

Avis de l'IRSN sur la tenue en service des cuves des réacteurs de 900 MWe - Comportement des matériaux irradiés - Réponses aux demandes de la SPN de décembre 2005

La démonstration par EDF de la tenue en service des cuves des réacteurs des paliers 900 MWe repose, pour ce qui concerne les zones de cœur, sur l'affaire parc AP9701. Le bilan de ces études a abouti en 1999 puis en 2005 à la tenue de réunions de la section permanente nucléaire (SPN) de la commission centrale des appareils à pression (CCAP). L'ASN a ensuite adressé à EDF une liste de demandes visant à conforter les conclusions des analyses sur les points suivants :

- la neutronique,
- la thermohydraulique,
- le comportement des matériaux irradiés,
- le comportement mécanique.

EDF a répondu aux demandes portant sur ces quatre points dans différents courriers accompagnés de notes d'étude et fiches réponses.

Par lettres du 19 février 2009 et du 15 septembre 2009, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé l'avis de l'IRSN sur le comportement des matériaux irradiés.

Les principales conclusions de l'analyse faite par l'IRSN sont les suivantes :

La justification de la tenue en service des cuves repose sur la connaissance précise de la ténacité du matériau constitutif de ces cuves, et de son évolution sous l'effet de la fragilisation provoquée par l'irradiation. Une vérification de la fragilisation réelle de l'acier de cuve est faite dans le cadre du programme de surveillance de l'irradiation (PSI) en comparant périodiquement la fragilisation effective mesurée sur les éprouvettes irradiées et la fragilisation prévisionnelle donnée par les formules empiriques de prévision de la fragilisation.

Par ailleurs, dans les justifications, la ténacité des zones affectées thermiquement (ZAT) par les opérations de revêtement par soudage de la surface intérieure de la cuve est considérée, par hypothèse, comme au moins égale à celle de l'acier de cuve.

Pour répondre aux demandes de l'Autorité de Sûreté sur le comportement des matériaux irradiés faisant suite à la SPN de 2005, l'exploitant a engagé d'une part un réexamen des formules de prévision de la fragilisation sous irradiation pour intégrer l'ensemble des résultats disponibles du PSI et poursuivi, d'autre part, ses travaux de recherche sur la ténacité des ZAT afin de valider l'hypothèse que la ténacité des ZAT est bornée par celle de l'acier de cuve.

L'objectif des travaux de l'exploitant a été de proposer pour le dossier d'analyse d'intégrité des cuves du parc de réacteurs français une révision des formules de prévision de la fragilisation qui rende bien compte des données PSI 900 MWe.

Une formule répondant à cet objectif a été déterminée. Elle est basée sur le même modèle que la formule FIM de HOUSSIN reprise dans le code RSE-M. Les connaissances acquises sur les mécanismes physiques de fragilisation montrent que ce modèle est adapté aux matériaux à basse teneur en cuivre du parc français. Les modèles américains récents sont fondés sur un mécanisme de fragilisation qui n'intervient qu'à plus haute teneur et n'ont donc pas été retenus.

La formule proposée est ajustée sur l'ensemble des données du PSI 900 MWe obtenues sur métal de base, joint soudé et matériau de référence (362 données) et sur des données acquises en réacteurs de recherche (65 données). Ces données couvrent les variations de teneurs en éléments fragilisants des matériaux de l'ensemble du parc de réacteurs français.

Par rapport aux formules précédentes du RSE-M, les principaux éléments nouveaux sont les suivants :

- amélioration de la description de la cinétique grâce aux données PSI CPY, dont les fluences sont bien réparties jusqu'à des fluences voisines de celle prévue après plus de 40 ans de fonctionnement du parc 900 MWe (les données des capsules Y de 27 tranches sont utilisées),
- utilisation de données nouvelles en réacteurs de recherche pour étendre la gamme de fluences au delà des celles correspondant à 40 ans d'exploitation du parc 900 MWe,
- couplage de l'influence relative de la chimie et de la forme de la cinétique entre métal de base et joint soudé conformément aux connaissances sur le mécanisme de fragilisation.

En tout premier lieu, l'IRSN souligne l'importance des travaux de synthèse menés par l'exploitant, ainsi que l'ampleur des analyses très détaillées qui ont permis d'aboutir à une proposition d'évolution des formules utilisées jusqu'ici.

