



Tous les enfants font des rêves mais pour certains c'est vital de les réaliser.

*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.
Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00

Cette vue en coupe d'un assemblage de crayons de combustible soumis à des conditions accidentelles montre la déformation des gaines (cercles blancs) autour des pastilles centrales.

Accident nucléaire

Le refroidissement du combustible mis à l'épreuve

CONTEXTE

> La catastrophe de la centrale de Fukushima Daiichi en 2011 a remis la sûreté des centrales nucléaires au cœur des préoccupations. Elle a conduit à réexaminer l'efficacité des stratégies prévues en cas d'accident.

En particulier de celles qui ont pour objectif d'éviter la fusion du cœur du réacteur. Le programme expérimental Perfroï lancé en 2014 et piloté par l'IRSN s'inscrit dans ce cadre.

Cahier partenaire
réalisé avec



www.irsn.fr

Dans le cœur d'un réacteur nucléaire accidenté, quand la température monte et la pression chute, les crayons de combustible peuvent se déformer. Leur refroidissement par les systèmes de secours est-il alors toujours efficace ? Pour le tester, un ensemble d'expériences, qui vont de l'étude de la déformation de ces crayons à des dispositifs qui reproduisent le comportement du combustible dans ces conditions dégradées, sont en cours.

Quand on évoque un accident de centrale nucléaire, on pense immédiatement à Three Miles Island, Tchernobyl, ou Fukushima, qui sont qualifiés de « graves », car ils ont conduit à la fusion du cœur d'un ou plusieurs réacteurs. Pour éviter d'en arriver là, c'est toute la séquence d'événements qui peut y mener qu'il faut maîtriser.

Parmi les divers scénarios possibles, le projet expérimental Perfroï, piloté par l'IRSN⁽¹⁾, s'intéresse à un type d'accident que les spécialistes désignent par le sigle APRP, pour Accident de Perte de Réfrigérant Primaire. Il recouvre les situations où une brèche affectant le circuit primaire du réacteur provoque une fuite (voir infographie page suivante). Dans un réacteur à eau sous pression,

le circuit primaire assure la transmission de la chaleur dégagée par le cœur, où se produisent les réactions de fission nucléaire, aux générateurs de vapeur. L'eau y circule à une température moyenne d'environ 300 °C et à une pression de 155 bars. Une fuite de ce circuit de refroidissement entraîne donc une dépressurisation du circuit primaire et, pour les fuites importantes, un dénoyage du cœur qui conduit à une augmentation de la température des crayons de combustible. Aussitôt la dépressurisation détectée, le réacteur est automatiquement arrêté et une injection d'eau par des pompes de secours est mise en service : il faut en effet rétablir rapidement puis maintenir un niveau d'eau suffisant dans la cuve du réacteur pour assurer le refroidissement des crayons de combustible et éviter l'accident grave.

> Deux critères sont à respecter impérativement dans les études de sûreté au niveau des crayons de combustible pour éviter leur fragilisation lors de cette phase, dite de renoyage, voire leur effondrement qui pourrait aboutir à un accident grave : une température maximale de 1204 °C associée à un taux d'oxydation maximal des gaines de l'ordre de 20 %.

Mais en dessous de ces limites, comment réagissent à ces conditions accidentelles les crayons qui contiennent les pastilles de combustible dans le cœur du réacteur ? Comment résiste la gaine de ces crayons qui garantit le confinement du combustible irradié et des gaz de fission produits lors des réactions nucléaires et qui constitue à ce titre la première barrière de confinement du réacteur ? (voir infographie ci-dessous). Faute d'être suffisamment refroidie alors qu'elle est soumise à des variations de pression, elle peut se déformer jusqu'à éclater. Georges Repetto, responsable du projet Perfroï, explique pourquoi : « Au sein des crayons, la pression est d'environ 100 bars. La cuve du réacteur, elle, est pressurisée à 155 bars. Une brèche sur le circuit de refroidissement fait chuter la pression, et si la taille de la brèche est très importante, on peut passer très rapidement de 155 à 3 bars. Résultat, sous l'effet de sa pression interne plus forte, la gaine gonfle comme un ballon de baudruche. De plus avec la chute de pression, l'eau se vaporise. Le matériau de gainage, normalement à 350 °C, monte alors en température : il peut atteindre entre 600 et 900 °C et perdre ses propriétés mécaniques. »

Le scénario varie donc selon la taille initiale de la brèche. Le cas d'une dépressurisation quasi immédiate à 3 bars est extrême, puisqu'il correspond à une rupture de la canalisation du circuit primaire sur toute sa section (0,8 mètre) et n'a jamais eu lieu. À l'autre bout du spectre, le cas d'une toute petite brèche de quelques centimètres seulement doit également être examiné pour vérifier que les systèmes de contrôle de la centrale permettent de gérer la situation. Entre ces deux

extrêmes, toutes les tailles de brèche doivent être envisagées car elles peuvent chacune poser des problèmes spécifiques différents.

