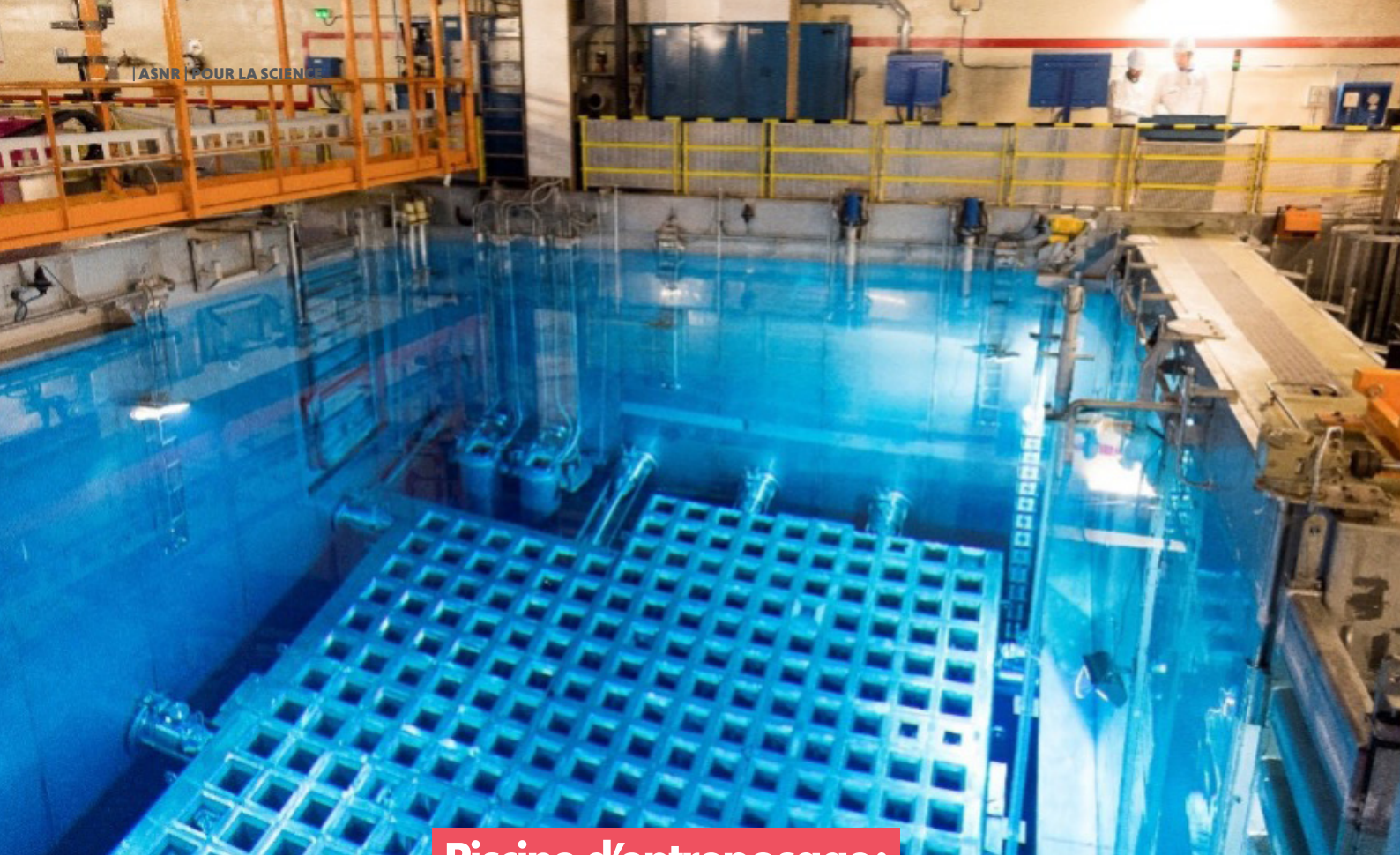




Piscine d'entreposage : refroidir à tout prix

Dans ces alvéoles de la « piscine d'entreposage » de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux, des assemblages de combustible usé sont immergés pour être refroidis.

