

L'ACCIDENT DE CRITICITÉ DE TOKAI-MURA

RÉSUMÉ

Le 30 septembre 1999 à Tokai-Mura au Japon, un accident dit de « criticité » a eu lieu dans une usine de traitement d'uranium de la *Japan Nuclear Fuels Conversion Company (JCO)*. L'accident s'est produit au cours d'opérations de dissolution de poudre d'uranium enrichi dans de l'acide nitrique pour obtenir du nitrate d'uranyle. Des réactions nucléaires en chaîne se sont déclenchées de façon incontrôlée, en dégageant d'intenses rayonnements et des gaz radioactifs, et en irradiant gravement plusieurs travailleurs. L'accident a été maîtrisé une vingtaine d'heures après son démarrage. Il a été classé par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) au niveau 4 de l'échelle INES.

► CAUSES

La cause de l'accident est attribuée aux opérateurs ayant contourné la procédure autorisée, et versé le nitrate d'uranyle directement dans le réservoir de précipitation avec un godet en acier inoxydable plutôt que d'utiliser une pompe. Selon la procédure, le nitrate d'uranyle aurait dû être stocké dans un réservoir tampon et ensuite transféré dans le réservoir de précipitation par paquets ne contenant pas plus de 2,4 kg d'uranium. En transgressant la procédure, 16 kg de nitrate d'uranyle ont ainsi été versés dans le réservoir de précipitation.

Le réservoir tampon aurait effectivement permis de contenir cette solution en toute sécurité, car il avait une géométrie haute et étroite et était conçu pour éviter la criticité. En revanche, le réservoir de précipitation n'avait pas été conçu pour contenir ce type de solution et n'était pas configuré pour empêcher la criticité. Une réaction nucléaire en chaîne s'est alors déclenchée et a entraîné l'accident de criticité. La puissance dégagée a atteint un pic puis a rapidement décliné à un niveau plus faible et oscillé en fonction des réactions de criticité qui se sont déclenchées pendant plusieurs heures. L'accident a duré 20 heures, durée caractéristique d'un accident de criticité en solution.

► CONSÉQUENCES

Les accidents de criticité sont rares. Celui de Tokai-Mura était le premier accident de ce type au Japon. À cette date, une vingtaine d'accidents de criticité ayant entraîné des victimes ont eu lieu dans le monde. Ces dernières ont toujours succombé rapidement. Dans l'accident de Tokai-Mura, les soins médicaux prodigués ont été d'un niveau exceptionnel et ont repoussé de plusieurs mois le décès des deux employés les plus gravement irradiés.

Au cours de l'accident, 136 personnes sur le site ont été irradiées à des doses très variables, dont deux gravement. Ces derniers, directement impliqués dans les opérations à proximité immédiate de la cuve de dissolution, sont décédés, respectivement au bout de trois et sept mois de soins intensifs. Le plus atteint avait reçu une **dose de 9,1 Sv** et le second une **dose de 5 Sv**.

Un troisième employé, situé dans une pièce voisine de la cuve, a reçu une **dose de 1,2 Sv** avec forte probabilité de développer un cancer. Les 133 autres personnes (pompiers, opérateurs intervenus pour arrêter l'accident de criticité) ont été exposées à des doses estimées entre **0,1 et 50 mSv**, sans effet directement observable.

► POURSUITES JUDICIAIRES

Des poursuites judiciaires ont été engagées à l'encontre des dirigeants de l'entreprise JCO. Un dirigeant et cinq employés de l'entreprise, considérés comme responsables du plus grave accident nucléaire depuis Tchernobyl, ont été condamnés à des peines de prison avec sursis et à payer de lourdes amendes.

La licence d'exploitation a été retirée à JCO. L'entreprise a été condamnée à verser une amende d'un million de yens. Le parquet avait requis cette sanction qui correspond au maximum prévu par la loi, l'accusant d'un manque de rigueur dans les procédures de contrôle ayant permis la répétition routinière des pratiques dangereuses.

La gravité de cet accident a conduit l'ensemble des Autorités de sûreté et des exploitants de chaque pays mettant en œuvre des installations nucléaires à engager une revue des procédures et des pratiques en vigueur concernant la prévention du risque de criticité.

