

Cuves défectueuses des réacteurs nucléaires belges Doel 3 et Tihange 2

Commentaires sur le rapport final d'évaluation de l'AFCN de 2015

Ilse Tweer
Spécialiste des matériaux, consultante

Janvier 2016

Commandité par Rebecca Harms,
Co-Présidente du groupe des Verts/ALE au Parlement européen
Rue Wiertz
B-1047 Bruxelles



Les Verts | Alliance Libre Européenne
au Parlement européen

Résumé

La centrale nucléaire Doel 3 a été mise en service en 1982, Tihange 2 a été mise en service en 1983. Ces deux centrales nucléaires de type REP (réacteur à eau pressurisée) sont exploitées par Electrabel, qui fait partie du groupe français ENGIE.

Dans le cadre d'inspections par ultrasons menées en 2012, des milliers de défauts ont été détectés dans le métal de base des cuves des deux réacteurs.

Le propriétaire, Electrabel, a affirmé que ces bulles d'hydrogène¹ étaient « plus que probablement » des défauts dus à l'hydrogène occasionnés durant la fabrication, aucune progression n'ayant été constatée depuis la mise en service des réacteurs. L'autorité de régulation belge a approuvé la remise en service des deux unités en mai 2014. Cette approbation posait comme condition de réaliser des tests d'irradiation sur des échantillons issus d'un bloc générateur de vapeur AREVA VB395 refusé, qui présentait des bulles d'hydrogène.

Ces échantillons ne peuvent pas être considérés comme représentatifs pour la virole de la cuve des réacteurs affectés, étant donné que le procédé de fabrication et l'historique du traitement thermique ne sont certainement pas identiques. Electrabel a considéré ces échantillons comme étant représentatifs en raison de l'apparente similarité de la défectuosité, et l'AFCN (Agence fédérale de Contrôle nucléaire) a validé cet argument.

Les résultats de la première campagne d'irradiation ont montré une fragilisation élevée inattendue due aux neutrons. En conséquence, les deux réacteurs ont été mis à l'arrêt en mars 2014. De nouvelles campagnes d'irradiation ont été réalisées en utilisant également des échantillons provenant des expériences « KS02 » réalisées dans le cadre du projet de recherches allemand FKS (« Forschungsvorhaben Komponentensicherheit », projet de recherches sur la sécurité des composants).

Le 17 novembre 2015, l'AFCN a autorisé le redémarrage des deux centrales.

En décembre 2015, Rebecca Harms, Co-présidente du groupe Les Verts/ALE au Parlement européen, a demandé à l'auteure d'évaluer les documents disponibles publiés par l'AFCN relatifs à l'autorisation de redémarrage, en portant une attention particulière aux résultats des tests d'irradiation et à leur interprétation par les différents groupes d'experts mandatés par Electrabel et l'AFCN.

L'évaluation des documents publiés avait pour objectif de clarifier les arguments scientifiques censés justifier l'autorisation de remise en service.

Bien que la nature des défauts détectés dans deux viroles des cuves des réacteurs ne soit pas prouvée, l'AFCN a accepté l'affirmation d'Electrabel selon laquelle ces défauts sont des bulles d'hydrogène. Bien que l'inspection par ultrasons n'ait pas montré de signes décelables après la fabrication mais que trente ans plus tard, des milliers de défauts d'une taille allant jusqu'à 179 mm

¹ Le terme *bulles d'hydrogène* est utilisé dans ce rapport comme traduction du terme *hydrogen flakes*. Ce terme est traduit par l'AFCN par *micro-bulles* et le terme *microfissures* a été également largement utilisé dans la presse pour désigner ces défauts.

aient été constatés, l'ANFC a validé l'opinion de l'exploitant, selon laquelle les défauts ne se sont pas aggravés depuis la mise en service.

