

QU'EST-CE QUE LA CRITICITÉ NUCLÉAIRE ?

RÉSUMÉ

Les noyaux de certains radioéléments, appelés fissiles, ont la propriété de se fragmenter quand ils sont percutés par un neutron, donnant lieu à 2 produits de fission, de masses atomiques différentes : l'une centrée vers 95, l'autre vers 135, et à 2 ou 3 neutrons. Cette fragmentation donne lieu à une forte libération d'énergie. Les neutrons émis peuvent, à leur tour, percuter d'autres noyaux fissiles : c'est la réaction en chaîne, qui se déroule avec des constantes de temps très rapides, mises en œuvre dans les bombes, mais qui ne permettraient pas de piloter un réacteur. Heureusement, parmi les produits de fission, certains sont émetteurs de neutrons, avec une période radioactive de quelques secondes à une minute : c'est grâce à ces neutrons différés (ou « retardés ») qu'il est possible de piloter un réacteur.

Divers phénomènes peuvent diminuer le nombre de neutrons émis qui pourront efficacement provoquer à leur tour la fission de noyaux voisins. Le paramètre keff (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. Il est calculé en examinant le devenir des neutrons émis lors de fissions précédentes et leur probabilité d'interagir ultérieurement avec d'autres noyaux fissiles. Si le rapport keff est :

- inférieur à 1 : le système est sous-critique : le nombre de fissions diminue avec le temps. 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.
- égal à 1 : le système est critique : le nombre de fissions est stable dans le temps (cas d'un réacteur nucléaire)
- supérieur à 1 : le système est surcritique : le nombre de fissions augmente avec le temps. Si cette situation n'est pas maîtrisée, un accident de criticité peut survenir.

Deux principes simples sont donc utilisés pour rester dans un état sous-critique :

- limiter autant que possible la probabilité des réactions de fission et par suite la production de neutrons ;
- favoriser autant que possible la disparition des neutrons par leur fuite hors du milieu fissile ou par leur absorption.

Toute la prévention du risque de criticité est ainsi contenue dans la mise en œuvre pratique de ces deux principes afin que la somme absorption + fuite soit supérieure à la production de neutrons.

Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité se sont produits dans le monde : deux tiers sont survenus dans des réacteurs ou des laboratoires de recherche, le tiers restant dans les installations du cycle du combustible. Les accidents de criticité connus n'ont pas provoqué de rejets radioactifs significatifs dans l'environnement, mais ont provoqué, pour les personnes situées à proximité immédiate des sources (quelques mètres), des irradiations importantes par des rayonnements gamma et des neutrons. L'IRSN a identifié 19 décès du fait de ces fortes irradiations, la plupart étant intervenus de quelques heures à quelques jours après l'accident. Pour les accidents les plus récents, l'amélioration des protocoles de traitement médicaux a permis d'améliorer le taux de survie des personnes irradiées.

Concernant les accidents survenus dans les réacteurs et laboratoires de recherche, les causes de ces accidents sont très diverses, mais la plupart sont liés à des erreurs de manipulation des matières fissiles. Le fait que la fréquence de ces accidents ait diminué dans le temps témoigne des progrès accomplis dans l'établissement, la validation et la bonne mise en œuvre des procédures.

La quasi-totalité des accidents qui se sont produits dans les installations du cycle du combustible ont eu lieu dans des solutions liquides de matières fissiles. Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'accident mettant en cause des poudres ou survenant dans des installations de stockage ou dans les colis de transport. Aucun accident ne peut être attribué uniquement à une défaillance matérielle ou à des erreurs de calcul ou à un défaut d'appréciation de scénarios d'accidents potentiels. Ils peuvent aussi être la conséquence d'erreurs humaines.

La fiche présente également les principes mis en œuvre pour garantir l'absence d'accidents de criticité dans les réacteurs électronucléaires de puissance et les transports des matières radioactives.

1. NOTIONS DE BASE

Dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, la **criticité** est une discipline visant à évaluer et prévenir les risques de réaction en chaîne de fission nucléaire incontrôlée. C'est une sous-discipline de la neutronique.

La **neutronique** est l'étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions qu'ils y induisent, en particulier la génération de puissance par la fission de noyaux d'atomes lourds. Elle permet d'étudier les flux de neutrons ainsi que la réactivité du milieu (un paramètre qui permet de rendre compte de l'auto entretien des réactions nucléaires et les taux de réaction : fission, absorption, diffusion).

