



Un travailleur manipule du combustible MOX dans une boîte à gants.

## Nucléaire : améliorer la prévention

### des accidents de criticité

#### [CONTEXTE]

Dans la matière nucléaire, une réaction de fission en chaîne peut se déclencher. C'est ce que l'on cherche dans un réacteur ou une bombe nucléaire. Dans le premier cas, en maintenant cette réaction à l'équilibre, dans le second, en favorisant son emballement. Dans les installations du cycle du combustible et les laboratoires de recherche, on évite à tout prix cette réaction, appelée « accident de criticité », qui irradie instantanément et très gravement les travailleurs à proximité.

L'IRSN développe des outils de simulation pour évaluer le risque de criticité dans toutes les configurations possibles. Ils sont validés par des expériences, ce qui permet de conforter les marges de sûreté, donc de mieux protéger les travailleurs, le public et l'environnement, quelles que soient les évolutions des installations. Certaines configurations, encore jamais testées pour le combustible MOX, le seront en 2025 sur le site de sécurité nationale du Nevada (NNSS) aux États-Unis.

Invisible mais présent dès que l'on manipule de la matière fissile, le risque de criticité exige une vigilance permanente. Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité ont été répertoriés. Ils ont fait une centaine de victimes dont vingt et une sont décédées rapidement. Cela donne une idée de la violence de l'irradiation qu'elles ont subie : lorsque les instruments de mesure la détectent ou les opérateurs la constatent, il est trop tard. La réaction en chaîne de fission n'est précédée d'aucun signe annonciateur. On passe en une fraction de seconde d'une situation normale à un débit de rayonnements extrêmement intense. De tels accidents ont surtout eu lieu entre 1950 et 1970, la plupart aux États-Unis et dans l'ex-URSS, le dernier en Russie en 2016 sur une installation de recherche.

Cela peut se produire dans des laboratoires de recherche ou dans les sites industriels où est extrait, fabriqué, enrichi, conditionné, retraité ou entreposé du plutonium, ou de l'uranium s'il est enrichi en uranium 235 à plus de 1%. Par définition, ce risque ne concerne pas les réacteurs nucléaires en fonctionnement, dans lesquels on cherche à entretenir la réaction en chaîne. Rappelons que celle-ci survient lors de la collision d'un neutron sur un atome fissile lourd. La réaction fait éclater le noyau de l'atome – composé de protons et neutrons – en atomes plus légers, libérant aussi quelques neutrons. Une réaction en chaîne peut s'amorcer si suffisamment de neutrons produits par fission génèrent d'autres fissions.

Comment éviter qu'elle ne se déclenche, provoquant un accident de criticité ? Le risque existe dès lors que

l'on manipule une certaine quantité de matière fissile contenant de l'uranium 235 ou du plutonium 239. Il dépend aussi de la forme géométrique dans laquelle se trouve cette matière, car cela impacte la proportion de neutrons qui peuvent fuir le système. L'environnement compte aussi beaucoup, notamment toutes les matières présentes (solides, liquides ou gazeuses) dont les noyaux atomiques sont susceptibles de ralentir les neutrons : plus ceux-ci sont lents, plus la fission est favorisée.

Les atomes qui ralentissent le plus les neutrons sont les plus légers, notamment l'hydrogène et le carbone. On en trouve en quantité dans l'eau, l'huile ou le plastique, mais aussi en moindre proportion dans le béton par exemple. La quasi-totalité des accidents a eu lieu lorsque la matière fissile était en solution. Ce n'est, en revanche, encore jamais arrivé durant un transport ou dans un entreposage. Pour autant, chaque accident est unique.

#### Simuler la neutronique

Pour apprécier le risque dans un colis de matière nucléaire, une installation du cycle du combustible ou la boîte à gants d'un laboratoire de recherche, il faut recourir à la simulation. S'appuyant sur des données de physique nucléaire, les logiciels modélisent les équipements présents dans l'installation ou le colis et font le bilan entre le nombre moyen de neutrons créés par fission et de neutrons perdus, soit absorbés par de la matière qui n'a pas conduit à une fission (on parle de « capture »), soit ayant fui le système. L'accident

intervient quand le nombre de neutrons créés excède celui des neutrons perdus. Toutes les procédures et les quantités de matière que les travailleurs ont le droit de manipuler ont été prévues pour prévenir l'accident.

