

Three Mile Island, aux États-Unis, la centrale où a eu lieu le premier accident nucléaire majeur.

Comprendre et prévenir la fusion du cœur d'un réacteur nucléaire

CONTEXTE

Trente ans après le début du nucléaire civil, un accident de fusion partielle du cœur d'un des réacteurs de la centrale américaine de Three Mile Island remet en cause l'efficacité des dispositions de sûreté, provoquant un électrochoc parmi

les spécialistes et l'opinion publique. Depuis, la catastrophe de Fukushima Daiichi, au Japon, en 2011, a mis en exergue l'importance de consolider les mesures prises depuis 1979 en tenant compte cette fois d'agressions externes extrêmes.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Depuis les années 1980, l'IRSN développe un logiciel baptisé Astec pour simuler les phénomènes physiques très complexes intervenant au cours d'un accident majeur. Sans cesse amélioré grâce à des travaux de recherche internationaux, largement diffusé dans le monde, c'est un outil fondamental pour étudier les dispositions de sûreté de la plupart des réacteurs électronucléaires ou expérimentaux ainsi que d'autres installations du cycle du combustible.

Le 28 mars 1979, en Pennsylvanie, aux États-Unis, une succession de défaillances techniques et d'erreurs humaines va conduire à une fusion partielle du cœur d'un réacteur de la centrale nucléaire de Three Mile Island. Confrontés à des informations qu'ils peinent à comprendre, les responsables de la centrale et les autorités mettent du temps à diagnostiquer l'accident en cours et à prendre les bonnes décisions. Il faut dire qu'à l'époque, les accidents conduisant à une fusion du cœur étaient jugés fortement improbables pour ce modèle de réacteur à eau sous pression, très proche des centrales françaises actuelles. Au terme de longues heures, les opérateurs réussirent finalement à refroidir suffisamment le cœur du réacteur et à éviter qu'un relâchement important de radioactivité dans l'environnement ne survienne.

Cet accident a marqué un tournant dans l'approche de la sûreté des installations nucléaires. La gestion accidentelle a été revue en profondeur, pour mieux tenir compte des aspects organisationnels et humains, et des programmes de recherche importants ont été lancés pour mieux connaître les mécanismes physiques intervenant lors d'un accident de fusion du cœur. Des logiciels de simulation ont alors été développés pour en prédire le déroulement, en évaluer les conséquences et apprécier l'efficacité des différentes mesures destinées à les prévenir sinon à en limiter les effets.

SIMULER L'ENCHAÎNEMENT DE PHÉNOMÈNES

Les logiciels développés sont dits « intégraux », car ils prennent en compte la complexité du processus d'accident de fusion, des défaillances matérielles ou des erreurs humaines jusqu'à la perte possible des systèmes de refroidissement conduisant à la dégradation progressive du réacteur. En fonctionnement normal, les réactions nucléaires engendrent des produits de fission*, radioactifs, qui continuent à dégager de la chaleur après l'arrêt du réacteur (de l'ordre de 50 mégawatts (MW) une heure après). Si elle n'est pas évacuée, elle provoque d'abord l'évaporation de l'eau du circuit primaire puis l'oxydation des gaines en zirconium qui entourent le combustible, produisant alors de l'hydrogène et encore plus de chaleur qui s'ajoute à celle issue des produits de fission.

Cette accumulation de chaleur conduit à une montée en température puis à la fusion des composants du cœur : gaines du combustible en zirconium, combustible sous forme de dioxyde d'uranium, structures internes à la cuve du réacteur en acier, éléments de contrôle de la réaction nucléaire notamment à base de carbure de bore ou d'un alliage d'argent, indium et cadmium. Les matériaux fondus forment un magma qui peut atteindre plus de 2500 °C, c'est ce qu'on appelle le « corium » (voir « *Accident nucléaire : comment contenir le cœur fondu d'un réacteur ?* », juillet 2020). ➤

* Les produits de fission regroupent les différents atomes issus d'une réaction de fission, à savoir :

- les noyaux créés par la « première » fission nucléaire, les produits « filles » ;
- les noyaux issus d'un atome fille instable (qui utilise la désintégration pour se stabiliser), les « petits enfants ».

> Celui-ci s'écoule d'abord dans le fond de la cuve du réacteur jusqu'à la percer et éroder le socle en béton de l'enceinte de confinement, tout en continuant à produire de l'hydrogène. L'enceinte, dernière barrière entre les produits est mise à rude épreuve: elle monte progressivement en pression à cause de la vapeur d'eau et de l'hydrogène produits, ce dernier pouvant exploser.