1. LE DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT

L'accident s'est produit le 30 septembre 1999 dans un atelier spécialisé dans la production d'uranium enrichi en isotope 235, destiné à la fabrication de combustible pour réacteurs de recherche. Il s'agissait, lors de l'accident, d'un nitrate d'uranyle enrichi à 18,8 % pour le réacteur expérimental Joyo.

Pour élaborer le nitrate d'uranyle à 18,8 % d'isotope 235, il fallait suivre plusieurs étapes approuvées par l'Autorité de sûreté. Schématiquement, il s'agissait d'abord de dissoudre de l'oxyde d'uranium dans un « dissolvant » dit de géométrie sûre : sa forme et ses dimensions excluent le risque de criticité¹. Puis, le liquide obtenu devait passer dans des récipients intermédiaires qui permettaient un contrôle de la masse d'uranium en jeu avant transfert de la solution dans une cuve de précipitation, qui n'est pas de géométrie sûre. Enfin, après avoir été calciné, le composé obtenu devait être à nouveau dissous dans le dissolvant de géométrie sûre puis homogénéisé dans l'un des récipients intermédiaires.

Pour plus d'informations sur la prévention du risque de criticité dans les installations nucléaires consulter la [fiche argumentaire GAENA « Qu'est ce que la criticité nucléaire ? »](#).



Les différentes étapes énumérées ci-dessus n'ont pas été respectées.

En réalité, il semble que l'habitude avait été prise de ne pas utiliser le dissolvant de géométrie sûre à la seconde dissolution : cette étape était effectuée dans des seaux de 10 litres et le liquide obtenu était directement injecté dans la ligne de traitement.

De plus, le jour de l'accident, pour gagner du temps et obtenir un produit final plus homogène, le contenu des seaux a été déversé directement dans la cuve de précipitation.

La cuve a servi à la fois à homogénéiser le composé et à l'entreposer, ce qui n'était pas son utilisation normale. La veille de l'accident, 9,2 kg d'uranium avaient déjà été versés par charges unitaires de 2,3 kg et le jour de l'accident, trois nouvelles charges ont été ajoutées.

◀ **Figure 1 : Maquette du décanteur – précipitateur réalisée pour les enquêtes qui ont suivi l'accident**

Il apparaît ainsi que l'organisation de l'usine était déficiente, tant pour ce qui concerne l'établissement des modes opératoires, que pour ce qui concerne la formation du personnel, et que, plus généralement, la culture de sûreté était insuffisante.

Les opérateurs, qui travaillaient habituellement dans les unités de conversion de l'uranium destiné au combustible des réacteurs électronucléaires, n'avaient qu'une expérience limitée (2 à 3 mois au plus) de l'exploitation de l'atelier de conversion dédié à l'uranium enrichi à plus de 5 %. De plus, ils n'avaient pas reçu de formation aux risques de criticité depuis 1992 et, en tout état de cause, la formation délivrée à l'époque avait été générale et non spécifique aux postes de travail correspondants. Par ailleurs, il est à relever que l'Autorité de sûreté japonaise ne semblait pas effectuer un réel suivi de cette installation.

2. LE PROCESSUS AYANT CONDUIT À L'ACCIDENT

L'accident s'est produit au cours d'opérations de dissolution de poudre d'uranium enrichi à 18,8 % en isotope U 235 dans de l'acide nitrique pour obtenir du nitrate d'uranyle. Le procédé autorisé par l'Autorité de sûreté japonaise consistait à dissoudre la poudre d'uranium dans un équipement « de géométrie sûre », c'est-à-dire un équipement dont les dimensions sont telles que tout accident de criticité est exclu quelle que soit la masse d'uranium introduite

¹ La criticité est une discipline visant à évaluer et prévenir les risques de réaction en chaîne de fission nucléaire incontrôlée dans une installation nucléaire ou en cas de transport de matières radioactives.

(figure 2A). Le volume de cet équipement, trop faible, ne permettant pas l'obtention d'une quantité importante de nitrate d'uranyle.