En outre, la confiance accordée à ces outils est basée sur des expériences représentatives de cette physique neutronique, dont un grand nombre a été conduit par l'IRSN et son prédécesseur l'IPSN (Institut de protection et de sûreté nucléaire). Plus de 3000 expériences ont été effectuées en France au centre CEA de Valduc depuis 1963, dont la majorité a été intégrée à la bibliothèque d'expériences partagée par la communauté internationale. Mais il est impossible de représenter toutes les situations. Or les industriels veulent optimiser leurs opérations, par exemple pouvoir placer plus d'assemblages usés dans le même colis de transport, ce qui permettrait aussi de réduire l'exposition des travailleurs.

Par ailleurs, des erreurs de manipulation comme l'introduction de matériau plastique dans une boîte à gants, ou des incidents, comme une fuite d'eau ou d'huile, peuvent survenir. « Pour toutes ces raisons, les calculs ont été faits avec d'importantes marges de sûreté, mais de nouvelles expériences sont à mener pour les confirmer et les affiner », précise Mariya Brovchenko, spécialiste de neutronique à l'IRSN. On manque notamment cruellement de certaines données concernant le combustible MOX. » Fabriqué à partir du plutonium issu des combustibles usés et récupérés à

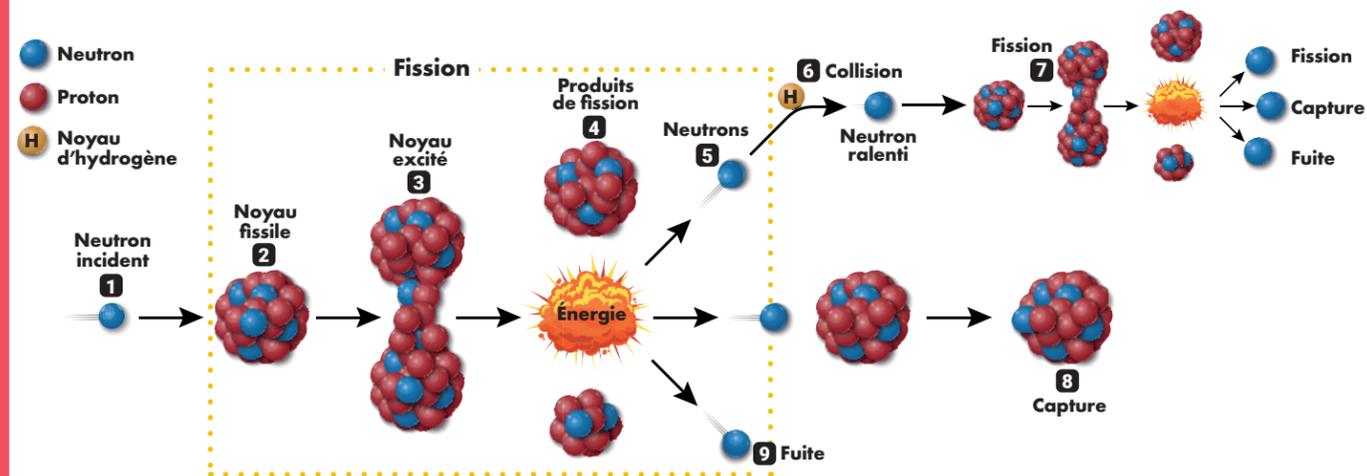
la sortie des réacteurs nucléaires, celui-ci est utilisé depuis 1987, aujourd'hui dans un peu moins de la moitié des réacteurs français (22 sur 56), et au total dans 44 réacteurs dans le monde.

L'évaluation du risque de criticité nécessite de prendre en compte un large spectre énergétique du neutron, allant d'environ 0,1 à 2·10<sup>6</sup> eV (électronvolt). Beaucoup d'expériences ont été menées dans le domaine d'énergie dit « thermique » (proche de 0,1 eV), pertinent pour la plupart des réacteurs nucléaires, avec des neutrons lents. Le comportement neutronique étant bien connu dans cette gamme d'énergie, les procédures et quantités critiques de matière pour prévenir un accident de criticité le sont également. On rencontre aussi cette situation avec, par exemple, du combustible MOX en présence d'une importante quantité d'eau, ou entreposé en piscine. De même, le combustible MOX associé à des neutrons rapides (2·10<sup>6</sup> eV) a été largement étudié en France et à l'international pour les réacteurs à neutrons rapides tels que Phénix et Superphénix.

