air. Après le transfert des combustibles, la piscine de refroidissement ne sera plus nécessaire.

34.5. Rejets et protection des populations

La synthèse globale officielle la plus récente relative aux rejets et aux conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl se trouve dans le rapport de l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) présenté à l'assemblée générale des Nations Unies en 2008 et en particulier dans l'annexe scientifique D⁸⁹⁰. Ce rapport a été précédé, en 2006, d'un rapport de l'Organisation mondiale de la Santé⁸⁹¹, l'OMS, ainsi que d'un rapport de l'AIEA⁸⁹². Les éléments qui suivent s'appuient sur l'ensemble de ces documents ainsi que sur des données plus récentes, telles que celles d'un rapport diffusé en 2018 par l'UNSCEAR, qui présente un bilan actualisé de l'incidence de cancers de la thyroïde dans les régions touchées par l'accident de Tchernobyl⁸⁹³.

34.5.1. Cinétique des rejets

Un tiers des rejets a été immédiat, au moment des explosions et de l'ouverture du réacteur (figure 34.4); les deux autres tiers, du 27 avril au 5 mai, ont eu des compositions variables en fonction des températures des différentes zones du combustible, mais tous contenaient de l'iode et du césium et, sans doute, des gaz rares, dans des proportions variables suivant les phases.

Le recouvrement progressif du cœur par des matériaux lâchés par hélicoptère a conduit, à partir du 2 mai, à une augmentation des températures dans le cœur, moins bien refroidi, et donc à des rejets jusqu'à ce que, vers le 6 mai, la combustion du graphite soit étouffée et les matériaux en fusion soient refroidis et partiellement solidifiés.

890. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes intitulé « Sources and Effects of Ionizing Radiation », disponible à l'adresse suivante : http://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf.

891. « Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes ». Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group » – Genève, 2006, disponible à l'adresse suivante : http://www.who.int/entity/ionizing_radiation/chernobyl/en/index.html.

892. « Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience ». Report of the Chernobyl Forum Expert Group « Environment » – IAEA, 2006.

893. Rapport de l'UNSCEAR intitulé « Evaluation of Data on Thyroid Cancer in Regions Affected by the Chernobyl Accident », 2018.

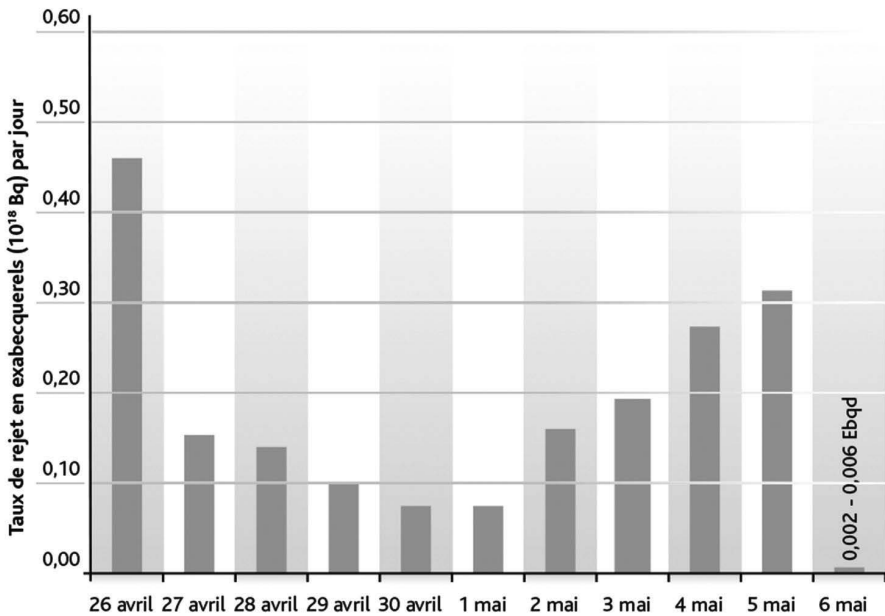


Figure 34.4. Rejets quotidiens de produits radioactifs (hors gaz rares) dans l'atmosphère après l'explosion du réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl. IRSN (source AIEA, 2006 [voir nota 892]).

Tableau 34.1. Estimation de l'activité des principaux radionucléides rejetés lors de l'accident de Tchernobyl (source AIEA, 2006).

Type d'élément	Radionucléide	Symbole	Période radioactive	Activité totale rejetée en PBq (10 ¹⁵ Bq)
Gaz inerte	Krypton 85	⁸⁵ Kr	10,7 ans	33
	Xénon 133	¹³³ Xe	5,3 jours	6 500
Éléments facilement volatils	Iode 131	¹³¹ I	8 jours	~ 1 760 ⁸⁹⁴
	Iode 133	¹³³ I	20,8 heures	2 500
	Césium 134	¹³⁴ Cs	2,1 ans	~ 47
	Césium 136	¹³⁶ Cs	13,1 jours	36
	Césium 137	¹³⁷ Cs	30,2 ans	~ 85 ⁸⁹⁵
	Tellure 132	¹³² Te	78 heures	~ 1 150
Éléments peu volatils	Ruthénium 103	¹⁰³ Ru	39,3 jours	> 168
	Ruthénium 106	¹⁰⁶ Ru	1 an	> 73
	Strontium 89	⁸⁹ Sr	50,5 jours	~ 115
	Strontium 90	⁹⁰ Sr	29,1 ans	~ 10
	Baryum 140	¹⁴⁰ Ba	12,7 jours	240

894. Soit 50 à 60 % de l'activité d'iode 131 contenue dans le combustible du cœur.

895. Soit 20 à 40 % de l'activité du césium 137 contenue dans le cœur.

Type d'élément	Radionucléide	Symbole	Période radioactive	Activité totale rejetée en PBq (10 ¹⁵ Bq)
Éléments réfractaires (non volatils)	Zirconium 95	⁹⁵ Zr	64 jours	84
	Cérium 141	¹⁴¹ Ce	33 jours	84
	Cérium 144	¹⁴⁴ Ce	285 jours	~ 50
	Neptunium 239	²³⁹ Np	2,4 jours	400
	Plutonium 238-239-240	Pu	respectivement 87,8, 2,41.10 ⁴ et 6 563 ans	< 0,1
	Plutonium 241	²⁴¹ Pu	14,4 ans	~ 2,6
	Curium 242	²⁴² Cm	163 jours	~ 0,4

Ces rejets ont donc été du niveau du terme source S1 (voir le chapitre 17).

L'explosion du réacteur, la très haute température du combustible et le feu de graphite qui a duré une dizaine de jours ont entraîné des gaz, des aérosols et des particules à haute altitude, atténuant un peu les conséquences locales mais facilitant la diffusion des radionucléides à l'échelle européenne.

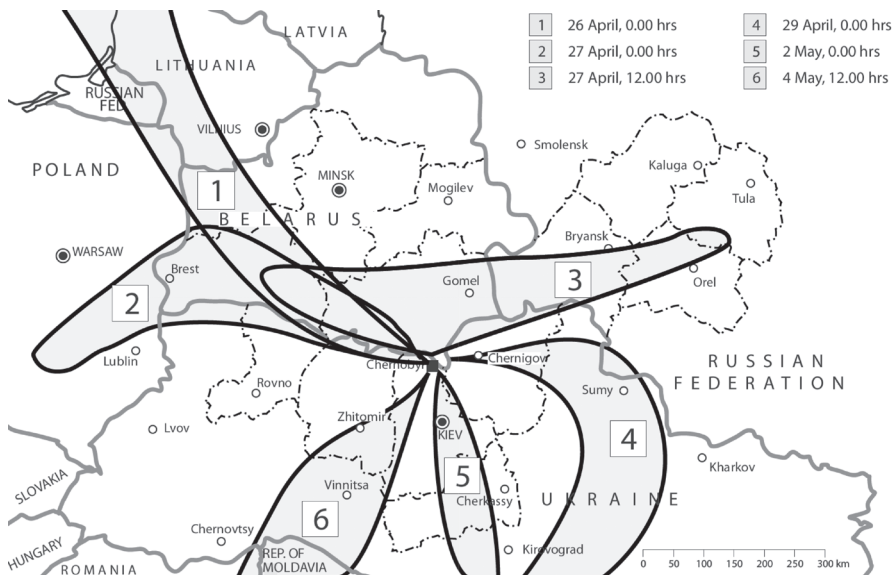


Figure 34.5. Trajectoires des rejets, du 26 avril au 4 mai 1986 (schéma issu de V. A. Borzilov et N. V. Klepikova, « Effect of meteorological conditions and release composition on radionuclide deposition after the Chernobyl accident », in S.E. Merwin et M.I. Balonov (dir.), *The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies*, Volume I, Washington, Research Enterprises Inc., p. 47-68, 1993).

Des conditions météorologiques très variables ont entraîné les radionucléides dans la plupart des directions (voir la figure 34.5). Quand ce panache radioactif a interféré avec des pluies, des augmentations locales des dépôts radioactifs se sont produites, même à plusieurs centaines de kilomètres de la centrale. C'est ce qui a conduit à la répartition de la contamination en « taches de léopard » qui a surpris et conduit à l'identification tardive des contaminations au nord et à l'est de Gomel au Bélarus notamment.

Une large campagne de détection a permis de tracer la carte des dépôts de césium 137 pour l'ensemble de l'Europe, en particulier des zones les plus contaminées dont certaines, à l'est de Briansk (Russie), sont relativement distantes du point d'émission (voir la figure 34.6). La période de décroissance du césium 137, de 30,2 années, permet sa détection à long terme, ce d'autant plus qu'il a tendance à se fixer sur l'argile; il migre très lentement sauf en cas de lessivage par de fortes pluies ou des inondations. Le strontium 90, moins volatil que le césium, s'est déposé plus rapidement que celui-ci, mais dans les mêmes conditions d'hétérogénéité.

