

En 2011, des explosions d'hydrogène ont endommagé plusieurs réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon) aggravant encore les accidents en cours.

Réduire le risque d'explosion d'hydrogène lors d'un accident nucléaire

CONTEXTE

Lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire, de grandes quantités d'hydrogène peuvent être produites. Elles sont susceptibles d'exploser et d'endommager l'enceinte de confinement ainsi que différents systèmes

importants pour la gestion de l'accident. Ce risque, dit «risque hydrogène», identifié et étudié depuis les années 1980, est limité grâce à des recombineurs d'hydrogène, installés dans toutes les centrales françaises depuis 2007.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Comment limiter le risque lié à l'hydrogène? Des méthodologies permettent de l'évaluer et de vérifier la pertinence des stratégies envisageables pour le prévenir ou le limiter. Les décisions de l'exploitant pourraient notamment être guidées par la connaissance en temps réel de la composition des gaz dans l'enceinte de confinement. La mesure est délicate, mais une solution reposant sur la spectrométrie Raman semble prometteuse. Un prototype préindustriel a été développé.

Le 11 mars 2011, un séisme suivi de peu d'un tsunami endommagent gravement quatre réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, au Japon. Le scénario du pire se réalise: les cœurs des réacteurs ne peuvent plus être refroidis. Dès le lendemain, une première explosion, liée à l'hydrogène, survient dans le bâtiment du réacteur 1, puis dans les trois autres, aggravant fortement les situations accidentelles et les rejets radioactifs dans l'environnement.

Le risque lié à l'hydrogène est bien connu, investigué depuis les années 1980 à la suite du premier accident nucléaire majeur, dans un réacteur de la centrale de Three Mile Island, aux États-Unis. L'enchaînement des phénomènes est le suivant: en cas de perte prolongée des systèmes de refroidissement du cœur d'un réacteur nucléaire, les crayons de combustible s'échauffent. Cela favorise une réaction chimique d'oxydation par la vapeur d'eau des gaines du combustible, faites de zirconium (un métal), puis du reste des structures métalliques du cœur du réacteur. Cette réaction produit du dihydrogène et est elle-même exothermique. Elle est susceptible de s'emballer si la vitesse à laquelle la chaleur est évacuée est très inférieure à celle qui est engendrée. Dans ce cas, les crayons de combustible peuvent

s'échauffer jusqu'à fondre. Cette réaction émet également une grande quantité d'hydrogène (H_2), gaz inflammable: «*Dans un réacteur de 900 mégawatts (le plus petit du parc électronucléaire actuel), l'oxydation totale des composants métalliques produirait environ 900 kilogrammes d'hydrogène*», précise Ahmed Bentaib, chercheur au service des accidents majeurs de l'IRSN.

Si aucun moyen de refroidissement suffisant n'est disponible, les matériaux fondus forment un magma, appelé «corium» (voir «*Accident nucléaire: comment contenir le cœur fondu d'un réacteur?*», *Pour la Science* n° 514, août 2020). Celui-ci s'écoule alors vers le fond de la cuve du réacteur jusqu'à la percer puis éroder le socle en béton de l'enceinte de confinement tout en continuant à produire de l'hydrogène ainsi qu'une quantité importante de monoxyde de carbone (CO), autre gaz inflammable.

Il y a des risques d'explosion dans ces différentes phases, car les gaz s'accumulent en nuages inflammables dans certaines zones de l'enceinte de confinement. La présence d'une source d'énergie très faible comme le contact avec une surface chaude à 580 °C suffit à déclencher l'inflammation. Celle-ci crée d'abord une flamme lente (vitesse de l'ordre du mètre par seconde) qui peut s'accélérer très fortement sous l'effet de la turbulence engendrée par la présence >

> d'obstacles et transiter vers le régime de la détonation (vitesse de l'ordre du kilomètre par seconde). Les pics de pression dus aux flammes ainsi accélérées sont susceptibles de menacer l'intégrité de l'enceinte de confinement du bâtiment réacteur ou d'y endommager des systèmes importants pour la sûreté.

RÉDUIRE LE RISQUE

Une des possibilités pour réduire le risque lié à l'hydrogène consiste à installer des recombineurs autocatalytiques passifs (voir schéma ci-contre). Grâce à des plaques catalytiques, ces systèmes recombinent l'hydrogène avec l'oxygène sous forme de vapeur d'eau et le monoxyde de carbone (CO) sous forme de dioxyde de carbone (CO₂). Cette réaction chimique étant exothermique, elle auto-entretient un tirage thermique passif des masses de gaz environnantes. À la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'IRSN a évalué les performances de ces dispositifs qu'EDF a installés dans tous les réacteurs français entre 2004 et 2007. Selon ses spécificités, chaque enceinte comporte ainsi vingt à cent seize recombineurs.