Il est compréhensible qu'une méthode de détection par ultrasons plus fine décèle plus de petits défauts, mais il n'est pas compréhensible qu'une méthode de détection par ultrasons moins fine ne décèle pas de défauts de grande taille. L'observation inverse doit être attendue : des défauts importants décelés par une technique moins fine apparaissent comme un assemblage de petits défauts en utilisant une technique plus fine.

Dès lors, l'exploitant n'est pas en mesure de fournir une preuve formelle que les défauts ne se sont pas étendus pendant le fonctionnement.

Le fait qu'aucun signe n'ait été détecté après la fabrication mais que des milliers de défauts aient été décelés trente ans plus tard, avec une augmentation de taille dans les résultats des derniers tests par ultrasons, ne peut s'expliquer que par le développement / l'extension des défauts pendant le fonctionnement.

L'exploitant n'est toujours pas en mesure d'expliquer pourquoi seules quatre viroles sont touchées et pourquoi ces défauts sont apparus seulement dans les cuves de ces deux réacteurs.

Un membre de l'International Review Board (IRB) a fait valoir que certains processus de réparation du métal de base avaient pu intervenir avant la pose du revêtement et occasionner des défauts qui ont pu s'agrandir pendant le fonctionnement. Une hypothèse similaire a été exprimée par l'auteure dans l'étude en 2013. Cette éventualité n'a pas été étudiée par l'AFCN.

W. Bogaerts et D. MacDonald émettent l'hypothèse d'un possible mécanisme d'extension provoqué par de l'hydrogène de radiolyse / d'électrolyse dans la paroi de la cuve du réacteur. L'AFCN a rejeté cette hypothèse.

L'approche de défense en profondeur telle que stipulée par Bel V (comparable aux principes fondamentaux de sûreté des Allemands) se fonde sur la qualité supérieure de la cuve du réacteur après fabrication, laquelle doit être maintenue pendant toute la durée d'exploitation. Cette exigence fondamentale n'est certainement pas satisfaite. Une cuve de réacteur avec des milliers de défauts – et avec des défauts d'une telle taille – ne serait pas homologable, ni aujourd'hui, ni à l'époque de sa fabrication.

Les campagnes d'irradiation faisaient partie des exigences de l'AFCN pour le redémarrage en 2013. Ces campagnes ont été réalisées en utilisant des échantillons d'un générateur de vapeur refusé (AREVA VB395), des découpes de tubulures de Doel (exemptes de défauts) et pour la dernière campagne, des échantillons allemands FKS (KS02). Ni les échantillons VB395, ni les KS02 ne peuvent être considérés comme représentatifs du matériau de base des réacteurs ; les découpes de tubulures ne sont représentatifs que du matériau de base non défectueux des cuves des réacteurs, mais ils n'ont pas le même historique de fonctionnement que les cuves des réacteurs. Electrabel a procédé à ces tests en se basant sur l'hypothèse que ces échantillons étaient représentatifs.

La fragilisation inattendue des échantillons VB395 irradiés dans le réacteur expérimental BR2 a finalement été justifiée par un mécanisme de fragilisation encore inconnu à ce jour ; actuellement,

ces échantillons sont considérés comme des profils anormaux. Electrabel et l'AFCN ne s'attendent pas à une telle fragilisation accentuée des viroles de Doel 3 et Tihange 2.

Par le passé, les découvertes expérimentales sur la fragilisation d'aciers de même type ont toujours été incluses dans la base de données sur la fragilisation qui est utilisée pour définir les courbes prédictives de fragilisation comme limites supérieures enveloppes. La fragilisation par les neutrons est le résultat complexe de processus stochastiques comprenant plusieurs mécanismes possibles. Éliminer les découvertes inattendues en les désignant comme des « profils anormaux » ne peut pas être considéré comme une pratique scientifique saine.