La fission nucléaire

Elle concerne un nombre très réduit d'isotopes (appelés fissiles) qui, quand leur noyau capture un neutron, se cassent en plusieurs fragments plus petits (produits de fission), et libèrent de l'énergie sous la forme de rayonnements gamma, de particules tels que des électrons et des particules alpha, et 2 ou 3 neutrons. La plupart de ces neutrons issus de la fission sont émis quasi-instantanément (on parle de neutrons prompts), alors qu'une faible proportion (environ 1%) est émise jusqu'à 1 ou 2 minutes après la fission elle-même : ce sont les neutrons retardés. Dans le cas de ^{235}U , chaque fission s'accompagne d'un dégagement d'énergie total d'environ 200 MeV.

Pour certains isotopes fissiles, comme par exemple le ^{252}Cf et l' ^{241}Am , cette réaction peut être spontanée, c'est-à-dire qu'elle ne nécessite pas de neutron incident pour se réaliser.

Ce phénomène a été découvert en 1938, initialement avec de l'uranium naturel contenant les isotopes 235 et 238, puis avec le ^{239}Pu créé lors de la capture d'un neutron par le noyau d'un atome d' ^{238}U .

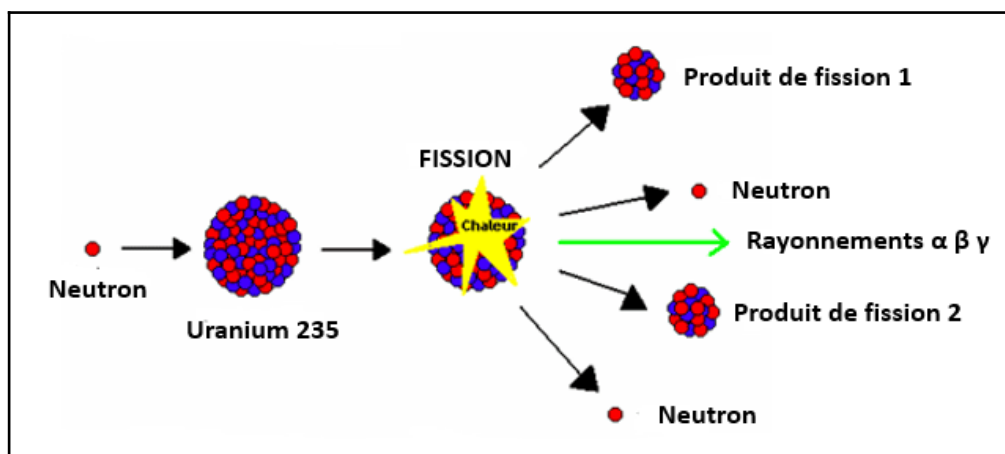


Figure 1 : Principe de la fission nucléaire

La réaction en chaîne

En négligeant tous les paramètres perturbateurs qui affectent les neutrons de fission émis, il suffit que le nombre moyen de neutrons émis lors d'une fission soit supérieur à 1, pour que le nombre de neutrons présents dans le massif de matériau fissile augmente de manière exponentielle :

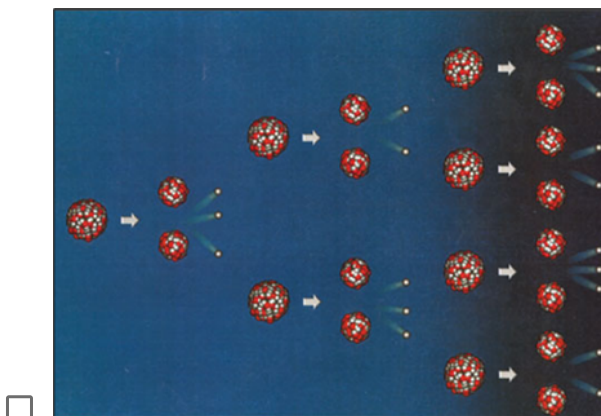


Figure 2 : Augmentation exponentielle du nombre de neutrons lors d'une réaction en chaîne (configuration théorique sans paramètres perturbateurs)

La criticité nucléaire

C'est un état où une réaction en chaîne de fissions nucléaires est auto-entretenu grâce aux neutrons émis. Cette situation peut être stable quand le nombre de fissions nucléaires est quasi constant dans le temps, ou au contraire s'emballer quand ce nombre augmente exponentiellement.

