

# III. LA SÛRETÉ DES INSTALLATIONS VIS-À-VIS DU RISQUE DE CRITICITÉ

## prévention de rigueur hors des réacteurs

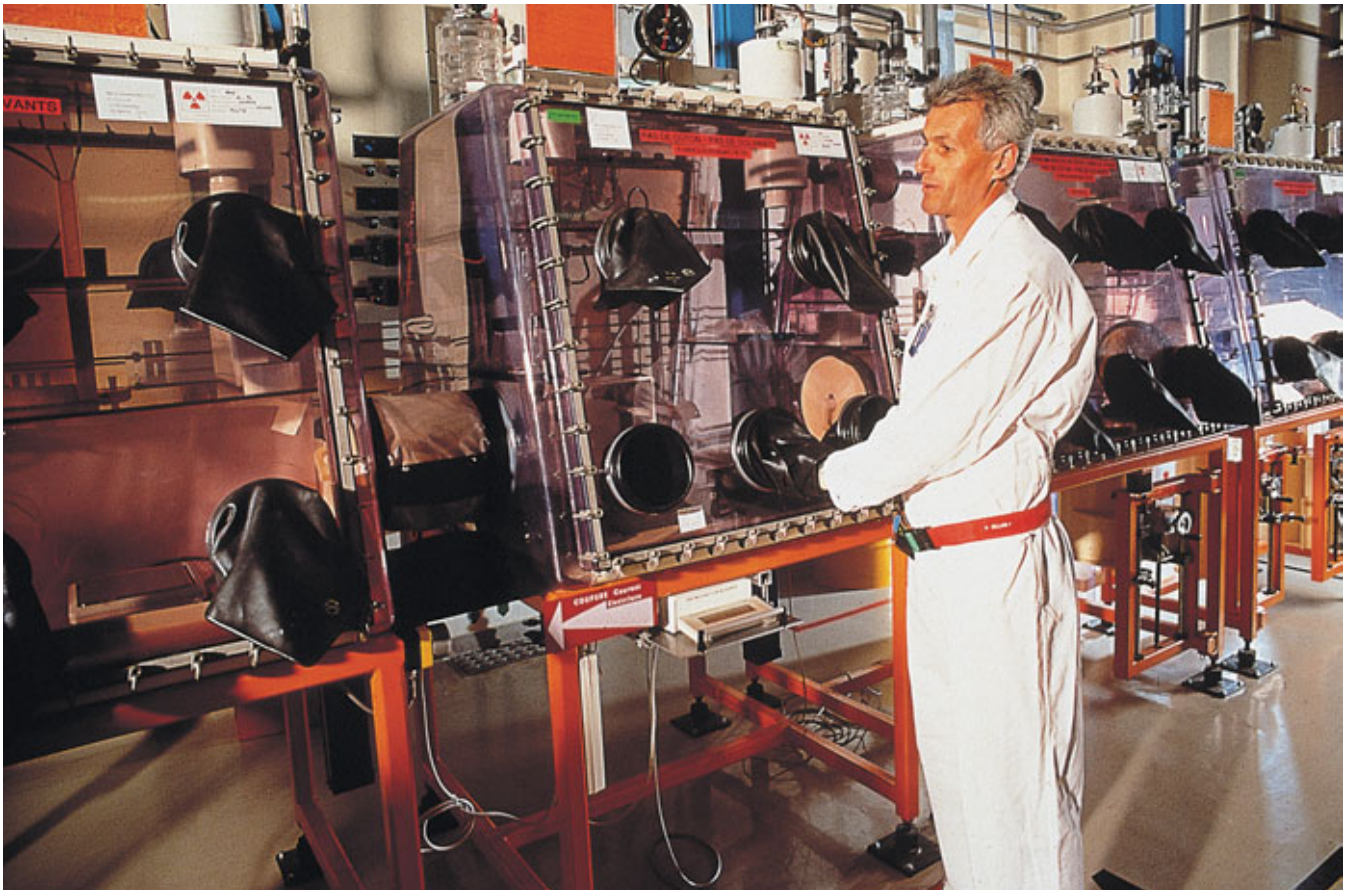
Dans les installations autres que les réacteurs eux-mêmes où sont manipulées des matières nucléaires, toute réaction en chaîne est soigneusement évitée. Il n'est cependant pas possible d'exclure qu'à la suite d'une erreur opératoire ou du non-respect d'une procédure, une telle réaction en chaîne se déclenche à cause d'une configuration favorable en termes de bilan neutronique, dans une installation fixe ou lors d'un transport : c'est le risque de criticité. La prévention de ce risque fait appel à des principes de base simples en eux-mêmes mais dont la mise en œuvre pratique nécessite des études rigoureuses et une vigilance constante. Le dernier accident grave de criticité, survenu en 1999 au Japon et présenté dans ce chapitre dans son déroulement, ses causes et ses conséquences, l'a bien illustré *a contrario*. Si sa prévention se traduit par des contraintes, la stricte évaluation du risque de criticité permet aussi d'obtenir plus de souplesse dans la gestion des matières de l'industrie nucléaire, gage d'économie. Deux articles illustrent les progrès réalisés sur ce plan par les chercheurs et les industriels.