Plusieurs dissolutions consécutives étaient alors nécessaires, entraînant la constitution de lots de concentration en uranium différents. Trois évolutions de procédure ont alors été décidées par JCO au cours des trois années sans en référer à l'Autorité de sûreté.

La première remonte à 1993. Elle a consisté d'une part à effectuer les dissolutions d'uranium purifié par charge de 2,4 kg dans des seaux en lieu et place du dissolvant et d'autre part à entreposer les solutions obtenues dans des colonnes de géométrie sûre où elles pouvaient être homogénéisées par barbotage à l'azote.

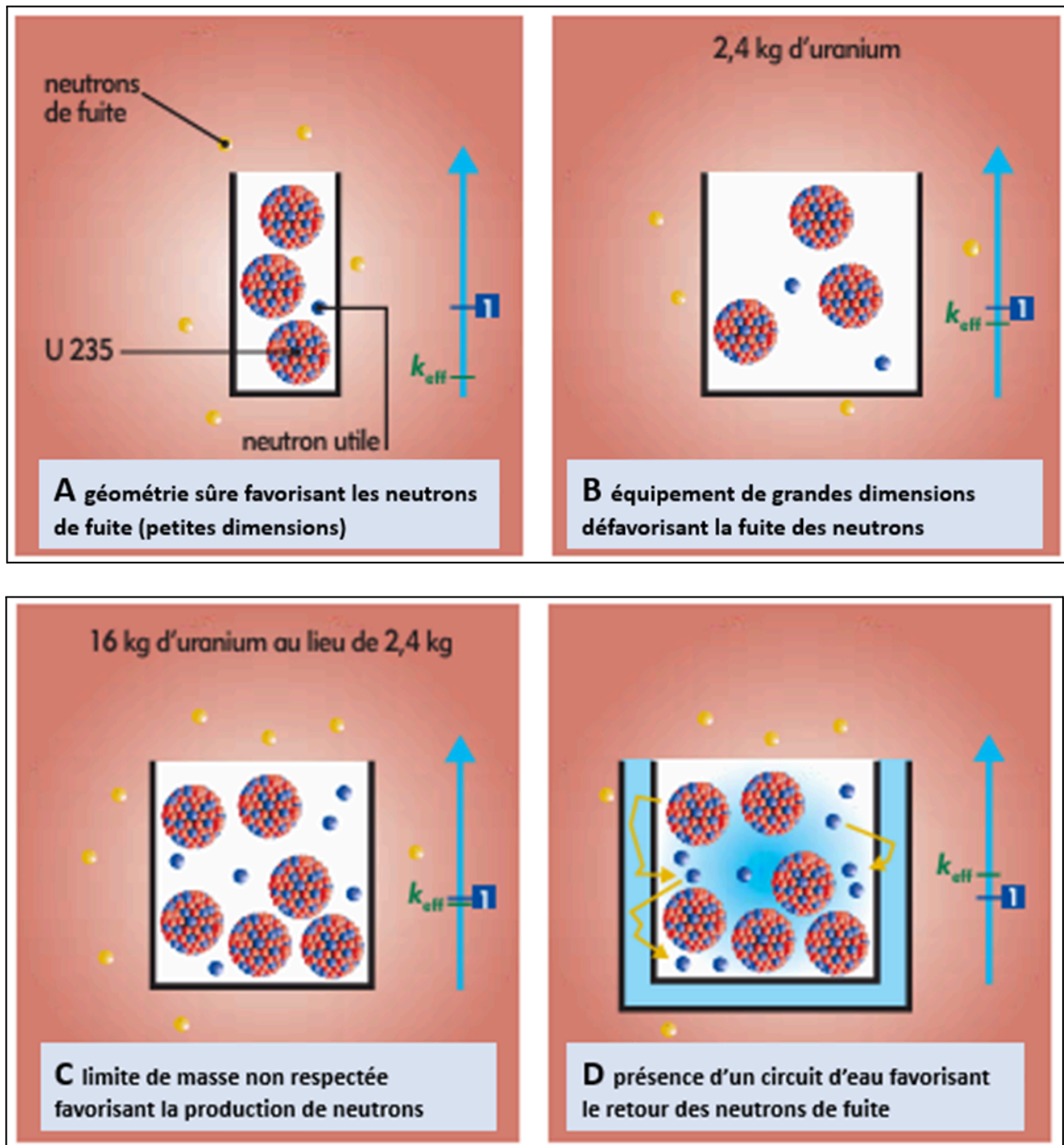


Figure 2 : Les différentes configurations du milieu fissile impliqué dans l'accident du 30 septembre 1999

En A, tel qu'il se serait présenté dans un équipement de géométrie sûre à la capacité jugée trop faible.

