

Note d'information technique

Le risque associé à l'hydrogène dans les enceintes de confinement des réacteurs du parc nucléaire français

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 de matières radioactives et, par conséquent, des rejets importants dans l'environnement.

Dans le cadre de l'étude des accidents de 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 (cette interaction dégage de plus du monoxyde de carbone également inflammable).

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'inflammation⁽¹⁾ (actionneurs, points chauds...), l'inflammation pourrait se produire assez rapidement. Dans certaines conditions (forte concentration en hydrogène en particulier), la déflagration, associée à la propagation d'une flamme initialement laminaire (vitesse de l'ordre du mètre par seconde), est susceptible de s'accélérer sous l'effet d'instabilités hydrodynamiques et de la turbulence. Des régimes de combustion rapide peuvent alors 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 peuvent occasionner des chargements dynamiques locaux très importants sur la structure du confinement du réacteur et sur les équipements.

⁽¹⁾ L'énergie nécessaire pour enflammer un mélange air-H₂ à la stœchiométrie est de l'ordre de 17 millijoules

Aussi, pour limiter l'accumulation d'hydrogène et le risque de combustion dans l'enceinte de confinement des réacteurs, différentes stratégies ont été envisagées. Elles consistent à utiliser une ou une combinaison des solutions suivantes :

- provoquer de manière délibérée l'inflammation des nuages inflammables au fur et à mesure de leur formation 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,
- 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) de manière à limiter voire supprimer la présence d'oxygène et donc le risque de combustion.

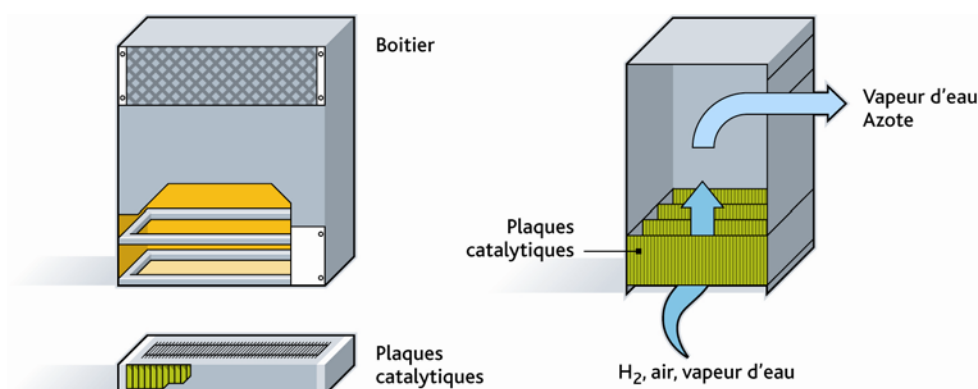
La présence de vapeur d'eau joue également un rôle en abaissant la fraction relative d'hydrogène et d'oxygène et inertant ainsi l'atmosphère de l'enceinte de confinement.

Informations sur les réacteurs à eau sous pression français

Pour les réacteurs à eau sous pression français, la stratégie choisie combine l'existence d'enceintes de grand volume et l'installation de recombineurs autocatalytiques passifs (RAPs). De tels recombineurs sont 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 de la possibilité qu'une inflammation survienne à un mauvais moment. En particulier, pour une situation accidentelle sans démarrage immédiat du système d'aspersion dans l'enceinte de confinement, l'hydrogène relâché depuis le circuit primaire pourrait s'accumuler progressivement dans l'enceinte de confinement si celle-ci était inertée par la vapeur d'eau relâchée depuis le circuit primaire (les igniteurs seraient alors inefficaces) ; dans un tel cas, le démarrage ultérieur de l'aspersion dans l'enceinte de confinement, opération normale pour la maîtrise de la pression, rendrait les gaz à nouveau inflammables et leur ignition dangereuse pour l'étanchéité du confinement.

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 RAPs a été prise après obtention de résultats probants sur le fonctionnement des recombineurs et a été confortée par les résultats des programmes de recherche menés 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 éventuel du système d'aspersion. Les recombineurs sont également dimensionnés pour résister aux chargements de pression et température pouvant résulter d'un accident grave, et fonctionnent à partir d'une concentration en hydrogène d'environ 0,5 % en volume.

Sur les réacteurs en exploitation, l'équipement des enceintes en recombineurs a été dimensionné de telle sorte que:

- les concentrations moyennes d'hydrogène dans l'enceinte de confinement ne dépassent pas 8 % en volume de manière à éviter l'inflammation complète de l'ensemble de l'hydrogène présent¹,
- les concentrations locales d'hydrogène ne dépassent pas 10 % en volume pour éviter l'occurrence de phénomènes de combustion dynamiques susceptibles de générer des chargements capables d'endommager l'enceinte de confinement et des équipements importants pour la sûreté.

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

Les enceintes des réacteurs de 1300 et de 1450 MWe sont équipées de 116 recombineurs fabriqués par AECL (de plus petites dimensions). La capacité correspondante de recombinaison de l'hydrogène est indiquée dans le tableau suivant :

Fraction molaire d'hydrogène (%)	Température moyenne (°Celsius)	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

¹ Dans une enceinte de grand volume, l'inflammation de tout l'hydrogène présent n'est possible que pour les concentrations les plus élevées ; pour des concentrations plus faibles, la combustion serait partielle (limitée à une zone particulière) avec un impact moindre sur les structures et équipements.

d'hydrogène dans l'enceinte de confinement, la cinétique de la production d'hydrogène peut excéder celle de la recombinaison d'un facteur 10).