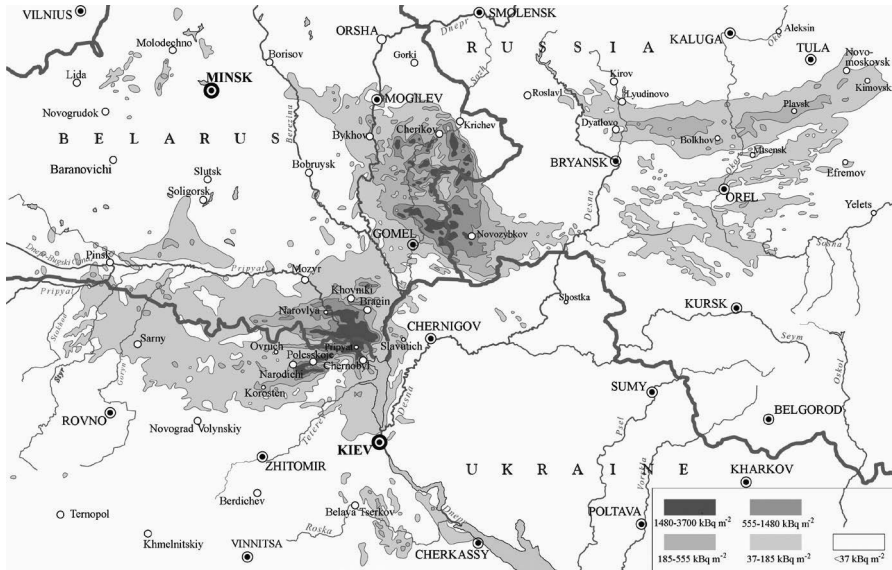


Figure 34.6. Carte de la contamination du sol par le césium 137 dans l'environnement du site de la centrale nucléaire de Tchernobyl (schéma issu de V. A. Borzilov et N. V. Klepikova, « Effect of meteorological conditions and release composition on radionuclide deposition after the Chernobyl accident », in S.E. Mervin et M.I. Balonov (dir.), *The Chernobyl Papers. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies*, Volume I, Washington, Research Enterprises Inc., p. 47-68, 1993).

34.5.2. Protection des populations

Il n'y avait pas d'habitants vivant à moins de 3 km de la centrale. À Pripjat, ville de 49 000 habitants dont les quartiers les plus proches du site se trouvent au-delà de cette distance, le débit de dose a commencé à croître tard dans la nuit du 26 avril au 27 avril,

atteignant 10 mSv.h^{-1} le 27 avril, 24 à 36 heures après l'accident. La population ne sera véritablement informée que le 27 avril en début d'après-midi, donc au bout de 36 heures, quand commenceront son évacuation et la distribution d'iode stable. Des bruits couraient depuis la veille mais aucune mesure concrète de protection n'avait été prise.

Au cours du printemps et de l'été 1986, c'est environ 115 000 personnes vivant dans un rayon de 30 km autour de la centrale, correspondant à la zone dite d'exclusion⁸⁹⁶, qui seront évacuées. Au cours des années qui ont suivi, 230 000 autres personnes seront déplacées. Le rapprochement entre la répartition des rejets dans le temps, la carte des directions du vent, celle de la contamination mesurée dans une zone de 10 à 20 km autour du site et la localisation de la « forêt rousse », forêt de 400 hectares de pins sylvestres « brûlée » par un niveau très élevé de rayonnement (de l'ordre de 100 Gy), montrent que les retombées les plus importantes sur la ville de Pripyat se sont produites après l'évacuation de sa population, qui ne fait ainsi pas partie des populations les plus touchées.

Les autorités et les populations du Bélarus ne seront informées et, en partie, évacuées que plus tard. Il en est de même pour l'Oblast (région administrative) de Bryansk en Russie. Les populations de ces régions n'ont bénéficié, ni d'une distribution d'iode stable, ni de restrictions à court terme concernant la consommation de produits alimentaires. Les doses à la thyroïde de ces populations sont estimées dix fois supérieures à celles des habitants de Pripyat compte tenu de l'évacuation de ces derniers.

Concernant les dépôts radioactifs sur le sol, qui participent à l'exposition (externe, voire aussi interne par les chaînes alimentaires) des individus, les cartes de contamination réalisées en 1990-1991 montrent que l'Oblast de Gomel au Bélarus a été particulièrement touché, en particulier dans ses parties sud et nord-est. La contamination du sol par le césium 137 (voir la figure 34.7) y est localement supérieure à $1,5 \text{ MBq.m}^{-2}$. 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, situées à 500 kilomètres environ du lieu de l'accident, ont été affectées par une contamination significative par le césium ($0,2 \text{ MBq.m}^{-2}$).

Cette répartition de la contamination par le césium, toujours observable vu la période de décroissance de ce radionucléide (30 ans), peut ne pas être représentative de celle relative à l'iode 131. La cinétique de rejet entre les explosions et la période de combustion du graphite peut avoir été différente pour les deux radionucléides. En outre, ces radionucléides n'ont sans doute pas eu le même comportement dans l'environnement; en effet, contrairement au césium, l'iode peut former des espèces gazeuses.

Des relevés de la contamination des sols par l'iode 129 – dont la période radioactive est longue, 15,7 millions d'années – ont été établis. Ces mesures sont nécessaires

896. Cette zone d'exclusion, toujours en vigueur, est aussi appelée officiellement « zone d'aliénation de la centrale nucléaire de Tchernobyl ». Elle a une superficie de $2\,600 \text{ km}^2$, à cheval sur les territoires ukrainien et biélorusse. Un retour de 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. Pourtant une centaine de personnes, voire un millier selon d'autres sources d'information, vivent illégalement dans cette zone, qui en outre a été ouverte au tourisme...

pour établir, en faisant l'hypothèse que son comportement est identique à celui de l'iode 131, les meilleures corrélations possibles entre des niveaux de contamination par l'iode 131 et des troubles de la thyroïde, mais les cartes ne sont que très partielles.

Les cartes disponibles montrent également que, dans la zone d'exclusion de 30 km autour de la centrale, la contamination par le strontium 90, émetteur β peu volatil d'environ 29,1 ans de période, qui s'est rapidement déposé, est dix fois plus faible que celle due au césium. Son effet en termes d'exposition externe est faible mais, s'il est ingéré, il se fixe sur les os comme le calcium et peut induire des cancers ou des altérations du système hématopoïétique.

Du plutonium a été détecté, avec une activité surfacique au maximum de quelques kBq/m², essentiellement dans la zone d'exclusion.

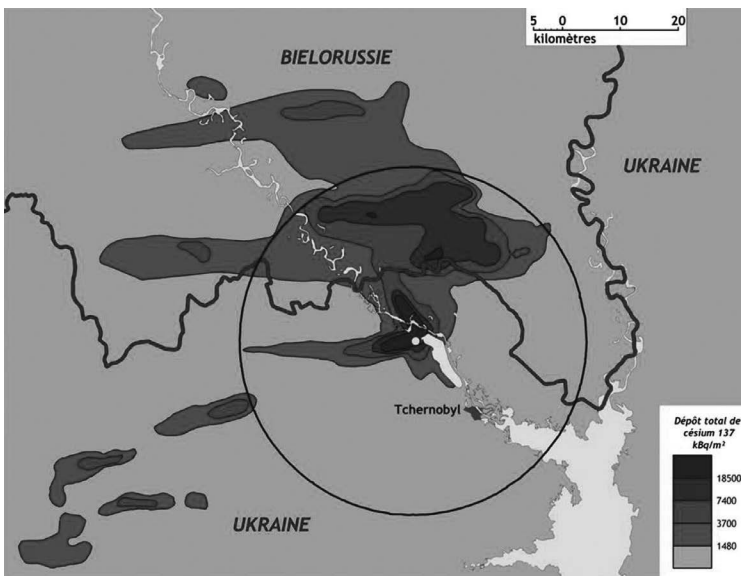


Figure 34.7. Contamination par le césium 137 près du site de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Source EC/IGCE, Roshydromet/Minchernobyl (UA)/Belhydromet, 1998. All rights reserved.

Il est à noter que, s'il est courant de présenter les niveaux de contamination des sols sur la base de l'activité surfacique de césium 137 – dont la période de 30 ans et l'émission d'un rayonnement γ de 662 keV par son descendant, le baryum 137m, en permettent la détection à long terme – le césium 137 n'était pas seul. Il était associé à des iodes dont l'iode 131 (période de 8 jours), à du césium 134 (période de 2,1 ans) dont l'activité surfacique initiale était moitié de celle du césium 137, à du ruthénium 103 (période de 39,3 jours) et du ruthénium 106 (période de un an).

Compte tenu de ces éléments radioactifs associés et de leur décroissance, une activité surfacique de 1 000 Bq.m⁻² de césium 137 correspondait à une irradiation par exposition externe, pour une personne vivant en continu à l'air libre sur un terrain

affecté, de 50 μSv la première année, 30 μSv la troisième année, 19 μSv la dixième année, 18 μSv la vingtième année⁸⁹⁷.

Globalement, hors de la zone d'exclusion, 800 000 personnes vivent dans des régions où les dépôts de césium 137 ont une activité surfacique supérieure à 0,2 MBq/m². Elles sont 33 000 dans les régions où cette activité est supérieure à 1,5 MBq/m².