Les courbes tendancielle de fragilisation sont utilisées dans le cadre de l'analyse de choc thermique sous pression pour calculer les courbes de ténacité en fonction de la fluence neutronique. Dans les normes françaises, les courbes dites FIS sont des limites supérieures enveloppes fondées sur les données expérimentales de fragilisation d'aciers similaires. Electrabel a établi de nouvelles courbes prédictives qui remplacent les courbes FIS utilisées jusqu'à présent. Les termes utilisés dans la nouvelle équation sont supposés prendre en compte les incertitudes de l'état réel de la ténacité de l'acier des cuves des réacteurs. Aucune justification des facteurs utilisés dans les différents termes n'est fournie – mais il est clair que la nouvelle courbe tendancielle ne constitue plus une limite supérieure enveloppe du décalage de la température de transition ductile-fragile du matériau (RT_{NDT}).

Pour l'évaluation de l'intégrité structurelle, le champ de température sur la paroi de la cuve du réacteur doit être calculé pour des transitoires accidentels graves (par exemple, les accidents de perte de réfrigérant primaire) en supposant l'injection de sécurité d'eau froide le long de la paroi chaude de la cuve. Les gradients de température vont provoquer des contraintes thermiques dans la paroi de la cuve, qui pourraient favoriser l'extension non contrôlée de fissures en fonction des propriétés mécaniques du matériau. Ces calculs de rupture mécanique sont réalisés sur la base d'hypothèses sur la ténacité réelle du matériau, ainsi que de courbes prédictives incluant le phénomène de fragilisation neutronique. Les calculs doivent être réalisés pour chaque fissure détectée (taille, forme, localisation) ; il faut démontrer que pour aucune fissure, il ne se produira une extension incontrôlée dans le cas du transitoire accidentel supposé (critère ASME).

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, il existe des doutes sur le fait que la ténacité (sans les effets d'irradiation) de l'acier défectueux soit la même que celle de l'acier non défectueux. Dans la nouvelle courbe tendancielle, la ténacité initiale du matériau non défectueux est utilisée. Electrabel prétend qu'un terme supplémentaire de la nouvelle courbe tendancielle est censé couvrir la partie inconnue (inattendue) de la fragilisation induite par l'irradiation dans le taux de fragilisation observé sur les échantillons VB395. Ce terme n'est pas quantifié par Electrabel. La justification des valeurs numériques utilisées peut être trouvée dans le rapport de l'Oak Ridge National Laboratory (ONRL), qui indique que cette valeur n'était pas enveloppe des résultats expérimentaux de fragilisation, mais a été ajustée aux exigences limites en matière de fragilisation dans les normes.

Dans le cadre de cette évaluation de l'intégrité structurelle, plusieurs défauts n'étaient pas conformes aux critères d'acceptabilité de l'ASME. Dès lors, les calculs de l'ONRL incluaient l'effet dit de « précontrainte thermique » – qu'il n'est pas prévu d'appliquer dans l'analyse de choc thermique sous pression selon les normes françaises et allemandes – afin d'atteindre la conformité avec les critères d'acceptabilité de l'ASME. Pour l'un des défauts, cette procédure n'a pas été suffisante pour

atteindre la conformité. Finalement, une modélisation « plus réaliste » du défaut a été nécessaire pour atteindre la conformité avec les critères de l'ASME. C'est certainement une réduction supplémentaire du conservatisme.

Pour un résultat positif des calculs de l'évaluation de l'intégrité structurelle, il a également fallu supposer que l'eau du système d'injection de sécurité était chauffée à 40° (selon Electrabel). L'ORNL a fixé la température à 40 ° pour ses calculs. Dans le rapport final de l'AFCN, la température de l'eau du système d'injection de sécurité n'est pas quantifiée. Jan Bens, directeur de l'AFCN, a informé la Chambre belge des Représentants que cette température a été augmentée à 45-50° C. Ces 50° constituent la limite en ce qui concerne la capacité de refroidissement du cœur en cas d'accident.

Ceci soulève un problème supplémentaire : l'important volume d'eau du système d'injection de sécurité (probablement environ 1 800 m³) doit en permanence être réchauffé à environ 45° C. La température ne peut pas être inférieure à 40° C, parce que cela transgresserait les exigences d'intégrité structurelle en cas d'accident, mais elle ne doit pas atteindre 50° C, parce que cela compromettrait la capacité de refroidissement du cœur en conditions accidentelles.

