

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

LES ACCIDENTS DE CRITICITE DANS L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

**DIRECTION DE LA SURETE DES USINES,
DES LABORATOIRES, DES TRANSPORTS
ET DES DECHETS**

Service d'expertise, d'études et de recherche en criticité

Octobre 2009

SOMMAIRE

<u>I LES RISQUES DE CRITICITE DANS L'INDUSTRIE NUCLEAIRE</u>	<u>3</u>
<u>II LA CRITICITE</u>	<u>4</u>
<u>III LE ROLE DE L'IRSN DANS LA MAITRISE DES RISQUES DE CRITICITE</u>	<u>7</u>
<u>IV LE BILAN DES ACCIDENTS DE CRITICITE</u>	<u>8</u>

I LES RISQUES DE CRITICITE DANS L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

Le risque de criticité (réaction nucléaire de fissions en chaîne non maîtrisée) est un risque qui concerne les installations du cycle du combustible dès lors que des quantités significatives de matières fissiles¹ sont manipulées. Ce risque est donc présent dans les laboratoires et les usines du cycle du combustible, dans des réacteurs de recherche, ainsi que dans les transports de matières fissiles et de certains déchets. Les matières fissiles mises en œuvre (uranium, plutonium, mélanges d'uranium et de plutonium, autres actinides (noyaux lourds) fissiles), leurs formes physicochimiques (liquide, solide, gazeux) et leurs conditions d'utilisation sont très variables. Les quantités de matières nécessaires au déclenchement de la réaction en chaîne sont donc également très variables (de quelques centaines de grammes à plusieurs centaines de kilogrammes).

Une réaction en chaîne incontrôlée s'accompagne d'une émission intense de rayonnements gamma et de neutrons ; elle ne peut survenir que pour des quantités de matières fissiles supérieures à une « masse minimale critique », dépendant de la nature des matières fissiles en présence. Les doses d'irradiation liées à un accident de criticité peuvent être très élevées, voire létales, pour les travailleurs se trouvant à proximité de l'équipement concerné.

Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité ont été répertoriés, pour l'essentiel aux Etats-Unis et dans l'ex-URSS. Survenus pour un tiers dans des installations du cycle du combustible et pour deux tiers dans des réacteurs de recherche ou dans des laboratoires sur des assemblages critiques, ils n'ont pas entraîné de rejets significatifs de produits radioactifs dans l'environnement, mais ils ont provoqué le décès de 19 travailleurs, dont 15 entre 1945 et 1971.

La maîtrise des risques d'accident de criticité consiste à prendre des dispositions de conception et d'exploitation qui écartent ou rendent très improbable l'occurrence d'une réaction en chaîne incontrôlée. Les dispositions de construction, d'exploitation et/ou administratives adoptées dans les installations pour prévenir les risques de criticité font l'objet d'analyses et d'études des exploitants, présentées notamment dans les rapports de sûreté. Ces dispositions, qui doivent répondre à une « règle fondamentale de sûreté » spécifique à ces risques (RFS 1.3.c), font l'objet d'expertises de la part de l'IRSN, en s'appuyant sur un service de spécialistes.

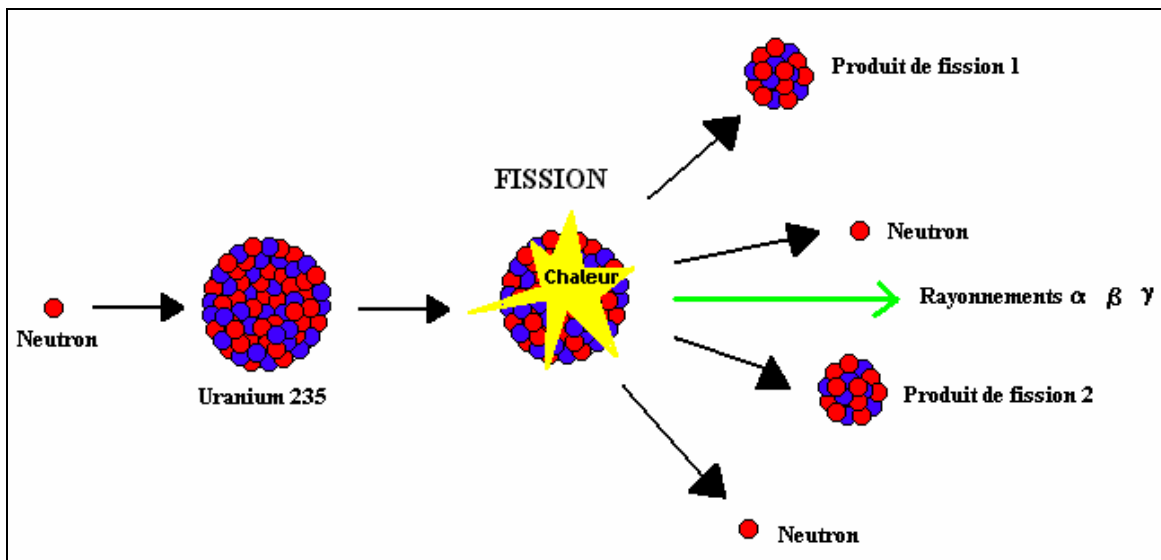
¹ Matière contenant des noyaux dits fissiles, c'est-à-dire pouvant subir une fission par interaction avec des neutrons de toute énergie, notamment des neutrons thermiques

II LA CRITICITE

Les matières nucléaires fissiles (les principales sont l'uranium 235 et le plutonium) présentent la propriété de pouvoir dans certaines conditions entretenir des réactions de fission en chaîne. C'est cette propriété qui est utilisée pour la production d'énergie dans les réacteurs nucléaires. Les réactions de fission s'accompagnent d'une intense production de rayonnements gamma et de neutrons.

Une réaction en chaîne peut s'établir parce que la fission d'un noyau fissile provoquée par l'absorption d'un neutron s'accompagne de l'émission de plusieurs neutrons² (voir figure 1). En dehors de la fission, les autres événements qui peuvent affecter la vie d'un neutron sont d'une part sa capture par un élément atomique absorbant³, d'autre part la fuite en dehors du milieu fissile.

Figure 1 : réaction de fission de l'²³⁵U



La grandeur qui est utilisée en criticité pour caractériser l'état d'un milieu est le « **facteur de multiplication effectif du système** » (k_{eff}). Cette grandeur peut être définie comme le rapport des nombres de neutrons correspondant à deux générations successives de neutrons. Elle est donc calculée en examinant le devenir d'une génération⁴ de neutrons.