Manutention au CEA/Cadarache de matières fissiles non irradiées conditionnées en fûts et entreposées dans des "cages centrées" pour se prémunir du risque de criticité.

# LE RISQUE DE CRITICITÉ ET SA PRÉVENTION DANS LES USINES, LES LABORATOIRES ET LES TRANSPORTS

*La propriété de pouvoir entretenir des réactions de fission en chaîne dont sont doués certains noyaux fissiles tels que l'uranium 235 et les plutonium 239 et 241 est directement à l'origine de l'utilisation de réacteurs nucléaires pour la production d'énergie. Elle est tout aussi directement à l'origine d'un risque spécifique à l'industrie nucléaire : la criticité.*



Joly/CEA

Point n'est besoin d'une machine complexe ni de quantités très importantes de matières **fissiles** pour amorcer le phénomène de **fission en chaîne** : un peu plus de 0,5 kilogramme de plutonium ou environ 60 kilogrammes d'uranium, tel que celui qui est utilisé pour fabriquer les **combustibles** des centrales d'EDF, mélangés à de l'eau, suffisent, pour peu qu'ils soient placés selon une géométrie favorable. Si une telle réaction de fission

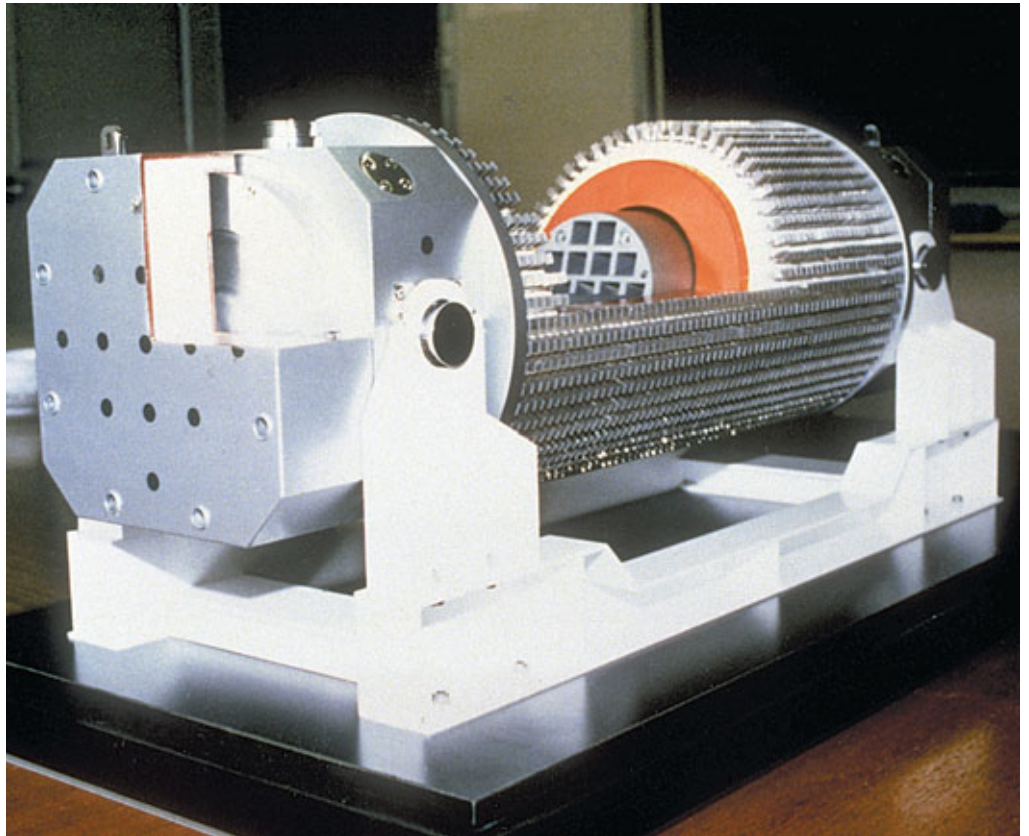
en chaîne intervient au cours de la manipulation de matières fissiles dans un laboratoire, une installation de fabrication ou de traitement de combustible, un entreposage ou au cours d'un transport, elle est accompagnée, comme dans un réacteur, d'un dégagement d'énergie. Celui-ci se traduit par un échauffement important du milieu fissile et la production de **rayonnements** (gamma et **neutrons**) pouvant dans les cas les plus graves cau-

**Dosages en boîtes à gants lors de la manipulation de combustible MOX.**





Emballage de transport de combustibles usés TN 12.



DR/Cogema

ser une irradiation importante voire mortelle pour les personnes se trouvant à proximité de l'équipement concerné, comme l'a montré en 1999 l'accident de Tokai Mura, au Japon (voir *L'accident de criticité de Tokai Mura*). En revanche, les conséquences pour l'environnement d'un tel accident sont faibles, les rejets de **produits de fission radioactifs** ne comportant que quelques gaz rares et très peu d'iode.