En B, dans l'équipement de grandes dimensions où il serait resté non critique si la masse de matière fissile était restée inférieure à 2,4 kg.

De C à F tel qu'il a effectivement évolué.

À droite figure la valeur du coefficient de multiplication² k_{eff} par rapport à 1.

² Le paramètre k_{eff} (facteur de multiplication effectif du système) exprime le facteur par lequel le nombre de fissions se trouve multiplié d'une génération de neutrons à la suivante.

La seconde remonte à 1996 et a consisté à généraliser la dissolution de la poudre d'uranium dans des seaux. **La troisième** a conduit à l'accident de criticité du 30 septembre 1999. Elle a consisté à remplacer les colonnes de géométrie sûre par la cuve de précipitation de diamètre plus grand et munie d'un agitateur mécanique dans le but de faciliter l'opération d'homogénéisation des différents lots de dissolution. Cette dernière cuve n'étant pas de géométrie sûre, le contrôle de la criticité était assuré par la limitation de la masse d'uranium de 2,4 kg (figure 2B).

Or, les deux opérateurs ont rempli la cuve à l'aide de seaux, chacun d'entre eux contenant 2,4 kg de poudre d'uranium dissous dans de l'acide nitrique. Au cours de la vidange du dernier seau, un opérateur a observé un flash bleu caractéristique d'un accident de criticité (effet Tcherenkov)³ : 16,6 kg d'uranium étaient présents dans la cuve (Figure 2C).

3. FACTEURS AYANT CONDUIT À L'ACCIDENT

Au plan technique, 3 facteurs ont conduit à l'accident.

- Le premier a été le remplacement de l'équipement de « géométrie sûre » par un équipement de grandes dimensions, entraînant dans la solution une diminution importante du nombre de neutrons pouvant s'échapper de l'équipement et, ainsi, une augmentation de la valeur du facteur de multiplication effectif k_{eff} et donc de la criticité (Figure 2B).
- En second lieu, la limite de masse de 2,4 kg n'a pas été respectée dans l'équipement de grandes dimensions. Son respect aurait permis de réaliser l'opération sans risque de criticité, avec des marges de sécurité importantes. La production de neutrons croissant avec le nombre de noyaux fissiles du milieu (et donc avec la masse de matière fissile), la présence de 16,6 kg d'uranium a augmenté de manière importante la valeur du k_{eff} .
- Enfin, la présence d'un circuit de refroidissement à l'eau (réflecteur) a ramené vers le milieu fissile des neutrons qui s'en seraient échappés en l'absence d'eau, leur permettant aussi de participer à la production de neutrons (Figure 2D). La présence d'eau autour de la cuve a augmenté la valeur du k_{eff} jusqu'à une valeur supérieure à 1. Ici, encore, le respect de la limite de masse de 2,4 kg aurait permis de réaliser l'opération sans risque de criticité (Figure 2F).

4. LE DÉROULÉ DÉTAILLÉ DES ÉVÉNEMENTS

Le 30 septembre 1999, à 10h35, heure locale, la réaction en chaîne a démarré, dégageant d'intenses rayonnements gamma et des neutrons. La puissance dégagée a atteint un pic puis a rapidement décroché à un niveau plus faible et qui s'est maintenu pendant plusieurs heures, avec une intensité variable qui a oscillé en fonction des réactions de criticité qui se sont déclenchées durant un certain laps de temps. L'accident a duré 20 heures, durée caractéristique d'un accident de criticité en solution.