² 2,5 dans le cas de la fission d'un noyau d'uranium 235 et 2,9 dans le cas de la fission d'un noyau de plutonium 239.

³ Par exemple, les barres de contrôle des réacteurs contiennent des éléments absorbants tels que le bore ; l'uranium 238 est également un élément absorbant qui se transforme en plutonium 239 par capture d'un neutron.

⁴ Il est possible de faire une analogie très fidèle entre la criticité d'un système contenant de la matière fissile et la natalité d'un pays, à la différence près que, pour les neutrons, le temps de vie entre deux générations est de l'ordre de la milliseconde...

Les neutrons peuvent être, comme cela est dit plus haut, soit absorbés par un noyau fissile et provoquer sa fission, soit absorbés sans entraîner de fission, ou encore fuir le milieu fissile sans avoir été absorbés.

Si le rapport k_{eff} est :

- inférieur à 1 : le système est **sous-critique**. C'est cette situation qui doit être assurée, avec des marges de sécurité suffisantes lors des opérations de fabrication, de stockage ou de transport de matières fissiles. C'est également la situation d'un cœur de réacteur nucléaire à l'arrêt lorsque les barres sont complètement insérées dans le cœur.
- égal à 1 : le système est **critique**. C'est la situation du cœur d'un réacteur nucléaire en fonctionnement.
- supérieur à 1 : le système est **sur-critique**. Si cette situation n'est pas maîtrisée, c'est l'accident de criticité.

La divergence d'un réacteur nucléaire est réalisée en levant les barres de contrôle de telle sorte que le coefficient de multiplication k_{eff} soit légèrement supérieur à 1 ; la puissance du réacteur est ensuite stabilisée en rendant le coefficient égal à 1.

Si les barres de commande sont trop levées, le réacteur peut devenir « prompt-critique »⁵, c'est-à-dire que le temps entre deux générations successives de neutrons peut devenir très court (de l'ordre de la milliseconde). Cela peut conduire à un dégagement très fort de puissance et entraîner la destruction du réacteur, comme ce fut le cas lors de l'accident de Tchernobyl en 1986. Toutefois, dans un réacteur nucléaire correctement conçu, différents phénomènes interviennent pour stabiliser la puissance du réacteur avant qu'une explosion n'intervienne.

Le même phénomène de multiplication très rapide des populations de neutrons peut se produire au cours de manipulations de matières fissiles dans des laboratoires ; une quarantaine d'accidents se sont produits dans ces conditions.

Dans les installations du cycle du combustible et les transports de matières radioactives, le risque de criticité existe dès lors que les matières mises en œuvre contiennent du plutonium et/ou de l'uranium enrichi à plus de 1% en uranium 235. Ce risque est donc présent dans les usines d'enrichissement de l'uranium, de fabrication de combustibles nucléaires, de traitement de ces combustibles après irradiation, de traitement de déchets nucléaires, ainsi

⁵ Le réacteur devient « prompt-critique » lorsque son coefficient de multiplication k_{eff} devient supérieur à $1+\beta$. β , « fraction de neutrons retardés », a une valeur de l'ordre de 0,007 pour les réacteurs à eau légère, et 0,0035 pour les réacteurs à neutrons rapides.

que dans certains laboratoires ou réacteurs de recherche et dans les emballages de transports de matières fissiles.

Pour des raisons économiques, il est souvent nécessaire de traiter ou de transporter simultanément des masses importantes de matières fissiles ; il n'est alors pas envisageable de faire fonctionner les installations avec un facteur de multiplication effectif (k_{eff}) très inférieur à 1. Les opérations sont optimisées, de façon à conserver un facteur de multiplication effectif généralement inférieur à 0,95 dans toutes les situations normales et accidentelles envisagées (introduction d'eau, chute, augmentation de la concentration de la matière fissile,...).

L'étude des accidents de criticité qui se sont produits, ainsi que des situations que l'on peut qualifier de « presque accidents », sont donc particulièrement importantes pour la définition des scénarios d'accidents à retenir dans les études de criticité, soit pour les transports, soit pour les usines du cycle du combustible, soit pour les laboratoires.

Les études de criticité font appel à des outils de calcul qui sont validés par des expériences réalisées dans des installations fonctionnant en régime (très) légèrement sous-critique ou juste critique à très faible.

III LE ROLE DE L'IRSN DANS LA MAITRISE DES RISQUES DE CRITICITE

L'IRSN réalise des études et des expertises concernant la maîtrise des risques de criticité dans les installations nucléaires et les transports et est en charge de la gestion de l'ensemble des données et connaissances associées. Dans ce cadre :

- il assure la maintenance et le développement des codes de calcul, mène les travaux de qualification associés et élabore des guides et des normes,
- il développe des outils de calcul permettant d'évaluer les accidents de criticité,
- il rassemble et synthétise les connaissances en matière de criticité, disponibles en France ou à l'étranger, en incluant celles relatives aux accidents de criticité, et tient à jour les recueils de données correspondants,
- il définit, en liaison avec les partenaires concernés, les programmes expérimentaux de criticité nécessaires à la qualification des schémas de calcul de criticité et en exploite les résultats,
- il mène les évaluations de sûreté spécialisées nécessaires pour les expertises de sûreté des installations et des transports, dans le domaine des risques de criticité,
- il mène des études concernant l'appréciation et la prévention des risques de criticité, éventuellement à la demande de concepteurs ou d'exploitants, dans le strict respect des règles de confidentialité et de déontologie.

Les expertises portent sur l'évaluation des dispositions prévues par les exploitants d'installations nucléaires et les transporteurs de matières fissiles, présentées dans les dossiers de sûreté fournis en appui des demandes d'autorisation déposées auprès des autorités de sûreté. Les outils de calcul développés par l'IRSN, en collaboration avec divers services du CEA, sont utilisés pour effectuer des contre-calculs, et étayer l'analyse technique associée.

Le développement et la validation expérimentale de ces outils et méthodes de calcul sont réalisés dans le cadre d'accords scientifiques conclus avec des organismes de recherche français et étrangers, ainsi qu'avec des industriels concernés par les risques de criticité (AREVA, ANDRA).