Après l'accident de Fukushima Daiichi, les évaluations complémentaires de sûreté menées en France par l'IRSN ont mis en exergue que l'efficacité de cette solution reste à démontrer dans certaines configurations. C'est le cas dans différents scénarios pour lesquels la cinétique de recombinaison peut être insuffisante. Par ailleurs, un bilan coordonné par l'IRSN en collaboration avec vingt-sept partenaires européens, canadiens et japonais a également mis en évidence le manque de connaissances concernant le fonctionnement des recombineurs lors des phases tardives d'un accident grave.

À ce stade, la faible teneur en oxygène de l'atmosphère de l'enceinte et la présence du monoxyde de carbone dégradent leurs performances. « Nous participons à des recherches dans le cadre du projet Amhyco, financé par la Commission européenne et piloté par l'université polytechnique de Madrid, pour y remédier, confie Ahmed Bentaib. Elles nous permettront de proposer des améliorations des guides de gestion du risque. »

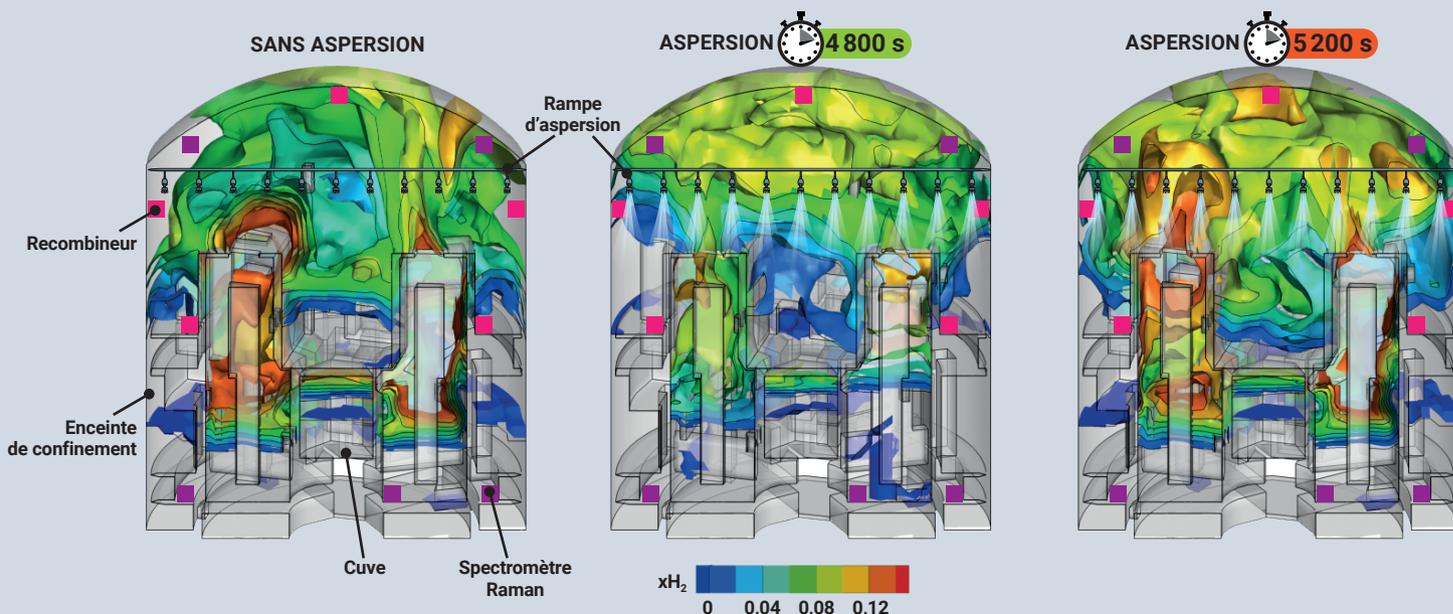
MAINTENIR LES OUTILS D'ÉVALUATION À L'ÉTAT DE L'ART

Le risque doit donc être évalué en tenant compte de la diversité des situations d'accident grave, des dispositions prévues par l'exploitant pour gérer l'accident et des moyens mis en œuvre. À cet effet, l'IRSN a développé une méthodologie d'évaluation en plusieurs étapes, incluant la sélection des scénarios pertinents en matière de risque lié à l'hydrogène. Ceux-ci ont été simulés au préalable avec le logiciel, baptisé Astec, qui calcule la progression et les conséquences des accidents graves depuis l'événement initiateur jusqu'aux rejets de radionucléides dans l'environnement (voir « Comprendre et prévenir la fusion du cœur d'un réacteur nucléaire », Pour la Science n° 548, juin 2023).