Il est manifeste que la fenêtre de tolérance est plutôt réduite et qu'il n'existe aucune marge de sûreté.

L'évaluation des documents publiés a révélé une diminution du conservatisme tout au long de l'analyse du dossier de sûreté (*Safety Case*) réalisée. Les échantillons non représentatifs utilisés lors des campagnes d'irradiation, qui étaient censés confirmer la marge de sûreté lors de l'évaluation des risques dans le dossier de sûreté 2012, se sont transformés en « profils anormaux ». En gardant à l'esprit que l'agrandissement des défauts dans les viroles des réacteurs pendant leur fonctionnement ne peut pas être exclu, l'autorisation de redémarrage des deux réacteurs est incompréhensible.

- D'après les calculs de l'ORNL, plusieurs défauts ne répondaient pas au critère d'acceptation de l'ASME.
- Il a fallu inclure l'effet du choc thermique sous pression (que ne prévoient pas les normes françaises) pour que la plupart des défauts répondent au critère d'acceptabilité.
- Pour un des défauts, cette procédure n'a pas suffi, et une modélisation « plus réaliste » a dû être adoptée pour atteindre la conformité requise. Cette démarche constitue une diminution du conservatisme.
- Il convient de garder à l'esprit que la marge de sûreté inhérente de la formule FIS a été éliminée par la nouvelle formule de prévision. Le décalage supplémentaire est censé tenir compte du fait qu'une possible fragilisation accrue n'enveloppe pas les résultats expérimentaux.

3. Conclusions générales

Pour assurer une exploitation sûre des centrales nucléaires, l'approche de défense en profondeur (comparable aux principes fondamentaux de sûreté des Allemands) se base sur une conception, des matériaux et une exploitation de qualité supérieure.

- Les fondamentaux de sûreté et la qualité la plus élevée au titre de la défense en profondeur pendant la fabrication des cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 ne peuvent pas être démontrées, en raison de la documentation lacunaire.
- La détection de milliers de défauts prouve que la qualité la plus élevée n'est pas obtenue et que les cuves ne seraient homologables ni aujourd'hui, ni à l'époque de leur fabrication. Il est dès lors extrêmement discutable, dans le cadre de la sûreté fondamentale ou d'une approche de défense en profondeur, que l'autorité nucléaire autorise le redémarrage des deux centrales 30 ans plus tard.

En ce qui concerne les défauts détectés, l'évaluation des documents montre :

- La nature réelle des défauts à l'origine des indications découvertes lors des tests par ultrasons peut seulement être révélée par des essais destructifs. L'hypothèse des bulles d'hydrogène, formulée par Electrabel et acceptée par l'AFCN, se base uniquement sur des considérations de vraisemblance.
- L'hypothèse des bulles d'hydrogène ne peut pas expliquer pourquoi seules les quatre viroles des centrales nucléaires de Doel 3 et de Tihange 2 sont affectées, et pas toutes les cuves forgées par le même constructeur.
- L'hypothèse des bulles d'hydrogène ne peut pas expliquer pourquoi les défauts n'ont pas été détectés lors des essais de réception après fabrication.

- L'éventualité selon laquelle avant ou pendant la pose du revêtement, des processus intermittents auraient pu introduire des impuretés dans la paroi de la cuve, avec ensuite un agrandissement en cours d'exploitation, n'a été étudiée ni par Electrabel, ni par l'AFCN.
- L'hypothèse selon laquelle de l'hydrogène de radiolyse / électrolyse aurait pu contribuer à l'agrandissement des défauts en cours d'exploitation (W. Bogaerts, D. D. Macdonald) a été rejetée par l'AFCN.
- Dans la suite de l'argumentation de l'AFCN et des différents groupes d'experts, on suppose sans aucune restriction que les défauts à l'origine des indications détectées lors des tests par ultrasons sont des bulles d'hydrogène, bien qu'il n'existe toujours aucune preuve de cette supposition.