Au cours d'un tel accident, des produits de fission peuvent être relâchés dans l'environnement sous forme de gaz et d'aérosols. Afin de déterminer leur quantité et leur nature, les logiciels de simulation modélisent les mécanismes qui contrôlent leur transport et leur dépôt dans les circuits et l'enceinte de confinement. Ils modélisent également les systèmes de sûreté permettant de limiter les conséquences de l'accident, tels que les « recombineurs hydrogène » utilisés en France pour réduire le risque d'explosion lié à l'hydrogène, et les actions mises en œuvre par l'exploitant.

À la suite des premiers logiciels intégraux, Maap et Melcor, développés aux États-Unis au début des années 1980, l'IRSN a conçu Astec (Accident Source Term Evaluation Code) avec le soutien de la Commission Européenne afin de disposer de son propre outil d'évaluation. Depuis, il est utilisé par une trentaine d'organismes licenciés dans le monde, parmi lesquels des autorités de sûreté, des organisations de techniques de sûreté, des exploitants et des organismes de recherche. En contrepartie, ces organismes contribuent à la validation et à la robustesse du logiciel en l'appliquant à la plupart des concepts de réacteurs électronucléaires dans le monde.

Pour sa part, l'IRSN utilise Astec afin d'évaluer les dossiers de sûreté que les exploitants déposent auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). « Nous menons également des analyses probabilistes de sûreté en simulant de nombreuses possibilités de cumulés et d'enchaînements d'événements accidentels jusqu'aux

conséquences en matière de contamination de l'environnement ou d'exposition du public, à l'aide, parfois, d'outils couplés à Astec, complète Lionel Chailan, responsable du projet de développement du code Astec. Nous avons ainsi une vue globale de la sûreté des réacteurs intégrant aussi bien la tenue des équipements que les actions des opérateurs. »

UN OUTIL EN CONSTANTE ÉVOLUTION

Les analyses faites *a posteriori* dans les réacteurs accidentés comme Three Mile Island fournissent des informations essentielles pour valider ces codes. En outre, des expérimentations permettent d'approfondir les connaissances fondamentales. Elles sont en général menées dans le cadre de coopérations internationales compte tenu de l'ampleur des essais, des moyens techniques, humains et financiers qu'ils réclament mais aussi du large intérêt qu'elles suscitent. Ainsi, à partir de 1988, l'IRSN a lancé, en partenariat avec la Commission européenne, les États-Unis, le Canada, le Japon, la Corée du Sud et la Suisse, un programme d'expérimentations uniques au monde dans un réacteur baptisé Phébus, implanté à Cadarache. Phébus est un véritable réacteur à eau sous pression à échelle réduite, représentatif des conditions réelles de fonctionnement. Entre 1993 et 2004, cinq essais de fusion de cœur ont été réalisés dans cette installation, depuis en cours de démantèlement. Ces essais ont permis de mettre en évidence des phénomènes physiques inattendus et d'acquérir une quantité considérable de connaissances théoriques qui continuent à être exploitées.

En plus des essais intégraux sur Phébus qui tiennent compte de presque tous les composants d'un réacteur, Astec se nourrit et évolue sans cesse grâce aux résultats d'expériences ciblées sur des points particuliers. « Nous découpons le problème en briques élémentaires, analysées séparément dans des centaines de dispositifs

expérimentaux dans le monde, explique Lionel Chailan. Cela va de l'étude d'une réaction chimique réalisée sur un matériau sous irradiation à celle du comportement d'un assemblage de combustible dans un réacteur. Nous étudions ainsi tous les phénomènes thermohydrauliques (le comportement de l'eau et les transferts de chaleur), thermodynamiques (impacts sur le comportement des matériaux), ceux qui sont liés à la chimie, à la radiochimie (chimie sous irradiation), à l'aérodynamique (écoulement de l'air), à la combustion ou encore à la physique des aérosols ou à la physique nucléaire. »

À l'image de ces briques élémentaires, Astec se décompose en modules, dont chacun représente un phénomène ou une zone de l'installation et peut ainsi être validé séparément. « À partir de conditions expérimentales associées à diverses hypothèses accidentelles, nous comparons les résultats de nos simulations à ceux des essais. Cela nous permet de mieux comprendre la physique en jeu et d'affiner les modèles. Au fur et à mesure, nous capitalisons ces résultats dans une base de données en veillant simultanément à ne pas dégrader les précédents acquis de validation. »

Le logiciel a été développé pour étudier les réacteurs à eau sous pression exploités actuellement par EDF en France, mais il permet également de simuler d'autres types de réacteurs, voire d'autres types d'installations. Par exemple, lors de l'accident de Fukushima Daiichi, il a été utilisé pour calculer, presque en temps réel, les phénomènes en cours dans les réacteurs en fusion de la centrale japonaise, bien que ceux-ci soient des réacteurs à eau bouillante qui diffèrent des réacteurs français. Plus récemment, il a permis d'évaluer les risques de rejets radioactifs de l'ensemble des installations nucléaires ukrainiennes, notamment des réacteurs de conception soviétique de la centrale de Zaporijjia. Les exploitants militaires l'utilisent également pour concevoir ou évaluer la sûreté de leurs chaufferies nucléaires de sous-marins et de porte-avions.

