



Annexe 6

Le risque hydrogène dans les enceintes des réacteurs du parc nucléaire français

1. Information générale

L'explosion d'hydrogène constitue une source d'accidents majeurs aussi bien dans les installations industrielles classiques que nucléaires. Dans les installations nucléaires, l'explosion d'hydrogène peut entraîner la perte de confinement des matières radioactives et, par conséquent, des rejets importants dans l'environnement.

Dans le contexte de l'étude des accidents avec fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression (REP), le « risque hydrogène » est défini comme la possibilité d'une perte de l'étanchéité ou de l'intégrité de l'enceinte de confinement du réacteur ou d'une défaillance des systèmes de sauvegarde du réacteur à la suite d'une combustion d'hydrogène. L'hydrogène est produit principalement par l'oxydation des métaux présents dans le cœur du réacteur (le zirconium des gaines des crayons combustibles essentiellement) lors de la dégradation de celui-ci et par l'oxydation des métaux présents dans le bain de corium ou dans le radier lors de l'interaction entre le corium et le béton.

L'hydrogène ainsi produit est relâché dans l'enceinte de confinement. La répartition de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement est plus ou moins homogène suivant l'intensité du brassage de son atmosphère (lié notamment aux boucles de convection résultant de la condensation de la vapeur dans l'enceinte de confinement). En cas de forte hétérogénéité, il peut exister des concentrations locales importantes d'hydrogène de telle sorte que le seuil d'inflammabilité du mélange gazeux peut être dépassé. Aussi, en présence de sources d'inflammation¹ (électriques, d'actionneurs, de points chauds..), il apparaît probable que l'inflammation se produise assez rapidement. Sous l'effet des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence, la déflagration initialement laminaire (vitesse de l'ordre du mètre par seconde) est susceptible de s'accélérer. Des régimes de combustion rapide peuvent ainsi être atteints : déflagration rapide (quelques centaines de mètres par seconde), Transition Déflagration Détonation (TDD) et détonation (plus de mille mètres par seconde). Ces phénomènes explosifs sont les plus menaçants et peuvent occasionner des chargements dynamiques locaux très importants sur la structure du confinement du réacteur et sur les équipements.

Pour limiter l'accumulation de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement des réacteurs, différentes stratégies ont été envisagées. Elles consistent à utiliser une ou une combinaison des solutions suivantes :

- provoquer l'inflammation de manière délibérée des nuages inflammables au fur et à mesure de leurs formations au moyen d'un système actif ; pour ce faire, des igniteurs sont utilisés sur certains réacteurs,
- consommer l'hydrogène au fur et à mesure de son relâchement dans l'enceinte de confinement en utilisant un système passif : les recombineurs catalytiques,

¹ L'énergie nécessaire pour enflammer un mélange air-H₂ à stœchiométrie est de l'ordre de 17 milli joules.

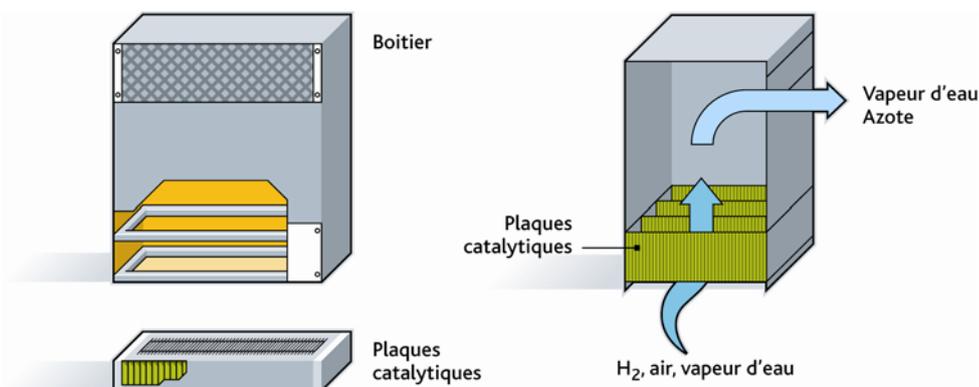
- diluer la concentration d'hydrogène dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement en utilisant des enceintes de confinement ayant un grand volume (système passif),
- injecter un gaz inerte tel que l'azote (système actif).

