

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.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Évaluation des documents disponibles	9
2.1 Sûreté fondamentale.....	9
2.2 Indications détectées lors des tests par ultrasons	10
2.2.1 Origine et nature des défauts.....	10
2.2.2 Nombre et taille des défauts.....	15
2.2.3 Extension des défauts en cours d'exploitation	18
2.3 Propriétés mécaniques.....	21
2.3.1 Ténacité initiale du métal de base	21
2.3.2 Effets de l'irradiation sur la ductilité (ténacité) de l'acier.....	24
2.3.2.1 Échantillons utilisés pour les essais d'irradiation	25
2.3.2.2 Formule de prévision de la fragilisation	26
2.3.2.3 Résultats des campagnes d'irradiation (décalage de la température RT_{NDT})	31
2.3.2.4 Incertitudes – marges de sûreté.....	35
2.4 Évaluation de l'intégrité structurelle (SIA)	39
3. Conclusions générales	44
4. Annexe.....	49

1. Introduction

La centrale nucléaire de Doel 3 est entrée en service en 1982, celle de Tihange 2 en 1983. Les deux centrales nucléaires de type réacteurs à eau pressurisée (REP) sont exploitées par Electrabel, qui fait partie du groupe français ENGIE.

Dans le cadre d'inspections réalisées en juin 2012 à Doel 3 en complément des inspections réglementaires pour déceler et caractériser des défauts sous revêtement dans toute la partie cylindrique de la cuve, des défauts inattendus ont été détectés dans les viroles forgées (SA-5086cl.3) de la zone du cœur du réacteur. Les défauts ont été découverts dans le métal de base, dans des zones éloignées des soudures. Dans la virole de cœur inférieure, 7 776 indications ont été découvertes au total, et 931 dans la virole de cœur supérieure.²

Le 17 mai 2013, les experts de l'AFCN ont émis un avis positif sur le redémarrage des deux réacteurs de Doel 3 et Tihange 2.³ En relation avec l'autorisation de redémarrage, l'AFCN a imposé à l'exploitant des exigences concernant des études et des tests supplémentaires (AFCN : *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report*⁴ et *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels, Final evaluation report*⁵). Plusieurs de ces opérations avaient déjà été réalisées avant le redémarrage, tandis que les autres devaient être réalisées après un cycle complet du réacteur, d'ici juin 2014.

Le 25 mars 2014, Electrabel a informé l'AFCN de sa décision d'anticiper l'arrêt planifié de ses réacteurs de Doel 3 et Tihange 2.⁶

Le 1^{er} juillet 2014, l'AFCN a publié un nouveau communiqué de presse concernant leur maintien à l'arrêt :

« Le résultat de ces tests indique qu'une propriété mécanique (ténacité) du matériau est plus fortement affectée par l'irradiation que les experts ne le prévoyaient. Des tests et des recherches supplémentaires sont nécessaires afin d'interpréter et d'évaluer ces résultats inattendus. »⁷

² AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3 and Tihange 2* (Indications de défauts dans la cuve des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2), 3 septembre 2012, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3200/3288.pdf>

³ Communiqué de presse de l'AFCN sur l'autorisation de redémarrage, <http://www.afcn.fgov.be/fr/news/les-experts-de-l-afcn-ont-rendu-un-avis-positif-concernant-le-redemarrage-des-reacteurs-de-doeel-3-et-tihange-2/614.aspx>

⁴ AFCN, *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report* (Cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport d'évaluation intermédiaire), <http://www.afcn.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

⁵ AFCN, *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Final evaluation report* (Cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2, rapport final d'évaluation), <http://www.afcn.fgov.be/GED/00000000/3400/3429.pdf>

⁶ Communiqué de presse de l'AFCN sur la mise à l'arrêt anticipée de Doel 3 et Tihange 2, <http://www.fanc.fgov.be/fr/news/doel-3/tihange-2-anticipation-de-l-arret-programme-des-reacteurs/668.aspx>

⁷ Communiqué de presse (en anglais) de l'AFFCN sur le maintien à l'arrêt de Doel 3 et Tihange 2, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3600/3657.pdf>

Le 22 août 2014, l'AFCN a publié le communiqué de presse suivant sur les tests d'irradiation effectués par Electrabel :

« Afin d'expliquer ces résultats inattendus, Electrabel a immédiatement initié une seconde campagne de tests et a annoncé qu'elle se poursuivrait jusqu'à l'automne 2014. »⁸

Le 13 février 2015, l'AFCN a publié un nouveau communiqué sur Doel 3 et Tihange 2 incluant les données des nouveaux tests par ultrasons effectués par Electrabel en 2014⁹ :

« En 2014, une nouvelle inspection a été réalisée selon la procédure améliorée et les réglages de l'instrument de mesure modifiés, menant à la détection d'un plus grand nombre d'indications de défauts que lors des mesures de 2012 et 2013. Cela signifie qu'Electrabel doit maintenant prendre en compte dans ses calculs 13 047 indications de défauts pour Doel 3 et 3149 pour Tihange 2. Ces indications de défauts supplémentaires sont similaires à celles qui étaient jusqu'alors prises en compte et se situent dans la même zone de la cuve. »

Dans le contexte des campagnes d'irradiation, l'AFCN a fait part de tests sur un échantillon allemand :

« Une 4ème campagne d'irradiation est en cours à l'heure actuelle dans le réacteur de recherche BR2 du SCK•CEN. Des échantillons présentant des indications de défauts d'hydrogène du matériau français VB395 y sont irradiés, de même que des échantillons présentant des indications de défauts d'hydrogène d'un autre matériau d'origine allemande. Les résultats de cette nouvelle campagne d'irradiation et des tests mécaniques qui s'en suivront sont attendus pour avril 2015. »

« Le 17 novembre 2015, l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN) a autorisé l'exploitant Electrabel à redémarrer les réacteurs de Doel 3 et Tihange 2. Les deux réacteurs étaient à l'arrêt depuis un certain temps pour des raisons de sûreté. »¹⁰

Les documents suivants ont été publiés en même temps sur le site Internet de l'AFCN :

- AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015)¹¹
- Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de

⁸ Communiqué de presse de l'ACFN sur l'évolution de la situation (en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/nl/news/doel-3-and-tihange-2-update-on-the-situation/701.aspx>

⁹ Communiqué de presse de l'AFCN sur la nouvelle évolution de la situation, <http://www.fanc.fgov.be/fr/news/dossier-doel-3/tihange-2-nouvel-etat-de-la-situation/744.aspx>

¹⁰ <http://www.afcn.fgov.be/fr/news/791.aspx>

¹¹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations due aux bulles d'hydrogène¹² sur la l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2)¹³

- AIB-Vinçotte, Rapport de synthèse Doel 201 (en anglais)¹⁴
- AIB-Vinçotte, Rapport de synthèse TIHA 186 (en anglais)¹⁵
- Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3)¹⁶
- Electrabel, *Safety Case 2015, Tihange 2 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Tihange 2)¹⁷
- *Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3)¹⁸
- *Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Tihange 2 reactor pressure vessel assessment* (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Tihange 2)¹⁹
- *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)²⁰
- *ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation* (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 et Tihange 2 : rapport final d'évaluation)²¹

En mars 2013, suite à la publication du Rapport d'évaluation provisoire de l'AFCN le 1^{er} février 2013, l'auteure a réalisé une analyse des documents disponibles.²²

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

¹² 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.

¹³ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

¹⁴ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

¹⁵ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4034.pdf>

¹⁶ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

¹⁷ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4024.pdf>

¹⁸ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

¹⁹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4026.pdf>

²⁰ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

²¹ <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

²² Ilse Tweer, *Flawed Reactor Pressure Vessels in Belgian Nuclear Plants Doel-3 and Tihange-2 Some Comments on the FANC Provisional evaluation report (January 30, 2013)*, (Défauts dans les cuves des réacteurs des centrales nucléaires de Doel 3 et Tihange 2, Commentaires sur le Rapport provisoire d'évaluation de l'AFCN du 30 janvier 2013), mars 2013, <http://www.greens-efa.eu/fileadmin/dam/Documents/Studies/Flawed%20Reactor%20Pressure%20Vessels.pdf>

2. Évaluation des documents disponibles

2.1 Fondamentaux de sûreté

La cuve du réacteur constitue l'élément central d'une centrale nucléaire ; une défaillance de la cuve doit être exclue car les systèmes de sûreté du réacteur ne sont pas conçus pour faire face à un tel accident. Une défaillance de la cuve provoquerait la fusion du cœur et aurait pour conséquence un rejet importante de produits de fission. Concernant la fabrication et l'autorisation d'une cuve de réacteur, il est dès lors d'une importance primordiale que celle-ci soit exempte de défauts et composée de matériaux aux propriétés adéquates, en conformité avec les spécifications, ainsi qu'avec l'état de la science et de la technologie (« sûreté fondamentale »).

Dans l'introduction de son évaluation du dossier de sûreté (*Safety Case*) 2015 (Page 4), Bel V déclare :

« Les principes de défense en profondeur sont traditionnellement appliqués à la conception et à l'exploitation des réacteurs. Dans une approche de défense en profondeur, la plus grande attention doit être portée au premier niveau de défense, qui exige une qualité supérieure en matière de conception, de construction et d'exploitation. Le deuxième niveau de défense est lui aussi primordial, et exige entre autres que des mesures soit prises en cours d'exploitation pour garantir qu'aucune altération des matériaux n'apparaisse et ne compromette la prévention des modes de défaillance. »²³

La sûreté fondamentale exigée lors de la fabrication des cuves de Doel 3 et de Tihange 2 ne peut pas être démontrée, parce que la documentation est lacunaire²⁴, en particulier en ce qui concerne le traitement thermique (traitement de déshydrogénation) de l'acier.

La détection de milliers d'indications dans la paroi de la cuve du réacteur en 2012 est en soi la démonstration que la cuve ne peut pas être considérée comme étant de « qualité supérieure » au sens de la sûreté fondamentale ou d'une approche de défense en profondeur. Un tel composant ne serait homologable ni maintenant, ni à l'époque de sa fabrication. À l'époque de sa fabrication, la technologie de tests par ultrasons était adéquate pour détecter des défauts tels que ceux découverts en 2012 et certains composants défectueux ont été refusés :

« La divergence entre les indications signalées dans les rapports de réception des viroles dans les années 1970 et dans l'inspection en 2012 des viroles de cœur des deux réacteurs reste inexplicée, étant donné que la technologie par ultrasons disponible à l'époque aurait dû avoir la capacité de détecter les indications découvertes. De plus, il est bien établi que d'autres

²³ Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations due aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

²⁴ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessel of Doel 3 and Tihange 2* (Indications de défauts dans la cuve des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2), 3 septembre 2012, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3200/3288.pdf>

composants, comme les anneaux de transition, ont été refusés précisément en raison de ces bulles d'hydrogène. »²⁵

Bel V adhère à la conclusion selon laquelle les principes fondamentaux de sûreté ne sont pas respectés pour les cuves des deux réacteurs :

« La présence de bulles d'hydrogène doit dès lors être considérée comme un écart majeur par rapport à l'exigence d'avoir pour la cuve un matériau qui satisfait aux normes de qualité les plus élevées, en particulier comportant aussi peu de défauts que possible dans les limites de la meilleure technologie de fabrication disponible. »²⁶ (Page 5)

Conclusion :

- Les fondamentaux de sûreté ou 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 30 ans plus tard, l'Autorité nucléaire autorise le redémarrage des deux centrales.

2.2 Indications détectées lors des tests par ultrasons

2.2.1 Origine et nature des défauts

Dès 2012, Electrabel, propriétaire des centrales nucléaires, a affirmé que les défauts à l'origine des indications détectées par les tests par ultrasons étaient dus à la fabrication. Cette affirmation est uniquement fondée sur des considérations de vraisemblance et sur des conclusions d'argumentation par analogie – une preuve expérimentale n'est pas possible sans essai destructif.