Ce risque de criticité, bien spécifique à l'industrie nucléaire, a été pris en compte dès l'origine par le CEA et les industriels à travers des dispositions préventives adaptées. Elles se traduisent en pratique par des contraintes consistant, par exemple, à limiter les quantités de matière manipulées, les dimensions des appareils contenant la matière fissile ou la concentration en matière fissile dans les milieux liquides ou à avoir recours à des matériaux spéciaux appelés **poisons neutroniques** (voir *Les phénomènes neutroniques*) ; chaque situation nécessitant d'être analysée en fonction des matières concernées et du contexte environnant. L'objet des études de criticité est, précisément, d'étudier les dispositions les mieux adaptées, nécessaires et suffisantes pour prévenir le déclen-

chement d'une réaction de fission en chaîne lors de la manipulation de matières fissiles. Un bref retour sur la **neutronique** permet de comprendre l'origine du phénomène (encadré F, *L'accident de criticité, une question de bilan neutronique*).

### Paramètres influençant le bilan neutronique

Les articles précédents (voir *Les phénomènes neutroniques*) ont montré le rôle déterminant des neutrons pour le déclenchement des réactions de fission "induites" ainsi que le mécanisme d'"auto-entretien" des réactions en chaîne par le phénomène de la multiplication des neutrons (chaque réaction consomme un neutron mais en produit plus qu'un, environ 2,5 en moyenne dans le cas de la fission de l'uranium 235). Il va donc y avoir production de neutrons qui, si elle n'est pas compensée par une perte suffisante, conduira à un accident de criticité. Différents paramètres influant sur les termes de ce bilan des neutrons, il est possible de prévenir le risque de criticité en respectant l'inégalité suivante :

$$\text{absorption} + \text{fuite} > \text{production}$$

## L'accident de criticité : une question de bilan neutronique F

Les conditions de **criticité** d'un milieu où se déroulent des réactions de fission en chaîne (encadré A) résultent du bilan de PRODUCTION de neutrons par fission et de leur PERTE par capture\* et par **fuite** [ABSORPTION + FUITE]. Ainsi, l'état du milieu fissile se caractérise par le coefficient de multiplication neutronique effectif,  $k_{\text{eff}}$ , qui peut être défini comme le rapport entre le nombre de neutrons de deux générations successives où  $N$  est le nombre de "neutrons pères" (génération  $n - 1$ ) ayant disparu par absorption ou fuite et ayant donné naissance à  $N'$  "neutrons fils" (génération  $n$ ) :

$$k_{\text{eff}} = \frac{N'}{N} = \frac{\text{production}}{\text{absorption} + \text{fuite}}$$

● si  $k_{\text{eff}} < 1$  : la réaction est inhibée. Il s'agit de l'état **sous-critique** qui caracté-

rise l'état de sûreté recherché dans le fonctionnement des installations nucléaires ;

● si  $k_{\text{eff}} = 1$ , la réaction est maîtrisée. C'est l'état juste **critique** pour lequel la population des neutrons reste constante, celui qui est visé dans un réacteur en fonctionnement mais qu'il convient de ne jamais atteindre (sauf expérimentation particulière) dans les autres installations nucléaires ;

● si  $k_{\text{eff}} > 1$ , il s'agit de l'état **sur-critique**, situation conduisant à l'accident de criticité. Une réaction de fissions en chaîne démarre entraînant une PRODUCTION importante de neutrons non compensée par les PERTES.

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 par capture stérile.

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.

\* À noter que la capture peut être une capture par un noyau stable (auquel cas le  $k_{\text{eff}}$  est diminué) ou une capture entraînant une réaction de fission (le  $k_{\text{eff}}$  est augmenté).

### La production des neutrons de fission

Les neutrons, particules sans charge électrique, se déplacent assez librement dans la matière. Ils sont porteurs d'une énergie cinétique  $e$ , liée à leur masse  $m$  et à leur vitesse de déplacement  $v$  par la relation  $e = 1/2 mv^2$ , énergie généralement exprimée en électronvolt (eV). Au moment de leur naissance à la suite d'une fission, les neutrons ont une énergie variable dont la moyenne est de 2 millions d'électronvolts (2 MeV). Ce n'est pas dans cet état qu'ils sont les plus efficaces pour déclencher des réactions de fission (voir *Les phénomènes neutroniques*). Mais par suite de leur déplacement dans la matière, les neutrons cèdent progressivement leur énergie au cours de collisions avec les autres noyaux du milieu, ce qui augmente leur efficacité pour provoquer des fissions lorsqu'ils rencontrent des noyaux fissiles. Ce phénomène de ralentissement s'appelle aussi **modération**.

En règle générale, l'énergie cédée par les neutrons au cours des chocs avec les noyaux du milieu est d'autant plus grande que les noyaux rencontrés sont légers, le champion des modérateurs de neutrons étant l'hydrogène dont le noyau

est constitué par un seul proton, de même masse que le neutron. On comprend ainsi le rôle tout particulier joué dans la neutronique et la criticité par l'eau dont la molécule comporte deux atomes d'hydrogène.