Les surfaces urbanisées ont été assez rapidement lavées par les pluies et, à l'intérieur des bâtiments, l'exposition a été, au plus, de 20 % de ce qu'elle était à l'extérieur. Cela permet de déterminer une exposition moyenne des populations concernées en fonction de leurs modes et cadres de vie. Les valeurs retenues par l'AIEA pour la première année sont de 17 μSv pour 1 000 Bq/m² pour l'Ukraine et de 15 μSv pour 1 000 Bq/m² pour la Russie et le Bélarus. Le choix fait pour la France, dont la population agricole est plus faible et dont l'urbanisation est importante, est de 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{an}^{-1}$ pour 1 000 Bq/m².

Bien sûr, l'exposition réelle est directement proportionnelle à la contamination réelle.

Dans ses conclusions de 2008, l'UNSCEAR résume les estimations de doses pour les différentes populations comme cela est indiqué dans le tableau ci-après.

Tableau 34.2. Estimation des doses reçues par les populations (UNSCEAR, 2008).

Groupe de population	Nombre de personnes	Dose moyenne à la thyroïde (mGy)	Dose efficace moyenne de 1986 à 2005 (mSv)	Dose collective à la thyroïde (homme.Gy)	Dose efficace collective de 1986 à 2005 (homme.Sv)
« Liquidateurs »	530 000 (*)	Évaluation trop parcellaire	117	-	61 200
Personnes évacuées	115 000 (**)	490	31	57 000	3 600
Habitants des zones contaminées	6 400 000	102	9	650 000	58 900
Autres habitants d'Ukraine, de Russie et du Bélarus	98 000 000	16	1,3	1 600 000	125 000
Autres pays européens	500 000 000	1,3	0,3	660 000	130 000

(*) Ce nombre inclut les 350 000 « liquidateurs » des années 1986 et 1987, dont 240 000 furent fortement exposés.

(**) Il s'agit du nombre de personnes évacuées en 1986.

Dans tous les cas, l'évaluation des conséquences radiologiques montre que l'influence de l'exposition externe directe par le panache a été faible par rapport à l'exposition interne due aux aérosols et à l'ingestion de produits alimentaires et par rapport à l'exposition externe due aux dépôts (tout particulièrement les iodes et les césiums).

897. Calcul effectué avec les coefficients regroupés dans la base ECRIN de l'IRSN. Il s'agit d'une base de données validées et référencées de coefficients de dose pour le calcul des doses reçues par l'homme. ECRIN couvre les doses dues à l'irradiation externe (exposition au panache, au dépôt au sol ou à l'immersion dans l'eau), à la contamination interne par inhalation et ingestion, qu'elles soient reçues par des travailleurs ou par des personnes du public de différentes classes d'âge.

34.6. Conséquences sanitaires et environnementales

Il n'est pas question de présenter ici un panorama exhaustif des conséquences de l'accident de Tchernobyl sur l'homme et l'environnement. Les effets psychologiques et les effets sur la santé mentale des populations, sans doute très importants, ne sont pas traités: sur ces sujets, le lecteur pourra se reporter au rapport de l'OMS de 2006 cité plus haut.

34.6.1. Effets directs des rayonnements

Les conséquences les plus importantes de l'accident de Tchernobyl ont touché des pays qui faisaient partie de l'URSS, peu habituée à communiquer sur les catastrophes de toutes natures la touchant ni même à en reconnaître l'importance.

Évaluer les conséquences effectives de l'accident de Tchernobyl se heurte donc à un manque de précision et d'exhaustivité des données. Les informations les plus utilisables sont le résultat de coopérations internationales apportant, de l'extérieur, des moyens humains et financiers pour collecter les données avec l'aide des médecins et des autorités locales. L'IPSN puis l'IRSN⁸⁹⁸ se sont beaucoup impliqués dans ces collaborations, notamment dans le cadre d'une Initiative franco-allemande (IFA) qui s'est en particulier intéressée aux cancers de la thyroïde des enfants. On reviendra sur ce sujet au paragraphe 34.6.2.

Dans son rapport de 2008, l'UNSCEAR conclut ainsi:

« Les effets pour la santé actuellement attribuables à l'exposition aux rayonnements ionisants sont les suivants :

- *134 personnes du personnel de la centrale et des premiers intervenants extérieurs ont reçu des doses élevées⁸⁹⁹ conduisant à des syndromes aigus d'irradiation ; beaucoup d'entre eux ont également subi des brûlures radiologiques dues à l'irradiation β ;*
- *ce haut niveau de doses a provoqué le décès de 28 d'entre eux ;*
- *19 autres personnes de ce groupe sont décédées jusqu'en 2006 mais les raisons de leurs décès sont diverses et ne sont pas habituellement liées à l'effet des rayonnements ;*
- *des blessures cutanées et des cataractes radio-induites sont les effets les plus importants pour les survivants de ce groupe ;*
- *au-delà de ce groupe, plusieurs centaines de milliers de personnes ont été impliquées dans les travaux effectués sur le site (les « liquidateurs »), mais, à ce jour, à part des indications d'augmentation de l'incidence des leucémies et des cataractes parmi ceux qui ont reçu les doses les plus élevées, il n'y a pas de preuve d'effets*

898. L'IRSN a pour sa part publié en 2007 l'ouvrage « Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français », Philippe Renaud, Didier Champion et Jean Brenot, Collection sciences et techniques, éditions Lavoisier.

899. Doses dues au rayonnement gamma allant jusqu'à 16 Gray au corps entier, 500 Gray à la peau.

pour la santé liés à l'exposition aux rayonnements ; s'il existe des indications d'augmentation de maladies cardiovasculaires et cérébrovasculaires dans cette population corrélées avec les doses estimées, l'influence d'autres facteurs de risques (obésité, alcool, tabac) n'a pas été étudiée ;

- *le manque de contre-mesures rapides à l'égard de la contamination du lait par l'iode 131 a conduit à d'importantes doses à la thyroïde de personnes du public ; cela explique une large part des 6 000 cancers de la thyroïde observés à ce jour parmi des personnes qui étaient enfants ou adolescents au moment de l'accident ; jusqu'en 2005, 15 d'entre elles sont mortes ;*
- *à ce jour, il n'y a aucune preuve convaincante d'autres effets sur la santé de la population qui puissent être liés à l'exposition aux rayonnements. »*

Le bilan présenté comporte donc les 28 premiers décès des personnes les plus irradiés, 19 autres décès plus tardifs mentionnés avec des réserves quant à un lien avec une irradiation et 15 décès par cancer de la thyroïde. Il est à noter que les deux premiers décès par polytraumatismes (les deux opérateurs présents sur la dalle du réacteur au moment de l'explosion) ne sont pas comptabilisés.

L'UNSCEAR ne tire aucune conséquence des estimations de doses aux populations. Toutefois, l'application de la relation linéaire sans seuil, avec 5.10^{-2} cancer mortel par sievert (valeur non modifiée entre la publication CIPR 60 et la publication CIPR 103 – voir le chapitre 1) pour les trois populations les plus exposées conduit à une « projection » de 3 060 cancers chez les « liquidateurs », 180 chez les personnes évacuées, 3 945 pour les personnes qui sont restées dans les zones contaminées, soit un total de 7 000 environ. Le rapport de 1996 « prévoyait » de l'ordre de 8 000 cancers induits pour les mêmes populations ; la différence n'est pas significative, compte tenu des incertitudes sur les doses.

L'augmentation de l'incidence 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 de la hausse de ces pathologies dans les populations exposées.

Au final, 30 ans après l'accident, il est impossible de dresser un bilan sanitaire exhaustif et définitif, du fait que les résultats disponibles sont limités par la qualité des études épidémiologiques réalisées et qu'il est difficile d'identifier précisément les populations exposées et 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.

34.6.2. Les cancers de la thyroïde chez l'enfant

Les cancers de la thyroïde survenant spontanément sont relativement rares. Leur taux d'incidence annuel est de l'ordre de 50 par million chez les adultes, deux à trois par million chez les enfants. Les femmes sont deux à trois fois plus touchées que les hommes. Ces cancers n'induisent un décès que dans moins de 10 % des cas.

L'augmentation du taux de cancers de la thyroïde après une irradiation externe avait été observée avant l'accident, mais il y avait peu d'informations disponibles sur les risques associés à une contamination interne par l'iode 131.

Dès 1990, des médecins du Bélarus ont signalé une nette augmentation de l'incidence de ces cancers chez des enfants. Progressivement, des informations analogues sont venues des zones les plus touchées de Russie et de celles d'Ukraine dont les populations n'avaient pas été rapidement évacuées et n'avaient pas reçu d'iode stable.

Ce phénomène – qui n'avait pas été anticipé – a d'abord fait l'objet d'un large scepticisme dans les milieux des spécialistes. Le lien avec la contamination de la thyroïde par l'iode radioactif ne fait maintenant plus de doute.

La population la plus touchée est celle des enfants nés avant l'accident, en particulier ceux de dix ans ou moins. Le taux d'incidence annuel a ainsi pu atteindre 120 par million, soit 40 fois la valeur relative aux cancers spontanés. La population adulte a également été touchée, même si la variation du taux d'incidence est moins spectaculaire.

La figure 34.8, tirée du rapport de l'IRSN présentant les conclusions de l'IFA⁹⁰⁰, montre l'augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde entre 1990 et 2000 chez les enfants du Bélarus, diagnostiqués dans la tranche d'âge 0-14 ans, qui avaient dix ans ou moins au moment de l'accident. Cet excès de risque disparaît en 2001 puisque tous les enfants nés avant avril 1986 ont dépassé cet âge.