Aucun système d'éventage n'est préconisé pour limiter l'accumulation d'hydrogène dans les enceintes de confinement. En effet, l'utilisation d'un tel système peut au contraire amener à l'accumulation d'hydrogène dans les conduits de ce système ; cette accumulation est susceptible de conduire à une détonation et par conséquent à la perte du système d'éventage et à la perte de confinement des matières radioactives². Le rôle des systèmes d'éventage est uniquement d'éviter une montée en pression des enceintes au-delà de la pression de dimensionnement et donc leur endommagement. Ils doivent donc être capables de filtrer les rejets et de résister aux conditions d'un accident grave.

2. Informations sur les REP français

Pour les REPs français, la stratégie choisie combine la conception d'enceintes de grand volume et l'installation des recombineurs auto catalytiques passifs (RAPs), installés sur l'ensemble des réacteurs du parc électronucléaire français depuis 2007. Le choix a été fait de ne pas utiliser d'igniteurs en raison du risque de démarrage intempestif au plus mauvais moment si ces derniers présentaient un défaut d'allumage.

Le principe de fonctionnement d'un recombineur catalytique passif d'hydrogène est le suivant (voir schéma ci-dessous) : l'hydrogène, mélangé à l'oxygène, à l'azote et à la vapeur d'eau contenus dans l'atmosphère de l'enceinte, est recombéné en vapeur d'eau au contact de plaques catalytiques.



La décision d'équiper le parc français de PARs a été confortée par les résultats de programmes de recherche menés à l'IRSN dans le cadre de projets nationaux et internationaux sur le « risque hydrogène ».

Les recombineurs sont ainsi conçus pour fonctionner dans les conditions de pression, de température, d'humidité et d'ambiance radioactive correspondant aux conditions rencontrées lors d'un accident grave et la qualification des matériels tient compte des risques d'empoisonnement des plaques catalytiques par les aérosols provenant du cœur fondu et de l'acide borique provenant du fonctionnement du système d'aspersion. Les recombineurs sont également dimensionnés pour résister aux chargements dus aux températures et aux pressions pouvant résulter d'un accident grave, pour rester intègres en cas d'un séisme, et fonctionnent à partir d'une concentration en hydrogène d'environ 2 % en volume.

L'équipement des enceintes de réacteur en recombineurs a été dimensionné de manière à ce que:

² Le risque de détonation d'hydrogène dans les conduits a été étudié par GRS pour les bouillants.

- les concentrations moyennes d'hydrogène dans l'enceinte de confinement ne dépassent pas 8 %vol évitant ainsi l'occurrence d'une combustion complète ;
- les concentrations locales d'hydrogène ne dépassent pas 10 %vol pour éviter l'occurrence de phénomènes de combustion dynamiques susceptibles de générer des chargements dynamiques capables d'endommager l'enceinte de confinement et les équipements importants pour la sûreté.

Ainsi, les enceintes des réacteurs de 900 MWe CPY sont équipées de 24 recombineurs type SIEMENS-AREVA (19 recombineurs de type FR90/1-1500 et 5 recombineurs de type FR90/1-750) correspondant à une capacité de recombinaison d'hydrogène de 111,6 kg/h (à 1,5 bar et pour une fraction molaire d'hydrogène de 4%).

Les enceintes des réacteurs 1300 et 1450 MWe sont équipées de 116 recombineurs de type AECL. La capacité de recombinaison de l'hydrogène correspondante est indiquée dans le tableau suivant :

Fraction molaire d'hydrogène (%)	Temperature moyenne (°c)	Taux de recombinaison (kg/h)
4%	80	109
	100	103
	120	97
8%	80	273
	100	257
	120	243

De manière générale, la cinétique de recombinaison est « lente » par rapport à la cinétique de la production d'hydrogène lors de l'oxydation des métaux dans la cuve (au tout début de la production d'hydrogène dans l'enceinte de confinement, la cinétique de production d'hydrogène peut excéder celle de la recombinaison d'un facteur 10).