Les programmes expérimentaux de criticité menés depuis près de 20 ans dans la « Station de criticité de Valduc » ont apporté une contribution essentielle à la qualification des outils de calcul ; plusieurs programmes majeurs, notamment les programmes HTC (Haut Taux de Combustion), PF (Produits de Fission) et MIRTE (Matériaux en Interaction et Réflexion Toutes Epaisseurs), ont été réalisés en partenariat avec des acteurs de l'industrie nucléaire française (AREVA NC, AREVA NP, ANDRA) et des acteurs internationaux (US-DOE).

IV LE BILAN DES ACCIDENTS DE CRITICITE

Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité se sont produits dans le monde dans des installations nucléaires : deux tiers sont survenus sur les réacteurs de recherche et dans les laboratoires sur des assemblages critiques, le tiers restant dans les installations du cycle du combustible. Ces accidents n'ont pas provoqué de rejets radioactifs significatifs dans l'environnement, mais des irradiations importantes entraînant 19 décès.

Deux tableaux, présentés en fin de ce document, résument les accidents de criticité actuellement connus sur les réacteurs de recherche et dans les laboratoires sur des assemblages critiques (Tableau 1), et dans les installations du cycle du combustible (Tableau 2).

Les accidents de criticité présentent un danger particulier du fait que lorsque le milieu est sous-critique, la puissance neutronique (c'est-à-dire le nombre de fissions par seconde) est très faible. Si, pour une raison quelconque, le milieu devient sur-critique, il pourra être le siège d'une augmentation très rapide de la puissance neutronique.

Dans certains cas cependant, le transitoire de puissance peut être beaucoup plus lent, les opérateurs peuvent alors être avertis à temps de l'anomalie par les appareils de mesure de rayonnement.

L'analyse des accidents de criticité par les spécialistes est une source très importante d'enseignements utilisée pour définir les scénarios accidentels à considérer dans les études de criticité, c'est-à-dire les situations anormales pour lesquelles il convient de démontrer par le calcul que le milieu fissile considéré reste sous-critique.

Les Tableaux 1 et 2 montrent que la plupart des accidents se sont produits aux Etats-Unis et dans l'ex-URSS. Jusqu'au début des années 1980, il y a eu plus d'un accident par an. Depuis, uniquement trois accidents se sont produits, deux en 1997 et le dernier en 1999 à Tokai-Mura au Japon.

Synthèse du tableau 1 : Accidents sur les réacteurs de recherche et dans les laboratoires sur des assemblages critiques

Entre 1945 et 1983, 36 accidents se sont produits dans le monde sur des réacteurs de recherche, ainsi que dans les laboratoires sur des assemblages critiques. Ils ont entraîné le décès par irradiation de 9 opérateurs. Il faut ajouter à ces accidents celui qui s'est produit en 1997 et qui a fait une victime.

Les causes de ces accidents sont très diverses, mais la plupart sont liés à des erreurs de manutention. L'analyse des causes et des conséquences de ces accidents relève de l'analyse de la sûreté des processus opératoires spécifiques aux différentes installations. Le fait que le nombre d'accidents ait diminué dans le temps témoigne des progrès accomplis dans l'établissement de procédures et leur mise en œuvre.

Synthèse du tableau 2 : Accidents dans des laboratoires et des installations du cycle du combustible

Contrairement au cas des réacteurs de recherche, pour lesquels les causes d'accident sont très diverses, il existe une assez grande similarité pour tous les accidents qui se sont produits dans les installations du cycle du combustible.

Le Tableau 2 fait apparaître qu'entre 1956 et 1997, 22 accidents de criticité se sont produits, provoquant le décès de 9 personnes et des irradiations significatives de plus de 40 personnes. A l'exception d'un accident dans l'usine de retraitement de combustible Windscale (Royaume-Uni) et de celui de fabrication de combustibles de Tokai-Mura (Japon), les accidents se sont produits aux Etats-Unis et dans l'ex-URSS. L'analyse de ces accidents, réalisée conjointement par les spécialistes russes et américains, montre que :

- sur 22 accidents, 21 se sont produits dans des solutions liquides de matières fissiles ;
- dans les années 1950 et jusqu'au milieu des années 1960, il y avait environ 1 accident chaque année. Cette fréquence est descendue à 1 accident tous les 10 ans grâce aux progrès accomplis dans les méthodes de calcul, les études de scénarios accidentels et les procédures, ainsi qu'à la mobilisation d'équipes disposant de personnel spécialement formé à l'appréciation et à la maîtrise des risques de criticité ;
- jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'accident mettant en cause des poudres ou survenant dans des conditions de stockage ou de transport ;
- les accidents survenus n'ont pas eu de conséquences radiologiques en dehors du site nucléaire, à l'exception de celui de Tokai-Mura pour lequel une évacuation préventive des populations avoisinantes (dans un rayon de 350 m du bâtiment) a été réalisée. Toutefois les conséquences radiologiques pour le public concerné sont restées faibles ;
- aucun accident ne peut être attribué uniquement à une défaillance matérielle ;
- aucun accident ne peut être attribué à une erreur de calcul ; ceci signifie que la cause de l'accident réside dans une erreur d'appréciation des scénarios accidentels susceptibles de se produire, compte tenu en particulier des erreurs humaines possibles.

Les spécialistes russes et américains qui ont analysé les accidents insistent sur la nécessité de maintenir un haut degré de formation du personnel pour éviter que les erreurs du passé ne se reproduisent à nouveau.

Voir : <http://www.csirc.net/docs/reports/la-13638.pdf>

Tableau 1 : accidents de criticité survenus sur des installations de recherche

type A : solution fissile

type B : système métallique nu ou réfléchi

type C : système métallique modéré ou système avec oxyde

type D : divers

le nombre indiqué après la lettre correspond au n° de l'accident dans cette catégorie.