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  $k_{\text{eff}}$  est de 1 est de 0,51 kg de plutonium, 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'isotope 235), le seul fait de maintenir le milieu rigoureusement sec (anhydre), et plus généralement exempt de toutes matières hydrogénées, suffit à empêcher tout risque de criticité, même en présence de grandes quantités de matière.

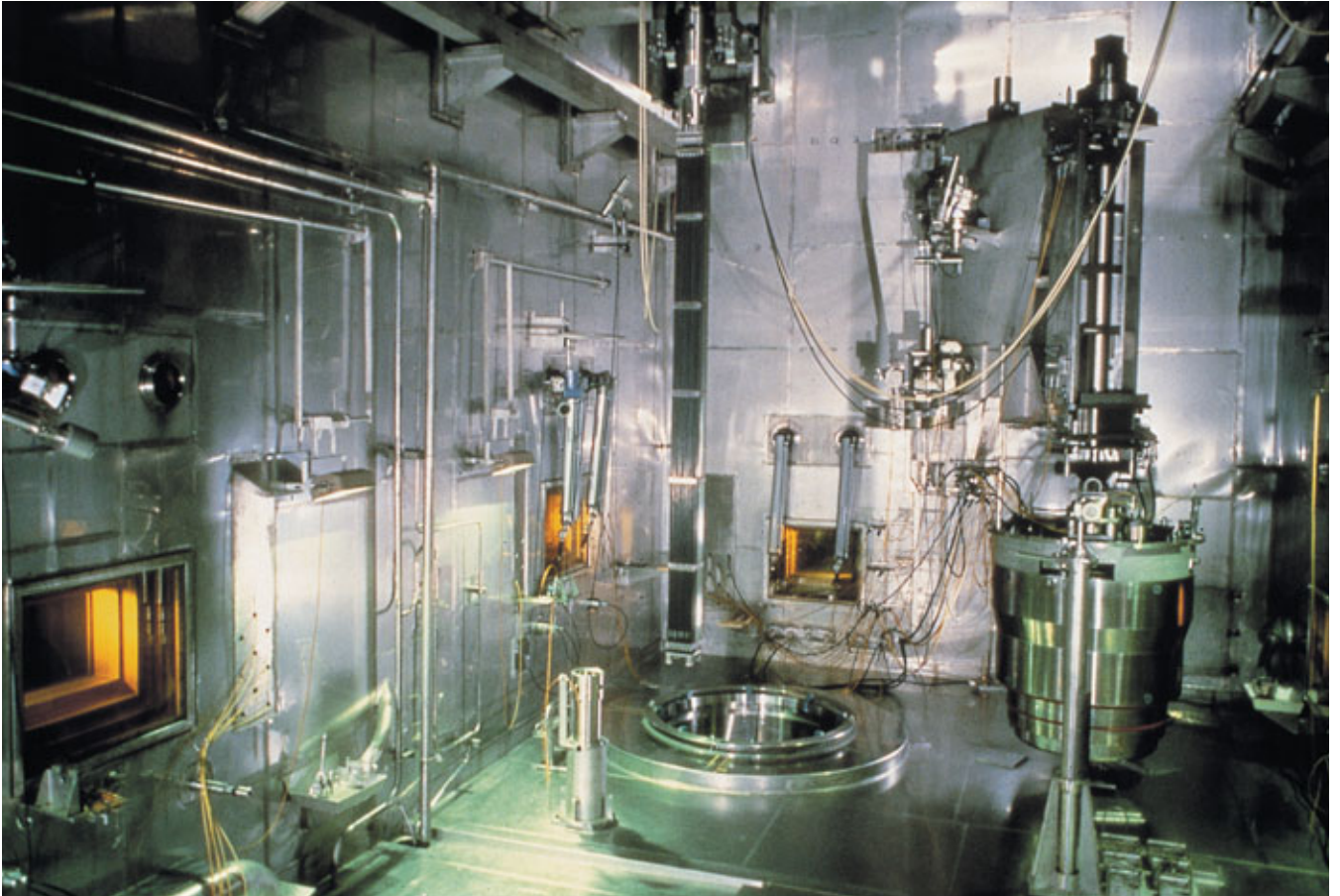
La criticité est alors contrôlée par limitation de la modération.

### 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 seul fait de maintenir la matière fissile dans un volume de dimensions suffisamment petites peut suffire à écarter tout risque de criticité.

La criticité est dans ce cas contrôlée par 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 appelée la **réflexion** des neutrons. 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.



S. Jezequel/Cogema

Appareillage de la cellule de l'atelier de déchargement à sec T0 de l'usine de retraitement des combustibles UP3 de Cogema à la Hague.



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 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.

