

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 températures 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).

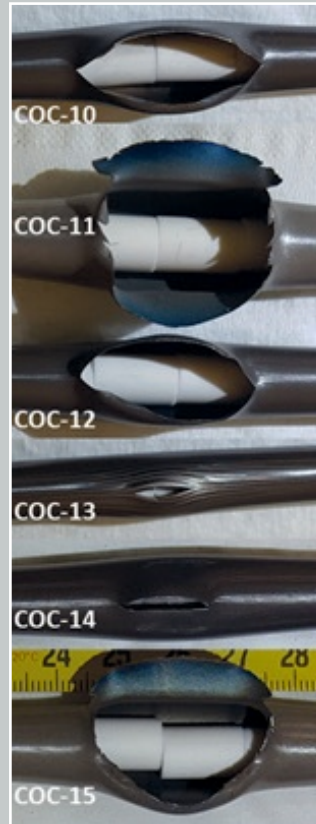
Cette fois, le dispositif testait la déformation d'un tronçon de crayon, un tube de gaine de 60 centimètres. Pour une pression interne donnée, chaque test a suivi le gonflement du crayon jusqu'à sa rupture en faisant monter la température jusqu'à 1 000 °C. Vingt-cinq tests, allant de 20 à 100 bars, ont 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 1 000 °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.

L'ESSENTIEL

> En 1955, à Los Alamos, aux États-Unis, eut lieu la première expérience numérique, dite « de Fermi-Pasta-Ulam » en l'honneur des trois physiciens qui l'ont réalisée : Enrico Fermi, John Pasta et Stanislaw Ulam.

> Cette expérience devrait pourtant être « de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou », en l'honneur

de la jeune informaticienne, Mary Tsingou, qui conçut l'algorithme sur lequel la simulation reposait, le coda et fit tourner l'ordinateur.

> L'expérience a été l'un des points de départ d'un fort engouement pour la physique hors équilibre, dont les répercussions sont encore nombreuses aujourd'hui.

L'AUTEUR



THIERRY DAUXOIS
directeur de l'institut de physique du CNRS, directeur de recherche au CNRS au sein du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon

Mary Tsingou

dans l'ombre de la première expérience numérique

Embauchée dans les années 1950 à Los Alamos pour effectuer des calculs à la main, la mathématicienne, aujourd'hui tombée dans l'oubli, était pourtant une pionnière en programmation.

La programmation de la toute première expérience numérique, dite « de Fermi-Pasta-Ulam », a été effectuée par une jeune femme nommée Mary Tsingou, dont le nom a été malencontreusement oublié. Après plusieurs années de recherches infructueuses, il m'a été possible de retrouver sa trace, tout près du lieu de ses premiers travaux.

Cette simulation numérique est d'une importance capitale en physique non linéaire. Il est temps de faire réapparaître le nom de Mary Tsingou, écrit à l'encre sympathique sur l'article fondateur, comme nous allons le voir.

LE PROBLÈME DE FERMİ-PASTA-ULAM

D'abord décrit dans un rapport classifié de Los Alamos en mai 1955, le problème de Fermi-Pasta-Ulam est souvent considéré comme le point de départ d'un nouveau domaine, la physique non linéaire; mais c'est aussi la toute première expérience numérique. L'idée était de simuler l'analogie unidimensionnel d'atomes dans un cristal: une longue

chaîne de masses reliées par des ressorts qui obéissent à la loi de Hooke.

Cette loi modélise de façon linéaire le comportement de systèmes élastiques soumis à des contraintes en stipulant que leur déformation – ici l'allongement des ressorts – est proportionnelle à la force exercée. On considère par ailleurs qu'il n'y a aucune perte d'énergie: les masses oscillent dans une seule direction et sans frottements.

Dans cette configuration, lorsque l'on excite la chaîne selon un certain mode de vibration, l'énergie associée à ce mode reste stable, car elle n'est pas transmise aux autres modes de vibration. Mais l'idée était ici de s'approcher de conditions réelles en ajoutant une composante non linéaire au dispositif, c'est-à-dire un faible terme non linéaire signifiant que la réaction des ressorts n'est plus proportionnelle à la force exercée. Dans ce cas, un transfert d'énergie est possible entre les modes.

Dans certaines conditions, cependant, ce système dans sa version faiblement non linéaire présente un comportement surprenant: il n'évolue pas vers l'équipartition de l'énergie entre les modes de vibration prévue par la physique



MARY TSINGOU

En 1952, avec d'autres jeunes mathématiciennes, Mary Tsingou (ici en 1955) fut embauchée comme calculatrice à Los Alamos. On lui proposa vite d'apprendre à utiliser un nouvel ordinateur, le *Maniac I*, construit dans le cadre du projet Manhattan (ci-contre).