« L'examen complet de tous les mécanismes potentiels de formation confirme les bulles d'hydrogène comme la cause la plus probable des indications. »²⁷ (Page 88)

L'hypothèse de bulles d'hydrogène induites par la fabrication a été validée par l'AFCN, et ceci n'a pas changé en 2015 :

²⁵ AFCN, *Doel 3 - Tihange 2 RPV issue: International Expert Review Board Final Report* (Problématique des cuves de Doel 3 et de Tihange 2 : Rapport final de l'International Expert Review Board - en anglais), 15/01/2013, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3393.pdf>

²⁶ Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations dues aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

²⁷ Electrabel, Dossier de sûreté : *Doel 3 – Reactor Pressure Vessel Assessment* (Doel 3 – Évaluation de la cuve du réacteur), décembre 2012.

« En ce qui concerne l'origine des indications, les conclusions publiées par l'AFCN en mai 2013 restent les mêmes. L'origine la plus probable des indications de défauts constatées dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 sont des bulles d'hydrogène induites par le processus de fabrication. »²⁸

L'hypothèse des bulles d'hydrogène ne peut pas expliquer pourquoi ces défauts ont uniquement été détectés dans les quatre viroles des deux centrales nucléaires et n'ont pas été détectés dans les 19 autres cuves forgées par le même fabricant.

Selon l'AFCN, Bel V avait manifestement les mêmes doutes en 2012 :

« Cependant, Bel V note qu'aucune analyse exhaustive d'une cause fondamentale ne peut expliquer pourquoi les dégradations induites par l'hydrogène n'ont pas affecté de la même manière tous les composants forgés des cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2, bien que leur contenu en hydrogène soit comparable. »²⁹

Dans le rapport de l'International Review Board (IRB) de 2015, il est noté que l'un des membres a contesté cette hypothèse des bulles d'hydrogène (la déclaration minoritaire complète peut être consultée en annexe, section 4) :

« 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 en conjonction avec l'hypothèse fondamentale de bulles d'hydrogène. »³⁰ (Page 29)

Il est intéressant de noter que ni l'AFCN, ni Electrabel n'ont étudié l'éventualité qu'avant ou pendant la pose du revêtement, quelque-chose ait pu se produire qui aurait provoqué la pénétration d'impuretés dans la paroi de la cuve, avec ensuite la formation et / ou l'extension de défauts en cours d'exploitation. De tels mécanismes pourraient expliquer les questions restées sans réponse.

L'auteure, Ilse Tweer, a envisagé une telle éventualité dans le rapport de 2013 :

« Il n'a été examiné nulle part si quelque-chose a pu se produire sur la surface interne brute en acier ferritique de la cuve et / ou pendant la pose du revêtement qui aurait induit l'extension des défauts dans la cuve en cours d'exploitation. De tels mécanismes pourraient expliquer pourquoi seules certaines viroles sont affectées, et pourquoi les défauts observés sont plutôt proches de l'interface. De tels mécanismes auraient au moins dû être pris en compte comme une explication possible / probable de la présence de ces défauts. Étant donné que ces

²⁸ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), page 43, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

²⁹ AFCN, *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report* (Cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport d'évaluation intermédiaire), 30/01/2013, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

³⁰ *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>

mécanismes impliquent que les défauts s'étendent en cours d'exploitation, les prendre en compte devrait être un préalable à toute considération de redémarrage. »³¹ (Page 14)

Une hypothèse similaire a été présentée par un membre de l'IRB :

« 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. »³² (Page 29)

En 2015, W. Bogaerts et D. D. MacDonald ont étudié l'hypothèse selon laquelle pendant l'exploitation, de l'hydrogène produit par des processus électrolytiques (corrosion) pourrait diffuser dans la paroi de la cuve du réacteur et s'associer aux bulles d'hydrogène, ce qui pourrait alors provoquer un cloquage dangereux.³³ Selon le rapport final de 2015 de l'AFCN, cette hypothèse a été étudiée et finalement rejetée par les experts de l'AFCN :

« Compte tenu des arguments initiaux de l'exploitant et des professeurs Bogaerts et MacDonald ; des commentaires du NSEG ; des études et des calculs supplémentaires fournis par l'exploitant pour satisfaire aux recommandations du NSEG ; de l'évaluation par BEL V ; des commentaires effectués par trois experts internationaux mondialement reconnus comme spécialistes des questions liées à la corrosion provoquée par l'hydrogène, l'AFCN dresse les conclusions suivantes dans sa synthèse sur les fissures induites par l'hydrogène :
Le seul mécanisme théorique de propagation des bulles détectées dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 est la fatigue oligocyclique, qui est supposée avoir un effet limité. D'autres phénomènes (comme le cloquage par l'hydrogène ou les fissures induites par l'hydrogène) ont été évalués et écartés comme mécanismes possibles d'extension des fissures en cours d'exploitation. »³⁴ (Pages 41 ss.)

L'hypothèse de Bogaerts et de MacDonald ne peut pas (encore) expliquer pourquoi ces milliers d'indications apparaissent uniquement dans les quatre viroles de Doel 3 et de Tihange 2 et pas dans toutes les autres cuves des réacteurs dans le monde entier, bien que la possibilité de voir la diffusion d'hydrogène se combiner à d'autres défauts existe certainement pour la plupart des cuves des

³¹ Ilse Tweer, *Flawed Reactor Pressure Vessels in Belgian Nuclear Plants Doel-3 and Tihange-2 Some Comments on the FANC Provisional evaluation report (January 30, 2013)*, (Défauts dans les cuves des réacteurs des centrales nucléaires de Doel 3 et Tihange 2, Commentaires sur le Rapport provisoire d'évaluation de l'AFCN du 30 janvier 2013 – en anglais), mars 2013,

<http://www.greens-efa.eu/fileadmin/dam/Documents/Studies/Flawed%20Reactor%20Pressure%20Vessels.pdf>

³² *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>

³³ W. F. Bogaerts, Z. H. Zheng, A. S. Jovanovic, D. D. MacDonald, *Hydrogen-induced damage in PWR reactor pressure vessels*, (Dommages induits par l'hydrogène dans les cuves des réacteurs à eau pressurisée – en anglais), recherche en cours, colloque CORROSION, 15 au 19 mars 2015, Dallas, États-Unis, prépublication

³⁴ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

réacteurs dans le monde. L'hypothèse de Bogaerts peut expliquer les augmentations de taille des défauts publiées par l'AFCN en 2015, en supposant une nouvelle extension induite par l'hydrogène (voir point 2.2.3).

L'AFCN conclut dans son rapport final d'évaluation de 2015 :

« L'origine la plus probable des indications de défauts identifiées dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 sont des bulles d'hydrogène dues au processus de fabrication. » et « Toutes les exigences à moyen terme concernant l'origine et l'évolution des indications de défauts découvertes dans les viroles de cœur des cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 ont reçu une réponse satisfaisante et ont été closes par l'Autorité de sûreté. » (Page 43)

Conclusion :

- 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 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.

Note de l'auteur sur les bulles d'hydrogène

Les effets délétères de l'hydrogène dans les aciers sont connus sous les appellations de fragilisation par l'hydrogène, rupture retardée, fissuration induite par l'hydrogène, etc. Dès lors, dans l'industrie de l'acier destiné à la fabrication des cuves, des traitements de déshydrogénisation sont requis. Les

bulles d'hydrogène sont décrites dans la littérature scientifique comme un défaut très dangereux, provoquant des défaillances sévères (voir notamment NRC³⁵, Voronenko³⁶).

En raison des effets dangereux des bulles d'hydrogène, des composants qui en contenaient ont été refusés après fabrication, comme une virole de Tihange ou encore le générateur de vapeur AREVA VB395.

Même Bel V affirme que les bulles d'hydrogène doivent être considérées comme un écart majeur par rapport à l'exigence d'avoir pour les cuves un matériau qui satisfasse aux normes de qualité les plus élevées, et en particulier qui contienne aussi peu de défauts que possible.

Cependant, l'AFCN (en supposant que les défauts soient des bulles d'hydrogène) a clos la question « toutes les exigences à moyen terme concernant l'origine et l'évolution des indications de défauts » dans son autorisation de redémarrage.

Est-ce là l'interprétation par l'AFCN de ce qu'est la responsabilité d'une Autorité de régulation nucléaire de garantir le niveau de qualité et de sûreté les plus élevés dans les installations nucléaires nationales ?

³⁵ NRC (Nuclear Regulatory Commission, Commission de réglementation nucléaire des États-Unis), *Metallurgical aspects influencing the potential for hydrogen flaking in forgings for reactor pressure vessels* (Aspects métallurgiques influant sur la possibilité de bulles d'hydrogène dans les pièces forgées des cuves de réacteurs à eau pressurisée), <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1322/ML13226A174.pdf>

³⁶ B. I. Voronenko, *Hydrogen and flakes in steel* (Hydrogène et bulles dans l'acier), *Metal science and heat treatment*, novembre 1997, volume 39, n° 11, pp 462-470

2.2.2 Nombre et taille des défauts

Dans son rapport provisoire de 2013, l'AFCN déclare à propos du nombre et de la taille des défauts détectés :

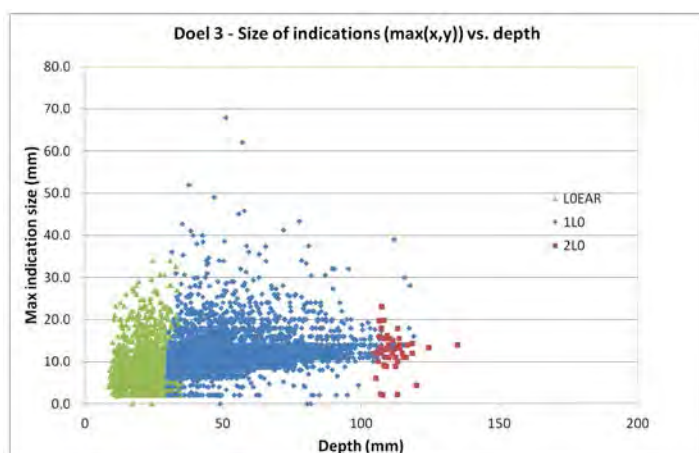
Pour Doel 3 :

« Dans les deux viroles, les défauts laminaires forment une constellation dans la bande centrale de la virole, qui se situe dans une profondeur allant de l'interface avec le revêtement en acier inoxydable jusqu'à 120 mm. Les indications ont en moyenne un diamètre de 10 à 14 mm (certaines dépassant même les 20 à 25 mm). »³⁷ (Page 23)

Et pour Tihange 2:

« À l'intérieur des viroles, qui sont les plus affectées, des défauts ont été observés jusqu'à une profondeur de 100 mm à partir de la surface interne. Cependant, la plupart des défauts sont localisés entre 20 et 70 mm de profondeur. En ce qui concerne leurs dimensions, des défauts d'une largeur maximale de 24 mm ont été observés. Cependant, la plupart d'entre eux font moins de 10 mm. » (Page 24)

Ces affirmations sont remarquables, parce que dans le dossier de sûreté 2012 d'Electrabel, le diagramme (ici, pour Doel 3) montre que le nombre d'indications d'une largeur supérieure à 20 à 25 mm est nettement supérieur à « quelques-unes ».