### L'absorption des neutrons

Si toute élimination des neutrons, par exemple par **capture** par des noyaux présents, est favorable à la **sous-criticité** d'un milieu fissile, il existe une grande diversité de comportement des noyaux, naturels et artificiels, vis-à-vis de leur capacité à interagir avec les neutrons : certains d'entre eux sont "quasi-transparents" aux neutrons tandis que d'autres se

comportent pour eux en véritables poisons. Parmi les éléments naturels, quatre, relativement abondants, se révèlent particulièrement doués pour capter les neutrons grâce au pouvoir absorbant d'au moins un de leurs **isotopes**. Il s'agit du **bore** (grâce à l'isotope  $^{10}\text{B}$  contenu dans le bore naturel), du **cadmium**, du **hafnium** et du **gadolinium** (grâce à son isotope  $^{155}\text{Gd}$ ). 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".

D'autres noyaux fréquemment rencontrés dans les milieux fissiles courants peuvent également contribuer à la capture des neutrons et donc à diminuer le risque de criticité. Parmi les principaux se comptent les isotopes 238 de l'uranium et 240 du plutonium.

En dehors des quatre "champions" précédemment cités, beaucoup de noyaux possèdent un pouvoir notable de capture des neutrons. Il est important d'en tenir compte de façon précise dans l'établissement du **bilan neutronique**. Parmi les éléments courants se distin-



guent le chlore, l'azote, le fer... et l'hydrogène lui même ! C'est ainsi que les solutions aqueuses contenant de faibles concentrations en matières fissiles restent sous-critiques, même en présence de très grands volumes, grâce à "l'empoisonnement" apporté par l'hydrogène de l'eau.

Le contrôle de la criticité est alors obtenu par limitation de la concentration (en matières fissiles).

Enfin, concernant le risque de criticité présenté lors des opérations d'entreposage, de transport ou de retraitement des combustibles "usés", il est à noter que plusieurs produits de fission stables (samarium 149, samarium 152, gadolinium 155, césium 133, néodyme 143, ruthénium 103, molybdène 95...) présents dans ces combustibles ont une influence très favorable à la sous-criticité de ces milieux grâce à leurs propriétés neutrophages, qui font l'objet de nombreux travaux de recherche.

Il apparaît ainsi qu'il existe en pratique une très grande variété de solutions pour maintenir dans un état sous-critique un système contenant des matières fissiles ! À chacune d'elle correspond un ensemble de *contraintes* ou de *limitations de paramètres* qu'il convient de définir précisément. Lorsque la sous-criticité est obtenue en limitant un seul paramètre, cette limitation constitue un *mode de contrôle de la criticité*.

## Modes de contrôle de la criticité et milieux fissiles de référence

Les paragraphes précédents ont mis en évidence les multiples moyens de prévention des risques de 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. Cette étape constitue le choix d'un (ou plusieurs) *mode(s) de contrôle de la criticité*. Il reste à préciser la méthode permettant de définir les limites imposées aux paramètres de contrôle. Il est nécessaire pour se faire de rechercher, par une *analyse de sûreté*, la combinaison des paramètres la plus défavorable vis-à-vis de la criticité et d'en déduire les paramètres enveloppes pour la sûreté. On est ainsi amené à définir un milieu fissile enveloppe appelé *milieu fissile de référence* dont les paramètres critiques sont *a priori* plus restrictifs que ceux de tous les milieux fissiles susceptibles d'être rencontrés dans l'installation en fonctionnement, compte tenu du mode de contrôle de la criticité retenu.



S. Jezequel/Cogema



Transport ferroviaire d'emballages de combustibles irradiés.

Essai de résistance au feu d'un emballage d'un conteneur de transport de plutonium.



J.-M. Taillat/Cogema

Le mode de contrôle de la criticité et le milieu fissile de référence constituent donc un couple indissociable pour définir les conditions de sûreté d'une installation vis-à-vis du risque de criticité, que l'on désignera par le terme "sûreté-criticité".

### L'analyse de la sûreté-criticité

Dès ce stade préliminaire de l'analyse de la sûreté doivent être pris en compte non seulement les conditions de fonctionnement dites *normales*, mais aussi les différents dysfonctionnements envisageables. Il peut être, dans ce cadre, particulièrement utile de se référer à la Règle fondamentale de sûreté (RFS)<sup>(1)</sup> qui

constitue une référence méthodologique pour la prévention des risques de criticité, aussi bien pour les concepteurs et exploitants d'installations que pour les analystes de la sûreté. La RFS énonce comme principe général qu'un "accident de criticité

(1) Les Règles fondamentales de sûreté, émises par l'Autorité de sûreté (la Direction de la sûreté des installations nucléaires) explicitent les conditions à respecter par l'exploitant d'une installation nucléaire de base pour démontrer que celle-ci est conforme à la réglementation en vigueur. Elles sont régulièrement révisées après notamment l'avis d'un "groupe permanent" constitué de personnes choisies pour leur compétence dans le domaine considéré.

## Les modes de contrôle de la sûreté-criticité selon la “Règle fondamentale de sûreté”

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 la DSin (Direction de la sûreté des installations nucléaires), l'autorité de sûreté 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  $^{235}\text{U}$ . 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.

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. 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.*

La RFS précise les dispositions relatives aux différents modes de contrôle :

### Contrôle par la masse de matière fissile

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.

*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. 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 [...].*

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”.

