

ANNEXE à la lettre 2013-10-16-BT-5-1-045-FR

0. Test de dépression et chauffage de l'eau d'injection de sécurité

Dans le corps de la lettre, la question d'un test de mise en dépression est évoquée : un test de mise en pression des deux cuves affectées a eu lieu, pourquoi n'a-t-on pas également réalisé un test de mise en dépression, en particulier suite à un refroidissement brutal intérieur ?

Il faut d'abord rappeler la place du test de pressurisation dans la démonstration fournie sur la tenue des cuves. L'approche suivie par Electrabel consiste à démontrer de manière analytique la tenue des cuves, sur base de calculs de mécanique évaluant les contraintes existantes dans les cuves lors de transitoires de manière à s'assurer que ces contraintes ne puissent engendrer d'évolution des « flakes » observés. Cette démonstration est accompagnée d'une série de tests en laboratoire destinés à vérifier les propriétés mécaniques de matériaux atteints de « flakes ». Cette démonstration en elle-même a permis d'aboutir à la conclusion que l'intégrité des cuves sera assurée en toute circonstance après redémarrage, même en cas de transitoires liés aux accidents de conception (y compris une rupture brutale d'une tuyauterie primaire).

Le test sur la cuve-même a été réalisé à la demande de l'autorité de sûreté. Il s'agit d'une vérification additionnelle ; les contraintes plus élevées rencontrées lors de ce test n'étaient théoriquement pas susceptibles d'aggraver les indications, ce qu'a confirmé l'écoute acoustique pratiquée lors de cette opération. Le choix du test a été fait compte tenu de considérations pratiques sur ce qui était réalisable, avec comme objectif de créer une situation pénalisante. De ce côté, le test de pressurisation remplit cette condition : le mode d'ouverture des fissures le plus susceptible d'initier la propagation requiert un état de contrainte de traction - les contraintes de compression ne peuvent le faire. Un test de surpression engendre bien de telles contraintes de traction.

Concernant la nécessité de préchauffage de l'eau d'injection de sécurité, cette mesure a été proposée par Electrabel, dès décembre, par mesure de « précaution » afin d'accroître les marges existantes. La différence entre Doel 3 et Tihange 2 est la profondeur des indications les plus significatives : elles sont plus superficielles à Doel 3, ce qui rend la cuve théoriquement plus sensible aux transitoires thermiques (comme vous l'identifiez dans votre courrier). De ce fait, préchauffer l'eau d'injection de sécurité à Doel 3 accroît vraiment la marge pour les défauts les plus sensibles, ce qui n'aurait pas été le cas à Tihange 2. Avec cette mesure, les marges pour les défauts les plus sensibles sont comparables dans les deux cuves et largement suffisantes (au moins 100% des critères de la Section XI du code ASME).

1. Plume effect

Dans l'évaluation du choc thermique pressurisé, la température prédite de l'eau au contact de la surface intérieure de la cuve est une condition aux limites pour l'analyse thermique. Le « plume effect » est dû au mélange incomplet de l'eau (froide) du système d'injection de sécurité et du réfrigérant primaire (chaud) en branche froide. Ce mélange incomplet donne lieu à un phénomène de stratification en branche froide et résulte en une distribution instationnaire non axisymétrique de température de l'eau adjacente à la paroi intérieure de la cuve. Par comparaison à une analyse basée sur une distribution axisymétrique de

température qui évalue les contraintes thermiques associées au gradient de température au travers de l'épaisseur, la prise en compte de la variation circonférentielle de température produit une composante de traction axiale additionnelle pour les contraintes.

L'intensité du plume effect est souvent mesurée par la différence entre la température minimale au droit de la tubulure d'entrée et les valeurs asymptotiques de part et d'autre. Il a été montré expérimentalement aux USA¹ qu'une fois le plume effect établi, l'intensité de l'effet diminue avec le temps mais aussi avec la distance verticale en dessous de la tubulure. Ainsi, au niveau du sommet du cœur, le mélange a pratiquement éliminé toute trace de plume effect.