C'est la stabilité qui est recherchée dans les dispositifs industriels de production d'énergie tels que les réacteurs électronucléaires dans lesquels la maîtrise de cette cinétique est nécessaire à la fois pour permettre les variations de puissance et le régime permanent. L'emballement peut être recherché dans les dispositifs où la libération très rapide de cette énergie est nécessaire (cas des armes nucléaires à fission), où être subie quand il s'agit d'un accident.

2. PARAMÈTRES INTERVENANT DANS LE BILAN NEUTRONIQUE

La grandeur caractéristique de l'état « neutronique » d'une configuration est le bilan entre ses capacités, d'une part de produire des neutrons par fission, d'autre part de perdre des neutrons par capture ou par fuite. Ce bilan est exprimé par le « facteur de multiplication effectif du système » (**keff**) qui désigne la multiplication du nombre de fissions d'une génération de neutrons à la suivante.

$$keff = \frac{N'}{N} \rightarrow \frac{\text{Production}}{\text{Absorption} + \text{Fuite}}$$

nombre de neutrons absorbés ou ayant fui > nombre de neutrons produits.

Il est possible de prévenir le risque de criticité en respectant l'inégalité suivante :

Si le rapport keff est :

- **inférieur à 1** : le système est sous-critique : le nombre de fissions diminue avec le temps. 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.
- **égal à 1** : le système est critique : dans un réacteur nucléaire le nombre de fissions est stable dans le temps grâce aux neutrons retardés.
- **supérieur à 1** : le système est surcritique : le nombre de fissions augmente avec le temps. Si cette situation n'est pas maîtrisée, un accident de criticité peut survenir.

2.1. LA PRODUCTION DE NEUTRONS

La production de neutrons dépend de la quantité de noyaux fissiles présents dans le milieu fissile considéré, qui va directement influencer sur la probabilité d'absorption des neutrons par un noyau fissile. Ce nombre dépend lui même :

- De la présence de matériaux inertes du point de vue neutronique, tels que des bulles de gaz, qui diminuent ce nombre
- De la température et donc de la dilatation du milieu
- De l'état du matériau dans lequel les noyaux fissiles sont présents : liquide, gaz, solide, association chimique avec d'autres éléments (oxydes par exemple)
- Du nombre moyen de noyaux fissiles qu'un neutron émis précédemment par une fission peut rencontrer avant de sortir du milieu fissile. Ce nombre dépend de la géométrie de l'espace dans lequel est contenue la matière fissile, et notamment du rapport volume/surface extérieure
- De la cinétique de production des neutrons de fission avec notamment la présence de neutrons retardés

Ainsi, il existe une masse en deçà de laquelle une réaction de fission auto-entretenue n'est physiquement plus possible : c'est la masse critique. Elle dépend des propriétés nucléaires du matériau considéré (section efficace de capture et de fission), et du nombre de neutrons produits par chaque fission), mais aussi de ses propriétés physiques (en particulier de sa densité et de sa géométrie), de sa pureté et de l'environnement proche de cette masse.

La criticité d'un milieu peut donc être contrôlée par la [limitation de la masse de matière fissile](#). En pratique, ce mode de contrôle est applicable à l'échelle d'un appareil, d'une boîte à gants, d'une cellule, voire d'un laboratoire entier mettant en œuvre de faibles quantités de matières fissiles. Les limites de masse de matières fissiles associées à ce mode de contrôle, considéré seul (c'est-à-dire non combiné avec une géométrie ou une limite de modération), sont généralement incompatibles avec des installations à caractère industriel.

Suite à une fission, les neutrons émis ont une énergie moyenne de 2 MeV. Ces neutrons cèdent progressivement leur énergie au cours de collisions avec les autres noyaux du milieu. Or, la plupart des noyaux fissiles ont une probabilité de fission d'autant plus importante que l'énergie des neutrons incidents est faible (à l'exception notable de certains isotopes tel l'²³⁸U) : le ralentissement décrit-ci-dessus (appelé modération) est donc favorable à l'entretien de la réaction en chaîne.

En règle générale, l'énergie cédée par les neutrons au cours des chocs avec les noyaux non-fissiles du milieu est d'autant plus grande que les noyaux rencontrés sont légers. Les modérateurs les plus efficaces contiennent des atomes d'hydrogène (eau, polymères hydrogénés,...) : ils jouent un rôle tout particulier dans la neutronique et la maîtrise de la criticité.