En ce qui concerne le nombre et la taille des défauts et l'agrandissement des défauts en cours d'exploitation :

- Le fait qu'aucun défaut n'ait été découvert pendant les essais de réception après la fabrication ne constitue manifestement pas un enjeu pour l'AFCN et les groupes d'experts.
- La comparabilité limitée entre les mesures réalisées en 2012 et en 2014 ne constitue elle aussi qu'une préoccupation mineure pour l'AFCN et les groupes d'experts.
- Il est peu probable qu'une technique de détection par ultrasons plus fine décèle des défauts plus importants qui n'ont pas été détectés par une technique moins fine. C'est à l'observation inverse qu'il faut s'attendre : des défauts importants détectés par une technique moins fine apparaissent comme un assemblage de petits défauts en utilisant une technique plus fine.
- L'exclusion imprécise de connexions radiales entre les défauts, qui implique qu'il existe des connexions radiales, indique un affaiblissement supplémentaire de la paroi de la cuve.
- Le fait qu'aucune indication n'ait été observée après la fabrication, mais que des milliers de défauts ont été observés 30 ans plus tard avec une augmentation de taille dans les résultats des dernières inspections par ultrasons, peut seulement être expliqué par le développement / l'extension des défauts en cours d'exploitation.
- L'exclusion de toute extension des défauts à l'exception de la fatigue oligocyclique en cours d'exploitation est en contradiction avec l'état de la science et de la technologie. Même dans le cas où les défauts observés seraient des bulles d'hydrogène, des mécanismes d'agrandissement des bulles comme ceux décrits par Bogaerts et Macdonald ne peuvent pas être écartés.

La qualité des propriétés mécaniques tout au long de la durée de service revêt une importance capitale pour le maintien de l'intégrité structurelle des cuves de réacteur.

- La ténacité du métal de base avec défauts (sans effet de l'irradiation) n'est pas connue. En raison de l'absence de matériau d'échantillonnage représentatif, il n'est pas possible de déterminer celle-ci de façon expérimentale.

- Les résultats expérimentaux provenant d'échantillons non représentatifs ne peuvent pas être utilisés pour prédire de façon crédible les propriétés mécaniques réelles.
- L'AFCN n'émet pas la moindre réserve concernant la transposition des résultats des échantillons non représentatifs (VB395 et KS02) aux caractéristiques du matériau des cuves des réacteurs.
- La diminution potentielle de ténacité dues aux défauts postulée en 2012/2013 a été ramenée à zéro – ceci constitue une diminution considérable du conservatisme.

Pour étudier les effets de l'irradiation sur le matériau présentant des défauts, l'AFCN avait décidé qu'en l'absence de matériau représentatif de la cuve, Electrabel utiliserait des échantillons du bloc générateur de vapeur VB395 refusé et du matériau provenant des expériences KS02 du projet allemand FKS.

- Les échantillons VB395 et KS02 ne sont pas représentatifs du matériau de la cuve, car ils ne résultent pas du même processus de fabrication, n'ont pas subi le même traitement thermique et ne présentent pas les mêmes antécédents opérationnels ; même l'acier est similaire, mais pas identique.
- Les échantillons VB395 et KS02 ne sont pas non plus représentatifs du matériau de la paroi de la cuve présentant des défauts, puisque la nature des défauts des viroles de Doel 3 et Tihange 2 n'est pas encore démontrée.
- Les résultats des tests d'irradiation réalisés sur les échantillons VB395 et KS02 caractérisent ces matériaux du point de vue de leurs propriétés mécaniques spécifiques et de la sensibilité à l'irradiation, mais ils ne permettront pas de déduire des informations fiables sur l'état réel de la paroi de la cuve du réacteur. Les données pourraient uniquement servir à enrichir la base de données sur la fragilisation des aciers présentant des caractéristiques similaires.
- La formule de prévision FIS définie dans les normes françaises a été remplacée par Electrabel par des courbes prévisionnelles « maison » qui sont censées inclure une marge de sûreté supplémentaire basée sur la fragilisation constatée sur le bloc VB395. Aucune explication quantitative ni aucune justification n'est donnée pour les différents termes de l'équation.
- La nouvelle formule prévisionnelle ne répond pas à la définition d'une limite supérieure enveloppe pour des aciers présentant des caractéristiques similaires.
- Les courbes de tendance à utiliser pour l'évaluation de l'intégrité structurelle montrent que la valeur de RT_{NDT} pour 40 ans d'exploitation se situe légèrement en-deçà de la limite des 132°C. Cet élément indique que la « marge variable » est conçue pour tenir compte de cette limite.
- La fragilisation remarquable observée sur les échantillons du bloc VB395 dépassant les courbes prévisionnelle montre que ce matériau ne devrait pas entrer dans la fabrication des cuves en raison de sa forte sensibilité à l'irradiation, mais ces résultats ne peuvent être utilisés pour exclure une fragilisation accrue des viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2.

