

# Eléments de réflexion sur les systèmes de sûreté passifs des réacteurs nucléaires

---

## I. Contexte

Les réacteurs électronucléaires à eau sous pression actuellement en exploitation en France comportent des systèmes de sûreté dont le fonctionnement nécessite le plus souvent un apport d'énergie, telle une alimentation électrique de puissance. Ils comportent aussi des dispositions de sûreté passives, notamment :

- les barres de contrôle et d'arrêt de la réaction de fission nucléaire (qui chutent par gravité lorsque les disjoncteurs sont ouverts) ;
- les accumulateurs du système d'injection de sécurité (qui injectent de l'eau dans le circuit primaire lorsque la pression dans celui-ci descend en dessous d'une valeur prédéfinie) ;
- le refroidissement en thermosiphon du réacteur après un arrêt, volontaire ou non, des pompes primaires (qui est assuré par un débit de circulation naturelle résultant de l'écart de densité entre des zones du circuit primaire à des altimétries différentes) ;
- les recombineurs d'hydrogène (qui catalysent la réaction de recombinaison de l'oxygène de l'air et de l'hydrogène dégagé dans l'enceinte de confinement lors de situations accidentelles).

Certains réacteurs électronucléaires actuellement proposés par les concepteurs de telles installations font plus largement appel à des systèmes de sûreté passifs dans l'objectif de pouvoir amener le réacteur en état d'arrêt sûr et de pouvoir l'y maintenir pendant une longue période (72 heures pour l'AP1000) sans intervention humaine et en limitant le recours à des fonctions supports.

Par ailleurs, depuis l'accident de la centrale japonaise de Fukushima Dai-ichi, différents acteurs accordent un intérêt grandissant aux systèmes passifs, tout particulièrement pour faire face à des situations de perte prolongée des alimentations électriques ou de la source froide.

**La présente fiche rappelle les caractéristiques des systèmes de sûreté passifs et expose les questionnements associés à l'évaluation de nouveaux systèmes de ce type ainsi que les axes de recherche à développer pour y répondre.**

## II. Définition et caractéristiques des systèmes de sûreté passifs

### II.1 Généralités

Un système de sûreté passif est caractérisé essentiellement par :

- **une limitation du recours à des composants actifs<sup>1</sup>** pour activer son fonctionnement ;
- **le recours à des phénomènes naturels** (gravité, différence de pression...) pour assurer son fonctionnement ;
- **l'absence de fonctions supports nécessaires à son fonctionnement ;**
- **l'absence de nécessité d'une intervention humaine pour son activation et son fonctionnement pendant la durée de sa mission.**

### II.2 Classification des systèmes de sûreté passifs

Devant la diversité des systèmes de sûreté passifs envisageables, l'AIEA propose de les répartir en quatre catégories selon leur niveau de passivité (décroissante) :

- les systèmes qui ne requièrent pas de mouvement d'une pièce mécanique ou d'un fluide moteur. Ces systèmes sont composés de composants ou de structures statiques qui n'utilisent ni source externe de puissance (électrique ou non), ni signal de contrôle commande (exemples : barrières statiques de confinement, tuyauteries, réservoirs, structures antisismiques...). La présente fiche ne s'adresse pas à de tels systèmes dont la mise en œuvre n'est pas nouvelle et qui ne suscitent pas de questionnement spécifique ;
- les systèmes dont l'activation ou le fonctionnement ne nécessite ni source externe de puissance, ni signal de contrôle commande et qui ne comportent pas de pièce mécanique mobile, mais utilisent des fluides moteurs (exemples : condenseurs, systèmes de refroidissement par thermosiphon, dispositifs de filtration des puisards de recirculation...) ;
- les systèmes dont l'activation ou le fonctionnement ne nécessite ni source externe de puissance, ni signal de contrôle-commande, mais qui comportent des pièces mécaniques mobiles (par exemple : accumulateurs, soupapes, transmetteurs passifs de pression, systèmes d'éventage-filtration d'enceintes de confinement utilisant des disques de rupture...) ;
- les systèmes qui ne nécessitent pas d'activation manuelle, dont le démarrage - mais pas le fonctionnement ultérieur - nécessite cependant des signaux de contrôle commande ou un apport d'énergie extérieur ; cet apport d'énergie ne peut alors provenir que de sources d'énergie stockée telles que des réservoirs de fluides comprimés ou placés en hauteur, ou encore des batteries (exemples : turbines à vapeur entraînant des pompes, accumulateurs activés par des sources électriques ou pneumatiques...).