Pratiquement tous les accidents de criticité dans les installations du cycle du combustible ont eu lieu en solution aqueuse. Il convient de rappeler qu'en présence d'eau (donc d'hydrogène) qui favorise la réaction de fission en ralentissant les neutrons, la masse pour laquelle le keff est de 1 est de 0,51 kg de plutonium en présence d'eau, alors qu'elle est de 4,5 kg en l'absence d'eau. Pour l'uranium, les limites dépendent de l'enrichissement en isotope 235 : 0,87 kg pour de l'uranium très enrichi (à 93,5 %), 5,2 kg pour un enrichissement de 20 % et 91 kg pour un enrichissement de 3 %.

Pour certains milieux fissiles tels que l'uranium faiblement enrichi (à moins de 6,6 % d'isotopes 235), le seul fait de maintenir le milieu rigoureusement sec (anhydre), et plus généralement exempt de toute matières hydrogénées, suffit à empêcher tout risque de criticité, même en présence de grandes quantités de matière.

La criticité est alors contrôlée par limitation de la modération.

2.2. LA FUITE DES NEUTRONS

Un certain nombre de neutrons, au cours de leurs déplacements dans la matière, parviennent à s'échapper en dehors du milieu fissile qui leur a donné naissance. Ils ne participent plus, dans ce cas, à l'entretien des réactions en chaîne. Cette fuite des neutrons est d'autant plus favorisée que le milieu présente une faible densité de matière ou est constitué de noyaux qui interagissent peu, et que les distances à parcourir pour parvenir jusqu'aux parois sont faibles. Le moyen le plus efficace pour écarter tout risque de criticité est de répartir la matière fissile dans un volume de grandes dimensions.

La criticité est dans ce cas contrôlée par la limitation de la géométrie.

Les neutrons ayant fui hors d'un milieu fissile peuvent continuer leur trajectoire dans les matériaux environnants et, par suite de collisions avec les noyaux qui les constituent, être soit capturés soit renvoyés dans le milieu fissile de départ : ce phénomène est appelé la réflexion des neutrons. Ainsi l'eau et le béryllium sont des matériaux réflecteurs de neutrons, qui peuvent diminuer le taux de fuite réel.

Les cloisons, les machines, mais aussi les personnes constituent, dans les usines, des réflecteurs susceptibles de diminuer la fuite des neutrons et dont il convient de tenir compte.

Enfin, lorsque plusieurs ensembles fissiles se trouvent à proximité les uns des autres, un dernier facteur, appelé interaction, est susceptible d'agir sur le bilan de fuite des neutrons. Une fraction des neutrons sortant d'un appareillage peut entrer dans un appareil voisin, contenant lui aussi de la matière fissile, et y provoquer des fissions. Ce couplage neutronique augmente ainsi la réactivité du système. Il doit donc en être tenu compte, dans le calcul de la criticité d'un ensemble d'appareils, de leur implantation précise ainsi que de la présence à proximité d'éventuels matériaux réflecteurs.

2.3. L'ABSORPTION DES NEUTRONS

Un certain nombre de neutrons, au cours de leurs déplacements dans la matière, sont capturés par les noyaux d'éléments appelés « poisons neutroniques¹ ». Ils ne participent plus, dans ce cas, à l'entretien des réactions en chaîne.

Parmi les éléments naturels, quatre, relativement abondants, se révèlent particulièrement efficaces pour capturer les neutrons grâce au pouvoir absorbant d'au moins un de leurs isotopes. Il s'agit du bore (grâce à l'isotope ¹⁰B contenu dans le bore naturel), du cadmium, du hafnium et du gadolinium (grâce à ses isotopes ¹⁵⁵Gd et ¹⁵⁷Gd). Ils sont couramment utilisés pour leurs propriétés neutrophages dans la prévention des risques de criticité.

Le contrôle de la criticité s'effectue alors par recours à "l'empoisonnement".

3. MODES DE CONTRÔLE DE LA CRITICITÉ

Le chapitre précédent présentait les multiples modes de contrôle de la criticité. Il s'avère que le seul fait de limiter un ou plusieurs paramètres "opérationnels" tels que la concentration en matières fissiles des solutions, les dimensions des appareils, la quantité de matières fissiles, celle de matériaux modérateurs, en ayant éventuellement recours à des poisons neutrophages, peut suffire à maintenir un système contenant des matières fissiles dans un état sous-critique.