[CONTEXTE]

Tout réacteur nucléaire comporte une piscine d'entreposage de combustible. Les assemblages usés y sont placés dans l'eau pendant plusieurs années et ceux qui sont déchargés du réacteur lors des arrêts de maintenance, temporairement. L'eau de ces piscines a deux missions : évacuer en continu la chaleur dégagée par le combustible et protéger les travailleurs de ses rayonnements ionisants. Pour cela, les assemblages doivent être noyés sous plusieurs mètres d'eau refroidie en permanence.

Lors de l'accident de Fukushima Daïchi, au Japon, en 2011, pour la première fois les systèmes de refroidissement et d'appoint en eau de certaines piscines ont été totalement perdus pendant huit jours. Grâce à des mesures improvisées, les assemblages n'ont pas été « dénoyés » et le pire a pu être évité. Mais cela a rappelé les risques majeurs associés à ces piscines et un besoin de recherches complémentaires.

Les accidents de perte de refroidissement des piscines d'entreposage ont longtemps été considérés comme des événements hautement improbables du fait de la conception et de la redondance des systèmes de sûreté, laissant à l'opérateur un délai plus que suffisant pour réagir. L'accident de Fukushima a montré que ce n'était pas toujours le cas et que les moyens pour étudier ces accidents étaient insuffisants. Par exemple, les modèles utilisés pour simuler le dénoyage des assemblages de combustible étaient développés dans le cas d'un accident grave dans un réacteur. Ils n'étaient pas validés pour la configuration d'une piscine à pression atmosphérique. Or, contrairement à un réacteur qui comporte trois barrières de confinement (cas de Fukushima), la seule barrière physique en cas de dénoyage en piscine d'entreposage est la gaine métallique qui entoure les pastilles de combustible empilées (l'ensemble constitue un « crayon », un assemblage en comporte des centaines). L'intégrité de cette gaine doit impérativement être préservée. Pour étudier ces sujets, dès 2012, plusieurs projets de recherche sont lancés dans le monde, aux Etats-Unis, puis au Japon et en Europe. Sous l'égide de

l'OCDE, les experts internationaux répertorient une centaine de phénomènes physiques importants pour la sûreté et en pointent dix-huit à examiner en priorité. La moitié impacte directement la capacité de refroidissement du combustible : ils concernent la thermohydraulique et les transferts de chaleur dans la piscine. L'autre moitié porte sur des phénomènes liés au combustible, tels que l'oxydation de sa gaine jusqu'à sa destruction et au relâchement de substances radioactives. Comment se déroule un accident de perte de refroidissement ? « Les grandes séquences sont bien connues dans l'ensemble, mais elles sont à affiner dans le contexte d'une piscine », note Sandrine Morin, chercheuse en mécanique des fluides. Lorsque le refroidissement d'une piscine est accidentellement perdu, l'eau s'échauffe (à Fukushima, le maximum relevé était de 92°C) puis s'évapore. Cette vaporisation se produit selon trois mécanismes : l'évaporation qui a lieu en surface et sans production de bulles ; l'ébullition nucléée où des bulles se forment au contact des assemblages sous certaines conditions thermohydrauliques ; le flashing où l'eau s'autovaporise dans la piscine en remontant du fond à la surface selon les différences de pression dues à la profondeur.

© Laurent Zylberman / Graphix-Images / Médiathèque ASNR

La prédominance de chaque mécanisme varie en fonction du temps et de la complexité des écoulements. Ceux-ci sont pilotés par la convection naturelle entre les assemblages chauds et les parties froides (la surface de la piscine et ses parois). Le niveau de la piscine baisse et, après une dizaine d'heures à quelques jours selon la puissance thermique des assemblages entreposés, la surface de l'eau atteint le haut des assemblages.