---

<sup>1</sup> Un composant actif est un composant qui nécessite un mouvement mécanique ou un apport d'énergie extérieur au composant lui-même pour assurer sa fonction.

### III. Fonctionnement et performances des systèmes de sûreté passifs

Le fonctionnement d'un système de sûreté passif utilisant un fluide en mouvement est assuré par des phénomènes physiques mettant généralement en jeu des forces d'intensité faible (comme la convection naturelle). Ces phénomènes peuvent être sensibles à de nombreux paramètres.

**L'évaluation des performances d'un système de sûreté passif nécessite une très bonne compréhension des phénomènes physiques permettant son activation et son fonctionnement et de ceux pouvant les empêcher.** Ceci implique d'identifier les principaux paramètres associés à ces phénomènes pour toutes les fonctions<sup>2</sup> auxquelles le système participe et de démontrer l'aptitude des logiciels de calcul utilisés à produire des prédictions fiables pour les situations pour lesquelles l'activation et le fonctionnement du système sont postulés.

Cette démonstration reposera généralement sur des résultats d'essais effectués à échelle réduite, ce qui soulève la question de leur représentativité et de leur transposition à l'échelle du réacteur.

De plus, les performances d'un système de sûreté passif peuvent être particulièrement sensibles aux conditions d'ambiance (par exemple : une élévation de la température dans l'enceinte de confinement résultant d'un événement initiateur) ou aux agressions (aléa climatique, séisme...), compte tenu des faibles forces naturelles mises en jeu.

**Les performances d'un système de sûreté passif doivent pouvoir être démontrées pour toute la durée de ses missions et pendant toute la durée de vie de l'installation.**

### IV. Valorisation des systèmes de sûreté passifs

#### IV.1 Démarche de sûreté

**La défense en profondeur est le principe fondamental de la démarche de conception des nouveaux réacteurs qui mettent plus largement en œuvre des systèmes de sûreté passifs.**

Elle impose de rechercher une indépendance suffisante entre les niveaux de la défense en profondeur. Toutefois, il apparaît que, pour certaines conceptions, un même phénomène physique naturel peut conditionner l'efficacité de systèmes de sûreté passifs intervenant à deux niveaux de la défense en profondeur. A titre d'exemple, le système passif de refroidissement de l'enceinte de confinement (PCS) de l'AP1000 utilise le même phénomène physique à la fois en situation accidentelle relevant du troisième niveau de la défense en profondeur pour permettre l'évacuation de la puissance résiduelle du cœur en vue de prévenir sa fusion et en situation accidentelle relevant du quatrième niveau pour évacuer l'énergie contenue dans l'enceinte en vue de préserver son intégrité en cas de fusion du cœur.

---

<sup>2</sup> A titre d'exemple, dans le cas des dispositifs de filtration des puisards de recirculation des réacteurs à eau légère, les phénomènes en jeu sont différents pour les fonctions « filtration » et « circulation ». Même pour un tel système utilisé dans les réacteurs actuels, et mettant en œuvre des dispositions passives et actives, les justifications d'atteinte des performances attendues restent à compléter.

**L'utilisation d'un même phénomène physique pour le fonctionnement d'un système de sûreté passif pour les niveaux 3 et 4 de la défense en profondeur nécessite un très haut niveau de confiance dans la capacité de ce phénomène à permettre la réalisation de la fonction de sûreté correspondante dans toutes les conditions.**

Par ailleurs, comme le montre le cas de l'AP1000, la mise en place de systèmes de sûreté passifs peut conduire les concepteurs à prévoir, pour un même niveau de défense en profondeur, des systèmes actifs afin de limiter les sollicitations des systèmes de sûreté passifs. Ces systèmes actifs ne sont pas soumis aux mêmes exigences que les systèmes de sûreté passifs et ne sont pas pris en compte dans les études d'accident. Toutefois, ces systèmes actifs pouvant fonctionner, au moins partiellement, lors des situations réelles d'accident, il est nécessaire d'analyser leur influence sur le fonctionnement des systèmes de sûreté passifs et sur le déroulement de l'accident (perturbation des écoulements naturels du fait d'un maintien en pression, évolution différente des températures...).