Ainsi, malgré les performances affichées des recombineurs, les études réalisées, notamment dans le cadre des études probabilistes de sûreté, montrent que la formation d'un mélange hydrogène-oxygène susceptible de conduire à des phénomènes d'accélération locale de flamme ne peut être exclue en tous points de l'enceinte de confinement et à tout instant et quel que soit le scénario accidentel de fusion du cœur considéré.

Les scénarios pouvant conduire à un risque sont ceux qui conduiraient à une cinétique de production d'hydrogène en cuve « très importante » en regard de la cinétique de recombinaison par les recombineurs. Pour ces scénarios, la quantité d'hydrogène présente temporairement dans l'enceinte pourrait constituer une menace pour l'étanchéité du confinement. Des dispositions ont été retenues par EDF pour éviter certaines de ces situations, par exemple en limitant (pendant une durée réduite) des injections d'eau dans la cuve au début de la fusion du cœur (l'eau injectée pourrait temporairement accélérer l'oxydation des gaines sans refroidir le combustible).

En cas de rupture de la cuve, et relocalisation du combustible fondu (corium) dans le puits de cuve, l'interaction entre le corium et le béton conduirait une forte production de gaz combustible (H₂ et CO). Dans ce cas, les recombineurs puis le déficit en oxygène dans l'enceinte de confinement, permettent de limiter les risques pour le l'enceinte de confinement.

Les dispositifs d'éventage-filtration (U5) installés sur les réacteurs existants (REP 900, REP 1300, REP 1450) ne sont prévus que pour éviter une montée en pression des enceintes de confinement conduisant à leur endommagement. L'objectif premier n'est donc pas d'évacuer

l'hydrogène. Par contre, la possibilité d'une déflagration d'hydrogène au sein du dispositif d'éventage a été pris en compte :

- à pression élevée dans l'enceinte, l'atmosphère de cette dernière serait inertée par la forte teneur en vapeur d'eau, ce qui limite les risques d'une déflagration d'hydrogène ;
- pour éviter une condensation dans les tuyauteries, un dispositif de préchauffage a été conçu et doit être mis en œuvre 24 h avant éventage (noter ici que les délais avant éventage sont supérieurs à un jour compte tenu du volume des enceintes de confinement).

Le comportement des dispositifs d'éventage va néanmoins certainement faire l'objet d'un réexamen à la lumière de l'accident de Fukushima.

La conception du réacteur EPR de Flamanville ne prévoit pas à ce jour de dispositif d'éventage-filtration. Comme pour les REPs français, la stratégie choisie pour le réacteur EPR pour éviter une déflagration d'hydrogène combine l'existence d'une enceinte avec grand volume et l'installation de recombineurs auto catalytiques passifs (RAPs).

3. Exemple d'actions en cours sur les risques liés à l'hydrogène dans les enceintes de confinement

Les principales dispositions de mitigation des risques liés à l'hydrogène sont détaillées ci-dessus (installation recombineurs et dispositions supplémentaires de gestion des appoints en eau). Le risque de défaillance d'une enceinte de confinement apparaît beaucoup plus faible aujourd'hui mais fait toujours l'objet de travaux de recherche (notamment à l'IRSN) pour le caractériser et le réduire encore. Ces travaux portent par exemple :

- sur la cinétique de production d'hydrogène notamment lors d'une injection d'eau en cuve lors de l'accident (programme expérimental PEARL visant à mieux caractériser l'impact d'une injection d'eau) ;
- sur la caractérisation de l'impact de l'aspersion de l'enceinte sur le risque de déflagration,
- sur les recombineurs suivant divers angles (impact des panaches de vapeur issus des recombineurs sur l'accumulation d'hydrogène dans une enceinte (projet OCDE/SETH II et projet européen ERCOSAM), l'impact de l'emplacement des recombineurs sur l'efficacité de la recombinaison, effet de l'inflammation par les recombineurs sur le risque d'explosion, performances des recombineurs en situation extrême (effet d'un déficit en oxygène), recombinaison du monoxyde de carbone produit lors de l'interaction entre le corium et le béton (en cas de rupture de la cuve) ;
- sur l'amélioration des outils de simulation d'accident (l'IRSN vise une amélioration significative de ses outils de simulations pour pouvoir réaliser des calculs très détaillés de distribution et de combustion d'hydrogène).