DÉFORMATION EN BALLONS

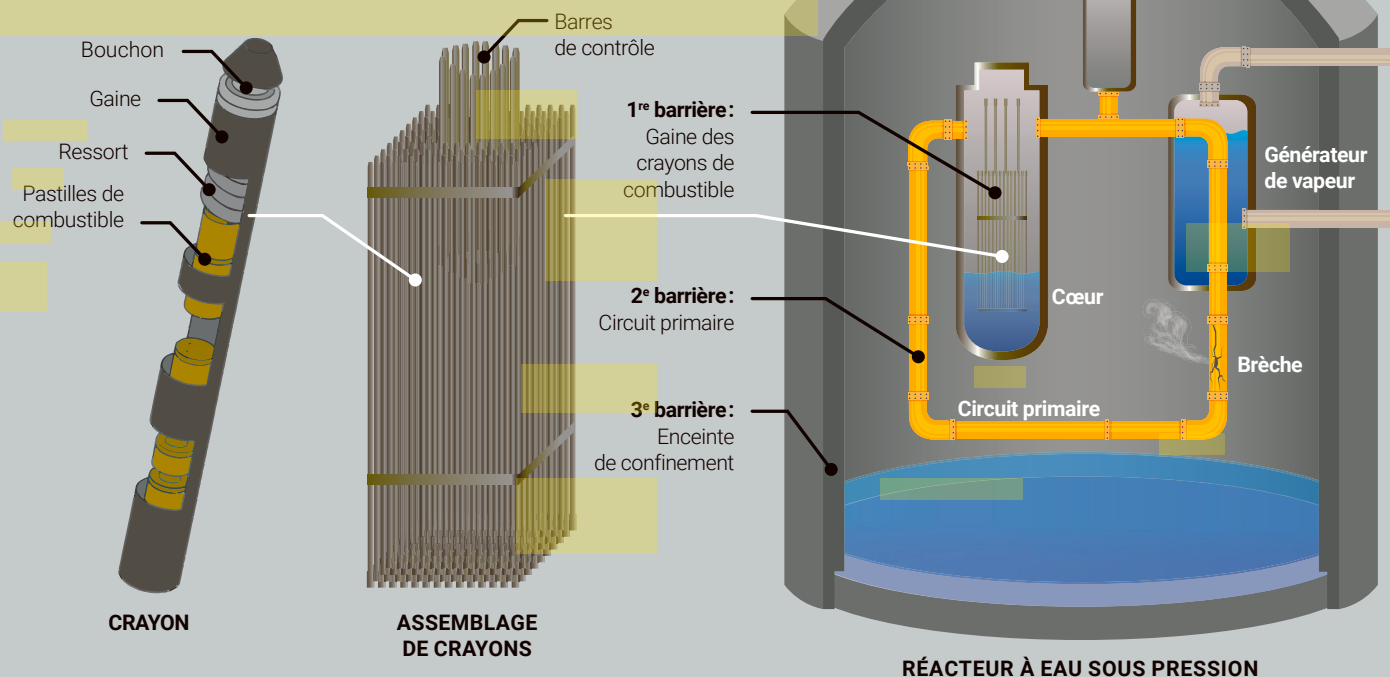
Ce sont ces situations que le projet PERFROI cherche à explorer pour anticiper l'évolution de la gaine des crayons. Car même si celle-ci ne va pas jusqu'à éclater, la déformation en « ballons » a des conséquences sur le refroidissement du cœur du réacteur. Premièrement, cette configuration de crayons gonflés peut empêcher l'eau injectée par les systèmes de secours de bien circuler – on parle de « bouchage » –. Deuxièmement, les pastilles de combustible, irradiées et fragmentées, peuvent se redistribuer par gravité dans ces ballons et augmenter localement la puissance thermique résiduelle.