**La présence de systèmes actifs peut rendre complexe la démonstration du bon fonctionnement des systèmes de sûreté passifs lors des transitoires accidentels où ceux-ci doivent intervenir.**

## **IV.2 Vérification des performances des systèmes de sûreté passifs**

Compte tenu du mode de fonctionnement des systèmes de sûreté passifs, **la vérification de leurs performances et du maintien dans le temps de ces dernières peut s'avérer complexe.** Elle repose sur la faisabilité :

- du suivi des paramètres d'influence spécifiques aux systèmes passifs (la circulation d'un fluide moteur reposant sur une faible différence de densité peut par exemple être sensible aux pertes de charge par frottement) ;
- de la réalisation d'essais périodiques dans des conditions représentatives de l'activation et du fonctionnement des systèmes passifs (un essai permettant d'évaluer la capacité d'évacuation de puissance par condensation ou vaporisation dans une enceinte peut être complexe à réaliser sur un réacteur en exploitation).

## **IV.3 Fiabilité des systèmes de sûreté passifs**

Les systèmes de sûreté passifs sont généralement considérés par leurs concepteurs comme étant d'une plus grande fiabilité que les systèmes de sûreté actifs (moins de matériels, moins d'interventions humaines, moindre dépendance aux sources électriques...).

L'étude des possibilités de défaillance d'un système de sûreté passif peut paraître plus simple que pour un système de sûreté actif qui comporte généralement de nombreux éléments, ce qui conduit à une complexité plus grande que pour les systèmes de sûreté passifs mettant en œuvre des composants souvent statiques.

**Il faut toutefois souligner que le caractère réellement passif de systèmes de sûreté recourant, selon leurs concepteurs, uniquement à des phénomènes naturels doit être tempéré :** la plupart de ces systèmes nécessitent des changements d'état d'équipements mécaniques (par exemple : ouverture de vannes), des signaux d'activation et une alimentation électrique par des batteries.

Par ailleurs, **un système de sûreté passif peut ne pas être en mesure d'accomplir la mission qui lui est attribuée, même en l'absence de défaillance matérielle mécanique ou électrique.** En effet, comme cela a déjà été souligné plus haut, le fonctionnement d'un système de sûreté passif peut reposer sur des phénomènes (par exemple : convection naturelle) qui peuvent être de faible intensité et s'avérer, dans certaines conditions, insuffisants pour l'accomplissement de la mission. Un tel échec pourrait notamment résulter du fait que les phénomènes mis en jeu sont sensibles à la géométrie du système (sensibilité aux pertes de charges par exemple) et à certains paramètres de leur environnement et qu'ils pourraient s'avérer, dans certaines situations réelles, différents de ce qui a été prévu à la conception. Ce type de défaillance, désigné par l'expression « défaillance fonctionnelle », peut conduire à l'échec de l'activation d'un système de sûreté passif, à son arrêt ou à des conditions de fonctionnement non prévues. Si le phénomène moteur devant assurer le fonctionnement des différentes voies d'un système de sûreté passif est le même, la défaillance fonctionnelle, si elle survient, pourrait affecter toutes les voies ; elle doit dès lors être envisagée comme une défaillance de **mode commun**.

En relation avec l'évaluation des performances des systèmes de sûreté passifs, il convient de souligner la difficulté de réaliser des études probabilistes de sûreté (EPS) probantes, en particulier du fait de la difficulté d'attribuer des probabilités de défaillance aux systèmes de sûreté passifs dans les différentes situations couvertes par ces EPS et de l'absence de retour d'expérience sur la fiabilité de ces systèmes en situation accidentelle.