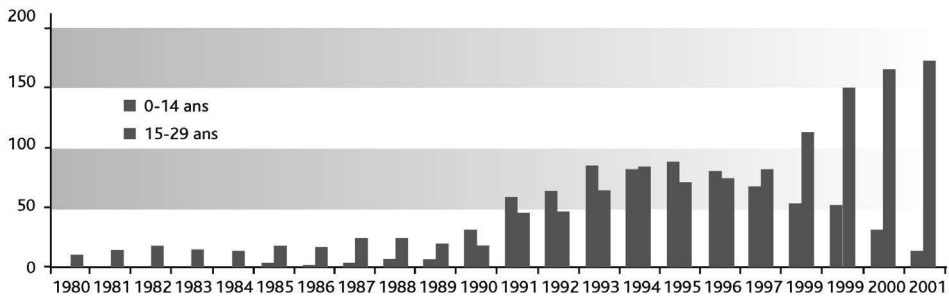


Figure 34.8. Évolution de l'incidence annuelle des cancers de la thyroïde au Bélarus (selon l'âge au diagnostic) par million de personnes (référence IFA et registre national des cancers au Bélarus). IRSN.

Cette figure montre que des enfants exposés, maintenant devenus de jeunes adultes, sont atteints, comme le sont des personnes exposées à l'âge adulte. L'excès de cancers de la thyroïde persiste donc, plus de 25 ans après l'accident.

Pour les personnes nées après 1986, le taux est et reste équivalent à celui qui était constaté avant l'accident. Ce n'est donc pas l'attention accrue portée à ces cancers

900. Rapport « L'IRSN présente les conclusions de l'Initiative franco-allemande (IFA) pour Tchernobyl », septembre 2005, disponible à l'adresse suivante : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_conclusions_ifa.pdf.

qui explique les résultats, au moins au Bélarus. En revanche, comme cette attention conduit à une détection plus précoce, le taux de décès constatés a diminué.

Des résultats similaires ont été observés pour les adolescents et les jeunes adultes en Ukraine et dans certains Oblasts fortement contaminés de la Russie.

L'évolution des cancers de la thyroïde chez l'enfant au Bélarus, en Ukraine et en Russie, est représentée sur la figure 34.9 suivante, extraite du même rapport.

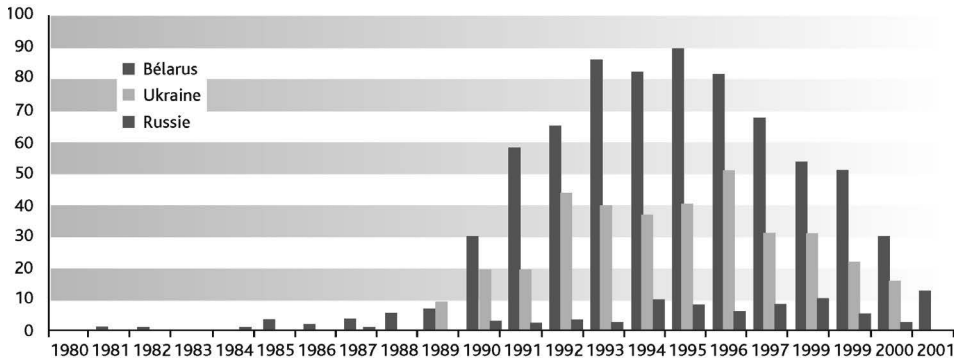


Figure 34.9. Évolution jusqu'en 2001 des cancers de la thyroïde chez l'enfant au Bélarus, en Ukraine et en Russie (IFA). IRSN.

Comme cela a été indiqué plus haut, l'UNSCEAR a diffusé en 2018 un bilan actualisé de l'incidence des cancers de la thyroïde dans les régions touchées par l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl (Bélarus, Fédération de Russie, Ukraine); il ressort de ce bilan que :

- sur un total de 19 233 cas de cancer de la thyroïde enregistrés entre 1991 et 2015 pour des personnes qui avaient moins de 18 ans au moment de l'accident, le nombre estimé en valeur moyenne de cas imputables à l'accident est de l'ordre de 5 000;
- il existe cependant des incertitudes très importantes sur cette estimation: le nombre de cas imputables est situé entre 700 et 10 000.

34.6.3. Contamination à long terme du bassin du Dniepr

Les dizaines de tonnes de matériaux du cœur qui ont été projetées au moment des explosions ont été repoussées au bulldozer lors du nettoyage du terrain au pied du réacteur accidenté ou enfouies dans quelque 800 fosses de stockage réparties sur le site. Ces débris ne sont protégés ni de l'écoulement des eaux de pluie dans le sol ni des remontées de la nappe phréatique. La contamination migre dans le sol par dissolution puis transport par l'eau souterraine vers les cours d'eau ou les points d'eau. Ces phénomènes sont lents mais inéluctables.

Il a été envisagé de limiter ces transferts par la construction d'une barrière géotechnique qui aurait été implantée dans le sol autour de la zone la plus contaminée incluant les quatre réacteurs. Ces travaux ont commencé dès 1986 à l'aval des écoulements souterrains. Ils ont été interrompus car ils ont conduit à une nette montée du niveau de la nappe phréatique, les eaux de pluie et les importantes fuites des circuits d'eau brute refroidissant les condenseurs ne pouvant plus s'évacuer. La montée de ce niveau qui aurait résulté d'un bouclage complet de la zone la plus contaminée, aurait conduit à noyer les sous-sols des tranches, ce qui était évidemment incompatible avec la poursuite de leur fonctionnement. Ces travaux ont été abandonnés.

L'AIEA a publié en 2006 un rapport de synthèse sur la situation radiologique du bassin du Dniepr⁹⁰¹ et son évolution.

À un kilomètre de la centrale, un grand réservoir (150 000 m³) avait été construit pour servir de source froide pour les différentes tranches de la centrale. Il était alimenté par pompage dans la rivière Pripjat et séparé de celle-ci, en aval, par un barrage.

Ce réservoir a été considérablement contaminé, en particulier par les 5 000 m³ d'eau provenant des sous-sols de la tranche accidentée qui y ont été rejetés. Il contient plus de 200 TBq de radionucléides qui sont, pour l'essentiel, concentrés dans les sédiments du bassin. Ils migrent de plusieurs centimètres par an vers la rivière Pripjat qui se jette dans le Dniepr. En cas de mauvaise gestion des vannes de liaison aval avec la rivière Pripjat, voire en cas de rupture du barrage en aval, les transferts de radioactivité pourraient être beaucoup plus brutaux.

Des cours d'eau du bassin du Dniepr, c'est évidemment la rivière Pripjat – dont le bassin draine les régions les plus contaminées du Bélarus et d'Ukraine – qui est la plus contaminée.

Une part significative de la zone d'exclusion de 30 km de rayon qui entoure le site est une zone inondable, noyée plusieurs fois par an, en particulier lors de la fonte des neiges. Les dépôts en surface, essentiellement de césium et de strontium depuis la disparition de l'iode par décroissance radioactive, sont régulièrement balayés par des inondations. Cela contribue à diminuer les concentrations locales, à augmenter celles des lacs et des étangs de la zone, et diffuse la contamination vers l'aval. Les poissons des lacs et des étangs sont particulièrement contaminés.

Le suivi de la concentration du césium 137 et de celle du strontium 90 dans les eaux du Dniepr montre l'effet des crues et des inondations, mais aussi de la fixation du césium dans les sédiments.

Les concentrations de ces radionucléides dans l'eau des bassins d'alimentation de la ville de Kiev étaient, dès la fin des années 1990, suffisamment faibles pour que cette eau soit considérée comme potable (voir la figure 34.10).

901. « Radiological Conditions in the Dnieper River Basin », Radiological Assessment Reports Series, IAEA, 2006.

De l'ordre de 90 TBq de strontium 90, soit 1 % des rejets, ont été transportés jusqu'à la Mer Noire; en 2000, sa concentration était toujours mesurable dans l'eau de l'embouchure du Dniepr.

Pour le césium 137, le transport jusqu'à la Mer Noire a été de l'ordre de 4 TBq, soit 5.10^{-5} des rejets; dès le milieu des années 1990, sa concentration n'était plus suffisante pour qu'il soit possible de le distinguer du bruit de fond.

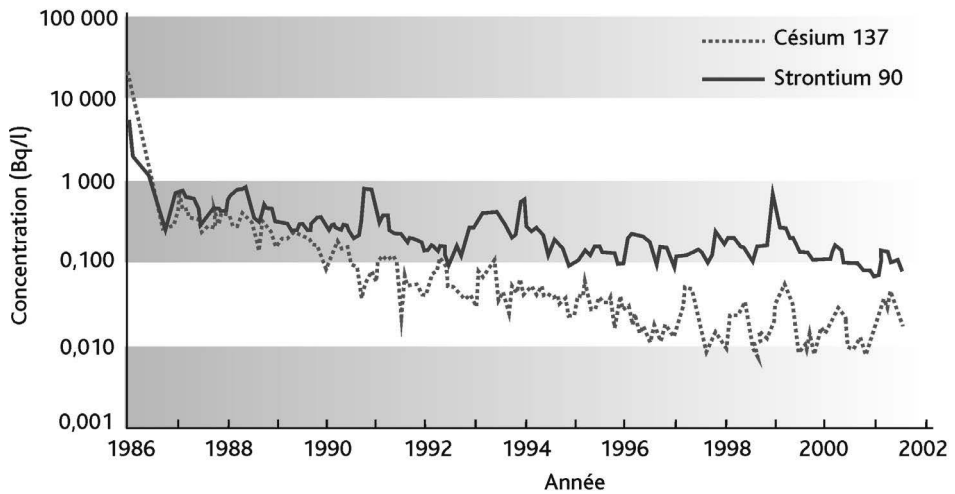


Figure 34.10. Concentrations du césium 137 et du strontium 90 au barrage de Kiev (1986-2001). IRSN (source IAEA, 2006 [voir nota 901]).