¹ Un poison neutronique est une substance ayant une grande section d'absorption de neutrons, et qui a de ce fait un impact significatif dans le bilan neutronique d'un réacteur nucléaire.

La Règle fondamentale de sûreté (RFS) spécifique au risque de criticité [voir extrait en annexe 1] constitue une référence méthodologique pour la prévention de ce risque, aussi bien pour les concepteurs et exploitants d'installations que pour les analystes de la sûreté. Cette règle impose clairement de préciser quels sont les modes de contrôle retenus et précise les dispositions relatives à chacun d'entre eux.

4. PRÉVENTION DU RISQUE DE CRITICITÉ DANS LE DOMAINE DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET DU TRANSPORT DE MATIÈRES RADIOACTIVES

4.1. TRANSPORT DES MATIÈRES RADIOACTIVES

Le transport des matières fissiles impose des contraintes particulières visant à éviter en toutes circonstances que les conditions d'un état critique et a fortiori surcritique ne soient rassemblées.

Ces contraintes ont été intégrées dans la réglementation internationale élaborée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et qui sert de base aux réglementations nationales.

Ces règles de sûreté sont spécifiques d'un ensemble, nommé colis, constitué par l'emballage de transport et un contenu de matières radioactives bien défini. Par rapport aux règles de sûreté applicables dans les installations nucléaires, ces règles imposent que les colis doivent subir une série d'épreuves types telles qu'une chute d'une hauteur variable sur une cible indéformable, une chute sur poinçon, des tests de feux d'hydrocarbures et d'immersion sous eau, définissant ainsi l'état du colis en conditions de transport dites "normales" (colis non endommagé) et "accidentelles" (colis endommagé).

En ce qui concerne le transport des matières fissiles (telles que l'hexafluorure d'uranium UF₆, les assemblages combustibles neufs et usés, les déchets...), il est exigé que celles-ci soient transportées de façon à maintenir la sous-criticité dans les conditions normales et accidentelles de transport.

Diverses éventualités doivent pour se faire être prises en considération : infiltration d'eau dans les colis ou perte d'eau par les colis, perte d'efficacité des absorbeurs de neutrons ou des modérateurs incorporés, redistribution du contenu à l'intérieur du colis ou à la suite d'une perte de son contenu, réduction des espaces entre colis ou à l'intérieur de ces derniers, immersion des colis dans l'eau ou enfouissement sous la neige et variations de températures.

Le but de l'essai présenté sur la figure 2 ci-contre permet, entre autres, de vérifier que la sous-criticité est maintenue en toutes circonstances.



Figure 3 : Essai de chute d'un colis de transport d'une hauteur de 9 m avec un angle de 30°.

4.2. RÉACTEURS NUCLÉAIRES

La criticité est l'état d'un réacteur nucléaire où suffisamment de neutrons sont créés par fission pour compenser ceux perdus par fuite ou absorption, de sorte que le nombre de neutrons produits par fission reste quasiment constant. C'est ce qu'on appelle le maintien de la réaction nucléaire en chaîne.

Cette stabilité dépend des quantités de neutrons disponibles pour provoquer de nouvelles fissions. En fonctionnement normal, les neutrons issus de la première fission d'un atome sont partiellement capturés par les barres de contrôle du réacteur, de manière à ce qu'un seul neutron soit disponible pour provoquer une deuxième fission à son tour. Le rapport du nombre de neutrons entre les deux générations successives de neutrons est ainsi égal à 1.

Cet équilibre est favorisé par l'existence de neutrons retardés qui rend possible le contrôle d'un réacteur nucléaire. Ce délai donne le temps d'actionner des barres d'absorption de neutrons et donc de piloter le système. Pour un réacteur qui fonctionne en régime critique, la fraction des neutrons retardés est une mesure de la marge de sécurité. Cette marge est environ de 0,65 % pour un REP et de 0,4 % pour un réacteur RNR comme Super-Phénix.

5. LES ACCIDENT DE CRITICITÉ

Historique

L'IRSN a compilé dans son rapport [1] l'ensemble des accidents de criticité connus depuis 1945. Il a répertorié une soixantaine d'accidents, dont les deux tiers sont survenus dans des réacteurs ou des laboratoires de recherche, le tiers restant dans les installations du cycle du combustible. 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.