### Contrôle par la géométrie des appareils

*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.*

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.

### Contrôle par la concentration en matière fissile des solutions

*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.*

### Contrôle par la modération

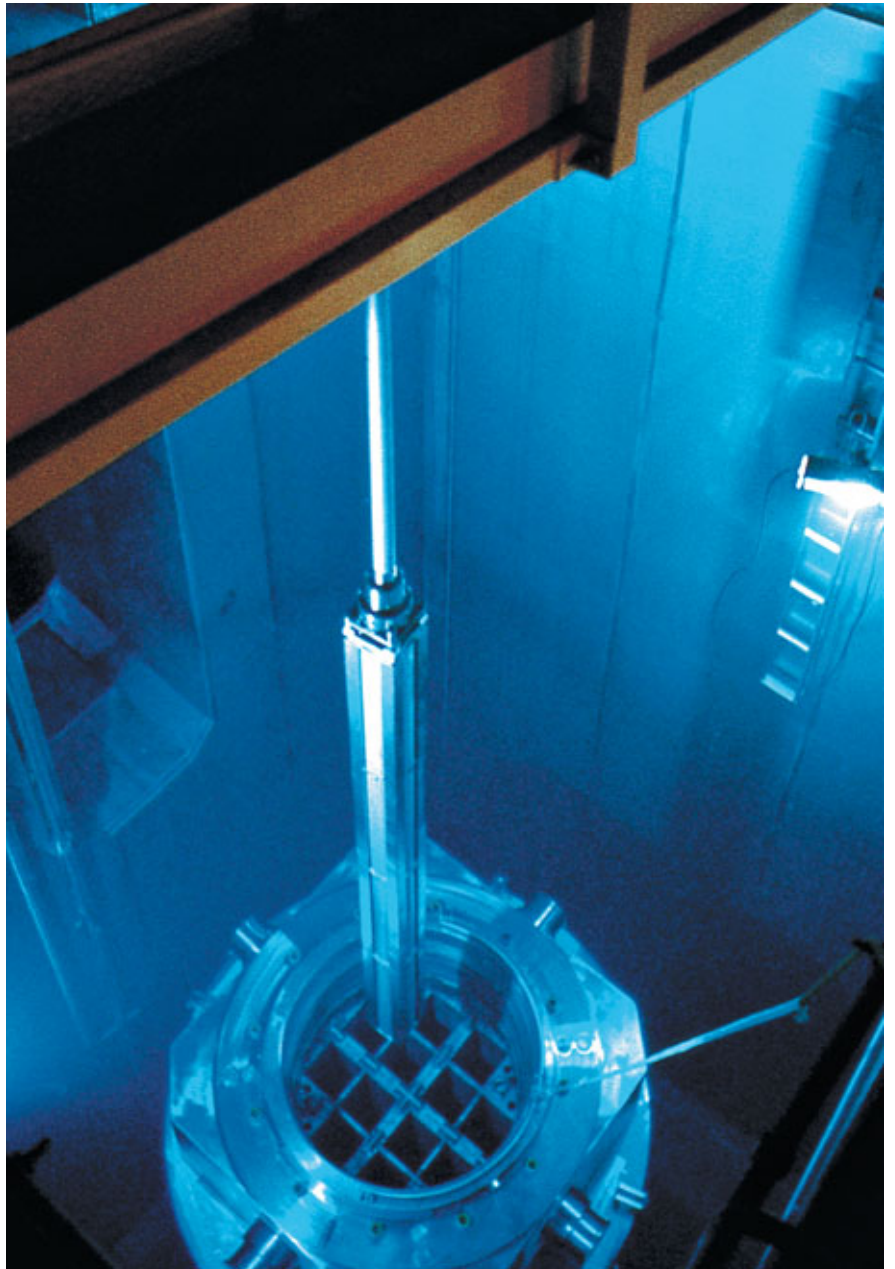
*Ce mode de contrôle est généralement utilisé, associé au contrôle par la masse, dans les installations ou parties d'installations de fabrication d'éléments combustibles. Il est réservé généralement aux produits secs ou peu humides, non hygroscopiques. Deux “barrières” dont l'intégrité sera surveillée, 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.*

### Empoisonnement neutronique

*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 [...].*



*Chargement sous eau d'un assemblage de combustible usé d'un REP dans un emballage de transport TN 12.*



M. Crepin/Photothèque EDF

ne doit en aucun cas découler d'une seule anomalie : défaillance d'un composant, d'une fonction, erreur humaine (non respect d'une consigne par exemple), situation accidentelle (incendie par exemple)... et que "si un accident de criticité peut découler de l'apparition simultanée de deux anomalies, il sera alors démontré que 1) les deux anomalies sont rigoureusement indépendantes, 2) la probabilité d'occurrence de chacune des deux anomalies est suffisamment faible, et 3) chaque anomalie est mise en évidence à l'aide de moyens de surveillance appropriés et fiables, dans un délai acceptable permettant l'intervention".

La Règle impose clairement de préciser quels sont les modes de contrôle et

milieux fissiles de référence retenus et précise les dispositions relatives à chacun d'entre eux (encadré).