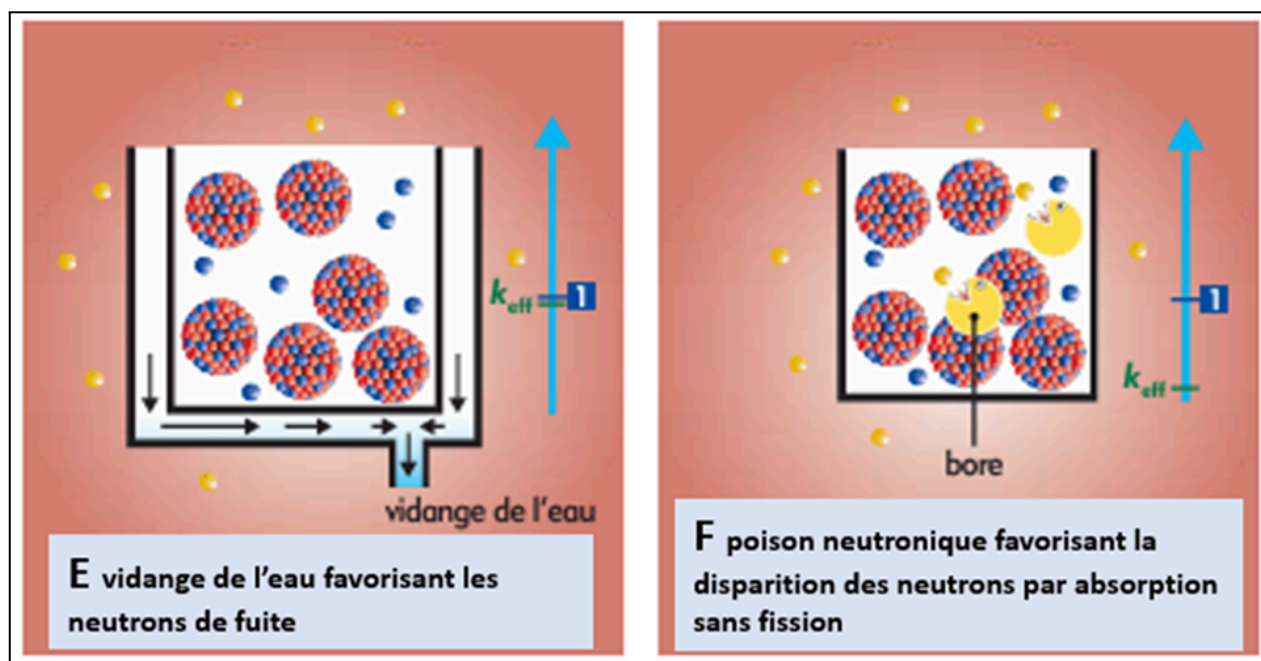


Figure 3 : Actions entreprises après l'accident

³ L'effet Tcherenkov, est un phénomène similaire à une onde de choc, produisant un flash de lumière lorsqu'une particule chargée se déplace dans un milieu diélectrique avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu (la vitesse de la lumière dans le vide étant toujours supérieure à celle de la particule).

En effet, la formation de bulles de gaz de radiolyse⁴ résultant de l'irradiation des molécules d'eau et de bulles de vapeur due à la chaleur dégagée a entraîné localement une diminution de la densité en matières fissiles et donc une diminution du k_{eff} .

Le milieu est alors revenu à un état sous-critique, entraînant la disparition des bulles. La réaction de fission en chaîne a pu alors redémarrer et le milieu redevenir surcritique. Dans le cas particulier de Tokai-Mura, l'alimentation en eau du circuit de refroidissement a perturbé les échanges thermiques, empêchant le milieu fissile de redevenir sous-critique sur une période suffisamment longue pour permettre une intervention.

Environ 14 heures après le début de l'accident, les premières opérations d'intervention ont pu commencer. L'eau du circuit de refroidissement de la cuve de précipitation, qui favorise la réaction en chaîne (en réfléchissant les neutrons responsables de la fission des atomes), a d'abord été vidangée. Vers 6 heures du matin, les mesures ont montré que cette opération avait été suffisante pour arrêter la réaction en chaîne (Figure 2E).