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
D1	11/02/45	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	6×10^{15}	1 pic	Réacteur DRAGON - UH ₃ dans du Styrex : 5,3 kg modéré par du polyéthylène	Réacteur fonctionnant en prompt critique - erreur de calcul entraînant un nombre de fission supérieur à celui visé - expansion du polyéthylène et endommagement du cœur - pas de contamination
C1	06/06/45	LOS ALAMOS (USA)	3 expositions significatives / pas de contamination	4×10^{16}	1 pic	35,4 kg d'uranium enrichi à 79.2% réfléchi par de l'eau, sous forme de cube formant une pseudo-sphère	Utilisation d'une pseudo-sphère constituée de petits cubes - l'entrée d'eau, non prévue, entre les interstices a entraîné l'accident - arrêt par évacuation de l'eau
B1	21/08/45	LOS ALAMOS (USA)	1 mort (510 rem) et 1 personne irradiée (50 rem)	1×10^{16}	1 pic - < 1 s	6,2 kg de plutonium en phase δ , sous forme de sphère réfléchie par du WC (tungstène carbide) - 15,7 g/cm ³	Lors de la mise en place de briques de réflecteur, l'opérateur s'est aperçu (grâce aux moyens de mesure) que la brique qu'il approchait risquait de conduire à la sur-criticité ; dans un mouvement de retrait, il a fait chuter la brique sur le système qui est devenu sur-critique
B2	21/05/46	LOS ALAMOS (USA)	1 mort (2 100 rem) et 7 expositions significatives (360-250-160-110-65-47-37 rem)	3×10^{15}	1 pic	6,2 kg de plutonium en phase δ , sous forme de sphère réfléchi par du béryllium	Mise en place d'un réflecteur à la main puis chute du réflecteur qui était maintenu à distance par un tournevis
A1	12/49	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée (< 2,5 rad)	4×10^{16}	1 ^{er} pic 3×10^{16} suivi d'un plateau de 1,5 s	Solution de nitrate d'uranyle contenant 1 kg de ²³⁵ U (13,6 l de nitrate d'uranyle) réfléchi par du graphite	Lors du test des temps de chute de nouvelles barres, le retrait manuel simultané de deux barres de contrôle a conduit à la sur-criticité - l'accident n'a pas été détecté immédiatement car l'instrumentation était hors service, hormis la mesure de la température (+25 °C) qui a déclenché l'arrêt
C2	Année 1950	CHALK RIVER (Canada)	3 expositions significatives		1 pic	Uranium naturel gainé par de l'aluminium dans de l'eau lourde	Lors du remplissage de la cuve, l'opérateur a bloqué le système de remplissage en position "remplissage continu" en violation des consignes - arrêt d'urgence normal
B3	01/02/51	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	1×10^{17}	Plusieurs pics	62,9 kg (24,4 kg et 38,5 kg) d'uranium métal enrichi à 93,5%, sous forme d'anneau (avec de la paraffine au milieu) et de cylindre réfléchis par de l'eau	Expérience testant l'interaction entre deux systèmes sous eau - mauvaise conception du système d'arrêt d'urgence (chute d'une feuille de Cd entre deux éléments fissiles) qui a entraîné lors de son déclenchement le rapprochement des unités fissiles (par la création de mouvements d'eau)

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
A2	16/11/51	HANDFORD (USA)	Pas de personne irradiée	8×10^{16}	1 pic - 4,7\$/s	Solution de nitrate de plutonium (1,15 kg) - sous forme de sphère gainée d'aluminium nue	Lors d'expérience de détermination de masse critique par des approches sous-critique, la remontée trop rapide des barres de contrôle a conduit à l'accident (le temps entre deux pas de mesures était trop faible)
B4	18/04/52	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	1.5×10^{16}	1 ^{er} pic 10^{15} puis plateau à 10^{17} f/s pendant moins d'1s	JEMINA - 92,4 kg d'uranium métal enrichi à 93%, sous forme de cylindre nu - assemblage sous forme de plaques	Erreur de calcul par deux personnes indépendantes entraînant la mise en place d'un nombre de plaques trop important - arrêt de l'accident par séparation des masses par le système de sauvegarde (séparation de la partie haute et de la partie basse)
C3	02/06/52	ARGONE NATIONAL LABORATORY (USA)	4 expositions (9-60-127-136 rep)	1.22×10^{17}	1 pic	Éléments combustibles d'oxyde d'uranium enrichi à 93% dans de la matière plastique modérés par de l'eau (6,8 kg d'oxyde)	Retrait manuel des barres de sécurité sans avoir modifié la quantité d'eau présente. Arrêt de la réaction suite à la formation de bulles qui ont éjecté l'eau en dehors du cœur et par expansion du plastique.
C4	12/12/52	CHALK RIVER (Canada)	Pas de personne irradiée	1.2×10^{20}	multiple pics - durée de l'accident inférieure à 1min	Crayons d'uranium naturel dans de l'eau lourde réfléchis par du graphite	Le réacteur possédait un système d'empoisonnement par circulation d'un courant d'eau légère (le modérateur est l'eau lourde) - or une erreur de l'opérateur et un problème sur le circuit électrique a conduit à l'ébullition de l'eau légère, entraînant (coefficient de vide positif) une surcriticité - l'énergie dégagée a été de 4000 MJ et le cœur a été détruit - contamination extérieure.
B5	09/04/53	VVNIEF (URSS)	2 expositions faibles (1,6 et 1 rad)	1×10^{16}	1 pic	Demi-sphères de plutonium (d'un total de 8 kg) en phase δ - réflecteur en uranium naturel	Erreur d'un opérateur travaillant seul (mise en place de plots, garantissant la distance entre la matière fissile et le réflecteur, plus petits que ceux prévus) : rapprochement trop important du bloc réflecteur - fusion d'une partie des demi sphères (système de sauvegarde lent)
B6	03/02/54	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	5.6×10^{16}	1 pic	Lady GODIVA - 54 kg d'uranium métal enrichi à 93%, sous forme de sphère non réfléchi	Erreur lors de la manipulation d'une barre de contrôle lors de l'amorçage (permettant d'obtenir un nombre initial de neutrons suffisant) avant l'excursion prévue
A3	26/05/54	OAK RIDGE (USA)	Pas de personne irradiée	1×10^{17}	(1 ^{er} pic 5×10^{16}) - 3,33\$/s	Solution de fluorure d'uranyle entre deux cylindres coaxiaux (18,3 kg de ^{235}U) - au centre barre de poison - système non réfléchi - V = 55,4 l	Système cylindrique comportant au centre un cylindre absorbant. Lors de la déconnexion accidentelle du point d'ancrage haut du cylindre absorbant, l'absorbant s'est penché rendant le système sur-critique