Éviter le dénoyage

Si rien n'est fait, les assemblages commencent à être à découvert (on parle de « dénoyage partiel »). À Fukushima, on estime qu'ils auraient été dénoyés au bout de quelques jours. Cela a pu être évité grâce à des mesures improvisées (appoint par camion). Au pire de l'accident, les assemblages sont restés immergés sous 1 mètre et demi d'eau au lieu de 5 à 8 mètres normalement. Les solutions techniques pour faire face à ces accidents varient selon les pays. En France, la sûreté des piscines repose tout d'abord sur des circuits principaux de refroidissement qui sont doublés et réalimentables. Ils sont complétés par des circuits de secours qui peuvent réintroduire de l'eau depuis l'extérieur du bâtiment. Le dénoyage est donc considéré comme hautement improbable. Dans d'autres pays, les solutions de secours reposent par exemple sur un système d'aspersion.

Cela permet-il d'éviter le dénoyage ? En cas de défaillance temporaire du système de refroidissement, sa reprise ne risque-t-elle pas d'être entravée par des phénomènes d'ébullition massive perturbant le fonctionnement des pompes, de mélange thermique intense ou de coup de bélier (une différence de pression pouvant rompre les conduites) ? En France, pour répondre à ces questions, ainsi que savoir s'il serait pertinent de modifier les modalités d'exploitation des piscines de réacteurs, un projet ANR a été mené par l'IRSN à Cadarache (Bouches-du-Rhône) entre 2013 et 2022. Il a réuni le CNRS, l'université de Perpignan, l'École des mines de Saint-Étienne et l'université d'Auvergne, rejoints par EDF et des partenaires internationaux américains et belges. Parmi ses différents volets, des études expérimentales ont porté sur les gaines de combustible en condition de dénoyage. Elles ont permis de détailler leurs cinétiques d'oxydation, accélérées par l'azote de l'air et l'influence des pressions partielles d'oxygène de l'air et de vapeur d'eau. Concrètement, avant de rejoindre la piscine, dans le cœur du réacteur, une couche de zircone se forme sur les gaines par corrosion sous eau, ce qui les protège. Mais si l'assemblage est à découvert à l'air, sous azote et oxygène donc, les crayons montent en température, les gaines gonflent et s'oxydent. En quelques heures, cette réaction exothermique s'emballe et la couche protectrice est soulevée puis fissurée, libérant la radioactivité jusqu'à la fusion de la gaine. Grâce à ces travaux, les marges de sûreté avant un rejet radioactif dans l'environnement ont pu être

ajustées. Ces résultats majeurs, finalisés en 2019, ont été intégrés dans les codes de calcul de l'ASNR. Deux équipements d'essai uniques ont également été construits dans le cadre de ce projet. L'un d'entre eux est une maquette de piscine d'entreposage de 4 mètres de hauteur et de près de 12 m³ comportant 21 alvéoles (à échelle 1/6 en surface de piscine et 1/3 en hauteur et en niveau d'eau). La puissance résiduelle des assemblages de combustible est simulée à l'aide de matériaux chauffés électriquement. Elle est contrôlée individuellement dans la maquette de piscine pour étudier l'influence sur la thermohydraulique du plan d'entreposage des assemblages.

Les premiers essais sur cette maquette ont eu lieu en 2021. « Nous avons bien observé les phénomènes pressentis avec la compétition des trois modes de vaporisation », note Sandrine Morin, coordinatrice du projet. Nous avons clairement observé à quel point le flashing amplifiait la convection naturelle et l'évaporation d'eau en surface par transfert de chaleur. »

Prévoir et conseiller

« Ces nouvelles données ont permis d'affiner la carte des régimes de vaporisation et leurs corrélations en fonction de la puissance résiduelle dans la piscine et de la hauteur d'eau », poursuit-elle. Elles seront intégrées dans les modèles numériques d'accidents de dénoyage des piscines d'entreposage. » En attendant, elles ont servi à développer un outil de simulation de l'évolution de la température en situation accidentelle. Il a déjà été mobilisé en mars 2022 lors d'une coupure d'électricité de 48 heures dans la centrale de Tchernobyl, provoquée par une attaque russe. Grâce à l'analyse de l'évolution thermique de la piscine, il a été possible d'anticiper les éventuels scénarios d'action si la coupure s'était prolongée, ce qui n'a pas été le cas. L'autre équipement d'essai a été construit pour étudier l'efficacité du refroidissement des assemblages par différents moyens après un dénoyage partiel ou total. Il comporte 289 (soit 17x17) crayons de 4 mètres de longueur chauffés électriquement, soit un assemblage dans son alvéole à taille réelle. Les premiers essais confirment l'efficacité de l'aspersion d'eau : elle permettrait de limiter la montée en température des assemblages. Par exemple, un débit d'eau de seulement 10 g/s (référence américaine lorsque l'aspersion est mise en œuvre) suffit à maintenir la température de l'assemblage en dessous de celle qui pourrait conduire à la dégradation des crayons de combustible.