Source : Electrabel³⁸

Légende de l'illustration :

En haut : Doel 3 » - Taille des indications (max (x,y)) vs. Profondeur

A gauche : Taille max. des indications (en mm)

En bas : Profondeur (en mm)

³⁷ AFCN, *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report* (Cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport d'évaluation intermédiaire), <http://www.afcn.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

³⁸ Electrabel, *Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment* (Dossier de sûreté : Doel 3 – Évaluation de la cuve du réacteur), 05/12/2012 <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

En février 2015, l'AFCN a communiqué de nouvelles découvertes concernant le nombre de défauts et leurs tailles³⁹: Selon l'AFCN, l'exploitant des deux centrales a découvert durant la qualification requise de la méthode d'inspection que celle-ci « ne permettait pas de détecter toutes les indications de défauts, et que la méthode utilisée pour l'interprétation des signaux avait tendance à sous-estimer les dimensions d'une petite partie des indications de défauts détectées. En mai et en juin 2014, l'exploitant a procédé à de nouvelles inspections par ultrasons à Doel 3 et à Tihange 2, avec pour résultat des indications de défauts de tailles encore supérieures ». Les données corrigées montrent une augmentation d'environ 60 % du nombre de défauts, ainsi qu'une forte augmentation de la taille moyenne et maximale des indications de défauts.

À titre d'exemple, les données concernant la virole inférieure de Doel 3, communiquées dans les informations de « clarification » de l'AFCN, sont comparées :

DOEL 3	2012	Réinterprétation des données de 2014	
		Virole inférieure	Virole inférieure
Nombre d'indications détectées	7 205	6 936	11 607
Longueur moyenne axiale des défauts (mm)	9,6	13,2	16
Longueur moyenne azimutale des défauts (mm)	7,6	11,7	12,7
Taille maximale des défauts axiaux (mm)	67,9	90,6	179
Taille maximale des défauts azimutaux (mm)	38,4	47,2	72,3

Les dernières campagnes de tests ont été réalisées par Electrabel dans le cadre de la procédure de qualification des essais non destructifs, comme l'exigeait l'AFCN. Concernant ces résultats, l'AFCN conclut :

« - Le nombre d'indications signalées est sensiblement plus élevé qu'en 2012, principalement en raison d'une baisse des seuils de détection et de l'utilisation d'un capteur plus sensible.

- La mise à jour de la procédure de mesure de la taille des défauts a conduit à une augmentation de la taille des défauts à prendre en compte dans l'évaluation de l'intégrité structurelle. La tendance de la nouvelle procédure de mesure de la taille des défauts à identifier des groupes d'indications comme des défauts uniques de grande taille conduit également à signaler des dimensions moyennes plus grandes et des dimensions maximales beaucoup plus grandes en 2014.

- Les nouvelles indications signalées sont localisées dans les mêmes zones que les indications signalées en 2012.

³⁹ <http://www.fanc.fgov.be/fr/news/doel-3/tihange-2-clarifications-regarding-the-detection-the-position-and-the-size-of-the-flaw-indications/753.aspx>

- *Aucune connexion radiale significative entre des bulles d'hydrogène n'a été détectée dans les viroles de cœur des cuves.*⁴⁰ (Page 77)

Il faut s'attendre à ce qu'une technique de mesure plus fine révèle un nombre plus élevé d'indications, mais il est difficile de comprendre comment des défauts de grande taille n'ont pas été détectés par les techniques moins fines. L'effet inverse semble vraisemblable : de grands défauts détectés par une technique moins fine apparaîtront comme des assemblages de petits défauts en utilisant une technique plus fine.

Selon Bel V, les informations fournies par Electrabel concernant la localisation des indications détectées ne sont pas complètes :

*« Aucune information exhaustive n'a été publiée permettant de comparer les paramètres statistiques qui caractérisent la répartition des angles d'inclinaison des indications de défauts. Concernant la virole de cœur inférieure de Doel 3, les courbes de répartition des angles d'inclinaison pour les inspections de 2012 et de 2014 ont été publiées et elles n'apportent pas la preuve d'une modification significative de la valeur moyenne, ni de l'écart-type. »*⁴¹ (Page 8)

Bel V conclut :

« Bel V considérait également qu'ils n'étaient pas en mesure de fournir une vue d'ensemble de l'aggravation des dégradations. » (Page 8)

À la demande de Bel V, Electrabel a dû déterminer s'il existait des connexions radiales entre les défauts susceptibles de générer des extensions radiales critiques des défauts.

L'AFCN conclut que :

*« Aucune connexion radiale significative entre les bulles d'hydrogène des viroles de cœur des cuves de Doel 3 et de Tihange 2 n'a été détectée. »*⁴² (Page 31)

Si l'on garde à l'esprit les déclarations faites par l'AFCN en 2013 concernant les tailles des défauts, la formulation « *aucune connexion significative* » pourrait signifier qu'il y a des connexions radiales.

À ce propos, l'un des membres de l'International Review Board a déclaré :

« 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

⁴⁰ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁴¹ Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations dues aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁴² AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

pourrait entraîner une diminution des tailles constatées pour les ligaments, et rendrait difficile d'exclure de petits défauts ou des faiblesses de joints de grains non-détectables dans les ligaments. »⁴³ (Page 29)

Pour résumer les déclarations citées, il est manifeste que l'AFCN et les groupes d'experts associés expriment des craintes concernant la comparabilité des tailles des défauts mesurées en 2012 et en 2014, qui indiquent une extension possible des défauts. Par conséquent, l'AFCN inclut une exigence unique dans sa déclaration sur l'autorisation de redémarrage :

« L'AFCN exige que l'exploitant réalise des inspections de suivi par ultrasons sur l'épaisseur de la paroi des viroles des cuves en utilisant la procédure qualifiée à la fin du prochain cycle de Doel 3 et de Tihange 2 et au moins une fois tous les trois ans ensuite . »⁴⁴ (Page 80)

Conclusion :

- Le fait qu'aucun défaut mesurable 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 une réduction supplémentaire de la résistance de la paroi de la cuve.

2.2.3 Extension des défauts en cours d'exploitation

Le fait qu'aucune indication de défaut n'a été découverte lors des essais de réception suivant la fabrication des cuves des réacteurs et que des milliers de défauts ont été détectés après 30 années d'exploitation indique qu'un développement - ou au moins une extension - des défauts a eu lieu en cours d'exploitation. Une autre preuve d'extension en cours d'exploitation est la détection de défauts de très grande taille durant les tests de 2014, par comparaison avec les données de 2012.

Bel V rapporte l'affirmation d'Electrabel selon laquelle aucune extension n'est intervenue en cours d'exploitation et exprime en même temps ses propres doutes :

⁴³ *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), 2015, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

⁴⁴ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

« Selon Electrabel, la comparaison amenait à conclure qu'aucune nouvelle indication n'avait été détectée en 2014 et qu'aucune extension des indications en cours d'exploitation n'avait été identifiée ».

De l'avis de Bel V, « sachant que le laps de temps écoulé entre le redémarrage en 2013 et la mise à l'arrêt en 2014 est inférieur à un an, les résultats de la comparaison ne permettent pas d'affirmer qu'il existe une preuve expérimentale de l'absence d'extension en cours d'exploitation. Cependant, ces résultats doivent être considérés comme positifs. » (Page 17) ⁴⁵

Début 2015, un article a été présenté lors du congrès CORROSION 15 à Dallas sur la corrosion dans les cuves des REP⁴⁶ ; cet article étudiait la possibilité que de l'hydrogène d'électrolyse / radiolyse diffuse dans la paroi de la cuve, induisant des phénomènes de cloquage par l'hydrogène. De tels effets indiqueraient le développement / l'extension des défauts dans la paroi de la cuve et pourraient constituer un problème d'amplitude mondiale.⁴⁷ L'AFCN explique dans son rapport final d'évaluation 2015 :

« Une hypothèse de cloquage par l'hydrogène, ou de fissuration induite par l'hydrogène, a été exposée par les Prs. W. Bogaerts (KU Leuven) et D. D. MacDonald (UC Berkeley), qui affirment que l'exposition des cuves de réacteur à l'eau du circuit primaire en cours d'exploitation pourrait résulter en une accumulation d'hydrogène moléculaire, avec pour conséquence une augmentation de la pression dans les bulles (induites par l'hydrogène), et entraîner leur extension en cours d'exploitation de la cuve. » (Page 40)

Electrabel ne mentionne que très brièvement la discussion sur l'hypothèse du cloquage :

« Étant donné que la teneur et la pression de l'hydrogène dans les bulles sont trop faibles, aucun impact de l'hydrogène sur les propriétés du matériau n'est à attendre du côté primaire et aucun mécanisme de propagation lié à l'hydrogène n'est possible. L'approche et les hypothèses de calcul ont été validées par des mesures de la teneur résiduelle en H dans les défauts (qui ne montraient aucune teneur significative en H), par une analyse des documents et par l'avis d'experts internationaux. L'absence de propagation des bulles induites par H est également confirmée par l'absence d'évolution des bulles après un cycle complet et la mise à l'arrêt.⁴⁸ » (Page 61)

⁴⁵ Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations dues aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁴⁶ W. F. Bogaerts, Z. H. Zheng, A. S. Jovanovic, D. D. MacDonald, *Hydrogen-induced damage in PWR reactor pressure vessels*, (Dommages induits par l'hydrogène dans les cuves des réacteurs à eau pressurisée), recherche en cours, colloque CORROSION, 15 au 19 mars 2015 à Dallas, États-Unis, prépublication

⁴⁷ <http://www.3sat.de/mediathek/index.php?mode=play&obj=49691>

⁴⁸ Electrabel, *Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment* (Dossier de sûreté : Doel 3 – Évaluation de la cuve du réacteur), 05/12/2012, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

Concernant cette question, les experts externes mandatés par Electrabel déclarent :

« La SCP Review Team a suivi la discussion concernant le cloquage par H2. Plusieurs réunions d'experts internationaux ont été organisées pour échanger sur les mécanismes possibles afin de les étudier plus en profondeur. Les conclusions de ces réunions, également reprises par l'AFCN et par Bel V, sont que les mécanismes considérés ont été suffisamment étudiés et qu'il ne subsiste aucun doute concernant la question du cloquage par H2. »⁴⁹ (Page 20)

L'AFCN a également discuté cette hypothèse avec les experts du NSEG et, dans son rapport final d'évaluation 2015, conclut au sujet de l'extension des défauts en cours d'exploitation :

« Le seul mécanisme théorique de propagation des défauts détectés dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 est la fatigue oligocyclique, qui est considérée comme ayant un effet limité. D'autres phénomènes (comme le cloquage par hydrogène ou la fissuration induite par l'hydrogène) ont été évalués et écartés comme mécanismes possibles d'extension des fissures en cours d'exploitation. » (Page 42)

L'AFCN n'étudie pas les effets de l'irradiation comme les défauts de Frenkel (interstitiels et lacunes), l'agglomération d'interstitiels ou de lacunes, les ségrégations induites par l'irradiation, la diffusion renforcée par l'irradiation, la génération d'hélium (comme conséquence de la désintégration radioactive et de la création de produits fissiles) et sa diffusion, la précipitation d'impuretés aux dislocations, les joints de grain et les microfissures, les nanostructures évolutives incluant des fonctions de matrice stable (SMF) qui persistent ou s'étendent en cas d'irradiation même dans les aciers pauvres en cuivre ou sans cuivre ; tous ces processus seraient susceptibles de contribuer à l'extension des défauts / fissures en cours d'exploitation.

Conclusion :

- 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.
- Electrabel n'est donc pas en mesure de fournir une preuve explicite que les défauts ne se sont pas étendus 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.

⁴⁹ Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

2.3 Propriétés mécaniques

En ce qui concerne l'intégrité structurelle d'une cuve de réacteur, les propriétés mécaniques de l'acier (résistance, dureté, ténacité, etc.) sont cruciales pour la sûreté. Ces propriétés sont affectées par la température et par l'irradiation neutronique ; il est dès lors nécessaire de démontrer que les caractéristiques mécaniques spécifiées sont conservées tout au long de la durée d'exploitation.