- Il n'est pas possible d'exclure une fragilisation accrue des viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 en se basant d'une part sur la supposition que les défauts présents sont des bulles d'hydrogène, et d'autre part sur la supposition supplémentaire que la forte fragilisation n'est pas liée aux bulles d'hydrogène.
- La fragilisation observée, dont le niveau dépasse les courbes de tendance prévisionnelle, pourrait tout aussi bien être une indication que les courbes de tendance prévisionnelle ne sont pas conservatives.
- Un possible effet de flux (fragilisation supérieure sous un flux d'irradiation plus modéré par rapport à la fragilisation se manifestant sous un flux plus élevé pour la même dose totale d'irradiation) ne peut pas être exclu.
- Les exigences de l'AFCN concernant les tests d'irradiation sur des échantillons du bloc générateur de vapeur AREVA VB395 refusé se basaient sur un accord conclu entre Electrabel et l'AFCN selon lequel le bloc VB395 était représentatif de l'acier composant la cuve. À la suite des résultats inattendus montrant une fragilisation importante, le bloc VB395 a été qualifié de profil anormal.
- La procédure visant à déclarer le bloc VB395 comme « profil anormal » en raison de la fragilisation inattendue et, à partir de là, à exclure une fragilisation accrue des viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 est extrêmement contestable.
- La définition préalable des bulles d'hydrogène trouvées sur les viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 qui reste valable passe outre le fait qu'il est impossible de l'établir. En ce qui concerne les essais d'irradiation, la fragilisation inattendue du bloc VB395 est présentée comme n'étant pas encore clarifiée mais comme n'étant pas due aux bulles d'hydrogène. En réalité, il n'existe aucun résultat expérimental sur l'effet de l'irradiation sur les viroles des cuves présentant des défauts.
- Les données expérimentales sur les effets de l'irradiation subie par les échantillons VB395 et KS02 montrent que la nouvelle courbe de tendance n'est pas conservative. La dispersion des données pouvant aller jusqu'à 20°C au-dessus de la courbe tendancielle devrait entraîner l'instauration impérative d'une marge de sûreté supplémentaire ou un ajustement de la courbe de tendance sur une limite supérieure enveloppe.
- La marge de sûreté située « dans la fourchette de fragilisation du bloc VB395 » à utiliser pour l'évaluation de l'intégrité structurelle n'est pas quantifiée. Les graphiques montrent qu'il se peut que cette marge de sûreté supplémentaire ne soit qu'un ajustement par rapport à l'exigence de maintenir la température de transition RT_{NDT} en dessous de 132°C jusqu'à la fin de vie.
- Étant donné que la fragilisation accrue des viroles de Doel 3 et Tihange 2 ne peut pas être exclue, le prétendu décalage supplémentaire défini par Electrabel n'est pas une marge de sûreté. Il pourrait même ne pas être une estimation conservative de la fragilisation éventuelle.