Les accidents de criticité présentent un danger particulier du fait que, si le milieu devient surcritique, il pourra être le siège d'une augmentation très rapide du nombre de neutrons émis et de l'intensité du rayonnement gamma. 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 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.

Depuis, uniquement trois accidents se sont produits, deux en 1997 et le dernier en 1999 à Tokai-Mura au Japon (voir la [fiche argumentaire GAENA « Accident de criticité de Tokai Mura »](#)).

On peut noter que 2 accidents de criticité ont été répertoriés en France (1960 et 1968) : ils sont survenus à Saclay sur des dispositifs expérimentaux, et ont provoqué l'irradiation légère d'un opérateur, sans conséquence à long terme.

Les accidents de criticité connus n'ont pas provoqué de rejets radioactifs significatifs dans l'environnement, mais ont provoqué, pour les personnes situées à proximité immédiate des accidents (quelques mètres), des irradiations importantes par des rayonnements gamma et des neutrons. Dans son rapport [1], l'IRSN a identifié 19 décès du fait de ces fortes irradiations, la plupart étant intervenus de quelques heures à quelques jours après l'accident. Pour les accidents les plus récents, l'amélioration des protocoles de traitement médicaux a permis d'améliorer le taux de survie des personnes irradiées.

Origine des accidents de criticité

Concernant les accidents survenus dans les réacteurs et laboratoires de recherche, les causes de ces accidents sont très diverses, mais la plupart sont liés à des erreurs de manutention et de manipulation des matières fissiles. 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 la fréquence de ces accidents ait diminué dans le temps témoigne des progrès accomplis dans l'établissement, la validation et la bonne mise en œuvre des procédures.

Contrairement au cas des réacteurs nucléaires et laboratoires 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. 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, montre que 21 des 22 accidents de ce type répertoriés se sont produits dans des solutions liquides de matières fissiles et que le dernier a concerné un massif de matière fissile à l'état solide. 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.

Aucun accident ne peut être attribué uniquement à une défaillance matérielle ou d'erreurs de calcul ou de défaut d'appréciation de scénarios d'accidents potentiels. Ils peuvent aussi être la conséquence d'erreurs humaines.

7. RÉFÉRENCES

[Réf.1] : rapport IRSN de 2009 : « Les accidents de criticité dans l'industrie nucléaire » : accessible par le lien https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/communiqués_et_dossiers_de_presse/IRSN_ni_Accidents_Criticite_102009.pdf

[Réf. 2] : Site du « Criticality Safety Information Resource Center (CSIRC) » du Los Alamos National Laboratory sur : <https://inis.iaea.org/records/tpqg1-5e311>

[Réf. 3] : La prévention du risque de criticité dans les installations nucléaires. Prévention de rigueur hors des réacteurs. Clefs CEA N° 45. <https://www.cea.fr>

[Réf.4] : La sûreté vis-à-vis de la criticité des transports de matières fissiles. Clefs CEA N° 45. <https://www.cea.fr>

Annexe 1 : Les modes de contrôle de la sûreté-criticité selon la “Règle fondamentale de sûreté”