#### De précieuses expérimentations

« En revanche, aucune expérimentation de qualité n'a pu être faite dans la plage d'énergie intermédiaire, regrette la chercheuse. Dans cette zone, la probabilité pour un neutron de réagir avec un des noyaux des atomes qui l'entourent varie considérablement en fonction de sa vitesse, donc de son énergie incidente. Elle est

#### CE QUI PEUT DÉCLENCHER UNE RÉACTION EN CHAÎNE IMPROMPTUE



Selon la matière qui l'entoure, caractérisée par la quantité de neutrons et protons qui composent ses noyaux atomiques, un neutron peut provoquer une réaction de fission en chaîne, surtout s'il est suffisamment lent. Exemple en présence d'hydrogène :

- Si le neutron incident (1) rencontre un noyau fissile (2), ce dernier passe à un état « excité » (3) : par fission, il se fracture en 2 ou 3 noyaux plus légers (4) et en moyenne 2 ou 3 neutrons sont produits (5). En fonction de l'énergie du neutron incident, la probabilité de faire une telle réaction varie fortement.
- Un neutron créé par fission est rapide (il est produit à environ 2·10<sup>6</sup> eV). Il peut être ralenti par une collision avec un noyau et en quelque sorte rebondir (6). Cela d'autant plus que la masse de celui-ci est proche de la sienne, ce qui est le cas lorsqu'il rencontre un atome d'hydrogène, composé d'un seul proton (les masses d'un neutron et d'un proton étant très voisines). Les fissions deviennent plus probables quand les neutrons sont lents, au bout d'une vingtaine de collisions (7) ;
- Le neutron peut être capturé (8) par un noyau ;
- Il peut également sortir de la zone contenant de la matière fissile (9).



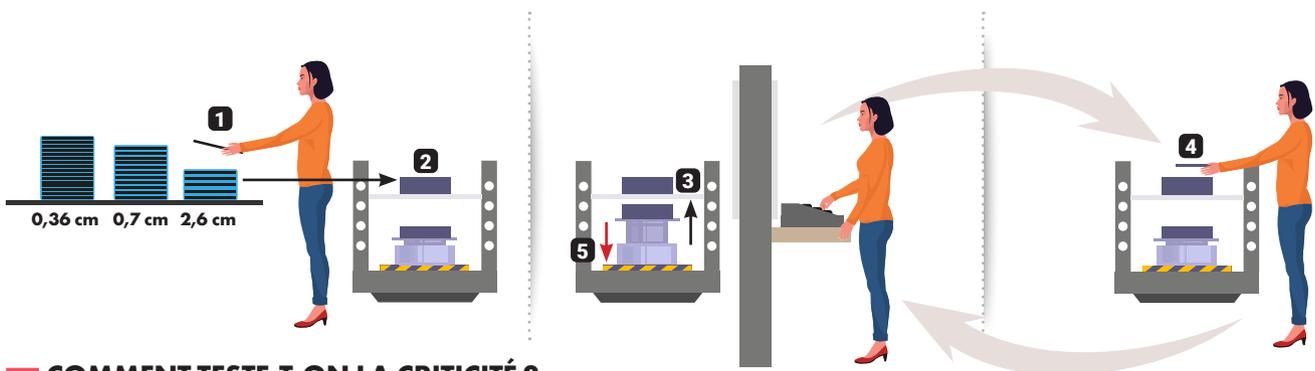
Cahier partenaire réalisé avec



www.irsn.fr

#### RÉFÉRENCES

- M. Brovchenko, J. Bez, « IRSN final design for TEX-MOX experiments IER296 CED-2 report », rapport n° IRSN/2024-00104, mars 2024.
- M. Brovchenko et al., « Design of TEX-MOX critical experiments varying neutron spectrum », ICNC 2023.
- « The need for integral critical experiments with low-moderated MOX Fuels », OCDE Workshop proceedings, 2004.



### COMMENT TESTE-T-ON LA CRITICITÉ ?

Dans les expérimentations menées au NNSS, trois spectres d'énergies dans la gamme intermédiaire sont visés en ralentissant les neutrons. Pour cela, trois épaisseurs de polyéthylène seront testées (0,36 cm, 0,7 cm et 2,6 cm) avec la quantité de combustible nécessaire pour atteindre la criticité. L'opératrice assemble une à une des plaques de combustible (noir) séparées par des couches de polyéthylène (bleu) (1). Pour être sûre de ne pas provoquer de réaction en chaîne inopinée, elle crée deux empilements séparément, ensuite placés dans la machine (2). Elle pilote alors leur rapprochement à distance et très lentement en surveillant, grâce à des détecteurs, le nombre de neutrons produits (3). Elle répète successivement l'opération en ajoutant à chaque fois un niveau de combustible et de polyéthylène, tant que la réaction en chaîne n'est pas atteinte (4). Lorsque c'est le cas, elle stoppe instantanément la réaction en séparant les deux moitiés d'assemblage (5).