2.3.1 Ténacité initiale du métal de base

L'apparition de milliers de défauts dans le métal de base de la paroi de la cuve permet de douter que la ductilité (ténacité) de l'acier puisse être considérée comme identique à celle du matériau non défectueux. Les caractéristiques des matériaux documentées du métal de base dans un état non irradié ont été mesurées en utilisant un matériau non défectueux. Il n'existe aucun matériau représentatif avec une densité de défauts comparable à l'état réellement observé.

Au sujet des échantillons, l'AFCN déclare dans son rapport final d'évaluation 2015 :

« Il n'y a pas d'échantillons de Doel 3 et de Tihange 2 présentant des bulles, étant donné que les échantillons de surveillance ont été prélevés loin des zones macro-ségrégées dans lesquelles les bulles d'hydrogène se forment. La plupart des essais ont dès lors été réalisés sur des matériaux représentatifs présentant des bulles comme VB395 et KS02, ou des matériaux sans bulles tels que les découpes de tubulure de Doel 3 et de Tihange 2, et sur certains matériaux de référence. »⁵⁰ (Page 44)

L'expression « matériaux représentatifs présentant des bulles » n'est certainement pas exacte, étant donné que ni VB395, ni KS02 n'ont le même historique de fabrication, de traitement thermique ou d'exploitation que l'acier des cuves des réacteurs.

« Les pièces des cuves de D3T2 ont été forgées selon la norme américaine SA508 Cl.3 et le bloc VB395 est constitué d'acier français de type 18MND5. Ces deux aciers appartiennent à la même famille d'aciers MnMoNi pour cuves de réacteur. Par contre, l'échantillon KS02 est constitué d'acier allemand 22NiMoCr37 appartenant à la famille des aciers NiMoCr pour cuves de réacteur. »⁵¹ (Page 35)

Même en ce qui concerne les bulles d'hydrogène, la représentativité n'est pas garantie, étant donné qu'il n'est pas prouvé que les défauts observés dans les viroles des cuves de réacteur soient réellement des bulles d'hydrogène.

Dès lors, les résultats des tests réalisés sur VB395/KS02 peuvent seulement décrire les caractéristiques mécaniques et la sensibilité à l'irradiation des blocs de matériaux d'essai concernés, mais non l'état réel de l'acier des cuves des réacteurs. Les résultats des tests d'irradiation peuvent uniquement être utilisés pour développer la base de données sur la fragilisation neutronique des aciers des cuves de réacteur.

⁵⁰ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁵¹ Electrabel, *Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment* (Dossier de sûreté : Doel 3 – Évaluation de la cuve du réacteur), 05/12/2012, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

Bel V déclare au sujet de la diminution de la ténacité comme conséquence des bulles d'hydrogène :

« Dans les dossiers de justification de sûreté de 2012, Electrabel a considéré que l'effet potentiel des bulles sur la ténacité du matériau serait pris en compte de façon adéquate par un décalage supplémentaire de RT_{NDT} . Electrabel a sélectionné une valeur de 50°C (en plus du décalage calculé par l'équation prévisionnelle française pour le contenu nominal en éléments fragilisants des pièces forgées des cuves de réacteur).

Ce décalage supplémentaire comprend :

(i) un terme de 11° C qui représente la possibilité d'une plus basse résistance du matériau à la formation de fissures (dans des conditions sans irradiation) dans les zones macro-ségrégées des pièces forgées - où les bulles d'hydrogène ont été détectées - par rapport aux zones non ségrégées ;

(ii) un terme de 14° C qui représente la possibilité d'une plus basse résistance des bulles à la formation de fissures (dans des conditions sans irradiation) par rapport à la résistance à la formation de fissures du matériau dans les ligaments entre les bulles, ... »⁵² (Page 9)

Ceci signifie qu'en 2013, tous les experts étaient d'accord pour dire que les bulles d'hydrogène diminuent la ténacité du matériau. En 2015, sur base des expériences réalisées par Electrabel en utilisant les échantillons VB395, Bel V affirme :

« Bel V conclut que les bulles d'hydrogène en tant que dégradation n'ont pas d'effet sur la ténacité du matériau et que la résistance à la rupture des bulles est déterminée par la ténacité du matériau macro-ségrégé où les bulles sont localisées. Les bulles peuvent dès lors être estimées comme toute autre fissure dans un matériau sain – ce dernier étant dans le cas présent, le matériau macro-ségrégé où les bulles sont localisées. Cette conclusion présume que la stabilité des bulles sous une charge simple et leur extension sous des charges répétées peut être évaluée à l'aide des mêmes méthodes que celles couramment utilisées pour les fissures provoquées mécaniquement (p. ex. les fissures de fatigue). » (Page 12)

Une fois encore : Il faut garder à l'esprit que l'hypothèse de bulles d'hydrogène dans les cuves n'est toujours pas prouvée – dès lors, la conclusion (sur base des expériences réalisées sur VB395) selon laquelle la densité élevée en défauts observée ne modifie pas la ténacité du métal de base dans des conditions sans irradiation est extrêmement contestable.

Au sujet des ségrégations découvertes dans le matériau, Bel V explique :

« L'écart estimatif de RT_{NDT} entre les zones non ségrégées et les zone ségrégées des viroles de cœur de Doel 3 et de Tihange 2 se situait dans une fourchette entre 0° C et 20° C. Cela signifie que ces valeurs de 0° C et de 20° C doivent être considérées respectivement comme les limites inférieure et supérieure de la différence de RT_{NDT} . Ensuite, il existe des données expérimentales non publiées qui indiquent que l'effet de ségrégation élève de 10° C environ la température

⁵² Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations dues aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

RT_{NDT} dans les zones à ségrégation positive par rapport aux zones où la ségrégation du carbone est nulle. Dès lors, Bel V a conclu qu'une valeur de 10° C pour $\Delta RT_{NDT \text{ init (ségrégation)}}$ et qu'une valeur de 5° C pour l'incertitude associée (1σ) était acceptable. »⁵³ (Page 29)

Cette argumentation montre clairement que les experts de l'Autorité belge ont tendance à minimiser les normes de sûreté sur base de résultats non publiés, tout en étant confrontés à des incertitudes fondamentales. Il y a suffisamment d'éléments dans la littérature scientifique qui indiquent que les défauts diminuent la ténacité des matériaux.

L'International Review Board (IRB) fait part de certains doutes sur le fait que la ténacité initiale est supposée être identique à celle du matériau sans défauts :

*« La méthode proposée par Electrabel pour estimer la ténacité au début de la vie est cohérente avec les approches utilisées dans d'autres pays. Cependant, l'IRB émet une **légère réserve** sur le fait que la marge d'incertitude pour les valeurs utilisées pourrait être trop basse. Ce serait le cas s'il y avait une différence systématique inhabituellement élevée (distorsion) des propriétés résistives entre la localisation d'où sont issues les données d'essai et les zones des cuves contenant les bulles. »⁵⁴ (Page 23)*

Un membre de l'IRB n'est même pas certain que la ténacité du métal de base ne soit pas affectée par les défauts :

« 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 associées à un niveau élevé de ségrégation. » (Rapport de l'IRB, page 29)

L'AFCN conclut :

Des examens complémentaires sur les matériaux disponibles présentant des bulles (VB395 et KS02) montrent que la présence de bulles n'a pas d'effet direct sur la ténacité du matériau des cuves des réacteurs (dans des conditions avec ou sans irradiation).⁵⁵ (Page 53)

Conclusion :

- La ténacité du métal de base défectueux (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.

⁵³ Bel V, *Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels.* (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations dues aux bulles d'hydrogène l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁵⁴ *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), 2015, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4029.pdf>

⁵⁵ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

- 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 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.

2.3.2 Effets de l'irradiation sur la ductilité (ténacité) de l'acier

Pour une exploitation sûre du réacteur, le matériau d'une cuve sous pression doit se trouver dans l'état ductile dans toutes les conditions d'exploitation du réacteur (conditions normales de fonctionnement ou conditions accidentelles). La transition entre un matériau de caractéristiques ductiles et un comportement de fragilité à basse température est appelée « température de transition ductile-fragile » (ou « température de ductilité nulle ») RT_{NDT} , définie comme la température correspondant à 41 J dans un test de Charpy standard (mesure de l'énergie absorbée lors de la rupture). Ces dernières années, la méthode dite de la courbe maîtresse (qui mesure directement la résistance à la rupture) est également utilisée, mais la comparabilité avec les résultats précédents (donnés par les essais Charpy) effectués sur un matériau spécifique d'une cuve reste un sujet de discussion.

L'irradiation neutronique est connue pour provoquer la fragilisation de l'acier, phénomène s'observant par une augmentation de la température de transition de référence RT_{NDT} . Afin de prévoir la fragilisation de l'acier d'une cuve, l'augmentation de la température RT_{NDT} par fluence neutronique est calculée à l'aide de formules dites prévisionnelles, supposées être issues des courbes limites supérieures enveloppes sur la base d'une étude d'irradiation complète avec des aciers de cuve comparables (dans les normes françaises, il s'agit de la formule FIS). La formule inclut un terme tenant compte de la composition chimique de l'acier.

Outre le calcul prévisionnel de la fragilisation, des échantillons représentatifs issus de la fabrication de la cuve sont irradiés au cours de l'exploitation dans des capsules proches de la paroi de la cuve. En raison du flux de neutrons plus important par rapport à celui observé sur la paroi de la cuve, les échantillons montrent le phénomène de fragilisation accéléré et peuvent être utilisés pour la vérification expérimentale des calculs prévisionnels.

Il n'existe aucune information sur le comportement du matériau de la cuve en cas d'irradiation dans le cas d'une densité élevée de défauts telle qu'observée dans les viroles de cœur des cuves de Doel 3 et Tihange 2.

L'AFCN conditionnait le redémarrage des réacteurs en mai 2013 à l'exécution par Electrabel d'essais d'irradiations sur des échantillons du bloc générateur de vapeur AREVA VB395 refusé. L'irradiation a été effectuée dans le réacteur expérimental BR2.

À la suite des résultats de la première campagne d'irradiation indiquant une fragilisation plus élevée que prévu, les deux blocs réacteurs ont été mis à l'arrêt en mars 2014.

L'AFNC a mandaté un groupe d'experts internationaux pour clarifier ces résultats, limitant explicitement leur mission à la question du dommage d'irradiation :

« L'AFNC a chargé l'International Review Board (IRB) de mener une enquête indépendante et de se limiter à deux domaines bien précis. L'implication de l'IRB se limite donc à la première phase du processus de révision, à savoir l'évaluation de la méthodologie proposée par l'exploitant :

D1. *Évaluation de la formule prévisionnelle utilisée pour déterminer le décalage de la température de transition qu'Electrabel a proposé d'appliquer pour évaluer l'intégrité structurelle des viroles de cœur des cuves de Doel 3 et de Tihange 2 et pour prévenir le risque de rupture fragile (courbe limite pression-température, choc thermique sous pression). En particulier, l'évaluation portera sur la transposabilité des résultats des essais réalisés sur les matériaux VB395 (français) et KS02 (allemand) aux viroles de cœur des cuves de Doel 3 et de Tihange 2.*

D2. *Évaluation de la conclusion ci-après d'Electrabel concernant l'analyse de la cause profonde du mécanisme :*

Le mécanisme précis de la fragilisation sans effet durcissant des échantillons VB395 et la cause profonde de ce mécanisme n'ont pas été identifiés, mais les mécanismes associés à l'hydrogène ou aux défauts dus à l'hydrogène sont exclus. »⁵⁶ (Pages 47-48)

2.3.2.1 Échantillons utilisés pour les essais d'irradiation

En l'absence de bibliothèque d'échantillons du matériau composant la cuve présentant une densité élevée de défauts, l'AFNC et Electrabel ont convenu d'effectuer des essais d'irradiation supplémentaires sur la pièce VB385 provenant d'un générateur de vapeur refusé d'AREVA. D'autres essais d'irradiation ont été réalisés sur des découpes de tubulure (ces échantillons sont représentatifs du matériau d'une cuve exempt de défauts) et, lors d'une autre campagne de tests, sur un bloc allemand KS02 présentant des défauts (provenant d'essais réalisés dans le cadre du Forschungsvorhaben Komponentensicherheit (FKS) - projet de recherches sur la sécurité des composants).