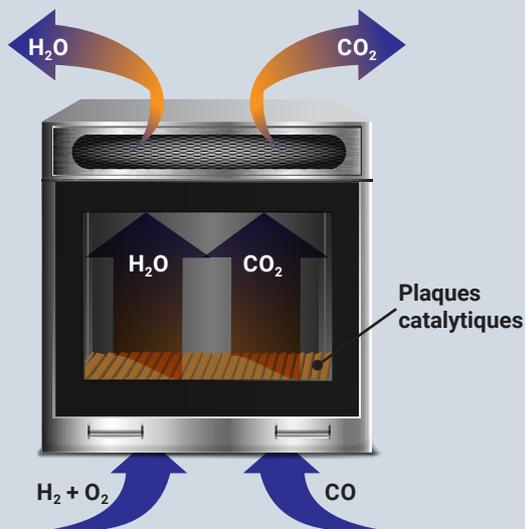
Cela fournit les données essentielles comme les cinétiques et la localisation de la production des différents gaz combustibles tout au long de l'accident. Ces informations servent de données d'entrée pour d'autres calculs plus détaillés et focalisés sur les phases pendant lesquelles le risque est le plus fort. Ces calculs, qui s'appuient sur la résolution en trois dimensions des équations de la mécanique des fluides, de la thermique et du transport des espèces gazeuses,

QUAND DÉCLENCHER L'ASPERSION D'EAU ?

Ces trois simulations sont des arrêts sur image à 5 300 secondes (environ une heure et vingt minutes) après le début d'un accident de fusion du cœur. Elles montrent la dispersion de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement du réacteur et l'importance du moment où le système d'aspersion d'eau est mis en service. Des dizaines de recombineurs (en rouge) limitent la teneur en hydrogène (x_{H_2} ici, la concentration en H₂ étant croissante du bleu au rouge). Sur la première image, le système d'aspersion n'a pas été déclenché. Sur les deux images suivantes, il l'a été, respectivement 4 800 secondes et 5 200 secondes après le début de l'accident. L'effet est considérable, à moins de 7 minutes d'écart : des concentrations locales très élevées apparaissent (comme dans la troisième image). Le risque est de favoriser la formation d'un nuage inflammable et de provoquer, en cas de combustion, ce qu'on appelle une « accélération de flamme » susceptible de menacer l'intégrité de l'enceinte de confinement. Les modélisations de l'IRSN montrent que retarder la mise en service de l'aspersion de trois à six heures après le début de l'accident permet de limiter le risque d'accélération de flamme. Une dizaine de spectromètres Raman (en violet) offrirait de mieux éclairer les opérateurs et les équipes de crise tout au long de l'accident en les renseignant sur la composition gazeuse dans l'enceinte.



PRINCIPE D'UN RECOMBINEUR AUTOCATALYTIQUE PASSIF



L'hydrogène (H_2) se recombine avec l'oxygène (O_2) au contact des plaques catalytiques (généralement en platine ou en palladium, en orange en partie basse du boîtier) pour former de la vapeur d'eau (H_2O). De même le monoxyde de carbone (CO) se transforme en dioxyde de carbone (CO_2). Ces dispositifs sont conçus comme des « cheminées » : la chaleur produite par les réactions chimiques exothermiques de recombinaison « tire » les gaz environnants thermiquement (effet cheminée), assurant ainsi un fonctionnement passif.

servent à évaluer l'impact des systèmes de sûreté tels que les recombineurs et l'aspersion d'eau, un système activé pour faire baisser la pression et rabattre les produits de fission vers le bas de l'enceinte de confinement.

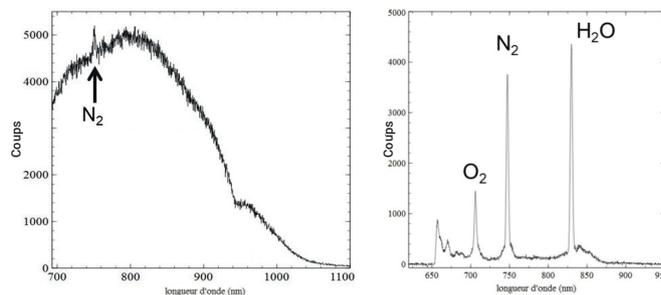
Ces calculs décrivent, de manière précise, l'évolution de l'atmosphère de l'enceinte de confinement au cours de l'accident. Grâce à cela, on peut identifier les nuages inflammables et le risque de flammes rapides en cas de combustion. Dans ces circonstances les calculs exécutés permettent d'évaluer les charges en pression et en température sur l'enceinte de confinement ainsi que sur les équipements de sûreté et d'en déduire les conséquences sur leurs fonctions. Pour cela, l'IRSN mène et participe à des programmes expérimentaux dont les résultats favorisent le maintien à l'état de l'art de ses outils.