L'IRSN souligne que le raisonnement retenu par l'exploitant et basé sur une loi moyenne à 2 écarts type conduit à accepter que 5% des cas réels puissent être en dehors du périmètre couvert par les prévisions. Pour appliquer ce raisonnement à un composant essentiel pour la sûreté qui bénéficie de l'hypothèse d'une exclusion de rupture, l'IRSN considère qu'il est indispensable que les cas non couverts potentiellement par le paramètre « matériaux », soient couverts par des marges effectives prises par ailleurs. Dans le cas contraire, l'IRSN considère que les évaluations doivent rester basées sur des lois réellement enveloppes des points expérimentaux.

L'IRSN ne remet pas en cause le modèle analytique retenu par EDF ni la méthode d'ajustement adoptée, et comprend l'intérêt de l'utilisation des résultats d'irradiations expérimentales pour explorer des fluences ou des compositions chimiques différentes de celles testées par le PSI. Cependant, l'IRSN constate que les formules de fragilisation antérieures ont été définies historiquement à partir de résultats expérimentaux, qu'elles présentaient à l'origine un excellent degré de corrélation avec les données utilisées, mais que le retour d'expérience a cependant conduit à les réexaminer. Pour l'IRSN la validité d'un modèle d'irradiation ajusté sur une base de

données comportant des résultats d'irradiations expérimentales doit principalement être appréciée par comparaison avec les résultats effectifs du PSI.

La valeur d'écart type proposée dans la nouvelle formulation est définie pour les soudures à partir de l'ensemble des données, et l'IRSN n'a pas de remarque à formuler.

Pour les viroles de cuve, l'exploitant a retenu de définir l'écart type à partir d'un jeu de données dit « à effet de prélèvement réduit », en ne retenant dans la base d'ajustement qu'une partie des résultats disponibles. L'exploitant considère en effet que les valeurs singulières de fragilisation relevées sur certaines capsules du PSI sont expliquées par un effet de prélèvement lié à la différence d'emplacement de prélèvement des éprouvettes, effet sans liaison avec la fragilisation irradiation. Des expertises faites pour tenter de comprendre de nouveaux cas de dépassement relevé ne confirment pas l'hypothèse avancée, hypothèse que l'exploitant étend pourtant à tous les résultats de fragilisation atypique.

Pour l'IRSN, les éprouvettes d'essais prélevés dans des matériaux dont la structure n'est pas homogène, comme ceci est le cas dans les zones fondues des soudures ou les grosses pièces forgées, conduisent à des résultats dispersés. Cette dispersion intègre d'une part la dispersion naturelle des essais, d'autre part les différences de comportement liées aux variations de structure du matériau.

L'IRSN considère donc que, pour les viroles forgées à l'image de ce que fait l'exploitant pour les zones fondues de soudures sur lesquelles l'effet de structure ne peut être quantifié, la détermination de l'écart type doit être faite en considérant la dispersion de l'ensemble des résultats.

L'IRSN constate que sur les 139 valeurs de fragilisations mesurées dans le cadre du PSI sur le matériau des viroles de cuves, la nouvelle formulation proposée conduit à un nombre de cas hors prévision plus faible que l'ancienne formule (20 pour 29). Toutefois, le pourcentage de 14% de cas non couverts par les prévisions n'est cependant pas compatible avec le taux de confiance à 95% affiché par l'exploitant. Pour les joints soudés, la nouvelle formulation apparaît plus pertinente que celle utilisée antérieurement, le nombre de cas non couverts par les prévisions restant plus faible (6 cas pour 130 valeurs).

L'analyse des écarts entre fragilisations mesurées et fragilisations moyennes prévisionnelles en fonction de la fluence conduit l'IRSN à observer que la répartition des résidus n'est pas homogène selon les fluences pour les résultats du PSI sur viroles. En particulier pour les fluences élevées, le nombre de points mesurés au-dessus des prévisions est plus important, en particulier pour les fluences supérieures à $7.10^{19}n/cm^2$ où il est largement majoritaire (12 valeurs sur 14). Cette tendance à la sous-prévision apparente pour les fluences élevées de la nouvelle formulation proposée est aussi observée sur les résultats du PSI des joints soudés.

La nouvelle formule moyenne proposée apparaît plus pertinente que les formulations précédentes, mais à l'examen des seuls résultats du PSI, elle conduit à une légère sous prévision moyenne aux fluences élevées.