Le matériau représentatif doit provenir de la même charge d'acier, être de même fabrication, avoir subi le même traitement thermique et avoir connu les mêmes antécédents d'exploitation que le composant correspondant. Les blocs VB395 et KS02 ne remplissent pas ces exigences. Les découpes de la tubulure sont des matériaux d'archive mais, contrairement aux viroles de la cuve, ils ne présentent pas une densité importante de défauts.

⁵⁶ AFNC, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves sous pression des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

L'IRB précise également que le bloc VB395 n'est pas un matériau représentatif pour Doel 3 et Tihange 2 :

« L'IRB est d'avis que le bloc VB395 est probablement, du point de vue du décalage lié à l'irradiation, un matériau anormal et non représentatif. »⁵⁷(Page 23)

L'ORNL considère que la pertinence du bloc VB395 ne vaut que pour l'évaluation des effets de l'irradiation sur le matériau présentant des défauts dus à l'hydrogène (bulles) :

« Les matériaux issus des blocs VB395 et KS02 ne sont pertinents que pour les réacteurs de Doel 3 et Tihange 2 essentiellement du fait que chacun d'eux contient une forte densité de bulles d'hydrogène, ce qui présente un intérêt pour évaluer si ces bulles ont des effets significatifs sur les propriétés mécaniques et la ténacité des pièces forgées des réacteurs Doel 3 et Tihange 2 en conséquence de l'exposition à l'irradiation. »⁵⁸ (Page 54)

Conclusion :

- 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 d'exploitation ; 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.

2.3.2.2 Formule de prévision de la fragilisation

Les résultats des essais d'irradiation obtenus sur la base des essais de Charpy dont le but est de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture (courbe maîtresse) sont comparés à la formule de prévision. Ces formules proviennent de vastes essais d'irradiation et de données de surveillance de différents aciers de même type composant les cuves et sont censées couvrir de manière conservative la dispersion des données expérimentales.

⁵⁷ *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>

⁵⁸ *ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation* (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 et Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

Dans son dossier de sûreté 2012, Electrabel⁵⁹ utilise la formule FIS, telle qu'élaborée pour les aciers des cuves françaises en se basant sur des études complètes faites dans le cadre de l'irradiation d'aciers de cuve et tient compte la composition chimique des aciers.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + \Delta RT_{NDT, FIS, ségrégation}$$

Dans son dossier de sûreté 2015, Electrabel a introduit de nouvelles courbes de tendance⁶⁰ avec une référence au code RSE-M⁶¹ (Ed.2010) (Page 69):

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + RT_{NDT,init,segr} + RT_{NDT,RSE-M} + RT_{NDT,VB395} + M$$

RT_{NDT,init} correspond à la RT_{NDT} initiale des viroles telle que déterminée par le RDM⁶²

Comme l'a demandé l'AFCN, la valeur RT_{NDT,init,segr} couvre la ténacité potentiellement inférieure du matériau dans les zones présentant des macro-ségrégations contenant des bulles d'hydrogène. Sur la base du matériau représentatif des viroles de Doel 3 et Tihange 2, cet effet était estimé à 10°C. Il convient de signaler que la pratique internationale ne tient généralement pas compte de ce décalage supplémentaire, traitant plutôt l'effet des ségrégations au travers de facteurs d'enrichissement dans les courbes de tendance de la fragilisation.

RT_{NDT,RSE-M} correspond au décalage de la RT_{NDT} en fonction de la fluence, conformément à la courbe tendancielle de la fragilisation donnée par le code français RSE-M (éd.2010) évaluée pour la composition chimique des viroles de Doel 3 et Tihange 2 (considérant de cette façon que les facteurs d'enrichissement interviennent dans la composition des macroségrégations).

RT_{NDT,VB395} est un décalage supplémentaire dépendant de la fluence, tel qu'observé sur le matériau du bloc VB395. Il est considéré comme la différence entre la fragilisation atypique observée sur le matériau entre les bulles d'hydrogène et la fragilisation pouvant être attendue pour ce matériau sur la base de la courbe tendancielle définie dans le RSE-M.

M est une marge basée sur les incertitudes des différents termes : M équivaut à 2 fois la combinaison quadratique de l'incertitude sur l'effet de la macro-ségrégation (évaluée à 5°C) et l'écart-type de la formule reprise dans le RSE-M (9,3°C).

Il convient de noter que ces courbes de tendance sont très conservatives, car elles se basent sur l'hypothèse selon laquelle les viroles de cœur des cuves de Doel 3 et Tihange 2 manifestent une sensibilité supplémentaire à la fragilisation sous irradiation de même ampleur que celle du matériau VB395, qui ne tient très probablement pas compte des résultats du programme d'essai ni de l'évaluation de la fragilisation atypique du bloc VB395. »

⁵⁹ Electrabel, *Safety case report: Doel 3 - Reactor Pressure Vessel Assessment* (Dossier de sûreté : Doel 3 – Évaluation de la cuve du réacteur), 05/12/2012

<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

⁶⁰ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁶¹ Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires (code français) (Rules for In service Inspection of Nuclear Power Plant Components)

⁶² Rotterdamsche Droogdokmaatschappij

Par définition, une courbe de tendance prédictive est censée être la limite enveloppe appliquée à tous les aciers similaires testés. Comme le montre le graphique de gauche ci-dessous (graphique 4.29, dossier de sûreté 2012 d'Electrabel, page 67), toutes les données de surveillance (à l'exception des valeurs pour les fluences très élevées) sont en-dessous la courbe FIS, y compris les plages de dispersion des mesures.

La nouvelle courbe prévisionnelle conçue par Electrabel semble correspondre « parfaitement » aux données de surveillance de Doel 3 et Tihange 2, comme le montre le diagramme ci-dessous à droite (dossier de sûreté 2015, graphique 5.15, page 50); ce graphique montre que les données expérimentales et la dispersion ne sont pas enveloppées par la courbe de tendance et que l'écart-type de 2σ est nécessaire pour être enveloppe.

Remarque : on constate une divergence des données expérimentales entre le graphique de 2012 (courbe FIS) et celui de 2015 (la nouvelle courbe tendancielle) : comparons par exemple le troisième point pour Doel 3 à partir de la gauche (en 2012, la ΔRT_{NDT} est légèrement en dessous de 60°C , et en 2015, elle est légèrement au-dessus). En gardant à l'esprit la dispersion expérimentale, cette différence est en fait négligeable, mais remarquable.

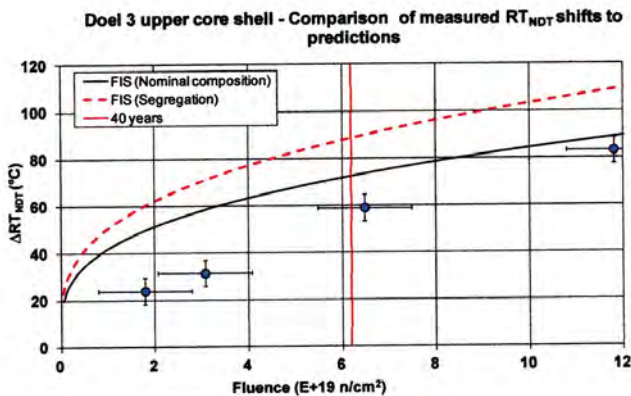


Figure 4.29

Source : dossier de sûreté 2012

Graphique 4.29

En haut : Doel 3 : virole supérieure – Comparaison des décalages entre la RT_{NDT} mesurée et les prévisions

A gauche : ΔRT_{NDT} ($^{\circ}\text{C}$)

En bas : Fluence ($E + 19n/cm^2$)

Encadré en haut :

FIS (composition nominale)

FIS (ségrégation)

40 ans

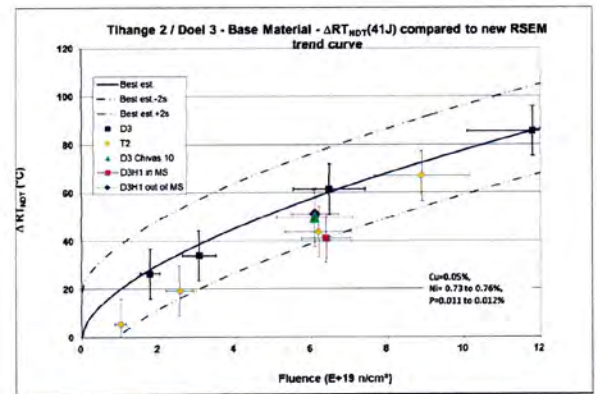


Figure 5.15: CHIVAS-10 results for D3 UCS and D3H1 compared to RPV Surveillance results and to RSE-M prediction.

Source : dossier de sûreté 2015

Graphique 5.15

Intitulé du graphique :

Mise en parallèle des résultats de la campagne d'irradiation Chivas 10 menée sur la virole supérieure de Doel 3 et sur la découpe de la tubulure H1 de la cuve de Doel 3, des résultats de surveillance de la cuve et des prévisions du RSE-M

En haut :

Tihange 2 et Doel 3 – matériau de base – comparaison entre la ΔRT_{NDT} (41 J) et la nouvelle courbe tendancielle RSE-M

A gauche :

ΔRT_{NDT} (°C)

En bas :

Fluence (E + 19n/cm²)

Encadré en haut :

Meilleure estimation

Meilleure estimation - 2s

Meilleure estimation + 2s

D3

T2 (Chivas 10)

D3H1 (en MS)

D3H1 (hors MS)

A droite :

Cu=0,05%

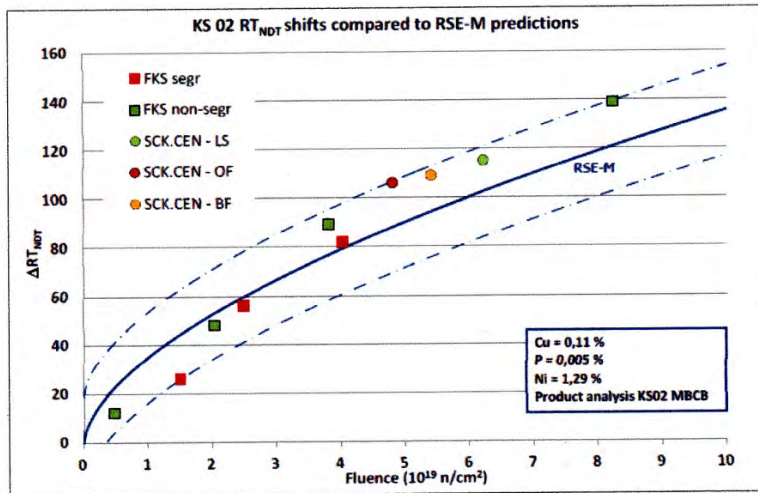
Ni= de 0,73 à 0,76%

P= de 0,011 à 0,012%

Les nouvelles courbes de tendance d'Electrabel font complètement disparaître la marge de sûreté inhérente à l'utilisation de la formule FIS, parce que les lignes de déviation n'apparaissent plus dans les courbes utilisées pour l'évaluation de l'intégrité structurelle.