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
C5	22/07/54	NATIONAL REACTOR TESTING AREA (USA)	Pas de personne irradiée	5×10^{18}	1 pic	Réacteur BORAX - 4,16 kg d'uranium enrichi à 93% sous forme d'alliage U-Al dans de l'eau lourde - 28 éléments MTR	Erreur de calcul pour une expérience d'excursion neutronique entraînant un transitoire trop rapide - une fusion de 4% des plaques était prévue, or une destruction totale du réacteur a eu lieu (135 MJ dégagée, à comparer au 80 MJ prévus) - la destruction s'est produite suite à une explosion vapeur survenue après le transitoire neutronique
D2	29/11/55	NATIONAL REACTOR TESTING AREA (USA)	Pas de personne irradiée	4.6×10^{17}	1 pic	Réacteur EBR1 à neutrons rapide (éléments combustibles d'uranium enrichis, 52 kg, dans du NaK)	Par erreur, le système lent d'arrêt d'urgence a été enclenché au lieu du système rapide conduisant à un retard de l'arrêt d'urgence dans un transitoire expérimental destiné à étudier le coefficient de puissance - fusion de la moitié du cœur
A4	01/02/56	OAK RIDGE (USA)	Pas de personne irradiée	1.6×10^{17}	1 pic de 8 ms	Solution de fluorure d'uranyle ($27,7 \text{ kg de } ^{235}\text{U}$) sous forme de cylindre (de 76 cm de diamètre) nu non réfléché - $V = 58,9 \text{ l}$	Accident dû à un changement de géométrie de la solution lors de la chute des barres, or pour ce système ΔH critique (retardée - prompte) = 1 mm - éjection de solution
D3	03/07/56	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	3.2×10^{16}	1 pic	Réacteur à puissance nulle en nid d'abeille - éléments combustibles de feuilles d'uranium enrichis à 93% dans du graphite - cœur cylindrique réfléché par du béryllium - 58 kg d'uranium	Des modifications ont été effectuées sur le réflecteur et le modérateur conduisant à une approche critique trop rapide et entraînant la prompt criticité (type DRAGON)
B7	12/02/57	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	1.2×10^{17}	1 pic	Lady GODIVA - 54 kg d'uranium métal enrichi à 93,7%, sous forme de sphère non réfléché	Le déplacement d'un équipement et la proximité non prévue par les calculs d'un réflecteur en graphite ont entraîné la sur-criticité prompte lors de l'amorçage - cet accident a montré que seule 1,4% de l'énergie était transformé en énergie cinétique (le reste étant transformé en chaleur)
C6	15/10/58	VINCA (Yougoslavie)	1 mort (433 rem) et 5 personnes irradiées (205-320-410-415-422 rem)	2.6×10^{18}	5 à 8 minutes	Crayon d'uranium naturel dans de l'eau lourde (3996 kg)	Lors de la montée de l'eau dans le réacteur, la mesure de puissance étant défectueuse, celle-ci a continué au-delà de la sur-criticité - détection olfactive par un opérateur (dégagement d'ozone) - pas d'endommagement du cœur

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
D4	18/11/58	NATIONAL REACTOR TESTING STATION (USA)	Pas de personne irradiée	2.5×10^{19}	1 pic	Réacteur HTRE prototype de propulsion aérienne - oxyde d'uranium dans du Ni-Cr	Suite à la défaillance de l'instrumentation (chambre de détection des neutrons) conduisant à un défaut d'asservissement (la puissance lue par le système diminuait - artificiellement - ce qui a conduit à la remontée automatique des barres), un accident est survenu, conduisant à la fusion partielle du combustible - arrêt d'urgence suite à la fusion de thermocouple - quelques produits de fission furent relâchés
C7	15/03/60	SACLAY (France)	Pas de personne irradiée	3×10^{18}	1 pic	Maquette critique (Alize) - 2,2 tonnes de barreaux d'oxyde d'uranium enrichis à 1,5%, sous eau	Pour une raison inconnue, un opérateur a effectué le retrait total d'une barre absorbante (au lieu d'un retrait partiel) - arrêt de la réaction par effet Doppler - non destruction du cœur
B8	17/06/60	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	6×10^{16}	1 ^{er} pic 10^{15} suivi d'un plateau	Environ 48 kg d'uranium métal enrichi à 93% sous forme de cylindre avec un réflecteur en graphite	Accident lors de la montée de l'assemblage dans le réflecteur en graphite - similaire JEMINA (B4)
C8	03/01/61	NATIONAL REACTOR TESTING AREA (USA)	3 morts et contamination du hall	4.40×10^{18}	1 pic	Éléments combustibles d'uranium enrichis à 93%, gainés d'aluminium, dans de l'eau	Lors du ré-assemblage des commandes des barres après un arrêt de routine, le retrait d'une barre de contrôle par un opérateur a entraîné une brusque augmentation de la puissance, puis une explosion vapeur (tuant les 3 opérateurs), détruisant le réacteur (réaction similaire à celles observées sur BORAX et Spert(C9))
B9	10/11/61	OAK RIDGE (USA)	Pas de personne irradiée	1×10^{16}	1 pic 10^{15} suivi d'un plateau - 2,4\$/s	75 kg d'uranium métal enrichi à 93% réfléchi par de la paraffine	Accident lors de l'assemblage d'une partie basse (en mouvement) avec la partie haute
C9	05/11/62	NATIONAL REACTOR TESTING AREA (USA)	Pas de personne irradiée	1×10^{18}	1 pic	Éléments combustibles en plaques d'U-Al, d'uranium enrichi à 93%, dans de l'eau	Extrapolation de résultats expérimentaux obtenus pour des temps de doublement plus élevés avec la prévision d'une fusion de 3,5% du combustible. Les prévisions en termes de neutroniques furent vérifiées mais 15 ms après la fin du transitoire neutronique, une explosion vapeur s'est produite détruisant le réacteur - l'instrumentation a montré que 7% des gaz nobles produits lors de l'excursion étaient relâchés et moins de 0,01% des radio-iodures étaient relâchés.
D5	11/12/62	LOS ALAMOS (USA)	Pas de personne irradiée	3×10^{16}	1 pic	Cœur constitué de feuilles d'uranium enrichi à 93% dans du graphite	Erreur dans l'approche critique (l'équipe pensait que l'assemblage avait déjà été utilisé la veille)