Est-il alors encore possible de les refroidir efficacement ? Jusque-là, on se fondait essentiellement sur des résultats expérimentaux obtenus dans les années 1980 par la communauté internationale. Ces résultats avaient montré que le taux de « bouchage » maximal atteint était de 90 % et que même dans ce cas extrême, l'eau circulait. Mais il y a une quinzaine d'années, l'analyse exhaustive de l'état des connaissances menée par l'équipe de l'IRSN a révélé les limites de ces programmes expérimentaux. L'analyse pointait en particulier le fait que la source de chaleur électrique placée au centre des crayons expérimentaux pour reproduire la puissance thermique résiduelle n'était pas en contact avec la gaine, alors que c'est le cas dans un crayon irradié, et ne permettait pas de simuler correctement l'inertie thermique de ce crayon. Elle soulignait également un autre manque important : la surpuissance locale liée à la relocalisation du combustible fragmenté dans la gaine déformée, qui peut être d'un facteur 1,5, n'était pas prise en compte.

Depuis cet état des lieux, l'IRSN a cherché à répondre aux questions restées ouvertes : quel est réellement le taux de bouchage maximal ?

LES TROIS BARRIÈRES

Dans un réacteur à eau pressurisée, trois barrières sont prévues pour empêcher la dissémination de produits radioactifs dans la centrale et, au-delà, dans l'environnement : la gaine du combustible, le circuit primaire, et l'enceinte du réacteur. Dans le scénario d'un accident provoqué par une brèche sur le circuit primaire (ci-contre), il est crucial de limiter la dégradation de la première barrière, la gaine des crayons.



Est-il acceptable ? Quel est l'impact de la relocalisation du combustible fragmenté ? Pour cela, l'équipe de Georges Repetto a proposé un nouveau programme expérimental.

Mais face au coût onéreux des dispositifs à mettre en œuvre, l'IRSN a d'abord opté pour une approche de modélisation numérique. Ainsi, à partir de 2006, a été développé le code de calcul Draccar qui décrit l'ensemble des phénomènes en jeu : de la déformation des crayons jusqu'aux échanges thermiques lors de la phase dite « derénuyage » – c'est-à-dire la phase d'injection d'eau de secours – dans des configurations de crayons déformés. Reste que les expériences sont nécessaires pour calibrer et valider ces modèles. C'est tout l'enjeu du projet PERFROI.

PREMIERS TESTS THERMOMÉCANIQUES

Le premier volet expérimental a démarré en 2014. Il était d'abord indispensable de connaître précisément l'évolution des propriétés mécaniques du matériau. C'était l'objectif de l'expérience Elfe qui a permis de mesurer la résistance mécanique et établir les lois de fluage et les critères de rupture sur des échantillons de 10 centimètres de long de zircaloy – matériau qui constitue la gaine du combustible – soumis à des température allant de 600 à 900 °C. Autant de données nécessaires pour dimensionner l'étape suivante, l'expérience Cocagne, réalisée, elle, de 2016 à 2020 (voir photo et légende ci-contre).

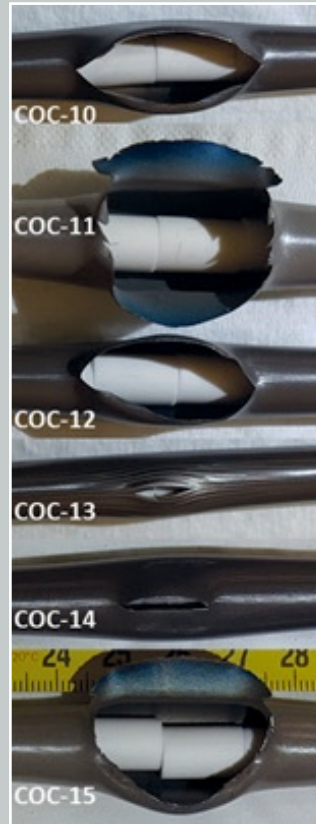
Cette fois, le dispositif testait la déformation d'un tronçon de crayon, un tube de gaine de 60 centimètres. Pour une pression interne donnée, chaque test a suivi le gonflement du crayon jusqu'à sa rupture en faisant monter la température jusqu'à 1 000 °C. Vingt-cinq tests, allant de 20 à 100 bars, ont été menés. Et pour la première fois, grâce à un système de contraintes internes exercées sur la paroi du crayon, ce dispositif permettait de simuler les contacts avec les crayons voisins déformés pour évaluer leur impact sur la longueur et la forme finale du ballon et par conséquent sur le taux de bouchage.