<i>La Règle fondamentale de sûreté [RFS 1.3.c] relative aux dispositions de prévention des risques de criticité dans les installations nucléaires autres que les réacteurs, a été édictée par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, l'autorité compétente en France pour les installations nucléaires de base (INB) civiles. Elle est applicable aux installations mettant en œuvre des matières fissiles, notamment le plutonium et l'uranium dès lors que celui-ci contient plus de 1% d'isotope ^{235}U. Les différentes installations concernées sont les usines d'enrichissement de l'uranium, les ateliers de fabrication d'éléments combustibles, les usines de traitement des combustibles usés, les magasins de stockage et les laboratoires.</i> <i>La RFS stipule d'abord que pour chaque unité fonctionnelle de l'installation, un mode de contrôle approprié [...] sera retenu[et] défini par une limite supérieure imposée à l'un ou plusieurs des paramètres suivants : masse de matières fissiles, dimensions géométriques de l'appareillage, concentration en matières fissiles pour les solutions, rapport de modération pour les produits secs ou peu humides, compte tenu de la présence éventuelle de poisons neutroniques. Ces limites seront fixées pour un milieu fissile de référence, en tenant compte de l'environnement réflecteur et des interactions.</i> <i>Le milieu fissile de référence est celui qui, parmi tous ceux qui peuvent être rencontrés dans l'ensemble concerné, dans les conditions normales et anormales de fonctionnement, conduit aux limites les plus faibles en raison de sa teneur en matière fissile, de sa composition et de sa loi de dilution.</i> <i>La RFS précise les dispositions relatives aux différents modes de contrôle :</i> <i>Contrôle par la masse de matière fissile</i> <i>La RFS impose de définir l'unité de travail dans laquelle la masse de matière fissile est limitée ainsi que les règles de gestion de matière associées.</i> <i>Lorsque ce mode de contrôle est adopté, une masse sûre de matière fissile est fixée par unité de travail. S'il est reconnu que la masse critique peut être atteinte à la suite d'une seule anomalie [...], la masse sûre de matière fissile dans l'unité de travail considérée sera égale à la moitié au plus de la masse minimale critique pour le milieu fissile de référence.</i>	<i>Cette limite sera éventuellement abaissée pour tenir compte de l'interaction neutronique éventuelle avec les masses de matière fissile présentes dans les unités de travail voisines. Une évaluation de la masse totale de matière fissile présente dans l'unité de travail sera faite dans le but de vérifier que cette masse est à tout instant inférieure ou égale à la limite fixée [...].</i> <i>En pratique, ce mode de contrôle peut être appliqué à l'échelle d'un appareil, d'une boîte à gants, d'une cellule, voire d'un laboratoire entier. Il nécessite le respect strict de consignes et présente donc l'inconvénient d'être vulnérable au “facteur humain”.</i> <i>Contrôle par la géométrie des appareils</i> <i>Ce type de contrôle est principalement utilisé [là] où la matière fissile se trouve sous forme de solutions concentrées. Des dispositions seront prises pour prévenir les situations suivantes ou pallier leurs conséquences : déformation accidentelle des appareils [...], fuites ou débordements de solutions de matière fissile [...], envoi de solution de matière fissile dans les récipients de géométrie non sûre, placés sur les circuits auxiliaires [...], rapprochement de récipients mobiles contre les appareils : récipients mobiles de géométrie sûre, en nombre limité, entourés si nécessaire d'une structure rigide permettant de garantir un écartement suffisant avec les appareils fixes.</i> <i>Ce mode de contrôle doit être préféré lorsque les contraintes sur les dimensions sont compatibles avec les procédés. Il n'est pas vulnérable au facteur humain mais nécessite d'être pris en compte dès la conception des appareils et une surveillance particulière des communications possibles entre appareils de géométrie sûre et appareils de géométrie quelconque.</i> <i>Contrôle par la concentration en matière fissile des solutions</i>	<i>Ce type de contrôle est principalement utilisé dans les installations ou parties d'installations dans lesquelles les concentrations en matière fissile des solutions sont sûres, compte tenu de la géométrie des appareils qui les contiennent. Il ne peut s'appliquer qu'à des solutions de matière fissile homogènes. En conséquence, les dispositions appropriées seront prises pour éviter la précipitation, la polymérisation, la cristallisation, l'extraction dans un autre fluide (solvant par exemple) ainsi que l'élévation de la concentration de la matière fissile par évaporation.</i> <i>Contrôle par la modération</i> <i>Ce mode de contrôle est généralement utilisé, associé au contrôle par la masse, dans les installations ou parties d'installations de fabrication d'éléments combustibles. Il est réservé généralement aux produits secs ou peu humides, non hygroscopiques</i> <i>Deux “barrières” dont l'intégrité sera surveillée, seront interposées entre la matière fissile et les fluides hydrogénés. Dans certains cas, une seule “barrière” pourra être tolérée si des dispositions particulières sont prises [...], notamment en ce qui concerne sa qualité. Les risques de modération accidentelle d'origine externe (crues, etc.) et d'origine interne (fuites, etc.) seront pris en compte</i> <i>Empoisonnement neutronique</i> <i>L'empoisonnement neutronique est utilisé lorsque le procédé nécessite l'utilisation d'appareils de grand volume, non réalisables en géométrie sûre, ou lorsqu'il est nécessaire d'isoler neutroniquement des appareils entre eux. La présence en quantité suffisante de poison neutronique sera garantie[...]</i>
--	--	--