Pour la valeur de fluence de $6,5 10^{19}n/cm^2$ correspondant à 40 ans de fonctionnement, l'IRSN évalue la sous prévision de la nouvelle formulation moyenne à une valeur de l'ordre de $3^{\circ}C$. Pour la détermination des fragilisations à $6,5 10^{19}n/cm^2$, afin de rester cohérent avec une détermination

enveloppe à 2σ à partir d'une loi moyenne, l'IRSN considère que cette sous prévision moyenne de 3°C est à prendre en considération en complément de celle définie plus haut pour les écarts type. Ceci revient à augmenter la prévision des RTNDT à 40 ans données par cette nouvelle formule, de 10°C pour les viroles, et de 3°C pour les joints soudés.

Pour les valeurs de fluence allant au-delà de $6,5 \cdot 10^{19}\text{n/cm}^2$, l'IRSN considère que la formule proposée devra faire l'objet d'une nouvelle évaluation dès que les résultats des capsules complémentaires du PSI introduites en cuve pour couvrir les fluences au-delà de 40 ans seront connus pour les joints soudés et les viroles.

L'exploitant a caractérisé la ténacité des ZAT de revêtement dans deux programmes.

Les résultats obtenus dans ces programmes indiquent qu'à l'état irradié, les valeurs de ténacité les plus basses sont relevées dans le métal de base. L'IRSN constate que ces valeurs de ténacité à l'état irradié, légèrement plus faible dans le métal de base que dans les ZAT, ne remettent pas en cause l'hypothèse adoptée par EDF consistant à considérer que les ténacités des ZAT restent bornées par celle du métal de base. L'IRSN considère que l'exploitant, par ces résultats, a apporté des éléments de réponse à la demande de l'ASN faisant suite à la SPN de 2005 sur la ténacité des ZAT. L'IRSN souligne cependant que, compte tenu du caractère très dispersif des essais de ténacité, ces résultats ne sont pas suffisamment nombreux pour valider totalement cette hypothèse, notamment en cas de présence de veines sombres. Ce point particulier reste à analyser.

Par ailleurs, l'IRSN note que la fragilisation mesurée dans ces programmes de caractérisation des ZAT atteint 81°C en ZAT et 66°C dans le métal de base. Cette valeur reste couverte par la nouvelle formulation proposée qui donne une fragilisation de 81°C . L'IRSN note aussi que la zone de ségrégation majeure n'a apparemment pas été relevée dans la zone caractérisée.

Par le passé, la débouchure H1 de virole B de la cuve Q12 (H1Q12) a fait l'objet de caractérisation lors desquelles la zone de ségrégation majeure avait été notée. La fragilisation mesurée atteignait 67°C en peau, et 80°C au $1/4$ épaisseur. L'application pour cette virole de la nouvelle formule proposée donne une fragilisation prévisionnelle maximale de 64°C .

Ce résultat en zone de ségrégation majeure illustre la tendance à la sous prévision de la nouvelle formulation proposée par l'exploitant, même lorsque la composition chimique de la coulée majorée, destinée à couvrir les zones de ségrégations majeures, est utilisée.

Ces différentes analyses conduisent aux recommandations données en annexe.

Annexe à l'avis DSR/2009-369 du 15 décembre 2009

Recommandation 1

L'IRSN recommande que pour l'évaluation des fragilisations du matériau des viroles de cuves, l'écart type utilisé dans la formule de prévision soit calculé sur l'ensemble des valeurs de fragilisation mesurées par le programme de surveillance à l'irradiation sur la population des viroles de cuves 900 MWe.

Recommandation 2

L'IRSN recommande que pour l'évaluation de la fragilisation des viroles de cuves 900 MWe et des soudures à la fluence de $6,5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ correspondant à une exploitation de 40 ans, une correction de $+3^\circ\text{C}$ soit apportée à l'évaluation de la fragilisation moyenne.

Recommandation 3

Pour l'estimation des fragilisations des viroles et joints soudés au-delà d'une fluence de $6,5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$, l'IRSN recommande qu'une réévaluation de la formule proposée soit faite dès que les résultats des capsules complémentaires introduites en cuve pour couvrir les fluences au-delà de 40 ans seront connus.

Recommandation 4

L'IRSN recommande qu'un bilan des actions engagées par EDF pour évaluer l'influence des zones de ségrégations majeures et des veines sombres sur la fragilisation soit réalisé.