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
B10	11/03/63	VVNIIEF SAROV (URSS)	6 irradiés (de 0,02, 1, 1, 7, 370 et 500 rem)	5×10^{15}	1 pic	Assemblage critique de deux demi-sphères de Pu (17,35 kg) en phase δ (demi-sphères de 135 mm de diamètre) réfléchies par du LiD	La violation des consignes (réalisation des pré-expériences sur le système avec la matière fissile en place et système de sauvegarde désactivé) dans une expérience mettant en jeu un assemblage critique, a conduit à l'accident - pas de conséquence sur l'assemblage
B11	26/03/63	LIVERMORE LABORATORY (USA)	Pas de personne irradiée	3.8×10^{17}	1 pic	47 kg d'uranium métal enrichi à 93%, sous forme de cylindre et réfléchi par du Béryllium	Entrée pas à pas d'un cylindre, constitué de sous-anneaux concentriques, à l'intérieur d'un élément fissile cylindrique fixe, lui-même constitué d'anneaux concentriques - les anneaux concentriques n'étant pas introduits de façon rigoureusement verticales, certains anneaux du cylindre extérieur se sont décalés ; ils se sont brusquement remis en position lors d'un pas d'introduction du cylindre intérieur ce qui a conduit à la sur-criticité - 15 kg d'U brûlé et 10 kg fondus répandus sur le sol
B12	28/05/65	WHITE SANDS (USA)	Pas de personne irradiée	1.5×10^{17}	1 pic (28ms)	96 kg d'uranium enrichi à 93%, sous forme d'alliage (U-Mo) - cylindre nu - même type que GODIVA II	Erreur de manipulation lors d'expérience pour tester de nouvelles barres
C10	30/12/65	MOL (Belgique)	1 personne irradiée (1 pied amputé)	4.3×10^{17}	1 pic	Réacteur VENUS - crayons d'oxyde d'uranium enrichi à 7% dans de l'eau lourde et de l'eau - 1,2 t d' UO_2	L'accident s'est produit suite à une erreur de l'opérateur qui, en violation des règles, a décidé de retirer une barre absorbante sans avoir vidangé le cœur et avant d'avoir installé une autre barre dans la nouvelle position testée - arrêt par chute de la barre en cours d'extraction par l'opérateur
A5	30/01/68	OAK RIDGE (USA)	Pas de personne irradiée	1.1×10^{16}	1 pic	Solution de nitrate d'uranyle enrichi à 97,6% en ^{233}U (0,95 kg de ^{233}U en solution) sous forme de sphère réfléchie par de l'eau - V = 5,8 l	L'évacuation d'une bulle dans le réservoir d'ajustement de la solution a conduit à l'introduction dans la sphère d'une quantité de solution supplémentaire suffisante pour atteindre la sur-criticité - 90ml de solution répandue sur le sol
B13	05/04/68	CHELYABINSK 70 (URSS)	2 morts (30 Sv et 10 Sv)	6×10^{16}	1 pic	47,7 kg d'uranium métal enrichi à 90%, sous forme de sphère creuse (remplie de CH_2) réfléchie avec de l'uranium naturel	Violation des procédures (système d'alerte par mesure de la multiplication des neutrons mise hors service lors du montage) et erreur de jugement sur l'influence de la mise en place de la sphère en polyéthylène au centre de l'assemblage - accident lors de l'assemblage avec le réflecteur - intervention du système de sauvegarde abaissant la demi-sphère inférieure.

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
C11	14/10/68	SACLAY (France)	1 personne légèrement irradiée		1 pic	ISIS Maquette critique du réacteur OSIRIS - combustible U-Al enrichi à 93%	Excursion de puissance due à un retrait anticipé d'une expérience très absorbante alors que toutes les barres n'était pas en position basse. La réaction en chaîne a été arrêtée lorsque l'opérateur a laissé retomber le dispositif expérimental. Quelques éléments du cœur ont été déformés. La hauteur d'eau a été suffisante pour assurer la protection de l'agent - accident non documenté.
B14	06/09/68	ABERDEEN (USA)	Pas de personne irradiée	6.1×10^{17}	1 pic	123 kg d'uranium enrichi à 93% - alliage U-Mo de type GODIVA	Erreur de manipulation ayant conduit à la fusion du cœur lié à un pic de réactivité lors de la remontée de la barre utilisée pour initier les excursions de réactivité - ce pic de réactivité n'avait pas été vu dans les expériences précédentes car les neutrons initiateurs n'étaient pas encore présents en quantité suffisante (sans une source initiale importante de neutrons, il peut s'écouler un temps important avant que l'excursion ne survienne)
C12	15/02/71	KURCHATOV INSTITUTE (URSS)	2 personnes irradiées sévèrement aux pieds (1500 rem aux pieds)	2×10^{19}	50 pics de 5×10^{17} chacun	Maquette critique d'assemblages combustibles de crayons d'oxyde d'uranium enrichis à 20%, dans de l'eau et réfléchis par du Béryllium ou du Fer - utilisé pour des approches sous-critique	Le remplissage de la cuve a été effectué alors que la source de neutron n'était pas en place et la barre de contrôle n'étaient pas en position basse car les opérateurs pensaient que le système était très sous-critique (suppositions que ce réflecteur était équivalent au réflecteur en Fer testé lors des expériences précédentes) or le Béryllium entraînait une augmentation de la réactivité (par rapport au Fer) de 10 000 pcm. les multiples excursions observées sont liées au fait que, lors du repli des opérateurs, la pompe de remplissage de la cuve n'a pas été mise hors service et qu'on a assisté à un phénomène de montée de l'eau -> sur-criticité -> évaporation -> sous-criticité -> montée de l'eau -> etc. jusqu'à la mise à l'arrêt, par coupure électrique, de la pompe. Lors de cet accident, les transitoires étant lents, aucun crayon n'a rompu et donc aucun produit de fission n'a été relâché.
C13	26/05/71	KURCHATOV INSTITUTE (URSS)	2 morts (2000 et 6000 rem) et 2 personnes sévèrement irradiées (700 et 800 rem)	5×10^{18}	1 pic	Maquette critique d'assemblages combustibles - crayons enrichis à environ 90% dans de l'eau et réfléchis par de l'eau - utilisé pour déterminer des masses critiques	Défaillance de la plaque de supportage des aiguilles lors de l'ouverture de la vanne de vidange (mauvaise conception de la vanne ayant entraîné cette défaillance) - Or le nombre d'aiguilles (qui dans le cas de cette expérience était maximal) conduisant à la criticité variant très vite avec le pas entre les aiguilles (qui dans cette expérience était minimal) l'écartement des aiguilles a entraîné une prompte criticité.
C14	23/09/83	BUENOS AIRES (Argentine)	1 mort (3000 rad) et 2 personnes irradiées (15 -20 rad)	4×10^{17}	1 pic	Réacteur de recherche à puissance nulle - éléments combustible de type MTR modérés par de l'eau et réfléchis par du graphite	En violation des procédures, absence de vidange du cœur avant d'intervenir dessus