Ceci démontre que les nouvelles courbes prévisionnelles ne sont certainement pas « très conservatives » ; elles sont ajustées aux données de Doel 3 et Tihange 2 fournies. Le décalage supplémentaire de la valeur de RT_{NDT} ($RT_{NDT,init,ségr} + RT_{NDT,VB395} + M$) qui est censé être une marge de sûreté face à l'ampleur de l'accroissement de la fragilisation observée sur les échantillons VB395 semble être conçu de manière à ce que la valeur de la RT_{NDT} n'atteigne pas la température limite de 132° C avant la fin de la vie de la cuve.

Les décalages de la RT_{NDT} constatés sur l'échantillon d'acier KS02 de la cuve allemande (acier comparable) devraient également être enveloppés par la nouvelle courbe prévisionnelle. Le graphique 11 figurant dans le rapport du SCP sur le dossier de sûreté 2015 (Page 21) montre que la plupart des points de données expérimentaux se trouvent au-dessus de la courbe.



Source: SCP⁶³

Figure 11: Shift in RT_{NDT} ($\Delta T=41J$) versus fluence (LS = 'Less Segregated Zone', OF = 'out of flakes', BF = 'Between Flakes')

Graphique 11

Intitulé du graphique

Décalage de la RT_{NDT} ($\Delta T=41J$) par rapport à la fluence (LS : zone moins touchée par la ségrégation, OF : zone non touchée par des bulles, BT : espace entre les bulles)

En haut :

Décalage de la RT_{NDT} de KS02 par rapport aux prévisions du RSE-M

A gauche :

ΔRT_{NDT}

En bas :

Fluence (10^{19} n/cm^2)

Encadré en haut à gauche :

FKS ségr

FKS non-ségr

SCK.CEN - LS

SCK.CEN - OF

SCK.CEN - BF

Encadré en bas à droite :

Cu = 0,11%

P = 0,005%

Ni = 1,29%

Analyse du produit KS02 MBCB

⁶³ Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

Aussi, les courbes de prévision conçues par Electrabel ne peuvent pas être considérées comme des courbes de tendance enveloppes s'inscrivant dans une approche conservative.

La valeur de $RT_{NDT,init,segr}$ - requise par l'AFCN - estimée à 10°C par Electrabel ne constitue certainement pas une marge de sûreté supplémentaire, car elle n'apparaît tout simplement pas dans l'écart-type.

Le décalage supplémentaire de la valeur $RT_{NDT,VB395}$ inclut un facteur indéfini et un exposant inexplicé, si bien que l'on peut supposer que ce décalage est conçu de telle manière que la RT_{NDT} n'atteigne pas la limite des 132°C avant la fin de vie de la cuve (voir section 2.3.2.4)

Certains détails supplémentaires se trouvent dans le rapport final de l'ORNL⁶⁴ (Page 66) :

Virole supérieure de Doel 3 : $RT_{NDT} = -22 \text{ °C} + 39,5 F^{0.59} + 31 \text{ °C}$

Virole inférieure de Doel 3 : $RT_{NDT} = -22,2 \text{ °C} + 37 F^{0.59} + 36,2 \text{ °C}$

Virole supérieure de Tihange 2: $RT_{NDT} = -25,4 \text{ °C} + 40 F^{0.59} + 31 \text{ °C}$

Virole inférieure de Tihange 2 : $RT_{NDT} = -27,2 \text{ °C} + 37,2 F^{0.59} + 36,2 \text{ °C}$

Or on voit mal comment ces trois termes s'inscrivent dans l'équation donnée

$$RT_{NDT} = RT_{NDT,init} + RT_{NDT,init,segr} + RT_{NDT,RSE-M} + RT_{NDT,VB395} + M$$

qui comporte cinq termes et on comprend mal pourquoi le facteur « fluence » varie entre les différentes viroles.

Conclusion :

- 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 courbe de tendance 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.

2.3.2.3 Résultats des campagnes d'irradiation (décalage de la température RT_{NDT})

Les résultats des différentes campagnes d'irradiation sur des échantillons prélevés sur le bloc VB395 ont montré une fragilisation nettement supérieure à celle que prévoyaient les nouvelles courbes de tendance prévisionnelle.

⁶⁴ ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 / Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

La dernière campagne a été effectuée sur des échantillons provenant d'un acier allemand similaire contenant des bulles d'hydrogène (FKS : « Forschungsvorhaben Komponentensicherheit », projet de recherches sur la sécurité des composants) à des fins de comparaison supplémentaire. Les décalages de la température de transition fragile-ductile (RT_{NDT}) mesurés lors de cette campagne dépassaient également les courbes de tendance, la différence pouvant aller jusqu'à 20°C⁶⁵ (graphique 11, page 21).

Electrabel a utilisé ces résultats pour exclure les bulles d'hydrogène comme cause de la fragilisation accrue du matériau du bloc VB395 et par conséquent des viroles de Doel 3 et Tihange 2 (sur la base de l'hypothèse selon laquelle les défauts présents dans ces viroles sont des bulles d'hydrogène).

Afin d'expliquer les résultats des campagnes d'irradiation, Electrabel a suggéré l'existence d'un second mécanisme de fragilisation agissant sur le matériau du bloc VB395. Bel V est d'accord :

« Ces résultats laissent supposer qu'un second mécanisme de fragilisation vient s'ajouter au mécanisme de durcissement sous irradiation agissant sur le matériau du bloc VB395. »⁶⁶(Page 27)

Mais Bel V écrit également :

« Sur la base des informations disponibles, le matériau du bloc VB 395 et le matériau des viroles de cœur des cuves de Doel 3 et Tihange 2 appartiennent à la même famille de matériaux. Si aucune accentuation du phénomène de fragilisation sous irradiation n'a été identifiée dans la virole porte-tubulure ni dans la virole supérieure de Doel 3, cela ne signifie pas pour autant que l'on puisse exclure l'éventualité d'une fragilisation accrue sous irradiation de la virole inférieure de Doel 3 et des viroles supérieures de Tihange 2 (qui sont les plus touchées par les bulles d'hydrogène). » (Page 30)

Les experts de l'organisme de contrôle agréé AIB-Vinçotte ont même déclaré que les effets de l'irradiation sur les viroles des cuves ne doivent pas nécessairement être supérieurs à ceux mesurés dans le matériau ne présentant pas de défauts (découpe de tubulure).

« Il ressort des résultats des essais que le seul matériau présentant une fragilisation atypique est le matériau du bloc VB395 et rien ne permet de conclure que les propriétés du matériau de la virole de la cuve contenant des bulles de Doel 3 sont nécessairement moins bonnes que celles d'une virole sans défaut, comme la découpe de la tubulure H1 de la cuve de Doel 3. »⁶⁷(Page 9)

⁶⁵ Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

⁶⁶ Bel V, Safety Evaluation Report, Quasi-laminar flaw indications in the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Evaluation of the impact of the hydrogen flaking damage in the serviceability of the Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. (Rapport d'évaluation de la sûreté, indications de défauts quasi-laminaires dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Évaluation de l'impact des dégradations due aux bulles d'hydrogène sur l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4028.pdf>

⁶⁷ AIB-Vinçotte, Rapport de synthèse Doel 201 (en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

C'est certainement vrai, mais il est également vrai que l'effet de l'irradiation sur les viroles contenant des défauts de Doel 3 et Tihange 2 pourrait être beaucoup plus fort.

L'équipe du SCP déclare⁶⁸ :

« Il n'existe aucune base technique permettant de déclarer que l'acier des cuves de Doel 3 et Tihange 2 réagirait d'une quelconque façon moins bien que l'acier du bloc VB395 face au phénomène de fragilisation sous irradiation de la zone contenant des bulles. » (Page 23)

De même, aucune base technique ne permet de prouver que cette affirmation est conservative.

Toutefois, l'équipe du SCP fait remarquer, à propos de l'incertitude autour du caractère pertinent de l'échantillon :

« Ce décalage supplémentaire a été utilisé comme donnée d'entrée dans l'évaluation de l'intégrité structurelle, fournissant un conservatisme impossible à quantifier avec exactitude (puisque nous ne connaissons pas le comportement exact, sous irradiation, des zones des viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 cuve contenant des bulles). » (Page 24)

L'ORNL décrit également le phénomène de fragilisation comme anormal :

« La cause profonde de la fragilisation anormale et excessive de la pièce forgée VB395 n'est pas connue avec précision pour le moment. Bien que ne s'appliquant pas nécessairement aux viroles de Doel 3 et Tihange 2, l'ORNL suggère de poursuivre les recherches de manière à déceler le ou les mécanismes exacts à l'origine de la fragilisation anormale de l'acier, de manière à étoffer les connaissances relatives au comportement des pièces forgées contenant des bulles d'hydrogène. »⁶⁹ (Page 55)

En résumé, les différents groupes d'experts considèrent que le bloc VB395 avant les campagnes d'irradiation est représentatif du point de vue des effets de l'irradiation sur les viroles défectueuses de Doel 3 et Tihange 2, mais la fragilisation inattendue est ensuite décrite comme une caractéristique anormale de l'échantillon. Il convient de garder à l'esprit qu'Electrabel et l'AFCN ont choisi le bloc VB395 comme échantillon représentatif pour démontrer que l'irradiation n'affecte pas de manière critique le matériau contenant des bulles d'hydrogène. Comme l'effet de l'irradiation s'est avéré plus sévère que prévu, le bloc VB395 a été déclaré « profil anormal ».

La question qui se pose est la suivante : pourquoi ne pas conclure que la courbe tendancielle n'est manifestement pas conservative ?

Les mesures directes de la ténacité des échantillons VB395 irradiés (courbe maîtresse) ont montré des décalages de ténacité (ΔT_0) pour les échantillons VB395 (graphique 5.19, page 53) nettement supérieurs aux décalages de la valeur RT_{NDT} mesurés par les essais de Charpy (graphique 5.18, page

⁶⁸ Report on independent analysis and advice regarding the safety case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment (Rapport sur une analyse et un avis indépendants concernant le Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4025.pdf>

⁶⁹ ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 / Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

54)⁷⁰ ; la différence estimée à partir des graphiques est d'environ 40 °C. (c.-à-d. que le décalage de la courbe maîtresse en fin de vie est d'environ 100°C).

À propos des résultats d'irradiation sur les échantillons du bloc VB395, Electrabel conclut :

« Étant donné que le décalage plus grand que prévu de la température de transition enregistré après l'irradiation du bloc VB395 n'est pas lié aux bulles d'hydrogène et étant donné qu'aucune des spécificités de fabrication mentionnées ci-dessus ne sont signalées pour les cuves de Doel 3 et Tihange 2, il est supposé que les viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 ne subissent pas le phénomène de fragilisation atypique observé sur le bloc VB395. »⁷¹ (Page 67)

L'application de courbes de tendance ne peut certainement pas être limitée aux strictes « spécificités de fabrication », sinon elles ne pourraient pas être non plus appliquées aux viroles de Doel 3 et Tihange 2, en raison de défauts de fabrication.

Il est absolument impossible de prouver l'exactitude de la conclusion selon laquelle les viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 ne subissent pas une fragilisation pire que celle des échantillons du bloc VB395.

Tous les tests d'irradiation ont été effectués dans le réacteur expérimental belge BR2 sous un flux neutronique très élevé ; il s'agissait de simuler en accéléré le niveau de fluence neutronique des cuves en fin de vie en les soumettant à des durées d'irradiation relativement brèves. En raison d'un possible effet de débit de dose⁷², les résultats de cette irradiation sous haut flux de neutrons pourraient sous-estimer la fragilisation réelle du matériau. L'effet de débit de dose a été observé sur les aciers de cuve occidentaux⁷³ et russes^{74,75}. Jusqu'à présent, les normes nationales ne tiennent pas compte de ce facteur dans le calcul de la prévision de la fragilisation.

