

L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

RÉSUMÉ

L'accident de Tchernobyl est un événement nucléaire majeur survenu le 26 avril 1986 sur le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl de type **RBMK**, située à 3 km de la ville de Prypiat et à 6 km de la ville de Tchernobyl en Ukraine. Elle se trouve à environ 130 kilomètres au nord de Kiev, à 20 kilomètres au sud de la frontière avec la Biélorussie. L'accident a été classé au **niveau 7** de l'échelle INES. Il s'agit de la plus importante catastrophe nucléaire, surpassant l'accident nucléaire de Fukushima survenu en 2011 classé au même niveau.

Cet accident s'est produit au cours d'un essai destiné à vérifier la possibilité, en cas de perte du réseau électrique de secours, d'alimenter les pompes de recirculation du réacteur par un groupe turbo alternateur. Il fait suite à une conjonction d'événements cumulant des **erreurs humaines** et des **défauts de conception** de la centrale nucléaire. La réduction de puissance nécessaire à la réalisation de l'essai n'a pas fonctionné et a entraîné une augmentation de la température du cœur, provoquant d'une part une augmentation de la réactivité incontrôlable et **la fusion partielle du cœur** et, d'autre part la génération d'une **grande quantité d'hydrogène** dont l'explosion a conduit à **la destruction** du bâtiment **réacteur**.

Une déflagration s'en est suivie qui a soulevé la dalle supérieure du réacteur, d'un poids de 2 000 tonnes. La partie supérieure du cœur du réacteur s'est retrouvée à l'air libre. Le modérateur en graphite a pris feu, plusieurs foyers se sont allumés dans l'installation. Il faudra trois heures aux pompiers pour les éteindre. Le feu de graphite a repris. Il n'a pas été arrêté définitivement.

Une seconde explosion chimique, due à l'hydrogène formé par radiolyse et décomposition de l'eau, a ensuite détruit le toit du bâtiment, entraînant la fuite dans l'atmosphère des produits de fission. Pas moins de **5 000 tonnes de matériaux** (sable, bore, argile, plomb, etc.) ont été déversées par hélicoptère pour recouvrir le réacteur, en vue de réduire le débit d'air alimentant le feu de graphite et le relâchement des émissions radioactives.

Conséquences sanitaires

Des particules et des gaz radioactifs sont rejetés pendant 10 jours. Environ 50 tonnes de gaz radioactif sont éjectés dans l'atmosphère, l'équivalent de 200 fois les retombées de Hiroshima et Nagasaki.

Deux heures après l'accident, les techniciens de la centrale ayant survécu éprouvent les premiers symptômes de la contamination radioactive (maaises, vomissements, vertiges, diarrhées, brûlures). À 6h du matin, leur état est si alarmant qu'ils sont conduits à l'hôpital. Plusieurs d'entre eux meurent dans les jours qui suivent. Le 27 avril, les premiers habitants de la ville toute proche de Pripjat sont évacués de la zone.

Selon plusieurs rapports, l'explosion aurait libéré des débris du bâtiment et du réacteur jusqu'à 7 à 9 km d'altitude. Près de 30 % du combustible du réacteur s'est échappé dans les environs immédiats de la centrale. Le panache radioactif s'est dispersé sur l'Europe Centrale où vivaient environ 300 millions de personnes, à des niveaux dix à vingt fois inférieurs à ceux mesurés en Biélorussie, et à un degré bien moindre jusqu'en Europe occidentale, dont la partie est de la France.

Cet accident a aussi provoqué un stress immense des populations, suite à la cacophonie des informations ayant entraîné le déplacement non-fondé de près de 200.000 personnes avec les risques d'accident de la route associés. Cette conséquence représente certainement le détriment sanitaire majeur. Les 600.000 liquidateurs et 400.000 personnes évacuées ont été suivis de façon diverse. L'OMS estime à 4.000 le nombre de décès prématurés en 20 ans, dus à l'exposition radiologique

Conséquences techniques

Le réacteur endommagé a été recouvert d'un sarcophage, puis d'une arche de protection. Les RBMK ont progressivement été arrêtés à Tchernobyl et à Ignalina (Lituanie), mais ils continuent de fonctionner en Russie, après des modifications qui portent principalement sur la réduction de l'effet de vide (augmentation de l'enrichissement du combustible), la modification du système d'arrêt d'urgence, le dessin de barres de contrôle (suppression de la partie inférieure en graphite), la protection de la dalle supérieure contre les accidents de surpression. Cette modernisation a été pilotée par un groupe d'experts internationaux.

1. CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT

L'accident de Tchernobyl est survenu le 26 avril 1986 sur le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire Lénine de Tchernobyl, située à 6 km de la ville de Tchernobyl en Ukraine. L'accident a été classé au niveau 7 de l'échelle INES. Il s'agit de la plus importante catastrophe nucléaire, surpassant l'accident nucléaire de Fukushima survenu en 2011 classé au même niveau.

L'accident s'est produit au cours d'un essai destiné à vérifier la possibilité, en cas de perte du réseau électrique de secours, d'alimenter les pompes de recirculation du réacteur par un groupe turbo alternateur. Il résulte d'une conjonction d'événements cumulant des **erreurs humaines** et des **défauts de conception** de la centrale nucléaire. Cette séquence de test de l'alimentation électrique de secours du réacteur n°4 va se révéler être une catastrophe majeure et faire prendre conscience au monde entier des risques liés au nucléaire.

2. PRÉSENTATION DU RÉACTEUR

Au moment de l'accident, la centrale compte 4 réacteurs nucléaires qui ont été mis en service respectivement en 1977, 1978, 1981 et 1983. Jusqu'en 1989, deux réacteurs supplémentaires sont en construction, avant que le projet ne soit abandonné, principalement en raison de l'explosion du quatrième réacteur.