### Marges de sécurité et critères de dimensionnement

Toute approche de sûreté implique l'existence de marges de sécurité. Dans le cas du risque de criticité, elle cherchera donc à définir quelles sont les valeurs maximales admissibles pour chaque paramètre, l'état critique constituant une limite qui ne doit jamais être franchie. Il n'est hélas pas possible de considérer de façon simpliste que la marge de sous-criticité est uniquement exprimée par le facteur de multiplica-

tion  $k_{eff}$ . En effet, certains milieux fissiles voient leur  $k_{eff}$  varier très rapidement en fonction de certains paramètres, par exemple les milieux constitués de plutonium ou d'uranium très enrichi alors que d'autres milieux fissiles ont un  $k_{eff}$  qui varie très lentement, comme les milieux constitués d'uranium faiblement enrichi. C'est la raison pour laquelle la RFS n'énonce pas de critère réglementaire chiffré de sous-criticité. La pratique française en la matière laisse l'appréciation des marges de sécurité à la charge des experts. Cette appréciation tient finalement compte de quatre critères : l'évaluation de la variation du  $k_{eff}$ , le degré de conservatisme lié à la modélisation de calcul (simplifications de géométrie et

de composition), le caractère plus ou moins probable du scénario correspondant à la *situation enveloppe* retenue pour les situations accidentelles et enfin du degré de qualification des logiciels de calcul pour le cas étudié (la RFS fait ici référence à une qualification *sur une base expérimentale*).

### Limiter les conséquences d'un accident de criticité

Les mesures de prévention prises, aussi parfaites soient-elles, rendent seulement très improbable, mais pas impossible, une divergence incontrôlée dans une installation dans laquelle la quantité de matières fissiles est potentiellement sur-critique : c'est l'accident de criticité (voir *L'étude de la phénoménologie des accidents de criticité* et *L'accident de criticité de Tokai Mura*). Il est donc nécessaire de prendre des dispositions complémentaires visant à limiter au maximum les conséquences d'un éventuel accident pour les personnels travaillant dans les installations, pour les personnes

du public susceptibles de se trouver à proximité et pour l'environnement.

Ces dispositions s'articulent autour de trois actions principales : la détection précoce de l'accident, l'organisation de l'évacuation rapide des personnels concernés et, si nécessaire, l'intervention visant à arrêter l'accident.

### Réseau de détection et d'alarme de criticité

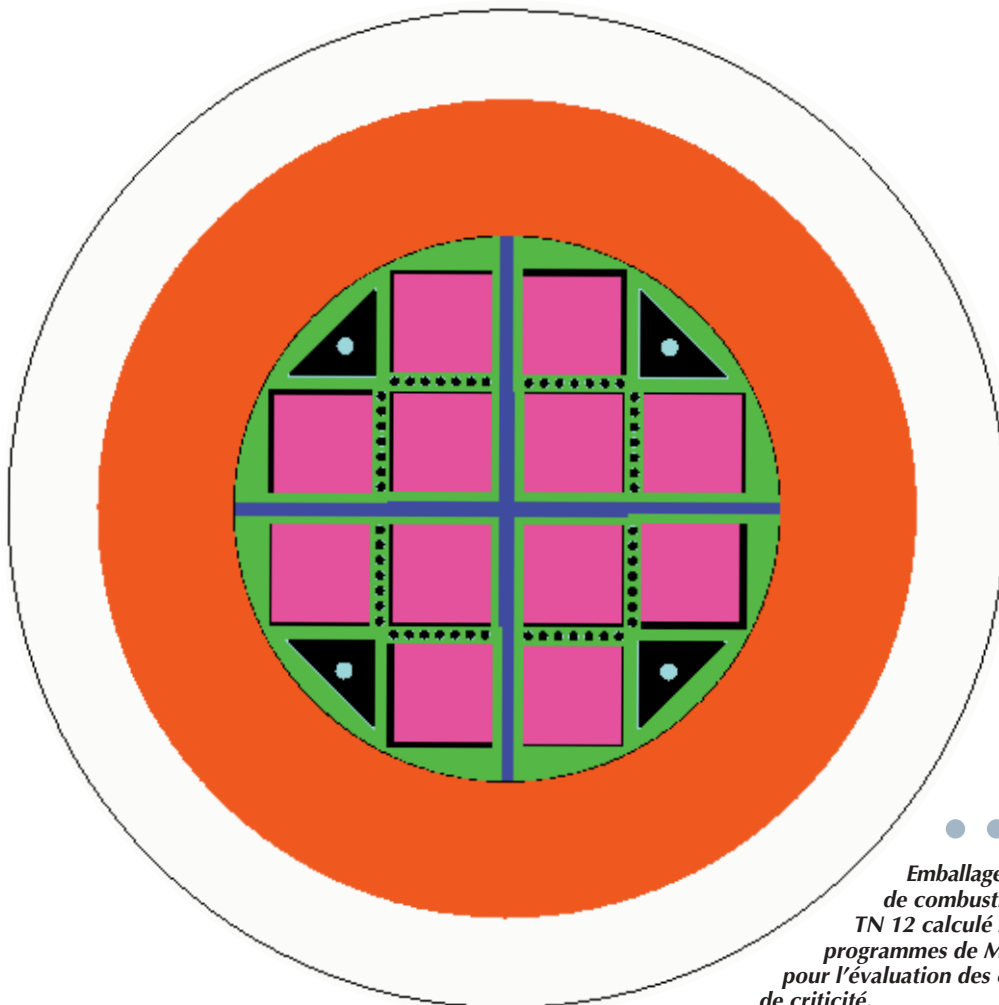
Il n'existe aucun signe précurseur mesurable d'un accident de criticité ; les dispositifs de détection utilisent le fait que la réaction en chaîne s'accompagne de l'émission d'un flux important de neutrons et de rayonnements gamma ( $\gamma$ ). Des détecteurs judicieusement placés dans les zones de circulation des personnels délivrent un signal déclenchant des alarmes sonores et lumineuses dès que la **dose** totale (neutrons +  $\gamma$ ) et que le **débit de dose** atteignent des seuils prédéterminés (respectivement  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Gy et  $1 \cdot 10^{-2}$  Gy/h pour le système français Edac décrit dans l'article suivant)<sup>(2)</sup>.