En ce qui concerne l'influence du flux neutronique, Electrabel fait la remarque suivante :

« Les résultats de la campagne d'irradiation CHIVAS-12 s'inscrivent dans le droit fil des résultats historiques allemands. Ceci confirme que l'influence du flux neutronique sur ce matériau n'est

⁷⁰ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁷¹ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁷² Effet de débit de dose : la fragilisation peut être 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

⁷³ A-S. Bogaert, R. Gérard, R. Chaouadi; *Belgian RPV embrittlement studies for LTO issues* (Etudes sur la fragilisation des cuves sous pression en Belgique dans le cadre du projet d'exploitation à long terme); *IAEA Technical Meeting on Irradiation Embrittlement and Life Management of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power, Znojmo, 18-22 October 2010* (Réunion technique de l'IAEA sur la fragilisation sous irradiation et la gestion de la vie des cuves sous pression des réacteurs de centrales nucléaires, Znojmo, 18-22 octobre 2010) <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Engineering/meetings/2010-10-TM-Czech/48.pdf>

⁷⁴ Ya. Strombach, RRCKI, *Examination of VVER-440 RPV steel re-irradiation behaviour using materials from operating units, Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000)* (Examen du comportement sous ré-irradiation de l'acier des cuves de réacteurs de type VVER-440 en utilisant les matériaux de sites en service)

⁷⁵ A.A. Chernobaeva, *Radiation embrittlement of RPV materials, Joint scientific program: Joint Helmholtz – ROSATOM school and ITEP winter school of physics «extreme state of matter», Feb. 19th – Feb. 26th 2012* (Fragilisation sous irradiation des matériaux de cuves sous pression, 19 – 26 février 2012)

pas significative, le flux du BR2 étant supérieur d'un ordre de grandeur à celui des irradiations allemandes. »⁷⁶ (Page 51)

Cela n'exclut certainement pas un possible effet de flux (débit de dose), parce que le flux neutronique du réacteur expérimental allemand était malgré tout supérieur au moins d'un ordre de grandeur au flux envoyé vers la paroi de la cuve.

Conclusion :

- 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.
- Rien ne prouve que la fragilisation des viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 présentant des défauts ne puisse pas être beaucoup plus importante que supposé.
- 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.

2.3.2.4 Incertitudes – marges de sûreté

Dans le dossier de sûreté 2012, Electrabel avait proposé d'ajouter, pour la valeur de la température de transition (RT_{NDT}), un décalage supplémentaire de 50°C aux courbes de tendance prévisionnelle afin de couvrir toutes les incertitudes concernant une diminution possible de la ténacité due à la densité des défauts et aux effets possibles de l'irradiation. Il convient de noter que l'International Review Board précédent recommandait d'appliquer un décalage de 100°C au lieu de 50°C. Ce décalage aurait naturellement eu pour conséquence d'excéder la limite réglementaire de 132 °C fixée pour la RT_{NDT} (ce pourrait être la raison pour laquelle la recommandation de l'IRB n'était plus incluse dans le rapport final d'évaluation 2013 de l'AFCN).

Dans le dossier de sûreté 2015, Electrabel a supprimé ce décalage de 50°C pour le remplacer par une « *marge variable* » :

« Loi de la fragilisation (2014 par rapport à 2012) : réévaluation du décalage de RT_{NDT} du matériau composant la virole à partir de la transposition des propriétés obtenues sur la virole

⁷⁶ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

VB395 (ajout d'une marge variable en plus de la formule du RSE-M), au lieu de considérer une marge fixe de 50°C en plus de la formule FIS.⁷⁷(Page 104)

La marge variable est définie conformément au rapport final d'évaluation 2015 de l'AFCN⁷⁸ (Page 54) comme suit: $\Delta RT_{NDT(VB395)} = \text{facteur}_{(VB395)} * \Phi * 0,59$; le texte ne précise pas la valeur de ce facteur $_{(VB395)}$. Aucune justification scientifique ne vient étayer l'utilisation du facteur $_{(VB395)}$ et de l'exposant (0,59) dans cette formule.

Le rapport final de l'ORNL⁷⁹ (Page 66) donne des détails supplémentaires, mais ne répond pas aux questions en suspens (voir section précédente).

Dans son rapport final d'évaluation 2015, l'AFCN conclut :

« La marge de 50°C ajoutée à la valeur de la température de transition (RT_{NDT}) envisagée dans le dossier de sûreté 2013 est écartée et remplacée par des équations prévisionnelles dépendant des propriétés du matériau. Si l'on considère le bloc VB395 comme un profil anormal du point de vue du comportement du matériau sous irradiation, il est peu probable que les viroles des cuves de Doel 3 et Tihange 2 soient davantage sensibles à l'irradiation. Néanmoins, par mesure de sûreté, les équations prévisionnelles de Doel 3 and Tihange 2 prennent en compte la fragilisation atypique observée sur le matériau du bloc VB395 contenant des bulles d'hydrogène. Aussi, l'AFCN considère que les équations prévisionnelles relatives à la fragilisation sous irradiation présentées dans le dossier de sûreté 2015 de l'exploitant sont acceptables. » (Pages 55-56)

⁷⁷ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁷⁸ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁷⁹ ORNL *Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation* (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 et Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

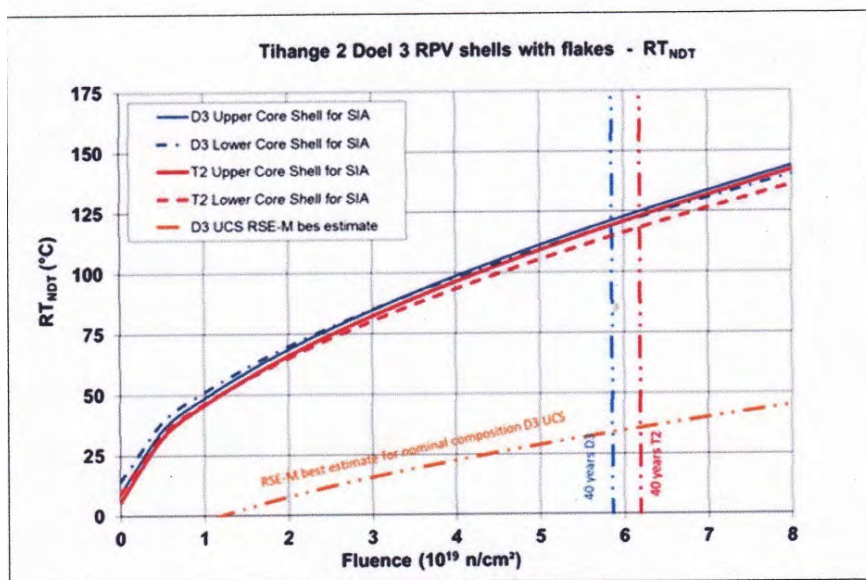


Figure 5.27: RT_{NDT} trend curves for the D3T2 core shells used in the SIA.

Source: dossier de sûreté 2015 d'Electrabel, page 71

Graphique 5.27

Intitulé du graphique :

Courbes de tendance de la RT_{NDT} utilisées pour l'évaluation de l'intégrité structurelle (SIA) des viroles de Doel 3 et Tihange 2

En haut :

Viroles des cuves de Tihange 2 et Doel 3 présentant des bulles d'hydrogène - RT_{NDT}

A gauche :

RT_{NDT} (°C)

En bas :

Fluence (10^{19} n/cm²)

Encadré en haut :

Virole supérieure D3 (SIA)

Virole inférieure D3 (SIA)

Virole supérieure T2 (SIA)

Virole inférieure T2 (SIA)

Meilleure estimation du RSE-M pour la VS D3

Meilleure estimation du RSE-M concernant la composition nominale de la VS D3

40 ans Doel 1

40 ans Tihange 2

Le graphique 5.27 (Page 71) du dossier de sûreté 2015 d'Electrabel permet d'estimer le décalage supplémentaire utilisé pour la température de transition RT_{NDT} censé se situer dans la fourchette de fragilisation du bloc VB395 en fin de vie : en supposant que le décalage introduit à la demande de l'AFCN soit d'environ 10°C, que la marge (M) soit d'environ 15°C, la différence restante se situe aux alentours de 55 à 60°C. Comme on peut le déduire de la section précédente, le décalage de la courbe maîtresse du bloc VB395 est d'environ 100°C. Cela signifie que le décalage supplémentaire est de facto une valeur aléatoire, très probablement ajustée à l'exigence selon laquelle la RT_{NDT} doit rester

sous la barre des 132°C jusqu'à la fin de vie de la cuve. Le graphique montre que les courbes de tendance à utiliser pour l'évaluation de l'intégrité structurelle répondent à cette exigence.

Il sera démontré dans la prochaine section (2.4) que la fragilisation doit également être prise en compte avec le préchauffage de l'eau de refroidissement de secours, sinon il est impossible de démontrer l'intégrité structurelle :

*« Température de l'eau du système d'injection de sécurité: 40°C (2014) contre 7°C (2012) ».
(Page 104)*

Selon le directeur de l'AFCN, l'eau du système d'injection de secours sera chauffée à 45°C.

Conclusion :

- 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, le bloc VB935 a été qualifié de profil anormal.
- 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 crédible sur l'effet de l'irradiation sur les viroles des cuves présentant des défauts.
- La procédure visant à déclarer le bloc VB935 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 fragilisation pourrait être de loin supérieure.
- Les données expérimentales sur les effets de l'irradiation subie par les échantillons VB935 et KS02 montrent que la nouvelle courbe tendancielle n'est pas conservatrice. 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 tendancielle sur une limite supérieure enveloppe.
- La marge de sûreté située « dans la fourchette de fragilisation du bloc VB935 » 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 et qu'elle soit de loin inférieure à la fragilisation observée sur le bloc VB395.
- 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 conservatrice de la fragilisation éventuelle.

2.4 Évaluation de l'intégrité structurelle (SIA)

La démonstration de l'intégrité structurelle d'une cuve tout au long de sa vie est effectuée par le biais d'une analyse de choc thermique sous pression. La répartition de la température dans la paroi de la cuve résultant de transitoires normaux ou accidentels est calculée sur la base de codes thermohydrauliques. Le champ de contrainte thermique dû à d'éventuels gradients de température sur une hypothétique fissure sur la paroi de la cuve est alors calculé à l'aide de méthodes de mécanique de rupture dans le cas d'un transitoire accidentel progressif. La courbe de charge est alors comparée à la courbe de ténacité effective attendue (courbe tendancielle servant à l'évaluation de l'intégrité structurelle, voir sections précédentes).

Pour la fissure hypothétique, la taille et la localisation des défauts documentés doivent être utilisées. La fluence neutronique dépend de la localisation de la fissure hypothétique et la fragilisation attendue est déduite des courbes prévisionnelles.