Les quatre réacteurs opérationnels sont de type [RBMK¹-1000](#), de conception soviétique et d'une capacité unitaire de 1 000 MWe. Tchernobyl est la première et la seule centrale nucléaire de type RBMK construite sur le sol ukrainien, et la troisième construite en Union soviétique avec celles de Léninegrad et de Koursk.

Les RBMK ne disposent pas d'enceinte de confinement comme celle qui entoure un réacteur de type REP. En revanche, ils disposent de plusieurs compartiments étanches, destinés à assurer le confinement de différentes zones du réacteur. A l'époque de Tchernobyl, ce système avait été conçu pour faire face à la rupture d'un tube de force. Les ruptures multiples de tubes de force n'étaient donc pas couvertes par cette conception.

Il reste en 2023 dix réacteurs RBMK en exploitation, tous situés en Russie. L'annexe 1 présente leur conception détaillée.

Le graphite est utilisé comme modérateur et l'eau bouillante comme fluide caloporteur. Le combustible est de l'oxyde d'uranium enrichi en uranium-235. Chaque assemblage combustible est contenu dans un « tube de force » à l'intérieur duquel circule l'eau de refroidissement (voir figure 1).

La complexité du système de distribution et de collecte de l'eau de refroidissement, la forte accumulation d'énergie thermique dans les structures métalliques et le graphite, l'absence d'enceinte de confinement, la difficulté de contrôle du cœur sont les inconvénients majeurs de ce type de réacteur.

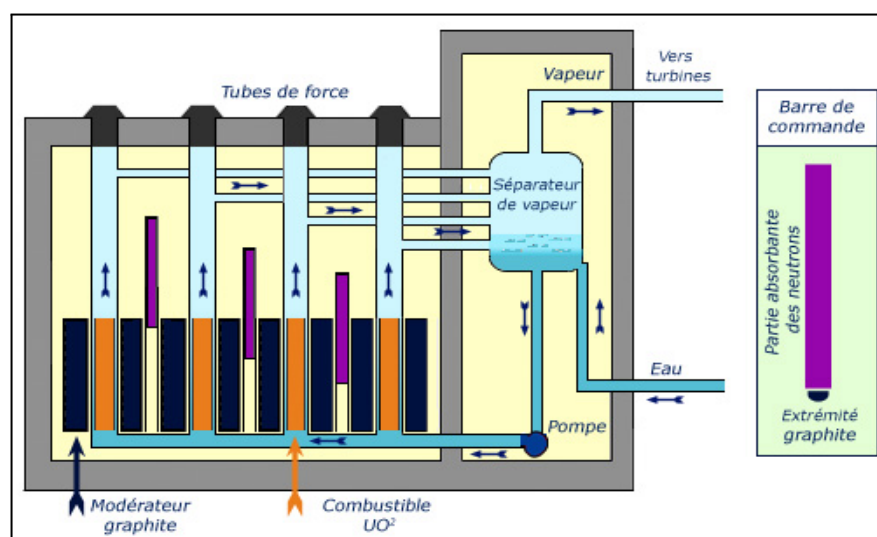


Figure 1 : Principe de fonctionnement du réacteur RBMK

2. LE DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT

Un essai doit être réalisé pour vérifier la possibilité, en cas de perte du réseau électrique, d'alimenter les pompes de recirculation du réacteur par un groupe turbo alternateur. Cet essai devait être réalisé à une puissance de l'ordre de 20 % – 30 % de la puissance nominale.

¹ RBMK est la traduction russe de « réacteur de grande puissance à canaux », c'est-à-dire à tubes de force.

Le 25 avril 1986 Les opérateurs démarrent le processus de baisse de puissance pour se mettre dans les conditions de l'essai. Toutefois, à la demande du centre de distribution électrique, le réacteur est maintenu durant la journée à une puissance supérieure à celle requise par l'essai. À 23h00, les opérateurs engagent la réduction du niveau de puissance du réacteur pour atteindre les conditions d'essai mais ils ne réussissent pas à contrôler cette baisse de puissance. Ils décident donc d'extraire des grappes de contrôle, au-delà des limites autorisées, afin de remonter la puissance. À 01h00, le 26 avril, la puissance du réacteur est stabilisée à une puissance nettement inférieure à celle requise. L'équipe décide toutefois de réaliser l'essai.

26 avril 1986, entre 1h03 et 1h07 deux pompes supplémentaires du circuit de recirculation sont mises en service. Le débit supplémentaire entraîne une hausse de température dans les échangeurs de chaleur. À 01h19, pour stabiliser le débit d'eau arrivant dans les séparateurs de vapeur, la puissance des pompes est encore augmentée et dépasse la limite autorisée. Le système demande l'arrêt d'urgence mais les commandes sont bloquées et les opérateurs passent outre.

26 avril à 1h23'04" L'essai débute : les vannes d'alimentation en vapeur de la turbine sont fermées. Les pompes de recirculation ralentissent, le débit diminue. La température monte dans le cœur provoquant, du fait de la conception du réacteur, une augmentation de la réactivité. La puissance du réacteur augmente de manière incontrôlée. La réduction de puissance reprend mais, dans cet état de forte accumulation de xénon-135, le réacteur est réputé difficile à contrôler.

26 avril à 1h23'40" Le chef opérateur ordonne l'arrêt d'urgence. La totalité des barres commencent à descendre dans le cœur, mais l'effet produit est l'inverse de celui escompté. La puissance augmente à nouveau de façon incontrôlée.