34.7. Les retombées radioactives en France et leurs conséquences

L'IRSN a publié en 2007 un ouvrage⁹⁰² qui mettait à jour les connaissances sur les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl en France et leurs conséquences; ce bilan a été actualisé en 2016⁹⁰³. On ne donne ci-après que quelques éléments sur ce sujet, en renvoyant le lecteur à ces communications pour plus de précisions.

34.7.1. Doses dues au panache

La France a surtout été concernée par les rejets du 27 avril 1986, portés par des vents d'est puis de sud-est. L'augmentation des activités dans l'air a été brutale entre le 30 avril et le 1^{er} mai, notamment dans le nord-est du pays. L'activité volumique

902. Philippe Renaud, Didier Champion, Jean Brenot: « Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français », Collection sciences et techniques, éditions Lavoisier, 2007.

903. « 1986-2016: Tchernobyl, 30 ans après/Impacts de l'accident de Tchernobyl en France et en Europe », page internet IRSN, 2016.

moyenne de césium 137 dans l'air du 1^{er} au 5 mai 1986 allait de quelques Bq.m⁻³ à moins de 0,15 Bq.m⁻³ d'est en ouest.

Les mesures très complètes du contenu des panaches faites par l'IPSN à sa station de prélèvement atmosphérique de Verdun où les activités volumétriques les plus élevées ont été observées (5,5 Bq.m⁻³ de césium 137 le 1^{er} mai) ont permis d'évaluer les doses, par inhalation et par exposition externe, dues à leur passage. Pour Verdun, la dose efficace par inhalation est estimée à 46 µSv pour un adulte; la dose équivalente à la thyroïde d'un enfant de un an, le plus sensible, y est estimée à 470 µSv. Au même lieu, les doses par exposition externe au panache sont très inférieures à ces valeurs.

Plus à l'ouest ou plus au sud, les doses ont été plus faibles: dix fois plus faibles dans le Cotentin, par exemple.

34.7.2. Doses externes dues aux dépôts au sol

Les dépôts radioactifs sont plus importants lorsqu'il pleut. À partir de mesures des dépôts radioactifs rémanents réalisées dans tout l'est du pays, et en établissant la relation entre les activités déposées et les pluies survenues entre le 1^{er} et le 5 mai 1986, une cartographie des dépôts sur l'ensemble du pays a été établie par l'IRSN (voir la figure 34.11). Cette cartographie présente une France très contrastée avec des dépôts de césium 137 beaucoup plus élevés et très hétérogènes sur un tiers est de la France, dépassant localement 20 000, voire 40 000 Bq.m⁻² en relation avec des précipitations elles-mêmes très hétérogènes, et des dépôts plus faibles (moins de 5 000 Bq.m⁻²) et plus homogènes sur le reste du pays.

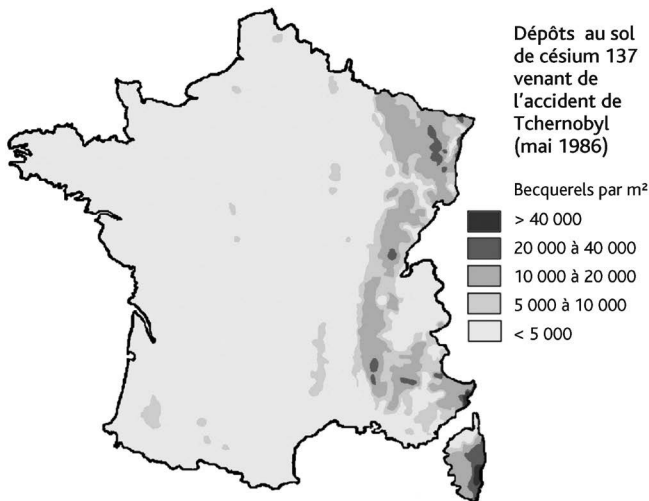


Figure 34.11. Dépôts de césium 137 sur la France reconstitués par l'IRSN (reconstitution mise à jour – modèle 2005). IRSN.

De son côté, la CRIIRAD⁹⁰⁴ a publié en 2002 un atlas de la contamination en France, fondé sur des mesures *in situ* faites en 1999 et 2000, complétant des mesures plus anciennes. Les deux approches donnent des résultats concordants.

Il a été indiqué plus haut qu'à une activité surfacique de $1\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ de césium 137 correspondait une exposition externe moyenne de $10\ \mu\text{Sv}$ la première année. Ainsi, pour une personne résidant dans une des communes les plus touchées de France ($40\ 000\ \text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ de césium 137), la dose externe due aux dépôts radioactifs a pu atteindre $400\ \mu\text{Sv}$ pour l'année 1986 – 25 fois inférieure à celles de populations non déplacées proches de Tchernobyl.

34.7.3. Doses dues à l'ingestion de produits contaminés

Le document publié en 2007 par l'IRSN déjà évoqué explicite les différents mécanismes à prendre en compte pour évaluer les doses dues à l'ingestion de produits contaminés.

Les niveaux de contamination les plus élevés observés dans les denrées alimentaires ont été atteints immédiatement après les dépôts, notamment dans les légumes-feuilles (salades, épinards, choux...) et le lait (voir la figure 34.12), puis la viande de bœuf; ces légumes et l'herbe pâturée ayant directement reçu les dépôts radioactifs sur leurs feuilles. Les activités ont ensuite rapidement diminué (disparition de l'iode par décroissance radioactive et croissance des végétaux pour le césium). Les doses efficaces engagées moyennes en 1986 pour les adultes vont de l'ordre de $300\ \mu\text{Sv}$ à l'est de la France à moins de $50\ \mu\text{Sv}$ à l'ouest.

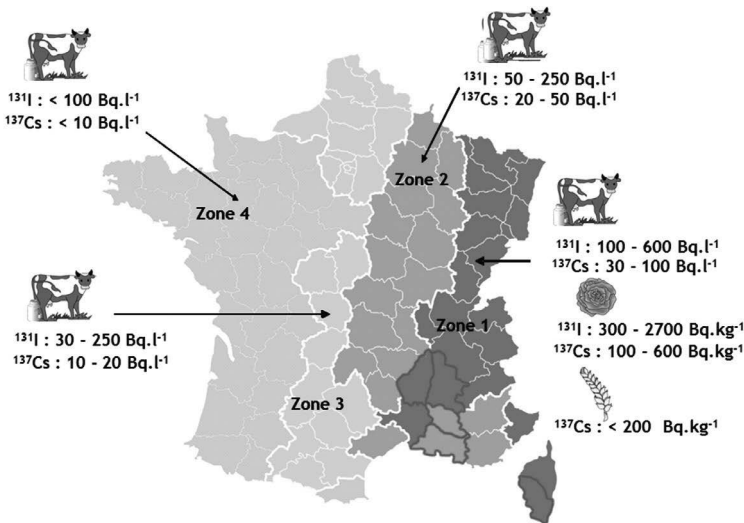


Figure 34.12. Gammes des valeurs de contamination par le césium 137 et l'iode 131 au cours de la première quinzaine de mai 1986, dans les légumes-feuilles, le lait et les céréales. IRSN.

904. Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité.

Les doses efficaces annuelles ont ensuite beaucoup baissé. Dès 1987 en effet, les productions agricoles et celles de l'élevage ont été contaminées essentiellement *via* le sol; cette contamination durable est beaucoup plus faible que celle qui a résulté des dépôts foliaires de mai 1986.

34.7.4. Bilan global

En France, au milieu des années 2010, certaines zones témoignent encore de niveaux de radioactivité supérieurs ou très supérieurs à ceux observés dans le reste du pays. Dénommées « zones de rémanence de la radioactivité artificielle », elles sont identifiables grâce au césium dont la contamination persiste encore dans les sols. L'activité surfacique dépasse 10 000 Bq/m³ pour les zones impactées par l'accident de Tchernobyl (zones où les précipitations ont été les plus importantes dans les jours qui ont suivi l'accident)⁹⁰⁵ et 3 000 Bq/m³ pour celles concernées par les retombées des anciens essais aériens d'armes nucléaires.

Concernant les denrées alimentaires, l'activité de césium 137 dans le lait prélevé dans les zones de rémanence (0,32 Bq/L en moyenne) est plus élevée que celle du lait prélevé ailleurs (au maximum 0,03 Bq/L).

La dose efficace cumulée de 1986 à 2006 du fait des retombées de l'accident de Tchernobyl avait été estimée à 4,5 mSv pour un adulte⁹⁰⁶ résidant dans les zones les plus touchées de France. Cela correspondait à moins du dixième de la dose moyenne délivrée en 20 ans par la radioactivité naturelle. 30 % de cette dose cumulée avait été reçue en 1986 et 1987. La contribution de l'année 2006 n'était plus que de 1 %. Pour l'ouest de la France, les valeurs étaient dix fois plus faibles.

La figure 34.13 ci-après montre la décroissance régulière des doses annuelles estimées en France (en mSv/an) de 1986 jusqu'au milieu des années 2010.