MESURER LA COMPOSITION GAZEUSE DANS L'ENCEINTE

« Les simulations ont notamment montré qu'il fallait retarder la mise en service du système d'aspersion d'eau, précise Ahmed Bentaib (voir infographie ci-contre). Car celle-ci conduit à la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'enceinte de confinement, ce qui contribue à rendre son atmosphère plus inflammable. » De fait, il a été observé, expérimentalement et numériquement, que la mise en service de l'aspersion accentue la propagation des flammes dans certaines conditions, notamment en cas de fortes concentrations d'hydrogène. Cela est dû aux turbulences qu'elle engendre. Il est donc primordial de savoir quand la déclencher. « En la retardant de trois à six heures, on laisse le temps aux recombineurs de réduire fortement la concentration d'hydrogène, évitant ainsi les conditions qui favorisent l'accélération de flamme. » Cette recommandation a été intégrée dans la gestion des accidents graves en France.

« Pour réduire encore le risque lié à l'hydrogène et éclairer les opérateurs et les équipes de crise en charge de la gestion de l'accident, l'idéal serait de connaître avec précision la composition de l'atmosphère de l'enceinte de confinement au cours du temps, explique le chercheur. Nous avons fait une revue des technologies disponibles sur le marché. Nous avons abouti à la conclusion qu'aucun des systèmes de mesure existant ne répondait aux exigences de sûreté françaises, qui imposent que la mesure soit faite dans l'enceinte de confinement afin de ne pas créer de voie potentielle de bypass de l'enceinte. » Seule solution : développer un dispositif de mesure *in situ* suffisamment précis et robuste, capable de résister aux conditions qui règnent en situation d'accident grave dans le bâtiment.

Le système développé s'appuie sur la spectroscopie Raman, technique d'analyse optique (voir graphiques ci-dessous). Quel est son principe ? Sachant qu'un milieu modifie légèrement la fréquence de la lumière qui y circule selon les fréquences vibratoires des molécules présentes, la méthode consiste à envoyer une lumière laser dans un milieu et à analyser le décalage de fréquence de la lumière diffusée. Cela se traduit par un spectre (dit « spectre Raman ») dont les bandes sont caractéristiques des molécules présentes et de leur concentration. « Malheureusement, dans notre cas, la mesure est illisible, car les signaux optiques sont bruités à cause d'un phénomène appelé « effet Cerenkov », lié à l'irradiation », explique Ahmed Bentaib.



DES SPECTRES RAMAN ILLISIBLES

L'irradiation (ici 14 grays par heure, spectre de gauche) empêche de distinguer les bandes révélant la présence des molécules du milieu analysé (spectre de droite). C'est ce qu'on appelle l'« effet Cerenkov ». Ce problème a pu être surmonté via un traitement algorithmique du signal.

« Le défi était de concevoir un outil qui résiste aux conditions régnant dans l'enceinte de confinement en cas d'accident grave et tout particulièrement à l'irradiation, sachant que les débits de dose sont de l'ordre de 2 000 grays par heure en cas de fusion du cœur. Le premier prototype développé dans le cadre du projet Mithygène, en partenariat avec le CEA, le CNRS, l'Institut Jülich, en Allemagne, et le fabricant d'équipements électroniques Arcys, ne supportait pas plus de 30 grays par heure... », résume-t-il. Défi relevé. « Nous avons amélioré les performances de la sonde de spectroscopie Raman et développé des algorithmes de traitement de signal à même de surmonter les perturbations liées à l'effet Cerenkov », se félicite le chercheur.

Le prototype préindustriel actuel peut donc fonctionner *in situ* en cas d'accident grave. Et outre l'hydrogène, l'appareil détermine, en temps réel, la concentration de cinq autres gaz : oxygène, azote, vapeur d'eau, monoxyde et dioxyde de carbone. « À l'aide de simulations, nous avons aussi prouvé qu'une dizaine de sondes bien placées donne une image assez fidèle de la composition du mélange de gaz dans l'enceinte de confinement, ajoute Ahmed Bentaib. Cela n'avait encore jamais été fait. » Cette innovation est adaptée à tout type de réacteurs. Elle pourrait être déployée dans les nouveaux concepts de petits réacteurs modulaires, ou « SMR ». ■