26 avril à 1h23'44" Le pic de puissance est atteint, dépassant de plus de 100 fois la puissance nominale du réacteur. Les fortes pressions atteintes dans les tubes de force provoquent leur rupture. Une déflagration soulève la dalle supérieure du réacteur, d'un poids de 2 000 tonnes. **La partie supérieure du cœur du réacteur est à l'air libre.** Le graphite prend feu, plusieurs foyers s'allument dans l'installation. Il faudra trois heures aux pompiers pour les éteindre. Le feu de graphite reprend. Il ne sera arrêté définitivement que le 9 mai.

Du 27 avril au 10 mai 1986 5 000 tonnes de matériaux (sable, bore, argile, plomb, etc.) sont déversées par hélicoptère pour recouvrir le réacteur, en vue de réduire le débit d'air alimentant le feu de graphite et le relâchement des émissions radioactives.

4. LES DÉGÂTS

La dalle (d'une masse de 2 000 tonnes) de la cuve renfermant le cœur a été soulevée et basculée à 90° (voir figure 3), sous l'effet de l'explosion du combustible fondu réagissant avec l'eau de refroidissement et/ou de la vaporisation instantanée de l'eau des tubes de force.

Une seconde explosion chimique, due à l'hydrogène formé par radiolyse et décomposition de l'eau, a ensuite détruit le toit du bâtiment, entraînant la fuite dans l'atmosphère des produits de fission.



Figure 2 : Vue aérienne de la centrale de Tchernobyl

Le graphite (utilisé comme modérateur) a pris feu, trente foyers s'allumèrent dans l'installation et la tranche N°3 attenante. Il faudra trois heures aux pompiers pour les éteindre provisoirement ; le feu dans le réacteur ne sera éteint que le 9 mai. Des particules et des gaz radioactifs sont rejetés pendant 10 jours.

Deux heures après l'accident, les techniciens de la centrale qui sont intervenus sur l'accident éprouvent les premiers symptômes de la contamination radioactive (maaises, vomissements, vertiges, diarrhées, brûlures). À 6h du matin, leur état est si alarmant qu'ils sont conduits à l'hôpital. Plusieurs d'entre eux meurent dans les jours qui suivent. Le 27 avril, les premiers habitants de la ville toute proche de Pripyat sont évacués de la zone.

Selon plusieurs rapports, l'explosion aurait libéré des débris du bâtiment et du réacteur jusqu'à 7 à 9 km d'altitude. Près de 30 % du combustible du réacteur s'est échappé dans les environs immédiats de la centrale (voir figure 4).

Environ 50 tonnes de gaz radioactif sont éjectées dans l'atmosphère, l'équivalent de 200 fois les retombées de Hiroshima ou Nagasaki.

**Figure 3 : Dalle du réacteur renversée****Figure 4 : Coulée de combustible en « patte d'éléphant »**

5. LES CAUSES DE L'ACCIDENT

La première cause de l'accident est le réacteur lui-même : extrapolé de petits réacteurs plutonigènes mais avec des inhomogénéités spatiales à cette taille de puissance (1 000 MWe), ce type de réacteur présentait de nombreuses lacunes vis-à-vis de la sûreté nucléaire qui n'étaient pas prises en compte par les autorités soviétiques : l'accent était mis sur la formation du personnel plus que sur la conception.

Mais le personnel n'était pas formé à la « culture de sûreté » : il a lancé l'essai en dehors des conditions prévues, violant les consignes et désactivant les systèmes de sécurité. Par ailleurs, des violations de très importants systèmes de sûreté ont été commises.

Et quand le chef de quart a ordonné la chute des barres, elles ont eu l'effet inverse du ralentissement attendu² : leur chute a déclenché l'excursion de puissance !

6. LES CONSÉQUENCES DE L'ACCIDENT

6.1. LES LIQUIDATEURS

Les premières victimes furent 3 techniciens qui sont allés fermer des vannes en sous-sol et qui ont évité ainsi une explosion d'hydrogène plus importante encore et qui sont morts très rapidement et les pompiers (237 intervenants) qui luttèrent plusieurs jours pour empêcher l'extension des foyers d'incendie aux réacteurs voisins.

Exposés à des doses létales en quelques minutes, 28 d'entre eux, les plus irradiés, moururent au cours des 2 ou 3 semaines suivantes. 19 autres décédèrent entre 1987 et 2004, pour des causes diverses pas nécessairement associées aux rayonnements.

Les 600 000 liquidateurs³ et 400 000 personnes évacuées ont été suivis de façon diverse. L'OMS estime à 4 000 le nombre de décès prématurés en 20 ans, dus à l'exposition radiologique.