Puis, pour éviter tout redémarrage, du bore – un élément chimique connu pour absorber les neutrons – a ensuite été introduit dans la cuve, diminuant de manière significative et définitive le k_{eff} (figure 2F). Ce bore a été fourni par un établissement proche, l'usine n'en ayant pas en stock. À 8 heures, l'accident était terminé.

Plusieurs équipes de deux personnes se sont succédé pour réaliser ces opérations au voisinage de l'atelier accidenté. Leurs durées d'intervention de l'ordre de 2 à 3 minutes étaient définies pour limiter la dose de rayonnements qu'ils recevaient à environ 100 millisieverts (mSv). Ainsi, selon un rapport de l'AIEA [Réf. 1] publié fin 1999, 21 personnes de la société JCO auraient reçu des doses de 0,04 à 119 mSv lors de la vidange de l'eau de la cuve et 6 autres des doses de 0,03 à 0,61 mSv au cours du déversement de l'acide borique.

L'installation n'ayant subi aucun dommage, les dégagements d'isotopes radioactifs dans l'environnement ont été limités à de très faibles concentrations. Les conséquences radiologiques de ces rejets ont été évaluées à 0,1 mSv à proximité de l'usine.

5. LES CONSÉQUENCES

Au cours de cet accident, 136 personnes sur le site ont été irradiées à des doses très variables, dont deux gravement. Deux employés impliqués dans les opérations et situés à proximité immédiate de la cuve de dissolution (voir illustration) sont décédés, au bout, respectivement de trois et sept mois de soins intensifs. Le plus atteint avait reçu une **dose de 9,1 Sv** presque deux fois supérieure à la dose létale (dose correspondant à 50 % de décès dans une population irradiée sans traitement médical particulier, soit 5 Sv) et le second une **dose de 5 Sv**.

Un troisième employé (le contremaître), situé dans une pièce voisine de la cuve, a reçu quant à lui une **dose de 1,2 Sv** avec une forte probabilité de développer un cancer⁵. Les 133 autres personnes (pompiers, opérateurs intervenus pour arrêter l'accident de criticité) l'ont été de manière beaucoup moins sévère et, certainement, pour la plupart d'entre elles, sans effet directement observable. Elles ont reçu des doses estimées entre **0,1 et 50 mSv**, sans effet directement observable.

D'après une enquête de l'exploitant, une centaine d'autres personnes auraient potentiellement reçu des doses estimées entre 0,06 et 16,6 mSv et environ 200 personnes du public auraient reçu potentiellement des doses estimées entre 0,01 et 21 mSv. Aux alentours du site, les 160 habitants se trouvant dans un rayon de 350 mètres du bâtiment contenant la cuve ont été évacués, tandis que 320.000 autres dans un rayon de 10 km ont reçu, par précaution, la consigne de rester confinés à leur domicile jusqu'à la fin de l'accident. Les mesures réalisées dans l'air, l'eau ou les produits végétaux n'ont révélé la présence d'iode que de manière ponctuelle et à l'état de traces.

6. LES ENSEIGNEMENTS

L'organisation mise en place par JCO et approuvée par l'Autorité de sûreté n'était pas satisfaisante. En particulier, l'organigramme de la société comportait un département de production et un département technique où se trouvaient les responsables de la sûreté et de l'assurance de la qualité de production.

⁴ La radiolyse de l'eau est la dissociation par décomposition chimique de l'eau (H_2O) (liquide ou de vapeur d'eau) en hydrogène et hydroxyle, respectivement sous forme de radicaux $\text{H}\cdot$ et $\text{OH}\cdot$, sous l'effet d'un rayonnement énergétique intense.

⁵ Cet employé, qui a été hospitalisé plusieurs mois après l'accident, a pu reprendre son travail. Il aurait sombré par la suite dans une profonde dépression et développé plusieurs hémorragies rétinienne et des excroissances bénignes dans la bouche. Selon des sources non validées, il serait toujours en vie.

Le manuel de la société spécifiait qu'en cas de modifications de procédures par le département de production, l'avis des responsables Sécurité et Assurance qualité n'étaient que consultatifs. Cette consultation, facultative, n'a pas été jugée nécessaire par l'ingénieur de production sollicité par le contremaître avant la mise en œuvre de la modification de la procédure qui a conduit à l'accident.