34.7.5. Les cancers de la thyroïde

L'Institut national de veille sanitaire (InVS⁹⁰⁷) a cherché à apprécier par des études épidémiologiques les taux d'incidence des cancers de la thyroïde en France et leurs évolutions dans les départements français disposant de registres adaptés, mais aussi en Corse; ces études ont fait l'objet de rapports publiés respectivement en 2011⁹⁰⁸ et 2012⁹⁰⁹.

905. Dans des prairies des Alpes du Sud, des « points chauds » sont observés sur de très petites surfaces, d'activités supérieures à 100 000 Bq/m³.

906. Les doses efficaces reçues par les adultes sont toujours supérieures à celles qui ont été reçues par les enfants en raison d'une consommation alimentaire plus élevée et d'une durée de présence à l'extérieur souvent plus grande.

907. Englobé depuis 2016 dans l'Agence nationale de santé publique, ou Santé publique France.

908. Rogel A. *et al.* : « Évolution de l'incidence du cancer de la thyroïde en France métropolitaine – Bilan sur 25 ans », InVS, 2011.

909. Pascal L., Lasalle J. L. : « Estimation de l'incidence du cancer de la thyroïde en Corse. 1998-2006 », InVs, 2012.

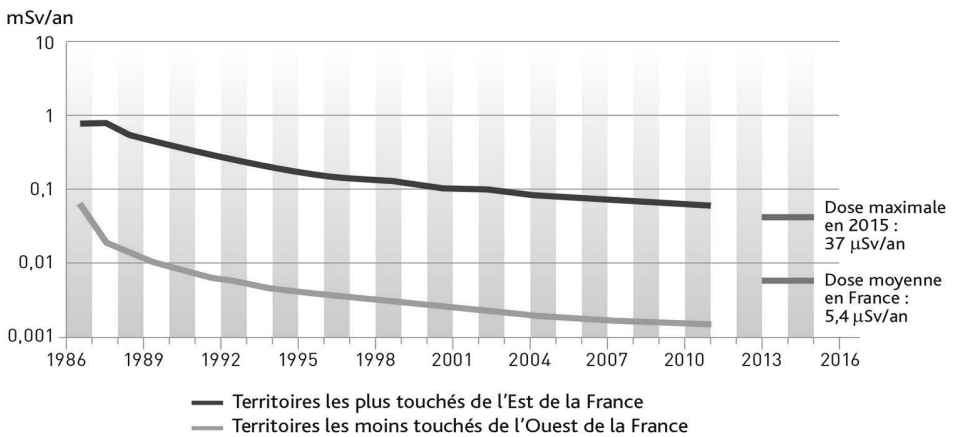


Figure 34.13. Évaluation des doses efficaces moyennes dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl en France jusqu'au milieu des années 2010 (exposition externe et exposition par ingestion). Agence Kazoar/IRSN.

34.7.5.1. Suivi des cancers de la thyroïde en France

Le système de surveillance des cancers de la thyroïde repose prioritairement sur des registres des cancers: 15 départements sont couverts par des registres généraux; un registre spécialisé dans l'enregistrement des cancers de la thyroïde regroupe les départements de la Marne et des Ardennes depuis 1975. La couverture sur la période 1982-2006 est de l'ordre de 20 % de la population française. Ce dispositif est complété par une surveillance à partir des bases médicales administratives (bases de l'assurance maladie et bases hospitalières), disponibles rapidement.

Les résultats sont regroupés dans l'étude de A. Rogel (InVS) de 2011 (nota 908). Pour cette étude, le choix a été fait de suivre l'évolution des cancers papillaires, les plus nombreux; ils constituent les cancers dont l'augmentation a été la plus élevée et ce sont ceux qui sont le plus susceptibles d'être constatés après une exposition à l'iode 131. Pour neuf départements, les résultats sont disponibles de 1982 à 2006.

Entre 1982 et 2006, l'augmentation de l'incidence du cancer de la thyroïde est significative pour les deux sexes, avec un taux d'augmentation annuel moyen de 6 %. L'augmentation est encore supérieure pour les cancers papillaires avec un taux d'augmentation annuel moyen supérieur à 8 % par an pour les deux sexes.

La croissance de l'incidence du cancer de la thyroïde s'est nettement atténuée au cours de la période 2002-2006 par rapport à la période 1982-2002, avec une augmentation moins forte et non significative aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Ce changement est en grande partie lié au ralentissement de l'augmentation de l'incidence des cancers papillaires à partir de 2001.

Les résultats ont été regroupés dans l'étude de L. Pascal (InVS) de 2012 (nota 909), sur deux périodes plus courtes, 1998-2002 et 2003-2006, pour un plus grand nombre

de départements. Le Bas-Rhin, le Haut-Rhin, l'Isère et le Doubs à l'est font partie de la zone 1, les Ardennes, la Marne et l'Hérault sont en zone 2, la Somme et le Tarn sont en zone 3, le Calvados, la Manche, la Loire atlantique et la Vendée, les plus à l'ouest, sont en zone 4. Il ressort de cette étude que les deux départements alsaciens sont parmi les départements les moins affectés alors que la Vendée est parmi ceux qui le sont le plus (incidence pouvant aller jusqu'à 6 pour 100 000 à 95 % de confiance pour les hommes et 20 pour les femmes). L'Isère qui est largement affectée pendant la deuxième période, pour les femmes et les hommes, l'était beaucoup moins pendant la première.

Il n'y a donc pas de corrélation entre ces résultats et l'incorporation d'iode 131 par l'alimentation en 1986, la Vendée ayant été nettement moins touchée par les retombées radioactives que l'Alsace.

Pour la Corse, l'étude de L. Pascal fait apparaître des valeurs d'incidence de cancers de la thyroïde plus élevées que pour la France métropolitaine uniquement dans la période 1998-2002 et pour les hommes (incidence pouvant aller jusqu'à 10 pour 100 000 à 95 % de confiance). L'incidence de cancers en Corse a ensuite décroché pour se situer au niveau de celles de l'Isère ou de la Vendée.

34.7.5.2. Évaluation du nombre de cancers induits en France par l'accident de Tchernobyl

Ce sont les enfants nés dans les 15 années précédant mai 1986 et ayant vécu dans 25 départements de l'est de la France (zone 1 en rouge de la carte de la figure 34.12) qui ont la probabilité la plus élevée d'être affectés d'un cancer de la thyroïde. Les recensements indiquent qu'ils sont au nombre de 2,27 millions.

Les doses équivalentes à la thyroïde des enfants qui résidaient dans la zone 1 de la figure 34.12 sont mentionnées dans le tableau 34.3. Ces doses sont dues à l'iode 131 (pour plus de 90 %) et à l'iode 132 (provenant du tellure 132) et ont été reçues dans les trois premiers mois suivant les dépôts radioactifs. Derrière ces moyennes déterminées pour des comportements alimentaires et des pratiques standards, se cache une variabilité importante liée principalement à la fraîcheur des denrées consommées. Ainsi, une personne ne consommant que des denrées de conserve (lait UHT, boîtes, surgelés) aura reçu une dose beaucoup plus faible quel que soit son lieu de résidence.

Tableau 34.3. Dose équivalente à la thyroïde en fonction de l'âge en 1986.

Enfant de	3 mois	1 an	5 à 9 ans	10 à 14 ans
Dose équivalente à la thyroïde (mGy)	1,9 ± 0,6	9,8 ± 3,2	6,0 ± 1,9	2,9 ± 0,9

Sur la base de ces estimations de doses, une évaluation quantitative du risque de cancers de la thyroïde a été réalisée par l'IRSN. Cette évaluation s'est appuyée sur des relations dose-réponse sans seuil issues de la littérature scientifique pour estimer, par le calcul, le nombre de cas attribuables à une exposition donnée.

En raison du délai de latence entre l'exposition de la thyroïde aux rayonnements ionisants et l'apparition d'un cancer de cet organe, les évaluations du nombre de cancers spontanés (dues à d'autres causes) et du nombre de cancers « attendus » en excès du fait de l'accident de Tchernobyl portent sur les périodes 1991-2000 et 1991-2015.

Tableau 34.4. Estimations du nombre des cancers de la thyroïde « spontanés » et intervalles de confiance du nombre de cancers en excès chez les personnes qui étaient âgées de moins de 15 ans en 1986 et qui résidaient dans la zone 1.

Période	Nombre de cancers « spontanés »	Nombre de cancers « en excès »	Pourcentage « en excès » par rapport au nombre de cancers « spontanés »
1991-2000	97 ± 20	entre 0,5 et 22	0,5 à 23 %
1991-2015	899 ± 60	entre 6,8 et 55	0,8 à 6 %

Ces résultats montrent que les « excès » de cas estimés sont inférieurs ou comparables aux incertitudes sur les estimations du nombre de cancers « spontanés » ; ces excès sont dès lors difficilement détectables par des études épidémiologiques.

34.8. Les enseignements généraux tirés à l'international et pour la filière des RBMK

En premier lieu, les réflexions engagées dès après l'accident de Tchernobyl militèrent notamment pour une vision plus internationale de la sûreté nucléaire et se concrétisèrent en particulier par différents rapports de l'INSAG, groupe alors récemment créé auprès de l'AIEA⁹¹⁰, parmi lesquels on peut citer le rapport INSAG de 1986 intitulé « Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident » (Safety Series No.75-INSAG-1), dans lequel apparaît la notion de **culture de sûreté**, qui sera approfondie en 1991 dans le rapport de l'INSAG intitulé « Safety Culture » (Safety Series No.75-INSAG-4). En 1992, le rapport INSAG-1 a fait l'objet d'une révision conduisant au rapport INSAG-7.