Les analyses définitives sont attendues pour la fin 2021, mais deux résultats importants ont déjà été présentés en avril 2021. Le premier confirme que le taux de bouchage n'excède pas les 90 %. Le deuxième est plus inattendu : aucune des vingt-cinq expériences ne montre de déformation axiale privilégiée liée aux contacts avec les crayons voisins. On prévoyait que cela aurait pour effet d'allonger les parties gonflées du crayon et ce n'est pas le cas. Les ballons entravent moins qu'attendu l'écoulement de l'eau.

Entre-temps, le deuxième volet du projet, l'expérience Coal qui reproduit la phase de « renuyage » des crayons de combustible proprement dite, a démarré en octobre 2020 dans une installation de Stern Laboratories, au Canada. L'eau est injectée dans un assemblage de quarante-neuf (7x7) crayons expérimentaux de 3 mètres de long, toujours chauffés électriquement, mais en prenant en compte les analyses des expériences menées depuis 2006, afin d'améliorer les modèles expérimentaux pour reproduire correctement l'inertie thermique des crayons.

La toute première campagne d'essai a d'abord mis en jeu une géométrie de référence de crayons tous intacts. Des essais ont été réalisés avec une pression du fluide de 2 à 30 bars. Les premiers résultats valident globalement les calculs du logiciel Draccar pour les plus hautes pressions, de 10 à 30 bars. En revanche, ils montrent que, pour les pressions les plus basses, entre 2 et 10 bars, l'outil de simulation numérique a tendance à accélérer le renuyage, il devra donc être amélioré à l'avenir.

Ensuite, pour reproduire une zone de cœur de réacteur partiellement bouchée, seize crayons de l'assemblage sont déformés avant le test. La géométrie de l'assemblage des crayons déformés (taux de



ESSAIS SUR TUBE

Lors de l'expérience Cocagne, chaque test consistait à suivre la déformation mécanique d'un tube de gaine de combustible de 60 centimètres de long chauffé jusqu'à 1000 °C, pour une pression interne donnée. Et ce jusqu'à la rupture de la gaine. Sur ces images, figurent les résultats de six des vingt-cinq tests.

Les images 11 et 15 montrent particulièrement l'éclatement du « ballon » de quelques centimètres de long formé par gonflement du crayon.

D'ailleurs, dans l'ensemble de ces résultats, la longueur des ballons ne dépasse jamais les 10 centimètres.

bouchage, longueur des ballons) est donc fixée au préalable. Au moment de l'injection d'eau, une surchauffe locale dans la zone déformée est maintenue pour tenir compte de l'effet de relocalisation du combustible fracturé par l'irradiation, le fameux facteur 1,5.

Puis, dans cette configuration donnée, on fait varier les paramètres de manière à simuler différentes tailles de brèches du circuit primaire : la pression (de 2 à 30 bars), le débit d'injection de l'eau (de 17 à 80 kg.s⁻¹.m⁻²), la puissance résiduelle dans les crayons (de 2 à 3,3 kilowatts par crayon). Vingt-cinq à trente essais sont nécessaires par campagne pour couvrir l'ensemble des scénarios retenus.

Les deux autres campagnes vont tester deux géométries de crayons ballonnés, reproduisant respectivement un taux de bouchage de 80 % avec des ballons de 10 centimètres de long et un taux de bouchage de 90 % avec des ballons de 30 centimètres. La dernière simule le maximum de déformation et de bouchage, autrement dit, le pire des cas. Et l'on sait déjà que cette configuration majeure largement les déformations en ballons, puisque selon les essais de l'expérience Cocagne, leur longueur ne dépasse jamais les 10 centimètres. La deuxième campagne s'est déroulée en juin et juillet 2021, les analyses sont en cours, et la troisième aura lieu en fin d'année. L'ensemble des résultats servira à valider et améliorer le code de simulation numérique Draccar, qui pourra alors être utilisé avec un niveau de confiance accru pour mener des études de sûreté d'autres séquences accidentelles susceptibles d'affecter un réacteur nucléaire. ■

RÉFÉRENCES

- > C. Dominguez, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 511, p 446-458, 2018.
- > T. Glantz et al., *Nuclear Engineering and Design*, vol. 339, p 269-285, 2018.
- > G. Repetto et al., *19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Bruxelles, Belgique, 6 au 11 Mars 2022.

⁽¹⁾ Ce projet a été financé dans le cadre du projet RSNR (Recherche en matière de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection) géré par l'Agence nationale de la Recherche (ANR), avec la participation de l'USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission), de KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) et d'EDF.