type	date	site	expositions	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
B15	17/06/97	VVNIIEF (URSS)	1 mort (4500 rad)	1×10^{19}	Pics multiples - 1 ^{er} pic de 4×10^{15} puis pendant 6,5 jours	44 kg d'uranium enrichi à 90%, sous forme sphérique avec un réflecteur en cuivre	Mauvais assemblage d'une expérience par un opérateur travaillant seul et ayant mal recopié une valeur dimensionnelle - sur-criticité lors de la chute d'une partie du réflecteur sur la sphère placée en partie basse. La réaction ne s'est pas arrêtée suite à l'arrêt d'urgence qui abaisse la partie inférieure (à savoir ici, la matière fissile avec le réflecteur chuté) - Oscillations pendant 3 à 5 min (jusqu'à 2×10^{17} fissions) puis toutes les 40 min pendant 6,5 jours - Arrêt par retrait de matière.

Tableau 2 : accidents de criticité survenus sur des installations du cycle (usines)

Type S : accident en solution
Type M : accident en milieu métallique

le nombre indiqué après la lettre correspond au n° de l'accident dans cette catégorie.

type	date	site	expositions en 10 ⁻² Gy	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
S1	15/03/53	Mayak (Russie)	2 irradiés - (1000 - 100)	2x10 ¹⁷	1 pic	Pu - 0,81 kg de ²³⁹ Pu - 26 l - 22,8 g/l	Transfert de solution, par un dispositif de vide commandé manuellement, depuis deux récipients sous-critiques vers un troisième plus grand supposé vide contenant déjà 5 l de solution à 44,8 g/l de Pu - Arrêt par nouveau transfert de solution.
S2	21/04/57	Mayak (Russie)	1 décès + 5 irradiés - (3000 - 5 x 100)	1x10 ¹⁷	10 mn	U (90%) - 3,06 kg de ²³⁵ U - caractéristiques du précipité : 30 l - 102 g/l	Accumulation de précipité d'oxalate en fond de cuve de réception après filtrage. Modification des procédures annulant les opérations de nettoyage régulières - Arrêt par éjection de matière.
S3	02/01/58	Mayak (Russie)	3 décès + 1 irradié (3 x (6000 ± 2000) - 600)	2x10 ¹⁷	1 pic	U (90%) - 22 kg de ²³⁵ U - 58,4 l - 376,7 g/l	Vidange manuelle d'une capacité vers des récipients de géométrie sûre. Les opérateurs en violation des procédures, ont incliné la capacité pour une vidange directe, ce qui modifia la géométrie et la réflexion (due aux opérateurs) - Arrêt par éjection violente de solution.
S4	16/06/58	Oak Ridge (USA)	8 irradiés (365 - 340 - 325 - 270 - 235 - 70 - 70 - 25)	1,3x10 ¹⁸	1 ^{er} pic 6x10 ¹⁶ - durée totale 20 mn	U(93%) - 2,1 kg de ²³⁵ U - 56 l à 37,5 g/l	Vidange d'une solution de nitrate d'uranyle dans un grand fût de 200 l, alors que les opérateurs voulaient vidanger d'autres cuves remplies d'eau - Arrêt par dilution.
S5	30/12/58	Los Alamos (USA)	1 décès + 2 irradiés (12000 - 130 - 35)	1,5x10 ¹⁷	1 pic	Pu - 2,94 kg de ²³⁹ Pu - 160 l à 18,4 g/l	Erreur de bilan entraînant une concentration anormalement élevée de plutonium en phase organique. L'excursion s'est produite lors de la mise en route de l'agitateur - Arrêt par le mélange des deux phases consécutif à l'agitation

type	date	site	expositions en 10 ⁻² Gy	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
S6	16/10/59	Idaho (USA)	2 irradiés + 17 légèrement (50 - 30) Doses dues aux P.F. de l'accident	4x10 ¹⁹	20 mn - (1 ^{er} pic 1x10 ¹⁷)	U (91%) - 30,9 kg de ²³⁵ U - 200 l - 155 g/l	Un siphon s'est amorcé et plusieurs appareils de géométrie sûre se sont vidés dans un grand réservoir de 19 m ³ contenant 600 l d'effluents - Arrêt par évaporation de 400 l de solution et cristallisation du nitrate d'uranyle.
S7	05/12/60	Mayak (Russie)	5 faiblement irradiées (0,2 à 2)	2.5x10 ¹⁷	Multiples excursions	Pu - 0,85 g de ²³⁹ Pu - 19 l - 44,7 g/l	Expériences de détermination de paramètres critiques - Une mauvaise évaluation de la masse due à des défaillances d'équipement, au transfert d'une quantité importante dans une cuve de géométrie non sûre - Arrêt par éjection de la solution
S8	25/01/61	Idaho (USA)	Sans conséquences	5x10 ¹⁷	1 pic	U (90%) - 7,2 kg de ²³⁵ U - 40 l - 180 g/l	La solution, poussée par de l'air comprimé est remontée dans l'évaporateur qui la contenait, en passant d'une partie resserrée à une partie évasée
S9	14/07/61	Siberian Chemical Combine	1 irradié (200)	1,2x10 ¹⁶	2 excursions (1 ^{er} pic < 2x10 ¹⁴)	U (22,6%) sous forme d'UF ₆ - 1,68 kg de ²³⁵ U H/U ²³⁵ de l'ordre de 600	Unité de condensation (Evaporation d'UF ₆) - Accumulation d'uranium dans le réservoir d'huile d'une pompe - concentration atteinte d'uranium dans l'huile de environ 173 g/l ± 40 %.-
S10	07/04/62	Hanford (USA)	3 irradiés (85 - 35 - 15)	8x10 ¹⁷	37 h - 1 ^{er} pic 1x10 ¹⁶	Pu - 1,29 kg de ²³⁹ Pu - 45 l - 28,7 g/l	La solution s'est écoulée suite à une fuite dans le fond d'une boîte à gants. Elle s'est trouvée aspirée dans une cuve de grande taille par un tube souple destiné à recueillir les eaux de rinçage - Arrêt par évaporation
S11	07/09/62	Mayak (Russie)	Sans conséquences	2x10 ¹⁷	3 pics en 1 h 40	Unité d'élaboration de plutonium métallique Pu - 1,26 kg de ²³⁹ Pu - 80 l - 15,8 g/l	Dissolution de résidus dont la masse de plutonium n'avait pas été déterminée précisément. L'estimation se basait sur une teneur moyenne de 1 % issue du retour d'expérience - Arrêt par vidange de la cuve.
S12	30/01/63	Siberian Chemical Combine	4 irradiés de 6 à 17	7,9x10 ¹⁷	10 h	Unité d'élaboration d'uranium métallique U (90%) - 2,27 kg de ²³⁵ U - 35,5 l - 63,9 g/l	Mauvaise estimation de la masse fissile chargée dans un dissolvant puis transfert de la solution trop concentrée dans une cuve de géométrie quelconque. Erreur due à une mauvaise interprétation d'analyse - Arrêt par vidange dans des récipients de géométrie sûre.