Ainsi, malgré les performances des recombineurs, les études réalisées, notamment dans le cadre des études probabilistes de sûreté de niveau 2 (EPS2), montrent que la formation d'un mélange hydrogène-oxygène susceptible de conduire à des phénomènes d'accélération locale de flamme ne peut pas être exclue en tout point 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 lié à l'hydrogène sont ceux qui présentent une cinétique de production d'hydrogène en cuve « très importante » en regard de la cinétique de recombinaison par les recombineurs. Pour ces scénarios, les recombineurs améliorent grandement la situation mais la quantité d'hydrogène temporairement présente 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 arrêtant (pendant une durée limitée) des injections d'eau de faible débit dans la cuve au début de la fusion du cœur (l'eau injectée pouvant temporairement accélérer l'oxydation des gaines sans refroidir le combustible).

En cas de défaillance de la cuve du fait de la coulée du corium (combustible fondu), et de relocalisation du corium dans le puits de cuve, l'interaction entre le corium et le béton conduirait à une forte production de gaz combustibles (H₂ et CO). Dans ce cas, les recombineurs puis le déficit en oxygène dans l'enceinte de confinement limitent les risques pour l'enceinte de confinement ; la question essentielle est alors la maîtrise de la montée en pression éventuelle de l'enceinte et le maintien de l'étanchéité du fond de celle-ci malgré l'interaction entre le corium et le béton du radier (phénomènes nettement plus lents que les phénomènes liés à l'hydrogène).

Les dispositifs d'éventage-filtration (U5) installés sur les réacteurs existants (REP 900, REP 1300, REP 1450) sont prévus pour faire face à une telle montée en pression dans les enceintes de confinement de façon à éviter un endommagement brutal. L'objectif de ces dispositifs n'est donc pas de permettre d'évacuer l'hydrogène. Par contre, la possibilité d'une déflagration d'hydrogène au sein du dispositif d'éventage a été examinée :

- à pression élevée dans l'enceinte, l'atmosphère de cette dernière serait en général inertée par la forte teneur en vapeur d'eau et ce d'autant plus qu'une partie importante de l'oxygène initialement présent dans l'enceinte de confinement aura été consommée par les recombineurs,
- un dispositif de préchauffage a été conçu pour éviter une condensation d'eau dans les tuyauteries ; il doit être mis en œuvre pendant un temps suffisant avant l'éventage.

Le comportement, la conception et la mise en œuvre de ces dispositifs d'éventage vont en tout état de cause faire l'objet d'un réexamen approfondi à la lumière de l'accident de Fukushima. Cet examen complétera les demandes déjà formulées par l'IRSN en vue d'améliorer l'efficacité de filtration des iodes gazeux en cas d'éventage.

La conception du réacteur EPR de Flamanville ne prévoit pas de dispositif d'éventage-filtration. Comme pour les autres réacteurs français, la stratégie choisie pour le réacteur EPR pour éviter une déflagration d'hydrogène combine l'existence d'une enceinte de grand volume et l'installation de recombineurs autocatalytiques passifs.

Exemples d'actions en cours sur les risques liés à l'hydrogène dans les enceintes de confinement (avant l'accident de Fukushima)

Les principales dispositions de réduction du risque associé à l'hydrogène sont détaillées ci-dessus (installation de recombineurs et dispositions supplémentaires de gestion des appoints d'eau). Le risque de défaillance d'une enceinte de confinement par explosion d'hydrogène apparaît beaucoup plus faible aujourd'hui qu'au début de l'exploitation du parc de réacteurs à eau sous pression, mais fait cependant encore l'objet de travaux de recherche. Les travaux menés par l'IRSN portent par exemple :

- sur la cinétique de production d'hydrogène, notamment lors d'une injection d'eau dans la cuve au cours de l'accident (amélioration de l'outil de simulation d'accident ASTEC, réalisation du programme expérimental PEARL visant à mieux apprécier l'effet d'une injection d'eau),
- sur l'effet d'une aspersion dans l'enceinte sur le risque de déflagration (expérimentations menées en collaboration avec le laboratoire ICARE du CNRS Orléans et prise en compte des résultats dans les outils de simulation),
- sur les recombineurs pour compléter les connaissances sur leur comportement et leur efficacité ; étude de l'effet des panaches de vapeur sortant des recombineurs sur l'accumulation d'hydrogène dans une enceinte (projet OCDE/SETH II et projet européen ERCOSAM), sensibilité de l'efficacité de la recombinaison à l'emplacement des recombineurs, étude de la possibilité d'inflammation² des gaz présents dans l'enceinte de confinement par les recombineurs et des conséquences en cas d'explosion, étude des performances des recombineurs dans des situations particulières (effet d'un déficit en oxygène par exemple), étude de la 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 la distribution et de la combustion d'hydrogène dans le cadre de ses études de sûreté, indépendantes de celles menées par les exploitants (l'objectif de l'IRSN en la matière est de rester au niveau de l'état de l'art et, autant que possible, de le faire progresser).

² Les plaques catalytiques des recombineurs atteignent lors de leur fonctionnement des températures suffisamment élevées pour enflammer localement l'atmosphère gazeuse. Cet effet a été observé expérimentalement et l'objectif des travaux en cours est de préciser autant que possible les critères d'inflammation. A noter que cet effet peut être positif en termes de sûreté car il favorise le déclenchement de combustions partielles de l'hydrogène présent, avec un impact moindre sur la tenue des équipements.