6.2. LES POPULATIONS

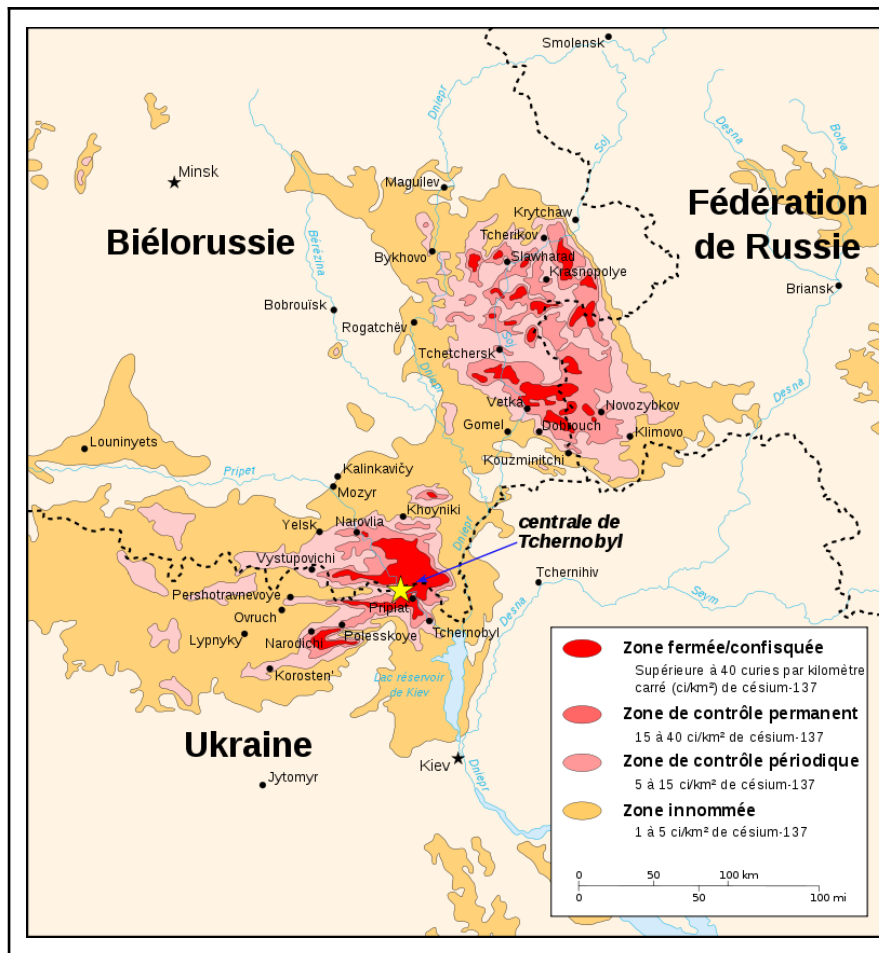
Sous l'effet de l'énergie libérée par l'accident, les produits radioactifs émis s'élevèrent jusqu'à plus de 1 200 mètres de hauteur. Les rejets se poursuivirent jusqu'au 5 mai, sous l'effet de l'incendie consécutif à l'accident, puis de la chaleur dégagée en continu par le cœur détruit du réacteur. Au total, ce sont près de 12 millions de térabecquerels (TBq) qui, en 10 jours, furent dispersés dans l'environnement,

Les vents portaient au début en direction du N-O, à travers la Biélorussie et les Pays Baltes, ce qui a protégé la ville de Kiev (3 millions d'habitants) située à 80 km au sud, et le réservoir du Dniepr qui alimente en eau une grande partie de l'Ukraine.

Ce sont d'ailleurs les Suédois qui ont donné l'alerte, à partir des balises situées autour des centrales nucléaires. Après la direction du panache, le deuxième facteur de contamination sont les conditions de précipitations atmosphériques : 70 % des précipitations radioactives sont retombées sur la Biélorussie (Tchernobyl se trouve quasiment à la frontière de l'Ukraine, la Biélorussie et la Russie).

² Les barres de commande en carbure de bore étaient munies d'une partie inférieure en graphite qui, augmentant la modération, favorisait la réaction neutronique en chaîne.

³ Le terme russe se réfère au personnel qui a « liquidé » les conséquences de l'accident. Comme leur statut a été protégé par la législation médico-sociale de l'Union soviétique, leur nombre s'est multiplié sans relation avec leur exposition aux rayonnements. On estime à 200 000 le nombre de personnes ayant effectivement participé aux interventions à risque radiologique.



La contamination des sols a été (voir figure 5) :

- 10 000 km² entre 500 et 1 500 kBq/m² (1)
- 20 000 km² entre 150 et 500 kBq/m² (2)

Dans un rayon administratif de 30 km autour de la centrale, 150 000 personnes ont été évacuées dans un premier temps à partir du 2^{ème} jour après l'accident et pendant plusieurs semaines (contamination au sol = 1,5 MBq/m²).

Au total, environ 400 000 personnes ont été déplacées sur les 3 pays. Près de 6 millions d'individus ont été exposés à une contamination qui s'est traduite, selon les lieux, par des doses à l'organisme entier comprises entre 50 et 150 mSv (milliSievert) cumulées en quelques semaines.

- (1) Soit 5 à 15 Ci/km²
- (2) Soit 15 à 40 Ci/km²

◀ **Figure 5 : Contamination des sols autour de la centrale**

6.3. LES CONSÉQUENCES SANITAIRES

Le rapport des Nations Unies (UNSCEAR) réactualisé en 2011 confirme le chiffre de **7 000** cancers de la thyroïde, en très grande majorité chez les jeunes enfants. Le nombre de décès connus depuis 2006 est de 15, car ce type de pathologie est opérable. Les doses moyennes à la thyroïde chez les personnes atteintes d'un cancer ont été évaluées à 500 mSv. La consommation de produits laitiers locaux, et la carence en iode chez des populations consommatrices de sel gemme, ont été des facteurs aggravants.

Ni chez les 530 000 liquidateurs ni chez les 6 400 000 habitants des zones contaminées (à des niveaux supérieurs à 37 kBq/m²), on ne distingue d'augmentation établie du nombre des cancers (à l'exception des cancers thyroïdiens chez les enfants), ni de toute autre pathologie en relation avec l'exposition reçue. (Cette information concerne bien sûr les maladies génétiques – ce qu'on savait depuis les bombardements d'Hiroshima et Nagasaki).

Cette information peut paraître paradoxale et mérite d'être commentée.