Pour ce qui concerne plus particulièrement les réacteurs de la filière RBMK, au-delà des modifications indiquées au paragraphe 34.3, des enseignements plus généraux ont été tirés, parmi lesquels on peut citer :

- les insuffisances en matière de retour d'expérience partagé entre opérateurs et concepteurs ; outre l'incident déjà mentionné survenu en 1983 à la centrale d'Ignalina, qui n'avait conduit à aucune modification ou disposition restrictive d'exploitation des RBMK, un autre incident était survenu en 1975 dans le réacteur n° 1 de la centrale de Leningrad, qui peut être considéré comme un précurseur de l'accident de Tchernobyl : il s'est terminé par la rupture d'un tube de force après une séquence d'événements assez semblable à celle qui a précédé l'accident de Tchernobyl, à savoir un fonctionnement prolongé à 50 %

910. Voir le chapitre 3.

de la puissance nominale, suivi par un arrêt complet, avant un recouplage au réseau. Empoisonnement neutronique par le xénon, fortes perturbations dans la distribution du flux neutronique, obstination des opérateurs à poursuivre la montée en puissance, marge insuffisante en termes de réactivité (l'équivalent de moins de 15 barres insérées) constituent les traits dominants de cet incident, qui a probablement conduit à une excursion nucléaire limitée à une zone du réacteur. Les opérateurs de la centrale de Tchernobyl n'avaient pas connaissance de la nature et des causes de cet incident;

- l'insuffisance du système de contrôle et d'autorisation dans les pays de l'Union soviétique; la commission d'enquête soviétique a elle-même constaté que la centrale de Tchernobyl ne respectait pas les règles et standards de sûreté soviétiques en vigueur au moment même de sa construction, au milieu des années 1970;
- la nécessité que le personnel d'exploitation dispose de documents clairs et non contradictoires entre eux, respecte les règles d'exploitation (cela incluant notamment les règles relatives aux inhibitions de systèmes de protection) ainsi que les modes opératoires d'essais, ou n'en dévie qu'après analyse de sûreté avec les personnes compétentes.

L'organisation de la sûreté et les méthodes et procédures d'autorisation et d'inspection dans les pays de l'Union soviétique ont ensuite évolué.

Plus spécifiquement, dans le domaine de la formation des équipes de conduite, un programme d'entraînement sur simulateurs dans toutes les situations, même sérieusement perturbées, a été mis en place.

Les personnels de conduite ont acquis progressivement la formation qui semble leur avoir fait défaut au moment où ils débranchaient les sécurités ou sortaient des limites de fonctionnement autorisées.

34.9. Les enseignements tirés en France

Au plan technique, les caractéristiques des réacteurs de la filière RBMK sont trop différentes de celles des réacteurs français pour une transposition directe. Toutefois, les informations obtenues dans les mois qui suivirent l'accident de Tchernobyl amenèrent à un certain nombre de questionnements et d'initiatives à l'égard des réacteurs exploités en France, qu'il est utile de rappeler.

Les réacteurs de puissance exploités en France sont dotés de systèmes d'arrêt d'urgence rapides automatisés, avec une possibilité d'arrêt d'urgence manuel.

Bien que les réacteurs de la filière à neutrons rapides, tous arrêtés en France depuis 2009, soient hors du domaine traité dans le présent ouvrage, quelques mots s'imposent néanmoins à leur sujet, dans la mesure où la question des similitudes pouvant exister avec les RBMK s'est tout particulièrement posée à la suite de l'accident de Tchernobyl, au cours duquel, comme cela a été montré plus haut, le coefficient

de vide positif du fluide de refroidissement a joué un rôle essentiel. Si les réacteurs à neutrons rapides concernés pouvaient en effet être sujets à un apport de réactivité en cas d'ébullition ou de vidange de leur fluide de refroidissement (sodium liquide), une différence importante entre les réacteurs à neutrons rapides et les RBMK provenait du fait que le sodium n'est pas sous pression dans les réacteurs à neutrons rapides et qu'il était, dans les conditions normales ou incidentelles, à une température inférieure d'environ 300 °C à sa température d'ébullition. Dans certaines conditions accidentelles, il était envisageable d'atteindre une ébullition locale mais le réacteur était arrêté par le système de protection avant qu'il n'y ait un risque d'ébullition généralisée. Les réacteurs à neutrons rapides étaient dotés d'une surveillance thermique individuelle de chaque assemblage combustible et de systèmes d'arrêt d'urgence multiples. Par ailleurs, il avait été prescrit par les décrets d'autorisation de création des réacteurs PHENIX et SUPERPHENIX de tenir compte d'un accident de fusion du cœur avec dégagement d'énergie pour la conception de leur confinement.

Les réacteurs à eau ne peuvent pas être sujets à une augmentation de puissance en cas d'ébullition ou de vidange du fluide caloporteur. Cependant, un programme d'études complémentaires sur les possibilités d'accidents de réactivité qui n'auraient pas été envisagés à la conception a été mené en collaboration entre Électricité de France, Framatome et l'IPSN; il a permis de détecter une première séquence accidentelle préoccupante, présentée au chapitre suivant. Le programme d'études a alors été complété par un réexamen de l'ensemble des études d'accident de réactivité effectuées précédemment pour vérifier leur cohérence et leur exhaustivité, par la recherche des marges disponibles (par exemple étude du retrait rapide de deux ou trois barres de commande et non plus d'une seule) et par la recherche de nouvelles séquences envisageables dans les différents états de fonctionnement et les situations accidentelles.

D'autres sujets ont fait l'objet d'un examen spécifique dans le cadre du retour d'expérience de l'accident de Tchernobyl; il s'agit notamment :

- de la culture de sûreté,
- des possibilités d'inhibition des actions de sécurité ou de sauvegarde,
- des possibilités d'intervention sur les sites en cas d'accident grave,

sujets également examinés pour d'autres installations que les réacteurs du parc électronucléaire.

En France, la formation des opérateurs, la composition des équipes lors d'essais particuliers, les procédures d'évaluation et d'autorisation de tels essais ont été reconnues comme étant de nature à éviter un enchaînement du type de celui de l'accident de Tchernobyl.

Il a été vu qu'un changement d'horaire⁹¹¹ a perturbé une partie des conditions de l'essai prévu dans la tranche n° 4 de la centrale de Tchernobyl, affectant le niveau

911. La demande des services extérieurs à la centrale d'alimenter le réseau électrique est intervenue alors que l'essai venait d'être commencé et a décalé de neuf heures sa poursuite.

d'empoisonnement du cœur du réacteur par le xénon, donc la marge de réactivité. L'effet de modifications dans l'ordonnancement d'activités peut être très variable. Deux activités incompatibles, au moins au regard des spécifications techniques d'exploitation, peuvent alors être menées simultanément. Cette leçon vaut d'être retenue partout, en particulier pour la gestion des situations d'arrêt.

Concernant les inhibitions, l'IPSN a mené, en liaison avec Électricité de France, un travail approfondi d'évaluation des possibilités matérielles et humaines d'un fonctionnement avec des sécurités inhibées et des cas observés de non-respect des spécifications techniques d'exploitation pour en déterminer les causes et définir les mesures correctives appropriées. L'évaluation des possibilités d'inhibition a porté sur les systèmes automatiques de protection et de sauvegarde (systèmes d'arrêt d'urgence, d'injection de sécurité, d'aspersion d'eau dans l'enceinte de confinement), en détaillant :

- les inhibitions volontaires que l'exploitant est amené à réaliser (par exemple pour effectuer des essais ou des opérations d'entretien) et leur signalisation,
- les moyens de mettre en évidence des inhibitions involontaires.

L'évaluation a permis de faire ou de refaire le point sur des aspects concrets tels que :

- le report d'informations en salle de commande concernant la mise hors service d'équipements ;
- la prévention des erreurs de lignage des circuits (erreurs de positionnement de vannes...) et leur détection, sujet qui avait déjà fait l'objet d'actions après l'accident de Three Mile Island (installation de capteurs de fin de course avec renvoi de la position des vannes en salle de commande) ;
- les règles d'exploitation applicables en état d'arrêt à froid, état au cours duquel il est admis de pouvoir mettre hors service certaines parties des systèmes de protection et de sauvegarde pour entretien préventif par exemple. Dès 1983, un bilan avait montré qu'au *pro rata* du temps passé, les incidents significatifs étaient plus nombreux en arrêt à froid qu'en tranche en puissance et ce fait était attribué au nombre important d'interventions en arrêt à froid. Les règles d'exploitation en arrêt à froid ont été durcies dès l'été de 1986 ;
- le caractère suffisant de la surveillance des consignations d'équipements, sachant qu'il y a annuellement plus d'un millier de consignations dans un réacteur. L'accident de Tchernobyl a aussi été l'occasion de réexaminer les risques d'oubli de remise en service d'équipements après consignation.

C'est toutefois dans des domaines plus généraux que se trouvent les enseignements les plus importants de l'accident de Tchernobyl. Outre celui de la culture de sûreté évoqué plus haut, la gestion concrète d'un site à plusieurs tranches dont l'une serait accidentée en est un autre. Plus généralement, la question de la gestion d'une situation post-accidentelle se pose. L'ampleur des moyens nécessaires après un tel accident est impressionnante, qu'il s'agisse des mesures de radioactivité

dans les installations, sur le site et dans l'environnement, des possibilités d'intervention sur le site et sur la tranche accidentée, de la maîtrise d'incendies dans des conditions ambiantes fortement radioactives, de l'évacuation d'un grand nombre de personnes, du traitement de celles qui ont été gravement irradiées, de la protection contre l'extension de la dissémination de la radioactivité ou de la décontamination de zones importantes, de la surveillance des chaînes alimentaires et du suivi médical des populations concernées. L'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au mois de mars 2011 a rappelé l'importance de telles préoccupations (voir le chapitre 36).