Par ailleurs, les consignes à respecter permettant d'éviter tout accident de criticité n'étaient pas affichées (par exemple, limites de masse en fonction de l'enrichissement de l'uranium en isotope U 235). Il n'y avait pas d'expert en criticité sur le centre, ni d'inspections régulières de l'Autorité de sûreté.

Les opérateurs n'étaient pas sensibilisés au risque de criticité. Le contremaître et les opérateurs avaient de nombreuses années d'expérience des opérations mettant en œuvre de l'uranium enrichi à 5 % en isotope U 235, pour lequel la limite de masse est de 16 kg d'uranium. Les opérateurs ont ainsi transposé leur expérience de l'uranium à 5 % à de l'uranium enrichi à 18,8 % en isotope U 235, sans connaître les risques encourus. En effet, la masse équivalente de l'isotope fissile 235 en quantité plus importante (4 fois plus dans ce cas), accroît la valeur du k_{eff} : augmentation du nombre de neutrons produits par la présence d'un nombre plus important d'atomes fissiles provoquant des réactions de fission (figure 2C).

La gravité de cet accident a conduit l'ensemble des Autorités de sûreté et des exploitants de chaque pays mettant en œuvre des installations nucléaires à engager une revue des procédures et des pratiques en vigueur concernant la prévention du risque de criticité.

7. CONCLUSION

Trois ans et demi après la survenue de l'accident s'est tenu le procès de l'accident de Tokai-Mura. Un dirigeant et cinq employés du centre de retraitement d'uranium de Tokai-Mura, considérés comme responsables du plus grave accident nucléaire depuis Tchernobyl, ont été condamnés à des peines de prison avec sursis.

La peine la plus grave a été prononcée contre Kenzo Koshijima, 56 ans, condamné à trois ans d'emprisonnement avec sursis et à une amende de 500.000 yens (4.240 dollars). À l'époque de l'accident, il dirigeait l'usine appartenant à l'entreprise JCO. Le tribunal de première instance de Mito l'a jugé coupable de négligence professionnelle et d'avoir enfreint la législation sur la sécurité nucléaire.

Les autres employés, dont un ouvrier rescapé de l'accident, ont été condamnés à des peines de deux à trois ans de prison avec sursis. L'entreprise JCO a été condamnée à verser une amende d'un million de yens. Le parquet avait requis cette sanction qui correspond au maximum prévu par la loi, accusant JCO d'un manque de rigueur dans les procédures de contrôle ayant permis la répétition routinière des pratiques dangereuses.

Deux des trois ouvriers étaient morts dans les mois qui ont suivi l'accident, des conséquences de leur exposition aux rayonnements. Le troisième, Yutaka Yokokawa, a été hospitalisé plusieurs mois et fait partie des six personnes poursuivies. Kenzo Koshijima et les cinq autres prévenus ont été inculpés pour violation des règles de sûreté nucléaire et négligence professionnelles.

La licence a été retirée à l'entreprise JCO. Depuis lors, la totalité de l'usine, qui produisait plus d'un tiers du combustible nucléaire de l'archipel, ne fonctionne plus. Le petit atelier dans lequel s'est produit l'accident a été totalement nettoyé.

JCO a estimé à 14,5 milliards de yens (150 millions d'euros) la perte exceptionnelle liée aux coûts relatifs à l'accident. Elle a notamment indemnisé plus de 6.000 riverains, en particulier de nombreux maraîchers, dont les légumes n'ont plus trouvé preneurs.

8. RÉFÉRENCES

- [Réf.1] : IRSN : L'accident de criticité de Tokai-Mura (Japon - 1999)
<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/laccident-criticite-tokai-mura-japon-1999>,
- [Réf. 2] : Clefs CEA N° 45 – Automne 2001: L'accident de criticité de Tokai-Mura
- [Réf. 3] : Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura, Japan
<https://www.iaea.org/publications/5957/report-on-the-preliminary-fact-finding-mission-following-the-accident-at-the-nuclear-fuel-processing-facility-in-tokaimura-japan>
- [Réf. 4] : Fiche argumentaire GAENA « Qu'est ce que la criticité nucléaire ? ».