D'une part, les cancers étant la cause principale de mortalité « naturelle » parmi nos populations, il est très difficile, compte tenu des fluctuations d'une année sur l'autre, de détecter une légère augmentation de mortalité par cancer (voir la [fiche argumentaire GAENA "L'épidémiologie et son application aux rayonnements ionisants"](#)).

D'autant que le territoire biélorusse était déjà contaminé chimiquement par des métaux lourds et, d'après les médecins, la radioactivité a pu déclencher un effet cumulatif désastreux pour la santé des individus fragilisés.

D'autre part, les cancers ne sont pas les seules conséquences radiologiques sur l'organisme : les rayons provoquent une baisse des défenses immunitaires (comme le SIDA) et les médecins rencontrés dans les hôpitaux de Kiev ont confirmé que les taux de morbidité des liquidateurs étaient ceux de personnes plus âgées : sur le plan sanitaire, ils avaient vieilli prématurément.

Un autre point, exposé par le Dr JC NENOT (IPSN) dès 1997 : la violence nécessaire à l'évacuation rapide (quelques heures) des 50.000 habitants de Pripjat a traumatisé beaucoup d'enfants qui ont vu leurs animaux familiers exécutés devant eux, puis ont été entassés dans des cars, sortis de la zone des 30 km, douchés au jet et conduits à Kiev. Selon NENOT à l'époque, le détriment majeur de l'accident est le choc psychologique qu'ont subi ces enfants.

Enfin, il ne faut pas oublier que les suites de cet accident, resté caché aux Soviétiques jusqu'à l'évacuation soudaine de Pripjat⁴, se sont déroulées en concomitance avec un bouleversement politique⁵, social et économique⁶ qui a impacté la santé des populations⁷.

Au résultat, il est impossible de faire la part des conséquences de Tchernobyl par rapport aux autres bouleversements sociaux des quinze années qui ont suivi l'accident ; les spécialistes de la santé ne tirent de bilan précis et incontestable que pour ce qui concerne les cancers de la thyroïde chez les enfants.

7. LES CONSÉQUENCES EN EUROPE CENTRALE ET OCCIDENTALE

Le panache s'est dispersé sur l'Europe Centrale où vivaient environ 300 millions de personnes, à des niveaux dix à vingt fois inférieurs à ceux mesurés en Biélorussie.

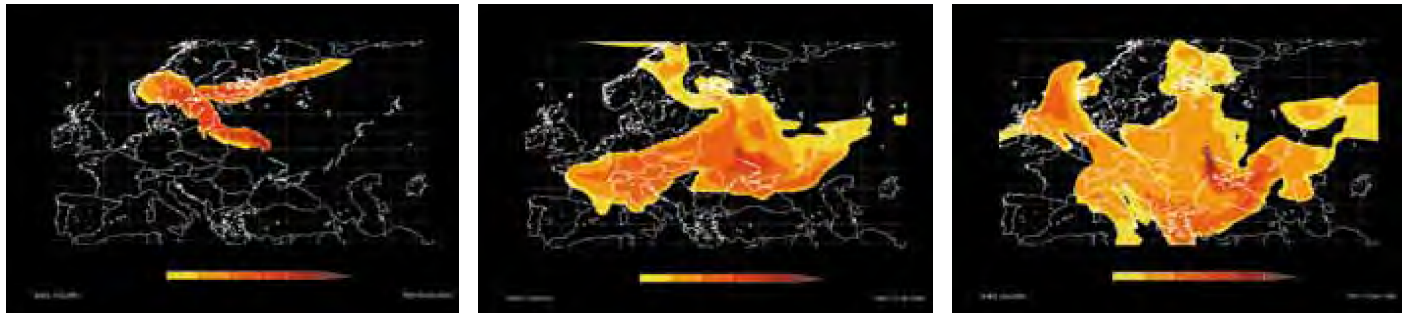
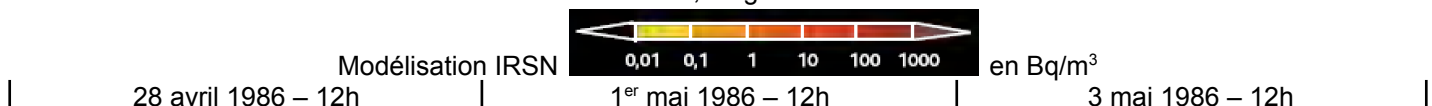


Figure 6 : Évolution de l'activité volumique de l'air par le césium-137 au niveau du sol
latitudes 36°N – 69°N ; longitudes : 10°W – 60°E



L'atlas européen auquel l'IRSN a contribué montre que si la France n'a pas été épargnée par le « nuage de Tchernobyl », c'est surtout en raison des précipitations dans l'Est du pays et sur les Alpes, la Corse étant touchée comme les régions proches de l'Italie (voir figures 6 et 7).

Les dépôts dépassent 40 kBq/m² en Scandinavie, dans le sud de la Roumanie, en Moravie, en Autriche et au nord de la Grèce. La Bavière, la Suisse et le Nord de l'Italie ont été impactés sur des surfaces plus réduites.

Ces niveaux de contamination correspondent à des doses annuelles de quelques mSv, comparables aux doses naturelles dans certaines contrées (Inde).