« La base de données est encore insuffisante », tempère la chercheuse qui compte sur le nouveau projet lancé en 2024 par l'OCDE pour quatre ans pour apporter son lot de réponses, notamment sur les phénomènes de convection naturelle, l'initiation du flashing ou encore sur l'efficacité des différentes stratégies d'intervention (aspersion ou refroidissement par le bas de la piscine, comme en France). Il réunit onze organismes de neuf pays (France, Allemagne,

Cahier partenaire réalisé avec



Depuis le 1^{er} janvier 2025, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) se sont réunis pour devenir l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

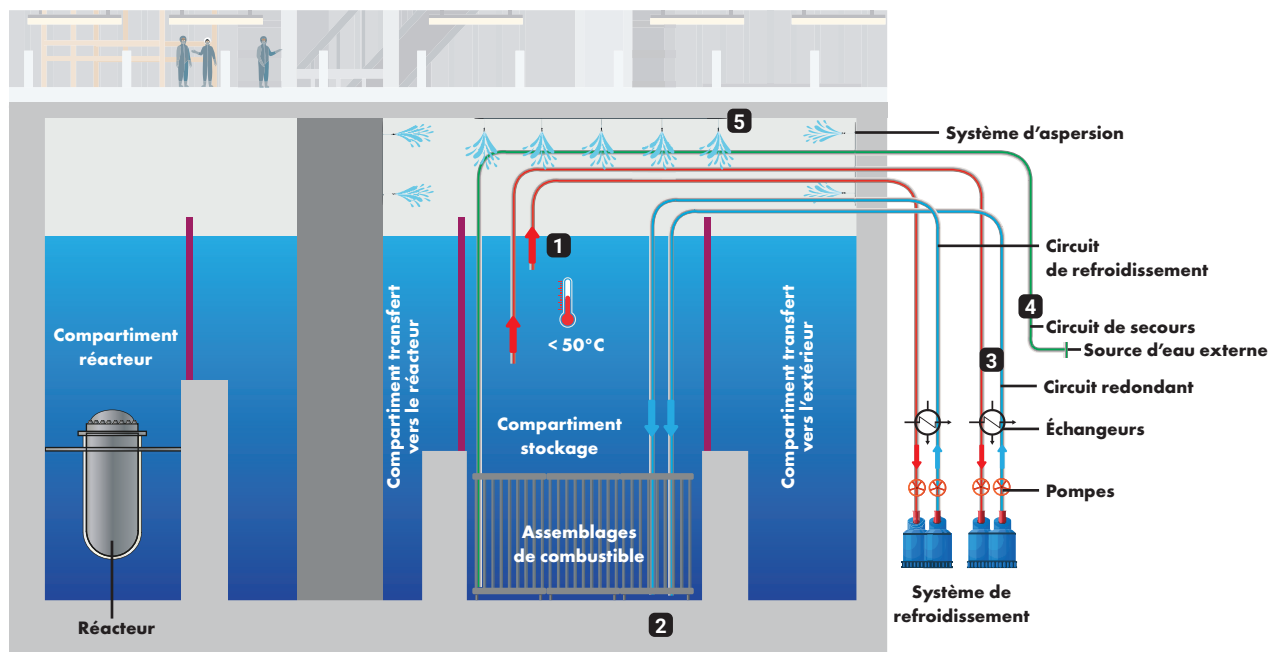
RÉFÉRENCES

- OECD Nuclear Energy Agency, Status report on spent fuel pools under loss-of-cooling and loss-of-coolant accident conditions, 2015.
- B. Migot, J. Martin, An experimental study of the thermal-hydraulics of a spent nuclear fuel pool under loss-of-cooling accident conditions. Part I: The MIDI facility and its main experimental results, Nuclear Engineering and Design, 2024.
- C. Duriez et al., Zircaloy-4 high temperature oxidation in atmospheres representative of SFP-LOCA: Investigation of the influence of a low temperature pre-oxidation scale, Journal of Nuclear Materials, 2019.
- G. Brillant et al., Rod bundle cooling by a spray system in spent fuel pool accident conditions, Nuclear Engineering and Design, 2024.

Belgique, Canada, Émirats arabes unis, Espagne, États-Unis, République tchèque, Suède) qui pourront confronter les données expérimentales à leurs modélisations. Saurait-on aujourd'hui gérer un accident de perte de refroidissement de piscine d'entreposage ?