L'évaluation de l'intégrité structurelle effectuée dans le cadre du dossier de sûreté 2015 a été ajustée aux nouvelles données, mais pas par rapport à la méthodologie.

- Par rapport à l'évaluation de l'intégrité structurelle de 2012 : Electrabel a mis à jour la répartition de la fluence neutronique et la taille des défauts, a remplacé la formule FIS par une nouvelle courbe de tendance prévisionnelle et a introduit le préchauffage de l'eau du système d'injection de sécurité à une température de 40°C. L'AFCN ne quantifie pas cette température dans son rapport final 2015 ; Jan Bens (directeur de l'AFCN) a déclaré devant la Chambre des représentants de Belgique que la température de l'eau du système d'injection de sécurité se situera entre 45 et 50°C.
- La nécessité de préchauffer l'eau du système d'injection de sécurité soulève un autre problème : l'important volume d'eau du système d'injection de sécurité (probablement environ 1 800 m³) doit en permanence être réchauffé à environ 45° C. La température ne peut pas être inférieure à 40° C, parce que cela transgresserait les exigences d'intégrité structurelle, mais elle ne doit pas atteindre 50° C, parce que cela compromettrait la capacité de refroidissement du cœur en conditions accidentelles. Il est manifeste que la fenêtre de tolérance est plutôt réduite et qu'il n'existe aucune marge de sûreté.
- Aucune validation expérimentale n'a été présentée pour étayer la procédure de regroupement introduite par Electrabel en 2012.
- Les doutes de l'Autorité de régulation française quant au caractère suffisamment pénalisant du jeu de scénarios retenus pour les transitoires accidentels n'ont pas été discutés.
- D'après les calculs de l'ORNL, plusieurs défauts ne répondaient pas au critère d'acceptation de l'ASME.
- Il a fallu inclure l'effet du choc thermique sous pression (que ne prévoient pas les normes françaises) pour que la plupart des défauts répondent au critère d'acceptabilité.
- Pour un des défauts, cette procédure n'a pas suffi, et une modélisation « plus réaliste » a dû être adoptée pour atteindre la conformité requise. Ceci constitue une nouvelle diminution du conservatisme.
- Il convient de garder à l'esprit que la marge de sûreté inhérente de la formule FIS a été éliminée par la nouvelle formule de prévision. Le décalage supplémentaire est censé tenir compte du fait qu'une possible fragilisation accrue n'enveloppe pas les résultats expérimentaux.

L'évaluation des documents publiés a révélé une diminution du conservatisme tout au long de l'analyse du dossier de sûreté. Les échantillons non représentatifs qui étaient censés confirmer la marge de sûreté lors de l'évaluation des risques dans le dossier de sûreté 2012 se sont transformés en profils anormaux. En gardant à l'esprit que l'extension des défauts dans les viroles des cuves des réacteurs au cours de leur exploitation ne peut pas être exclue, l'autorisation de redémarrage des deux réacteurs est incompréhensible.

4. Annexe

Déclaration minoritaire sur l'adéquation des marges associées à la ténacité au début de la vie et sur d'autres aspects du dossier de sûreté. ⁹¹ (Page 29)

Un membre de l'IRB ne soutient pas pleinement l'évaluation de l'IRB (voir la section 3 et la section 4 du rapport de l'IRB) ; sur la base des arguments suivants et sur l'examen des documents fournis après la réunion de l'IRB d'avril 2015 par Electrabel en réponse aux préoccupations minoritaires :

a) Les valeurs de la ténacité initiale peuvent ne pas être conservatives pour les zones avec une densité élevée d'indications aux tests par ultrasons, parce que celles-ci sont probablement corrélées à un niveau élevé de ségrégation.

b) La teneur en phosphore des viroles de Doel 3 et Tihange 2 est supérieure à celle du bloc VB395 et de l'échantillon KS02 d'après l'analyse du produit, ce qui peut influencer l'étendue de la ségrégation et la réponse à l'irradiation.