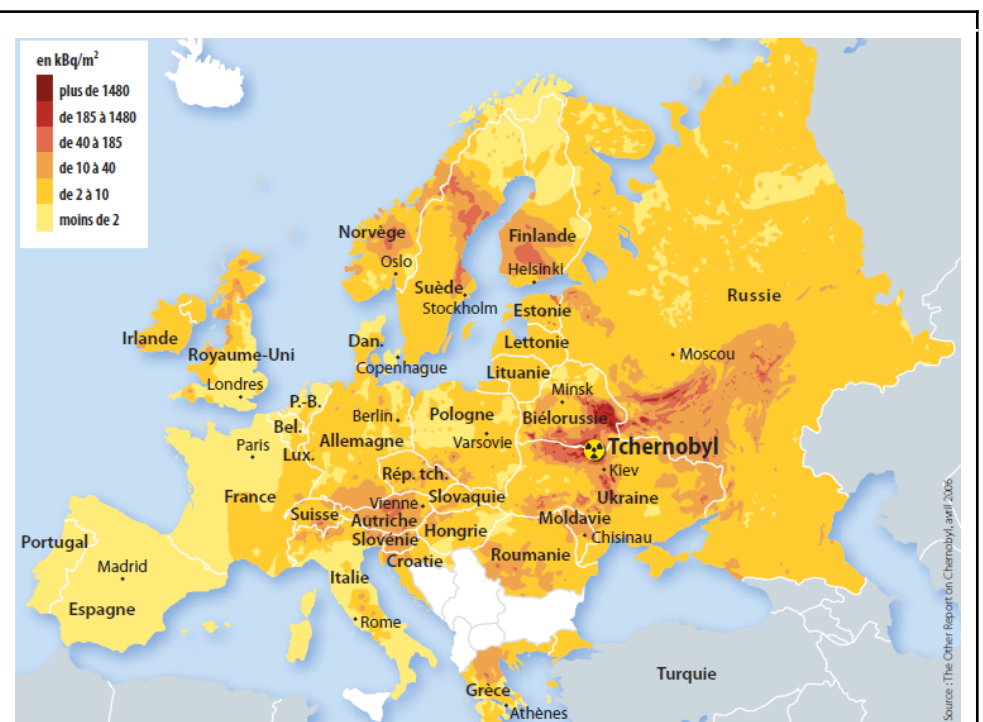


Figure 7 : Carte de contamination européenne

⁴ Ville construite pour les travailleurs de la centrale de Tchernobyl, et située à vol d'oiseau à 3 km de la centrale.

⁵ Guerre d'Afghanistan, retour des cercueils en Russie, puis la dissolution de l'Union Soviétique ayant entraîné en Ukraine et en Biélorussie une catastrophe économique (inflation galopante), sociale et médicale.

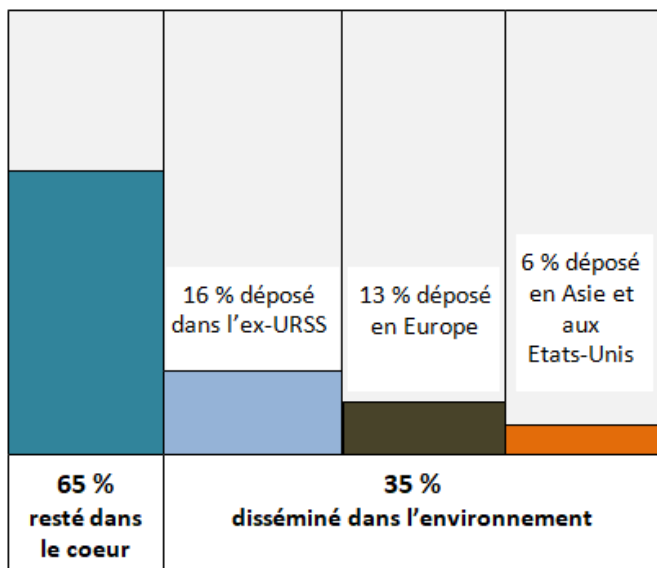
⁶ En 1995, 9 ans après l'accident, la monnaie ukrainienne avait subi une inflation d'un facteur 100 000 ! Pour payer leurs agents, les directeurs des centrales nucléaires étaient obligés d'imprimer des coupons échangeables dans les magasins de la ville locale contre de l'électricité.

⁷ Détresse psychologique des 115 000 personnes évacuées, pour quelques milliers d'entre elles sans raison radiologique, carences alimentaires, perte de confiance en l'avenir conduisant à des états dépressifs jugés souvent favorables au tabagisme et à l'alcoolisme.

Les niveaux sont suffisamment faibles pour qu'il ne soit pas possible d'établir un lien direct entre l'accident et les conséquences sanitaires pour les populations d'Europe centrale et occidentale.

Les pays concernés n'étaient pas préparés ni à communiquer sur ce type d'accident, ni à appliquer des normes d'ingestion qu'il a fallu décider au pied levé, ce qui a créé une grande cacophonie en Europe. Apparemment, c'est en Suisse que la communication a été la mieux maîtrisée.

8. LES CONSÉQUENCES SUR LA FAUNE ET LA FLORE



Après 1986, la contamination reste surtout fixée dans les 10 à 20 premiers centimètres dans la majorité des sols.

Même si la contamination des produits agricoles diminue globalement au fil des années, il n'est pas rare d'observer fréquemment des valeurs élevées de concentration de césium 137 jusqu'au début des années 1990 (Gomel, Biélorussie).

La chute des feuilles entraîne localement une contamination importante des arbres et des sols des forêts sur une surface d'environ 40 000 km².

Le transfert des éléments radioactifs par les racines, beaucoup plus lent que le transfert direct par les feuilles, contribue néanmoins à entretenir une contamination chronique des végétaux et du reste de la chaîne alimentaire dans les territoires les plus touchés autour de Tchernobyl.