Ces équipements ont été conçus de façon à limiter au maximum le risque de fausse alarme et sont en outre susceptibles de fournir des informations sur l'accident (localisation, évaluation de doses) utiles pour la conduite de l'intervention.

### L'évacuation des personnels

La limitation pour les personnels des conséquences radiologiques d'un accident de criticité dépend largement d'une évacuation rapide hors de la zone concernée. Ils doivent donc avoir été entraînés à évacuer les lieux vers des points de rassemblement selon des cheminements préalablement définis et fléchés. L'optimisation de l'implantation des détecteurs et des chemins d'évacuation résulte de l'étude de scénarios d'accidents propres à chaque installation.

(2) C'est l'inverse dans certaines installations, où c'est l'interruption d'une alarme permanente qui signale l'accident.



● ● ● ● ●  
**Emballage de transport de combustible usé TN 12 calculé selon des programmes de Monte Carlo pour l'évaluation des conditions de criticité.**

IPSN



*Emballage de transport de combustible usé TN 17 calculé selon des programmes de Monte Carlo pour l'évaluation des conditions de criticité.*



IPSN

## L'intervention en cas d'accident de criticité

L'expérience tirée des différents accidents de criticité, en particulier du dernier survenu en 1999 au Japon, montre qu'il peut être nécessaire d'intervenir pour arrêter un accident en l'absence d'arrêt spontané suffisamment rapide. Cette intervention peut consister à "empoisonner" le milieu fissile par l'ajout de solution ou de poudre contenant des matériaux neutrophages, à transférer une solution fissile siège de l'accident vers une géométrie qui garantit un état sous-critique, à éliminer un réflecteur neutronique (par vidange de l'eau du circuit de refroidissement dans le cas de Tokai Mura). Au titre du retour d'expérience de ce dernier accident, les autorités de sûreté françaises ont demandé à l'ensemble des exploitants d'installations concernées par le risque de criticité de réexaminer les moyens dont ils disposent pour détecter un accident et intervenir et de proposer les améliorations qui s'avèreraient nécessaires.

## Respect des principes et vigilance

La maîtrise des risques de criticité dans les installations nucléaires est obtenue en imposant des limitations strictes à certains paramètres de contrôle bien identifiés. Ces limites sont définies grâce à l'étude exhaustive des conditions de criticité de tous les appareils susceptibles de contenir des matières fissiles en tenant compte de leur environnement spécifique, les paramètres enveloppes des études de sûreté devant être compatibles avec le "principe de double éventualité" énoncé dans la Règle fondamentale de sûreté (encadré).

Les outils de calculs dont disposent les *criticiens* ont déjà atteint un niveau élevé de précision grâce aux progrès réalisés dans les modèles de traitement neutronique et la connaissance des données nucléaires de base. Ils permettent en particulier de rechercher les meilleures conditions de sûreté, sans approximations excessives, pour la majorité des situations. Des développements et des travaux de

qualification actuellement en cours visent à en améliorer encore la précision, par exemple pour le calcul de la criticité des combustibles usés (voir *La criticité des combustibles usés : comment tirer profit des marges créées par leur usure ?*) afin de pouvoir mieux évaluer les marges de sécurité et de chercher à optimiser les contraintes de sûreté-criticité d'un point de vue technique et économique.

Enfin, il ne faut pas oublier que la prévention des risques de criticité est assurée par des hommes ! Les multiples défaillances de la "chaîne humaine" relevées dans le cas de l'accident de Tokai Mura montrent, à cet égard, toute l'importance de la formation et de l'organisation dans la maîtrise de la sûreté et de tout ce qui contribue à maintenir intacte la vigilance de tous les acteurs. ●

**Patrick Cousinou**

Institut de protection et de sûreté nucléaire  
Fontenay-aux-Roses