En comparant la courbe de charge calculée (intensité de la contrainte par rapport à la température pendant le transitoire accidentel) à la limite inférieure de la courbe de ténacité, la tangente aux deux courbes donne la $RT_{NDT(crit)}$ critique. Il se peut que cette valeur critique ne soit pas atteinte jusqu'à la fin du cycle de vie. C'est ce que l'on appelle le critère d'acceptation ASME :

$RT_{NDT(crit)} - RT_{NDT(final)} > 0$: le critère d'acceptation est satisfait

$RT_{NDT(crit)} - RT_{NDT(final)} < 0$: le critère d'acceptation n'est pas satisfait

Paramètre alternatif pour l'application du critère d'acceptation des défauts ASME :

$RT_{NDT(final)} / RT_{NDT(crit)} < 1$: le critère d'acceptation est satisfait

$RT_{NDT(final)} / RT_{NDT(crit)} > 1$: le critère d'acceptation n'est pas satisfait

D'après Bel V, l'évaluation de l'intégrité structurelle (SIA) n'a été mise à jour qu'en ce qui concerne la fluence neutronique ajustée, les nouvelles courbes de tendance d'Electrabel et la taille des défauts ;

« En fait, l'exploitant a appliqué la même méthodologie que celle utilisée dans le précédent dossier de sûreté et dans l'addendum présenté par l'exploitant en 2012-2013. »

L'exploitant a monté un nouveau dossier de sûreté pour prendre en compte les données d'entrée mises à jour suivantes :

- l'équation prévisionnelle mise à jour pour la RT_{NDT} en tant que fonction de la fluence;
- la répartition mise à jour de la fluence de la cuve après 38 ans d'exploitation du réacteur (cycle de vie de 40 ans) ;
- l'augmentation de la température de l'eau du circuit d'injection de sécurité appliquée dans la centrale nucléaire de Doel 3 ;
- la cartographie mise à jour des indications détectées lors des tests par ultrasons, obtenue en appliquant la procédure de contrôle qualifiée. »⁸⁰ (Page 10)

⁸⁰ AIB-Vinçotte, Rapport de synthèse Doel 201 (en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4033.pdf>

Le préchauffage de l'eau du circuit d'injection de sécurité (pour le refroidissement d'urgence) à 40°C apparaît dans le dossier de sûreté 2015 d'Electrabel comme un nouveau paramètre :

« Température de l'eau du système d'injection de sécurité : 40°C (2014) contre 7°C (2012). »⁸¹ (Page 105)

Il est intéressant de noter que le rapport final 2015 de l'AFCN n'indique pas la valeur de la température de l'eau du système d'injection :

« L'augmentation de la température de l'eau du système d'injection de sécurité mise en œuvre dans la centrale nucléaire Doel 3. »⁸² (Page 63)

D'après Jan Bens, le directeur de l'AFCN, cette température a même été augmentée à 45-50°C.

« Les études d'incidence tiennent compte du fait que l'eau de refroidissement que l'on verse sous certaines conditions dans le cœur peut avoir une température située entre 8 et 50 degrés. Pour éviter le choc thermique, on a rehaussé le seuil bas et on a préchauffé cette eau à 45 degrés. »⁸³ (Page 5)

Jan Bens précise que la température de 50°C est une limite, parce que des températures supérieures pourraient causer un autre problème de sûreté important, en compromettant la capacité de refroidissement du cœur du réacteur en cas d'accident :

« Ces 50 degrés sont la valeur considérée dans les études d'accident. Il s'agit de voir comment se comporte le cœur du réacteur en cas d'incident et on tient compte d'une certaine valeur, maximale dans ce cas-ci, de température de l'eau qui est injectée. Avec cette valeur-là, est-il encore possible de refroidir le cœur du réacteur? Ces calculs ont été faits il y a des années avant la construction de la centrale avec une valeur fixée à 50 degrés. C'est pourquoi nous avons fixé la limite à 50 degrés. Pourrait-on faire les calculs avec une autre valeur? C'est possible, mais nous n'avons pas fait l'exercice. » (Page 13)

Cela montre que le « nouveau paramètre » requis ne peut pas être défini avec des marges de sûreté ; cette valeur est d'une part nécessaire pour démontrer l'intégrité structurelle mais elle est d'autre part limitée par l'exigence de refroidissement du cœur en cas d'accident.

⁸¹ Electrabel, *Safety Case 2015, Doel 3 reactor pressure vessel assessment* (Dossier de sûreté 2015, évaluation de la cuve du réacteur de Doel 3), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4023.pdf>

⁸² AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

⁸³ CRIV 54 **COM 281**, Chambre des représentants de Belgique, Sous-commission de la sécurité nucléaire, Compte rendu général, 02-12-2015

Les calculs de l'ORNL ont été réalisés en utilisant 40°C comme valeur pour la température de l'eau du système d'injection de sécurité (SI), comme le montre par exemple la légende du graphique B.3 figurant dans le rapport de l'ORNL :

« *Graphique B.3 - Transitoire accidentel de perte de réfrigérant primaire utilisé par l'ORNL pour l'évaluation préalable de Doel 3 (SLOCA 3 in; SI=40°C)* »⁸⁴ (Page 69)

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, 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.

De toute évidence, aucune mise à jour n'a été effectuée en ce qui concerne la série de transitoires accidentels entrant dans les calculs thermohydrauliques. En 2012, l'Autorité de sûreté française avait soulevé la question d'un non-conservatisme potentiel.⁸⁵

Dans le cadre du dossier de sûreté 2012, les calculs thermohydrauliques utilisaient des conditions de refroidissement symétrique sur la paroi de la cuve, bien que cela soit inhabituel dans les études internationales en matière de choc thermique pressurisé. Il est établi que des conditions de refroidissement asymétrique peuvent très bien se produire sur la paroi de la cuve en cas de transitoires graves provoquant des gradients de contrainte thermique dans la paroi de cuve (« langues froides » ou « effet panache »). Cet effet n'a visiblement pas été pris en compte par Electrabel (« *Electrabel a fourni à Bel V les informations permettant de conclure que « l'effet panache » pouvait être négligé.* »)⁸⁶

L'augmentation de la température de l'eau du circuit d'injection de sécurité indique qu'autrement l'analyse de choc thermique sous pression ne pouvait pas aboutir à une conclusion positive.

L'AFCN a demandé à l'ORNL de « *fournir une évaluation précise des marges de sûreté existantes contre la fissuration des cuves provoquée par la présence de défauts quasi-laminaires détectés sur chacune des cuves.* »⁸⁷

⁸⁴ ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 / Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

⁸⁵ ASN-IRSN Examen du dossier de justification de l'aptitude au service des cuves des réacteurs de Doel 3 et Tihange 2, 26-12-2012
<http://www.asn.fr/index.php/content/download/36842/272618/file/CODEP-DEP-2012-069419.pdf>

⁸⁶ AFCN, Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels. Provisional evaluation report (Cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport d'évaluation intermédiaire), 30/01/2013, page 44
<http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3391.pdf>

⁸⁷ ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 / Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

Pour procéder à l'analyse de la mécanique de rupture, la procédure de regroupement utilisée en 2012 a été adoptée par l'ORNL.

Electrabel a élaboré des règles de regroupement spécifiques pour les défauts rapprochés en utilisant une modélisation 3D par éléments finis pour étayer son dossier de sûreté 2012 conformément aux principes des règles de proximité donnés dans le code ASME (code case N-848). Les règles de l'ASME ont été développées pour deux ou trois défauts voisins. On peut douter de la validité de la procédure de regroupement dans le cas de Doel 3 et Tihange 2.

L'ORNL a adopté les résultats du processus de regroupement appliqué par Electrabel (Rapport final ORNL, page 62). Il s'est avéré que plusieurs défauts individuels et groupes de défauts ne satisfaisaient pas au critère d'acceptabilité de l'ASME. Aussi, l'ORNL a inclus l'effet dit de « précontrainte thermique ».

« Le modèle de précontrainte thermique exécuté avec le code logiciel FAVOR est avancé pour réévaluer les quatre défauts caractérisés par EBL (tableau 5.2 (b)) qui ne répondent au critère d'acceptabilité de l'ASME (ASME Section XI) (2004). Il s'avère qu'en appliquant le modèle de précontrainte thermique, les trois défauts caractérisés par EBL ne répondant pas au critère qui ont été décelés dans la centrale de Doel 3 - c.-à-d. les groupes de défauts GP0817 et GP0818, ainsi que le défaut individuel 492 - répondent au critère d'acceptabilité. Pour le défaut individuel 1660, trouvé dans la centrale de Tihange 2 et soumis à l'accident de perte de réfrigérant primaire (LOCA 1), le critère d'examen $RT_{NDT(final)} / RT_{NDT(crit)}$ passe de 1,49 à 1,20 ; aussi, le défaut 1660 ne répond toujours pas au critère d'acceptabilité de l'ASME, avec ou sans précontrainte thermique. » (Page 32)

La précontrainte thermique est un phénomène qui a pour effet de donner une plus grande ténacité aux aciers de la virole inférieure lors d'un préchargement à haute température. Cet effet a été observé sur des échantillons avec encoche et a été étudié dans des conditions expérimentales variées. Il semble dépendre de ces conditions.⁸⁸ Les expériences ont été réalisées sur des échantillons de petite taille et de composition similaire, mais pas sur l'intégralité d'une cuve.

L'inclusion de l'effet de la précontrainte thermique dans l'analyse du choc thermique sous pression est autorisée dans le cadre réglementaire américain, mais pas par le KTA ni par la norme française.

L'effet de la précontrainte thermique est démontré par l'ORNL pour un défaut précis :

« Sans l'application d'une précontrainte thermique, une valeur de $RT_{NDT-CRIT}$ égale à 77,9 °C crée un point de tangence entre le $K_I(t)$ appliqué et la courbe de ténacité. Ce point de tangence apparaît après l'apparition de la valeur maximale, $K_{I,max}$ et donc ne satisfait pas au critère de précontrainte thermique. L'inclusion de la précontrainte thermique fait passer la valeur critique de $RT_{NDT(CRIT)}$ à 102 °C. Aussi, $RT_{NDT(final)} / RT_{NDT(crit)} = 1,15$ sans précontrainte thermique et $RT_{NDT(final)} / RT_{NDT(crit)} = 0,88$ avec précontrainte thermique. »⁸⁹ (Page 72)

⁸⁸ U.Alsmann, Werkstoffmechanische Untersuchungen zu den Mechanismen des Vorbelastungseffekts, Dissertation, MPA Stuttgart, 2002

⁸⁹ ORNL Evaluation of Electrabel Safety Cases for Doel 3 / Tihange 2: Final Report Evaluation (Évaluation par l'ORNL des Dossiers de sûreté d'Electrabel pour Doel 3 / Tihange 2 : rapport final d'évaluation), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4030.pdf>

Cela signifie que le défaut ne répond au critère d'acceptation de l'ASME que grâce à l'inclusion de l'effet de précontrainte thermique.

Toutefois, l'inclusion d'une précontrainte thermique n'a pas suffi pour permettre au défaut 1660 de répondre au critère d'acceptabilité, si bien que l'ORNL a eu recours à une modélisation « plus réaliste » des défauts, jusqu'à ce que la conformité soit atteinte :

« L'analyse indépendante affinée de l'ORNL a démontré que le défaut 1660 caractérisé par EBL, qui ne répond pas au critère d'acceptabilité dans l'évaluation préalable de l'ONRL et d'EBL, est rendu conforme lorsqu'il est modélisé de manière plus réaliste comme un défaut quasi-laminaire individuel dans le cadre d'une analyse 3D par éléments finis. » (Page 12).

En ce qui concerne l'évaluation de l'intégrité structurelle, l'AFCN :

« L'analyse structurelle présentée montre que les cuves sous pression des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2 présentant des bulles d'hydrogène répondent aux exigences XI 'Acceptance by Analytical Evaluation' de l'ASME en ce qui concerne la charge et les propriétés mécaniques spécifiées.

Les résultats et conclusions susmentionnées confirment l'intégrité structurelle de Doel 3 et Tihange 2 pour tous les transitoires simulés, avec des marges importantes. »⁹⁰(Page 73)

Conclusion :

- 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.

⁹⁰ AFCN, *Flaw indications in the reactor pressure vessels of Doel 3 and Tihange 2. Final Evaluation Report 2015* (Indications de défauts dans les cuves des réacteurs de Doel 3 et de Tihange 2. Rapport final d'évaluation 2015 – en anglais), <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4000/4027.pdf>

- 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