Figure 8 : Dissémination du Cs¹³⁷ après l'accident

Aujourd'hui, l'accès à la zone des 10 km reste strictement réglementé, mais les anciens habitants sont venus se réinstaller dans la zone des 30 km. L'existence de cette zone interdite à toute activité ou présence humaine depuis presque 40 ans en a fait un refuge pour la biodiversité, avec la prolifération de nombreuses espèces de mammifères dont les loups et les chevaux de Przewalski, auparavant menacés d'extinction. Les études en cours ne montrent pas un état sanitaire de la faune et de la flore dans cette zone différent de celui constaté sur des zones comparables extérieures à la zone d'exclusion.

9. LE « SARCOPHAGES » CONSÉQUENCES SUR LA FAUNE ET LA FLORE

Construit de mai à novembre 1986 dans des conditions d'urgence, cette enveloppe de 300 000 tonnes (voir figure 9), constituée de plaques de métal simplement posées à distance avec des grues, avait pour rôle de limiter la dispersion du combustible dans l'environnement, de limiter les entrées d'eau de pluie, et de permettre la reprise de l'exploitation du réacteur N°3 mitoyen qui partageait des auxiliaires et le hall des turbines.

Pour ménager le refroidissement du cœur ruiné, les plaques présentaient des ouvertures (1 000 m²) qui ont été réduites de moitié pendant les travaux de consolidation de 1995-1997.

Le combustible fondu et mélangé au béton et à l'acier s'est transformé, sous l'effet de la radiolyse due à l'humidité et à l'irradiation, en poussières qui risquaient d'être remises en suspension.



Figure 9 : Sarcophage et Réacteur N°3 Figure 10 : Projet d'arche recouvrant le sarcophage

Afin d'isoler de façon étanche les matières nucléaires de l'environnement, puis de les reprendre et les conditionner de façon sûre, une nouvelle enveloppe baptisée « arche » a été étudiée, et sa construction a débuté en 2006 (voir figure 10). Les études et la réalisation sont financées par un fonds international mis en place par le G7 et géré par la BERD.

Il faudra plusieurs dizaines d'années pour que les Ukrainiens assainissent les ruines du réacteur. Les illustrations suivantes (figures 11 et 12) montrent des vues intérieures des travaux de consolidation.



Figure 11 : Poutres supportant le sarcophage



Figure 12 : Coulée de combustible sous le réacteur

10. LES LEÇONS TIRÉES

10.1. LES AMÉLIORATIONS DE SÛRETÉ DES RÉACTEURS RBMK

1. Les mesures post-Tchernobyl

Mises en œuvre immédiatement après l'accident, sur tous les réacteurs RBMK, elles avaient pour but de remédier aux principaux défauts de la conception initiale.

- Ajout de barres absorbantes fixes et augmentation de l'enrichissement du combustible afin de réduire le coefficient (effet) positif de température.
- Modification du système d'arrêt d'urgence, par l'installation d'un système d'arrêt plus performant (24 barres supplémentaires).
- Amélioration de la capacité de dépressurisation du système de confinement, par l'ajout d'un système de réduction de la pression par condensation de la vapeur.

2. Les programmes de modernisation

Au-delà des modifications génériques précédentes, un programme de modernisation spécifique a été conçu pour chaque réacteur. Les systèmes de sûreté les plus importants (comme par exemple le système d'arrêt d'urgence) ont été entièrement remplacés par de nouveaux systèmes plus modernes et plus fiables.

Une évaluation approfondie de la sûreté des réacteurs RBMK, après modernisation, a été menée par des groupes d'experts internationaux, à travers les deux cas concrets spécifiques des réacteurs Kursk 1 (1 000 MWe) et Ignalina 2 (1 500 MWe). Dans les deux cas, les conclusions ont souligné une amélioration très sensible de la sûreté de leur fonctionnement par rapport à leur situation initiale.

10.2. AUTRES DISPOSITIONS

Les RBMK ont progressivement été arrêtés à Tchernobyl et à Ignalina (Lituanie), mais ils continuent de fonctionner en Russie, après des modifications qui portent principalement sur la réduction de l'effet de vide⁸ (augmentation de l'enrichissement du combustible), le dessin de barres de contrôle (suppression de la partie inférieure en graphite), la protection de la dalle supérieure contre les accidents de surpression.

Au niveau mondial, des associations se sont mises en place pour partager le retour d'expérience : au niveau des exploitants (WANO : World Association of Nuclear Operators) et au niveau des autorités de sûreté (WENRA :

⁸ Voir https://laradioactivite.com/articles/energie_nucleaire/defauts-de-conception-rbm-k

Western European Nuclear Regulators Association) ; une échelle médiatique INES (International Nuclear Events Scale) a été créée, et la notification d'un accident nucléaire, d'un pays à l'autre, accélérée.

L'AIEA a créé des groupes consultatifs (INSAG : International Nuclear Safety Advisory Group) qui a rédigé une doctrine de sûreté partagée⁹.

L'accident de Fukushima (voir [fiche argumentaire GAENA "Accident de Fukushima"](#)) a montré que cette ligne de sûreté, alignée sur les règles les moins contraignantes, restait néanmoins insuffisante.

La gestion du traumatisme post-accidentel de populations nombreuses est un enseignement majeur de cette catastrophe qui a touché toute l'Europe.

11. CONCLUSION

Les conséquences humaines de cet accident ont été majeures :

Au-delà des 30 morts parmi les « liquidateurs » dans les premières semaines, des 6 000 cas de cancers de la thyroïde chez les enfants et adolescents, des 340 000 personnes relogées, les conséquences humaines sont difficiles à évaluer précisément et ont fait l'objet de polémiques. En France, cet accident n'a cependant pas conduit à des excès de cancers suite aux retombées de l'accident (voir [fiche argumentaire GAENA "Accident de Tchernobyl – Ses conséquences en France"](#)).