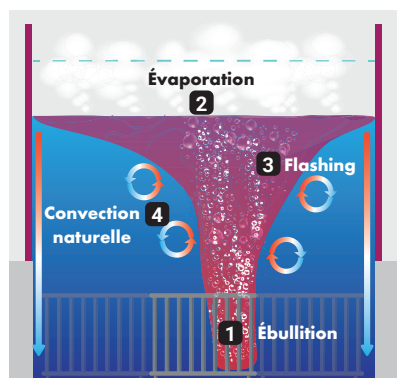
« D'ores et déjà, les connaissances acquises permettraient de mieux réagir, note Sandrine Morin. Nous comprenons mieux les phénomènes en jeu. Leur modélisation en conditions « piscine » nous procure de mieux prédire le déroulement de l'accident, ses conséquences et l'efficacité des moyens de sûreté. » ■

EN CAS DE PERTE DE REFROIDISSEMENT

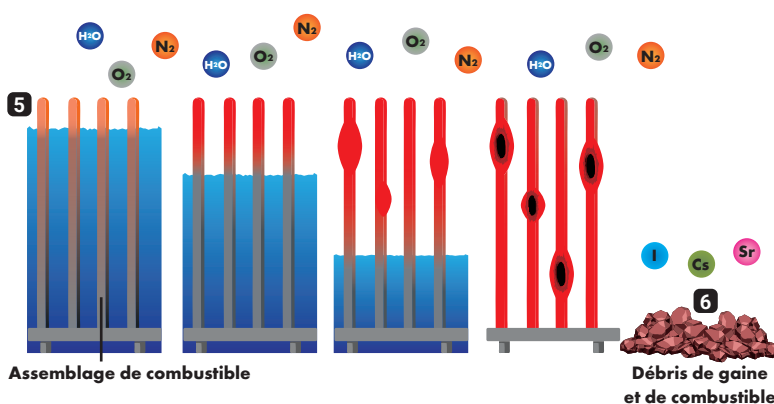


Le système de refroidissement des piscines d'entreposage consiste à prélever de l'eau près de la surface (1) et à la réinjecter après refroidissement dans la partie basse (2). La sûreté de ce système repose sur des circuits de refroidissement redondants (3). En cas de panne, en France, un système de secours prend le relais pour réinjecter de l'eau provenant d'une source extérieure (4). Dans d'autres pays, c'est une aspersion d'eau par le haut qui est activée (5).

LES PREMIERS JOURS



QUAND LES ASSEMBLAGES SONT DÉNOYÉS



Lorsque les assemblages sont immergés mais pas refroidis, l'eau s'échauffe puis bout à leur contact (1), elle s'évapore et le niveau baisse (2). L'eau chaude remonte à la surface sous forme de bulles de vapeur ou flashing (3). La différence de densité entre les zones chaudes et froides génère des mouvements d'eau par convection naturelle (4). Si les assemblages sont à découvert (5), leurs gaines s'oxydent rapidement au contact de l'air, gonflent et éclatent (6), libérant les substances radioactives (iode, césium, strontium, etc.).