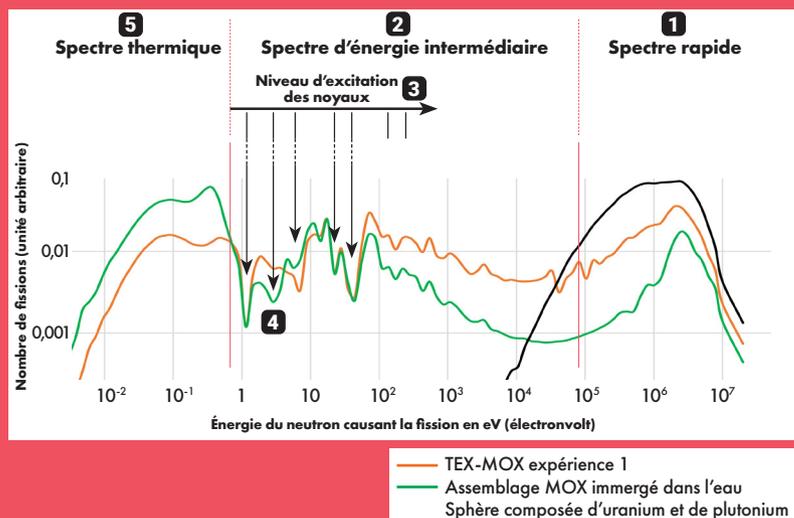
particulièrement importante si cette énergie est proche de celle d'un des niveaux d'excitation des noyaux, ces états énergétiques discrets spécifiques à chaque noyau. » Évaluer le risque de criticité suppose donc de connaître tous ces niveaux d'excitation afin de prédire le positionnement, la largeur et l'amplitude des pics de probabilité de fission ainsi que des autres réactions.

Pour vérifier les prédictions des simulations, trois expériences seront menées en 2025 au NNSS, l'installation du CEA de Valduc ayant été fermée en 2013 : deux dans le spectre d'énergie intermédiaire et une dans le spectre thermique. Elles correspondent à trois configurations que l'on peut rencontrer dans les installations françaises, entre autres celles du cycle du combustible MOX. Par exemple, une petite fuite d'eau intervenant près d'une personne manipulant de la poudre de MOX.

Concrètement, pour disposer d'une majorité de neutrons aux niveaux d'énergies visés (entre 1 et  $10^5$  eV), on contrôle leur vitesse en jouant sur les matières à proximité susceptibles de les ralentir. « Nous utiliserons du polyéthylène, une matière plastique constituée de carbone et d'hydrogène, précise Mariya Brovchenko. Nous intercalerons des plaques de différentes épaisseurs entre celles de combustible. » Plus l'épaisseur de polyéthylène est importante, plus les neutrons sont ralentis. La probabilité de fission est alors d'autant plus élevée, même avec peu de combustible.

Avec la relance du nucléaire prévue en France, de nouveaux designs de réacteurs, voire de nouveaux combustibles seraient utilisés, pour certains très différents des solutions actuelles. Dans chaque cas, la criticité devra être réévaluée sur toute la gamme d'énergie des neutrons pour prévenir le risque de criticité sur tout le cycle du combustible. Cette expertise indispensable ne peut reposer sur la seule simulation, même si elle a beaucoup évolué. La validation de la physique neutronique nécessitera toujours des expériences ciblées et optimisées. La disponibilité d'installations expérimentales adaptées est aujourd'hui un défi pour la filière. ■

### POURQUOI LA CRITICITÉ EST-ELLE COMPLEXE À PRÉVOIR ?



Ces simulations ont été faites dans trois configurations, caractéristiques de trois environnements neutroniques favorisant plus ou moins le ralentissement des neutrons : celle d'un mélange d'uranium et de plutonium sans aucun autre élément pour les ralentir (courbe noire), celle d'une des expériences qui sera menée au NNSS (courbe orange) et celle d'un assemblage MOX dans une piscine d'entreposage (courbe verte). Lorsque les neutrons sont rapides, entre  $10^5$  et  $10^7$  eV (1), le taux de fission est important : c'est le régime des réacteurs à neutrons rapides comme Superphénix. Dans la plage d'énergie intermédiaire (2), tout dépend des matières que rencontrent les neutrons et des niveaux d'excitation de leurs noyaux atomiques (3). Cela se traduit par les nombreuses vallées (4) et pics. Quant aux neutrons lents, autour de 0,1 eV (5), ils peuvent provoquer de nombreuses fissions : c'est le régime recherché et maintenu dans des conditions stables dans les réacteurs à neutrons thermiques comme nos centrales nucléaires.