Plan d'action engagé :

Les enseignements proprement techniques ont été limités, mais la catastrophe de Tchernobyl a fait naître le besoin de transparence de l'information, la culture de sûreté, la préparation à la gestion de crise et la concertation internationale.

Au plan international, adoption le 17 juin 1994 à Vienne, de la **Convention sur la sûreté nucléaire** qui vise à engager les exploitants des centrales nucléaires à maintenir un niveau élevé de sûreté en établissant des principes fondamentaux de sûreté auxquels les États souscriront. La Convention oblige les parties à soumettre des rapports sur la mise en œuvre de leurs obligations pour un « examen par les pairs » lors de réunions qui se tiennent au siège de l'AIEA.

En France, amélioration de la coordination des pouvoirs publics. Les mesures suivantes ont été prises : organisation de la coordination des pouvoirs publics en cas d'incidents ou d'accidents ; création du réseau de télémessure et d'alerte Télec par le SCPRI ; développement des exercices de crise nucléaire et distribution préventive de comprimés d'iode pour les habitants vivant à proximité d'une centrale nucléaire, pour prévenir l'apparition de cancers de la thyroïde.

Mise en évidence de la nécessité d'une communication publique transparente, dans tous les États concernés par l'utilisation de l'énergie nucléaire.

12. SOURCES

- IRSN : « Tchernobyl », livret thématique (www.irsn.fr) – d'où sont tirées les figures présentées
- Henri FÉROUL : « Tchernobyl : les réalités... 22 ans après » ; l'hippocampe - n°60 - Décembre 2008
- UNSCEAR, annexe D : « Health effects due to radiation from the Chernobyl accident », New York 2011
- Nouveau regard sur Tchernobyl, Revue générale nucléaire, mars-avril 2006
- SFEN, accident de Tchernobyl (www.sfen.fr)
- Bernard Lerouge : « Tchernobyl, Un « nuage » passe... » ; ed. L'Harmattan
- Accidents nucléaires et évolutions de la sûreté et de la radioprotection. Comment la sûreté nucléaire et la radioprotection ont évolué après les accidents survenus en France et dans le monde. [Les cahiers historiques de l'ASN - Novembre 2023](#)
- Connaissance des énergies
- La radioactivité. laradioactivite.com

Les photos de l'intérieur du « sarcophage » ont été fournies par V.I. Kupny, Chef de l'INB. C'est l'occasion de lui rendre ici hommage.

⁹ Par exemple, l'INSAG-4 concerne la Culture de sûreté

Annexe 1 : PRINCIPE DE CONCEPTION DES RÉACTEURS RBMK

Les réacteurs RBMK sont des réacteurs à neutrons thermiques utilisant le graphite comme modérateur et l'eau légère bouillante comme fluide caloporteur. Le combustible est de l'oxyde d'uranium enrichi en uranium 235. L'enrichissement d'origine était de 2 %. Il atteint aujourd'hui 2,6 %.

Chaque assemblage combustible est contenu dans un « tube de force » à l'intérieur duquel circule le fluide de refroidissement. Les tubes de force, environ 1700, sont placés verticalement dans l'empilement de graphite. L'ensemble repose sur une structure mécano-soudée contenue dans une cavité en béton. Au-dessus du réacteur, une « machine de chargement » permet le renouvellement du combustible de manière continue pendant l'exploitation. Le contrôle de la réactivité est assuré par environ 200 barres absorbantes de neutrons, réparties dans tout le cœur du réacteur. Les barres sont placées dans des tubes de force analogues à ceux qui contiennent les assemblages combustibles.

Deux boucles indépendantes assurent le refroidissement du réacteur. Chaque boucle comprend deux ballons séparateurs et quatre pompes de recirculation (3 en fonctionnement et 1 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. Depuis ces ballons séparateurs, la vapeur est envoyée à la turbine alors que l'eau retourne vers les collecteurs et les pompes de recirculation, qui alimentent les tubes de force au moyen d'un système de sous-collecteurs et de tuyauteries.

Un circuit de refroidissement de secours permet de refroidir le cœur en cas de brèche du 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).

Les réacteurs RBMK sont caractérisés à faible puissance par un « *coefficient de température positif* ». Le combustible et l'eau de refroidissement qui devient vapeur contribuent d'une manière antagoniste à ce coefficient, en capturant des neutrons durant leur ralentissement. Le coefficient de température négatif du combustible va dans le bon sens : quand la température augmente, davantage de neutrons sont capturés du fait de l'agitation thermique (effet Doppler) et donc perdus pour la fission. Le coefficient de température de l'eau de refroidissement est lui positif. Quand elle se vaporise l'eau devient moins dense, davantage de neutrons sont disponibles pour la fission : le dégagement d'énergie s'emballe.

La vaporisation de l'eau dans un RBMK génère donc une réactivité positive. En fonctionnement normal, le coefficient de température négatif du combustible l'emporte sur celui positif de l'eau de refroidissement. A puissance réduite, c'est le contraire : le coefficient de vide positif de l'eau l'emporte. Le réacteur devient naturellement instable et sujet à de brusques à-coups de puissance. Cette instabilité a entraîné d'abord une chute de puissance et surtout plus tard le déclenchement de l'accident.

Les avantages en faveur de ce type de réacteur sont, d'après le concepteur, 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 et, par conséquent, de contrôler chacun d'entre eux tant du point de vue thermique que du point de vue de l'intégrité des gaines du combustible.

Les inconvénients sont : la complexité du système de distribution et de collecte du fluide de refroidissement, la forte accumulation d'énergie thermique dans les structures métalliques et le graphite, l'absence d'enceinte de confinement, la difficulté de contrôle du cœur.