type	date	site	expositions en 10 ⁻² Gy	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
S13	02/12/63	Siberian Chemical Combine	Sans conséquences (le plus irradié < 5)	1,6x10 ¹⁶	16 h	Unité de purification et de retraitement U (90%) - 1,93 kg de ²³⁵ U - 64,8 l - 29,8 g/l	Accumulation de solvant, de plus en plus chargé en uranium, dans un pot de contrôle de géométrie non sûre d'un circuit de vide - Arrêt par injection de cadmium, poison neutronique.
S14	27/07/64	Wood River Junction (USA)	1 décès + 2 irradiés (10000 - 100 - 60)	1,3x10 ¹⁷	2 pics - 1 ^{er} pic de 1x10 ¹⁷	Unité de récupération d'uranium U (très enrichi) - 2,8 kg d'U - 11 l - 256 g d'U/l	Modification du processus opératoire de récupération d'U dans du solvant. Les mêmes bouteilles furent utilisées pour recueillir des solutions très diluées ou très concentrées puis déversées dans une grande cuve - Arrêt par éjection de solution puis par mélange des phases et vidange.
S15	03/11/65	Electrostal (Russie)	1 irradié faiblement < 3,5	8x10 ¹⁵	1 pic	Unité de conversion d'UF ₆ en UO ₂ U (6,5%) - 3,6 kg de ²³⁵ U - 100 l - H/U ₂₃₅ - 600	Accumulation d'uranium dans la cuve d'eau de la pompe d'un circuit de vide après percement des filtres - Arrêt par dispersion de l'oxyde.
S16	16/12/65	Mayak (Russie)	27 très faiblement irradiés (< 0,3)	5,5x10 ¹⁷	11 pics - 7 h	Unité de traitement de résidus U (90%) - 1,98 kg de ²³⁵ U - 28,6 l - 69,2 g/l	Suite à un non-respect de procédure, chargement d'une masse trop importante d'uranium dans un dissolvant non sûr par la géométrie - Arrêt par injection de cadmium
S17	10/12/68	Mayak (Russie)	1 décès, 1 personne amputée, 6 irradiés (2450 - 700 - 1,64 - 0,2 - 4x0,15 - données en rem)	1,3x10 ¹⁷	2 pics - 1 ^{er} pic de 3x10 ¹⁶	Unité de purification Pu - 1,5 kg de ²³⁹ Pu - 28,8 l - 52,1 g/l	Trois vidanges manuelles successives d'une bouteille de 20 l dans une capacité de 60 l, malgré l'alarme sur le premier pic lors de la deuxième vidange - Arrêt par éjection de solution
S18	24/08/70	Windscale (UK)	Sans conséquences - 2 faiblement irradiés (2 et <1)	10 ¹⁵	1 pic	Pu - 2,07 kg de ²³⁹ Pu - 40 l - 51,8 g/l	Accumulation progressive de plutonium dans un pot de transfert après des mois de fonctionnement. Accumulation de solvant dans un siphon censé ne contenir que de la phase aqueuse, solvant qui se chargeait petit à petit en plutonium.

type	date	site	expositions en 10 ⁻² Gy	nombre total de fission	historique de l'accident	Caractéristique de la matière fissile	Résumé de l'accident
S19	17/10/78	Idaho (USA)	Pas d'exposition	2,7x10 ¹⁷	25 mn - 1 pic	U (très enrichi) - 6 kg de ²³⁵ U - 315,5 l - 19,3 g/l	Un mauvais dosage chimique a favorisé l'accumulation d'uranium dans une colonne de lavage à une concentration croissante - Arrêt par mélange des phases ou par dilution.
M1	13/12/78	Siberian Chemical Combine (Russie)	1 personne amputée + 7 irradiés (250 (dont 2000 sur les bras) - 5 à 60)	3x10 ¹⁵	1 pic	Unité mettant en œuvre des lingots métalliques de Pu 10,68 kg de ²³⁹ Pu - En 4 lingots à 18700 kg/m ³	Introduction d'une masse trop grande de lingots de plutonium dans un conteneur - Arrêt par éjection ou retrait d'un lingot.
S20	15/05/97	Novosibirsk (Russie)	Sans conséquences	5,5x10 ¹⁵	26 h	Unité de concentration U (70 %) - 17,1 kg de ²³⁵ U	Accumulation d'uranium sur les parois et le fond d'un réservoir plaque. Traitement de solution très enrichie alors que seul un enrichissement à 26 % était autorisé - Arrêt après la deuxième injection de poison.
S21	30/09/99	Tokai - mura (Japon)	2 décès + 1 irradié - + irradiation en dehors du site (< 2000 * - < 1000 - < 450 * Données en centi-Gray équivalent)	2,5x10 ¹⁸	17 h (1 ^{er} pic 5x10 ¹⁶)	U (18,8 %) - 3,12 kg de ²³⁵ U - 45 l - 69,3 g/l	Application d'une procédure non autorisée qui conduisit à introduire 16 kg d'uranium dans une cuve de géométrie non-sûre au lieu de traiter des batchs de 2,4 kg - Arrêt par vidange du système de refroidissement (réflecteur).