L'EXPÉRIMENTATION PERMET DES PROGRÈS CONSTANTS DANS LA MODÉLISATION DE LA DÉGRADATION DU CŒUR

La caractérisation des éléments fondus récupérés à l'issue des expérimentations dans Phébus a révélé des interactions insoupçonnées entre différents matériaux. Ainsi, le dioxyde d'uranium du combustible, en réagissant avec le zirconium des gaines qui l'entourent, forme un nouveau matériau qui entre en fusion à 2 700 °C au lieu de 3 000 °C. En combinant les résultats expérimentaux et des calculs purement théoriques, les bases thermodynamiques des phénomènes ont pu être établies. Les essais ont également mis en exergue l'importance de modéliser la dégradation du cœur en tenant compte du mélange des différents débris solides fragmentés (combustible, gaines ainsi que d'autres éléments) et de plusieurs mélanges de matériaux en phase liquide. Les processus de dégradation sont fortement couplés à la thermohydraulique de l'eau, liquide et sous forme vapeur, restant dans le circuit.

METTRE EN LUMIÈRE DES PHÉNOMÈNES INATTENDUS

« Par rapport aux autres logiciels intégraux, Astec permet une modélisation plus fine de la chimie, notamment des produits de fission comme l'iode », ajoute Lionel Chailan (voir « L'iode radioactif volatil, l'iode un gaz à piéger », décembre 2020). L'iode est un des contributeurs majeurs en cas de rejets dans l'environnement consécutif à un accident de réacteur nucléaire, et il est parmi les plus dangereux pendant les premiers jours après le relâchement. Savoir sous quelle forme il se répand (gaz, aérosols, composés organiques, minéraux, etc.) est fondamental pour protéger les populations vivant à proximité d'une centrale. C'est grâce aux essais menés dans Phébus que les chercheurs et ingénieurs en sûreté ont compris à quel point le comportement de cet élément était mal connu, en particulier sa répartition sous forme gazeuse ou d'aérosols. Un programme de recherche mis en œuvre dans la foulée a permis de préciser les différentes formes d'iode produites et de comprendre leurs interactions. Elles s'avèrent largement influencées par la température, l'hygrométrie et les rayonnements dus aux produits de fission radioactifs. Ces nouvelles connaissances ont permis, entre autres, d'améliorer les dispositifs de filtration de rejets pour les rendre plus efficaces.

« Astec est un outil indispensable pour évaluer la sûreté nucléaire et assurer la protection de l'homme et de l'environnement, résume Lionel Chailan. Il nous a permis de traiter les phénomènes et situations qui nous paraissaient les plus importants pour le parc nucléaire actuel. Nous veillons à le maintenir à l'état de l'art pour répondre aux besoins de connaissance associés à la sûreté des nouvelles installations comme les SMR (small modular reactor), à l'utilisation de nouveaux combustibles de type ATF (advanced tolerant fuel) ou encore à la future installation de fusion nucléaire, Iter, en construction à Cadarache. » Le logiciel est par ailleurs régulièrement utilisé dans le cadre de projets de recherche européens. ■

RÉFÉRENCES

> Didier Jacquemain (coordinateur), Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance. État des connaissances, edpSciences, 2013.

ASTEC MODÉLISE LES DIFFÉRENTES PHASES D'UN ACCIDENT

En cas d'accident, bien que le réacteur soit arrêté, les produits de fission continuent de dégager de la chaleur dans la cuve remplie d'eau (1). Dans le cas où il est impossible de refroidir le cœur, l'eau s'évapore et cette vapeur d'eau oxyde le combustible produisant encore plus de chaleur et de l'hydrogène (2). Ces gaines se percent libérant des gaz de fission radioactifs dans la cuve et notamment des espèces iodées (3). Les composants du cœur fondent et se mélangent sous la forme d'un magma appelé « corium » qui perce le fond de la cuve en acier et se déverse sur le plancher en béton (4) en produisant beaucoup de gaz dans l'enceinte de confinement, dont une grande quantité d'hydrogène qui peut exploser au contact de l'air (5). Le corium risque alors de percer le socle de l'enceinte, celle-ci pouvant par ailleurs être endommagée à d'autres endroits si la pression dépasse 5-6 bars dans les centrales actuelles, les éléments radioactifs étant alors relâchés dans l'environnement. L'aspersion permet de diminuer la pression dans l'enceinte tandis que les recombineurs d'hydrogène diminuent le risque d'explosion.