Après l'accident de Tchernobyl, l'ensemble des exploitants nucléaires français ont créé en 1988 un groupement d'intérêt économique, le Groupe d'intervention robotique sur accident (INTRA)⁹¹², 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 des trois entreprises membres; il est implanté sur le site de la centrale nucléaire de Chinon.

De plus, par une directive interministérielle de 2005, la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, devenue depuis Autorité de sûreté nucléaire, a été chargée d'établir le cadre et de définir, préparer et mettre en œuvre les dispositions nécessaires pour répondre aux situations post-accidentelles consécutives à un accident nucléaire, ce qui a conduit à la création du CODIRPA (Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire), au sein duquel sont associées les parties concernées, nationales ou locales: pouvoirs publics, exploitants, associations (ANCCLI...), organismes d'expertise parmi lesquels Santé publique France, l'IRSN, etc. Dans ce cadre, différents groupes de travail ont été chargés d'élaborer des éléments de doctrine sur des sujets tels que la levée des actions d'urgence de protection des populations, la réduction de la contamination en milieu bâti, la vie dans les territoires ruraux contaminés, les questions relatives à l'eau (impact de l'accident, gestion des ressources), la gestion des déchets, le suivi sanitaire des populations, ou encore l'évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques. Le CODIRPA a émis des premiers éléments de doctrine en 2012⁹¹³.

Par ailleurs, de nombreux programmes de recherche ont permis d'améliorer la modélisation de la diffusion et des dépôts de radionucléides rejetés dans l'atmosphère. Il en a été vu l'application dans ce chapitre.

Enfin, dans un domaine important mais assez éloigné des aspects purement techniques, celui de l'information du public et de la communication, les difficultés rencontrées ont amené des réflexions sur la nécessité d'une plus grande transparence en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection.

912. Voir le site <https://www.groupe-intra.com/fra>. Ce groupe réunit EDF, le CEA et Orano.

913. Document intitulé «Éléments de doctrine pour la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire», ASN, octobre 2012 (<http://www.asn.fr>).

34.10. Information du public et communication

Les quelques jours qui ont suivi l'accident de Tchernobyl, et plus encore les mois suivants, ont confirmé la grande difficulté qu'avaient le public et ceux qui l'informent à se faire une idée précise de la gravité relative des incidents, accidents ou simples anomalies qui se produisent dans les centrales nucléaires et qui sont portés à leur connaissance.

Les critères de sélection des événements intéressant la sûreté et des incidents (ou événements) significatifs (voir le chapitre 21) sont tournés largement vers les conséquences potentielles des événements et sur leur caractère précurseur de situations sévères pour le réacteur; ils ne sont pas directement utilisables pour l'appréciation des faits par un public non spécialisé.

Dès 1987, le Conseil supérieur de la sûreté et de l'information nucléaires a suggéré que soit établie une échelle de gravité, simple à comprendre et facile à utiliser, permettant le classement des incidents sur la base de critères factuels.

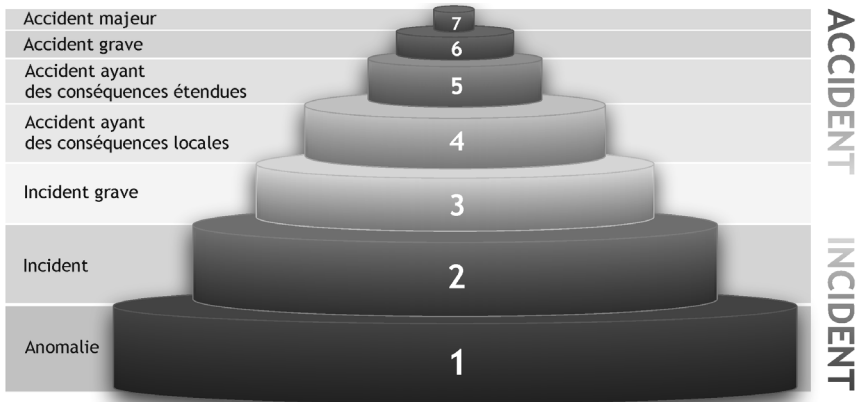
Un groupe de travail regroupant des journalistes, des représentants d'Électricité de France et des organismes de sûreté, a été réuni à cet effet. Il a proposé, en 1988, un système de classement inspiré, dans son esprit, des échelles descriptives des phénomènes sismiques, intitulé «échelle de gravité des incidents et accidents dans les réacteurs électronucléaires». Il était clair dès l'origine que cette échelle n'avait pas vocation à se substituer aux critères propres à l'analyse de sûreté, mais devait être un outil supplémentaire, indépendant, destiné à faciliter la communication hors des milieux spécialisés, en faisant mieux ressortir l'importance relative des différents événements. Les niveaux allaient de 1 (incident mineur) à 6 (accident majeur), en fonction de critères comme les conséquences à l'intérieur et à l'extérieur du site nucléaire concerné et l'affaiblissement de la défense en profondeur.

Cette échelle préfigure l'échelle INES, issue de réflexions menées au niveau international. Ce travail de réflexion et ses premières conclusions ont été repris par l'OCDE et l'AIEA qui ont défini une «échelle internationale des événements nucléaires» (*International Nuclear Event Scale – INES*). La version initiale, centrée sur les centrales nucléaires, a été utilisée dès le début des années 1990.

Par rapport à l'échelle proposée en France, l'échelle INES comporte en plus un niveau 0 pour les événements n'ayant aucune importance au plan de la sûreté et un niveau 6 intermédiaire entre les accidents tels que Three Mile Island (niveau 5) et Tchernobyl; l'accident de Tchernobyl passe au niveau 7 (l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi sera aussi classé au niveau 7).

L'échelle INES a été étendue par la suite pour être utilisable pour toutes les installations de l'industrie nucléaire civile. Puis, dans les années 2000, elle a été adaptée pour répondre aux besoins croissants de communication sur l'importance de tous les événements associés au transport, à l'entreposage et à l'utilisation de matières radioactives et de sources de rayonnements. Une représentation très schématique de l'échelle INES est donnée sur la figure 34.14. Un guide de l'AIEA («The International Nuclear and

Radiological Event Scale – User's Manual, 2008 Edition») en précise les modalités d'application – en fixant quelques seuils en termes de débit de dose d'irradiation pour classer des événements d'exposition radiologique de personnes.



En dessous de l'échelle/niveau 0
aucune importance du point de vue de la sûreté

Figure 34.14. Communication vers le public pour les événements survenant dans les installations : l'échelle INES. Georges Goué/IRSN.

Il faut cependant veiller à ce que cette échelle reste bien un moyen d'information externe simple d'utilisation et ne soit pas utilisée comme indicateur de la sûreté des différentes installations ou des différents pays, ce qui perturberait sérieusement la sérénité des déclarations et des classements.

En tout état de cause, l'emploi de cette échelle nécessite des précautions pour éviter qu'elle ne conduise à des comparaisons trompeuses. En France, tous les événements (incidents et accidents nucléaires) doivent être déclarés à l'Autorité de sûreté nucléaire par les exploitants, sous 48 heures ouvrées, avec une proposition de classement sur l'échelle INES. Cette proposition est examinée par l'Autorité de sûreté nucléaire (généralement avec l'IRSN), qui demeure responsable de la décision finale de classement. L'utilisation de cette échelle permet à l'Autorité de sûreté nucléaire de sélectionner, parmi l'ensemble des événements qui surviennent, ceux qui ont une importance suffisante pour faire l'objet d'une communication de sa part :

- les événements classés au niveau 0 de l'échelle INES ne font l'objet d'un avis d'incident que s'ils présentent un intérêt particulier ;
- les événements classés au niveau 1 de l'échelle INES font systématiquement l'objet d'un avis d'incident publié sur le site internet de l'ASN ;
- les événements classés au niveau 2 et au-delà de l'échelle INES font, en complément, l'objet d'un communiqué de presse et d'une déclaration à l'AIEA.

34.11. Après l'accident de Tchernobyl

En conclusion, l'accident de Tchernobyl n'a pas remis en cause les fondements de la sûreté des réacteurs de production d'énergie des pays occidentaux.

Pourtant, si l'on peut dire que l'accident de Three Mile Island a fait passer la fusion d'un cœur de réacteur du stade de résultat d'un code de calcul à celui de la réalité, l'accident de Tchernobyl a transformé des formules théoriques de relâchement de produits de fission et des abaques de diffusion atmosphérique en drames humains à long terme, en batailles d'experts et en hésitations politiques à l'échelle d'un continent au moins.

Il a aussi rendu nécessaires de nouveaux progrès de la sûreté de toutes les installations dans le monde et motivé des études et recherches qui ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances dans des domaines complexes tels que :

- les accidents de réactivité dans les réacteurs à eau,
- les accidents graves,
- les transferts de substances radioactives dans l'air, dans les sols et dans les aliments,
- les effets des rayonnements ionisants sur l'homme et sur l'environnement.

L'accident de Tchernobyl a également mis en lumière la complexité des questions soulevées par une contamination durable de territoires en cas d'accident grave dans un réacteur et motivé un certain nombre d'initiatives dans ce domaine – dont la création du CODIRPA en France évoquée plus haut.

Vidéos pouvant être consultées pour compléter le chapitre



Le déplacement du panache de Tchernobyl



Le déplacement du panache de Tchernobyl (modélisation)



Les territoires contaminés autour de Tchernobyl



Le sarcophage de Tchernobyl