**Le développement d'approches spécifiques apparaît nécessaire pour être en mesure d'évaluer correctement la fiabilité des systèmes de sûreté passifs, notamment en considérant les possibilités de défaillance des phénomènes thermohydrauliques mis en jeu dans ces systèmes.**

#### IV.4 Les apports attendus de la R&D

Des réflexions sont nécessaires pour définir les besoins de R&D associés à la mise en œuvre de systèmes de sûreté passifs ; pour l'IRSN, ces réflexions visent à développer la capacité d'expertise permettant de disposer, le moment venu, des connaissances nécessaires à l'analyse des développements technologiques qui pourraient être mis en œuvre par les concepteurs de réacteurs faisant appel à de tels systèmes.

Les éléments qui précèdent montrent que de premières questions ont d'ores et déjà été identifiées dans le cadre de la stratégie scientifique de l'IRSN. Elles concernent l'efficacité ainsi que la fiabilité de tels systèmes et la capacité à en vérifier les performances, et ce depuis leur conception jusqu'à leur exploitation, en incluant leurs fabrication et maintenance.

Ces grandes questions scientifiques doivent être mises en perspective des attendus de la démonstration de sûreté nucléaire afin d'être déclinées en questions ouvertes dont la réponse nécessite l'acquisition de connaissances. En parallèle, un bilan complet de l'état des connaissances est à constituer à partir des éléments disponibles concernant les réacteurs valorisant d'ores et déjà plus largement de tels systèmes de sûreté passifs.

Les axes de recherche pourront alors être définis précisément en visant tout particulièrement :

- la nécessaire compréhension des phénomènes physiques ayant une influence sur les systèmes de sûreté passifs,
- les capacités de simulation de tels phénomènes,
- les besoins d'expérimentations pour valider les logiciels de simulation.

Des échanges avec les industriels sont nécessaires pour mener à bien ces actions et l'IRSN a d'ailleurs initié un groupe de travail avec AREVA, EDF et le CEA pour ce faire.

L'espace international est un cadre dans lequel ces axes de recherche doivent s'inscrire et l'IRSN participe notamment au projet NUSMOR (NUgenia Small Modular Reactor with passive safety features) qui sera proposé dans le cadre de l'appel d'offres européen H2020.

## V. Conclusion

La conception de certains réacteurs électronucléaires actuellement en construction ou en cours de développement fait appel à des systèmes de sûreté dits passifs dont l'objectif est de pouvoir amener le réacteur dans un état d'arrêt sûr et de pouvoir l'y maintenir sans nécessité d'intervention humaine pendant une longue période et en limitant le recours à des fonctions supports.

**Les réflexions menées jusqu'à ce jour à l'IRSN sur de tels systèmes de sûreté passifs conduisent à souligner certaines difficultés intrinsèques, qui concernent notamment :**

- **l'évaluation de leurs performances** : l'évaluation des systèmes de sûreté passifs nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques à la base de leur fonctionnement ainsi que des capacités de simulation de ces phénomènes ;
- **l'évaluation de leur fiabilité** : le développement d'approches spécifiques apparaît nécessaire pour être en mesure d'évaluer correctement la fiabilité des systèmes de sûreté passifs, notamment en considérant les possibilités de défaillance des phénomènes thermohydrauliques mis en jeu dans ces systèmes.

**Des travaux sont à mener pour être en mesure d'analyser, le moment venu, les systèmes de sûreté passifs qui seraient mis en œuvre par des concepteurs de réacteurs. Des questionnements ont ainsi d'ores et déjà été identifiés par l'IRSN dans le cadre de sa stratégie scientifique.**

L'IRSN inscrit ces travaux dans le cadre d'actions menées avec des organismes étrangers afin de permettre de larges échanges et de pouvoir bénéficier des acquis disponibles. Notamment, l'IRSN partage ses réflexions au sein d'un groupe de travail dédié dans le cadre du « Reactor Harmonization Working Group » de l'association WENRA : ce groupe de travail, piloté par l'IRSN, vise à discuter des approches à retenir en termes de démarche de sûreté appliquée à ces systèmes. L'IRSN participe également au projet NUSMOR qui sera proposé dans le cadre de l'appel d'offres européen H2020 en vue de développer les connaissances relatives aux performances des systèmes de sûreté passifs et pilote un groupe de travail avec les industriels français en vue de préciser les axes de recherche à développer.