c) La répartition d'indications proches de la surface dans la virole de cœur inférieure de Doel 3 présente un type de troncature qui diffère considérablement des autres viroles et qui doit être expliquée conjointement à l'hypothèse fondamentale de bulles d'hydrogène.

d) Sur la base du type de distribution mentionné ci-dessus, les experts ne voient aucune raison pour que les ségrégations ne soient pas présentes jusqu'à la surface de la virole de cœur inférieure de Doel 3, affectant les propriétés du matériau de l'interface de revêtement. De plus, il est possible que des réparations aient été effectuées sur le matériau de base avant la pose du revêtement pour supprimer des défauts de surface dans cette zone et, eu égard aux pratiques de fabrication de l'époque, n'aient pas été signalées.

e) La répartition des indications de l'inspection de 2014, comparée avec l'inspection de 2012, montre dans une certaine mesure une population plus dense dans la direction axiale, ce qui pourrait entraîner une diminution des tailles constatées pour les ligaments, et rendrait difficile l'exclusion de petits défauts ou de joints de grain faibles non-déTECTABLES dans les ligaments.

f) L'expert comprend que le calcul de l'intensité de la contrainte ne tient pas compte des contraintes résiduelles. Celles-ci peuvent être présentes subissant les influences de la fabrication : le traitement thermique ; les différentes microstructures locales ; la formation des bulles d'hydrogène ; et, pour les indications proches de la surface, la zone de soudage du revêtement affectée thermiquement. Il est difficile d'évaluer les valeurs et la direction (traction/compression) pendant les charges transitoires.

g) L'angle d'inclinaison des indications de défauts peut différer selon les zones de ségrégation et il se peut que la proposition de baser cet angle d'inclinaison sur les mesures des tests par ultrasons soit trop exigeante pour la technique de détection par ultrasons dont la validation ne couvre pas le spectre complet de tailles et de densités des bulles.

h) Compte tenu de l'expérience d'exploitation, le fait de se fonder sur une inspection visuelle pour étayer l'hypothèse d'un revêtement non fissuré reste controversé.

i) Compte tenu de l'interprétation actuelle de la taille des bulles, les zones avec une densité élevée d'indications proches de la surface dans le réacteur de Doel 3 pourraient avoir un impact sur la répartition de la température locale dans des conditions transitoires provoquant des contraintes hétérogènes dans les ligaments locaux.

j) Certains membres de l'IRB ont repris confiance, convaincu par l'argument de l'arrêt de fissure, qui n'intervenait pas dans le dossier de sûreté d'Electrabel, mais qui avait été suggéré par un des experts de l'IRB. Toutefois, l'utilisation de cette condition d'arrêt de fissure risque d'être difficile à valider pour les zones des viroles présentant un niveau élevé de ségrégations et de bulles. À la connaissance des experts, les expériences menées à grande échelle (p. ex. ORNL, MPA, NESc) simulant l'effet

⁹¹ *Doel 3 and Tihange 2 issue: International Review Board Final Report* (Problématique de Doel 3 et de Tihange 2 : rapport final de l'International Review Board), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

combiné de charges thermiques et mécaniques ne couvrent pas les cas de matériaux contenant des ségrégations similaires et des bulles, et même dans des conditions moins compliquées, l'étendue de l'extension des fissures et le nombre de reprises n'étaient pas suffisamment prédit.

Abréviations

AFCN Agence fédérale de contrôle nucléaire

ASME American Society of Mechanical Engineers

EBL Electrabel – Groupe ENGIE

FIS Formule d'irradiation supérieure

FKS Forschungsvorhaben Komponentensicherheit (projet de recherches sur la sécurité des composants)

IRB International Review Board

LOCA accident de perte de réfrigérant primaire

NDT température de ductilité nulle

NSEG Groupe national d'experts scientifiques

ORNL Oak Ridge National Laboratory

REP réacteur à eau pressurisée

RSE-M Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques en îlots nucléaires

SCP Service de contrôle physique

SI injection de sécurité

SIA évaluation de l'intégrité structurelle