L'évaluation de la tenue des cuves de Doel 3 et Tihange 2 pour les transitoires de refroidissement rapide considère des températures uniformes conservatives de l'eau au contact de la surface intérieure de la cuve. Il convient cependant de mentionner que des études françaises² ont montré que des évaluations 3D utilisant des températures de réfrigérant non axisymétriques dans le downcomer (espace annulaire cuve - enveloppe de cœur) obtenues par la méthode de la mécanique des fluides numérique dégageaient des marges plus importantes que des calculs utilisant des températures moyennes. Ces considérations ont permis de conclure que le plume effect pouvait être négligé.

2. Nombre limité de scénarios

La justification par Electrabel de la sélection des scénarios étudiés n'était pas connue de l'ASN et l'IRSN lorsqu'ils ont adressé leurs remarques à Bel V en décembre 2012.

La pratique n'est pas d'évaluer tous les scénarios d'événement mais d'en retenir, pour l'analyse de sûreté, un nombre limité, chacun d'eux enveloppant un certain nombre d'événements non décrits explicitement. Les événements « brèche sur les tuyauteries vapeur » et « brèche sur les tuyauteries d'eau alimentaire » figurent parmi ces événements considérés dans l'analyse de sûreté de manière générale. Pour l'évaluation de l'impact des défauts hydrogen flaking sur la tenue de la cuve, tous les transitoires de l'analyse de sûreté n'ont pas été étudiés mais uniquement ceux démontrés pénalisants pour la tenue de la cuve. La détermination de ces transitoires pénalisants a été obtenue par le calcul du facteur d'intensité de contrainte en pointe de défauts hypothétiques, pour différentes positions des défauts dans l'épaisseur de paroi, pour tous les événements considérés dans l'analyse de sûreté. Les événements « brèche sur les tuyauteries vapeur » et « brèche sur les tuyauteries d'eau alimentaire » n'ont pas été retenus comme pénalisants pour la tenue des cuves affectées par l'hydrogen flaking.

3. Root cause analysis

L'attribution de l'origine des indications à un mécanisme d'*hydrogen flaking* durant le forgeage résulte (1) de l'adéquation des conditions d'apparition de ce mécanisme et des caractéristiques des défauts résultants (notamment la description de la phénoménologie des défauts obtenue sur la virole AREVA VB 395) avec les données disponibles et les observations faites sur les viroles de cuve de Doel 3 et Tihange 2 et (2) de l'exclusion des autres causes possibles de dégradation. En particulier, il est connu que la dépose par soudage du revêtement en acier inoxydable austénitique sur la surface intérieure de la cuve peut générer des fissures, connues sous le vocable *défauts sous revêtement*. Ce mécanisme

¹ NUREG-1809, Thermal-Hydraulic Evaluation of Pressurized Thermal Shock

² Ternon-Morin et al., Assessment of French reactor pressure vessel integrity : a thermohydraulics and fracture mechanic analysis of the small break loss of coolant accident, ICONE 8, 2000 , Baltimore

a été exclu essentiellement parce que l'emplacement de ces défauts est limité à la zone affectée thermiquement et que ces défauts ne sont pas quasi-laminaires mais sont orientés perpendiculairement à la surface intérieure de la cuve. Par ailleurs il convient de rappeler qu'aucune indication de type défaut sous revêtement n'a été identifiée par l'inspection des cuves de Doel 3 et Tihange 2 à l'aide d'une technique qualifiée pour la détection et la caractérisation de ces défauts. Les causes possibles de propagation en exploitation ont été évaluées et toutes ont été exclues, à l'exception de la propagation par fatigue. Une analyse de propagation par fatigue a toutefois démontré que la propagation calculée pour la durée de vie des unités était négligeable.

4. Qualification des techniques d'inspection

L'inspection par ultrasons qui a permis la découverte des indications liées aux défauts hydrogène dans les cuves de Doel 3 et Tihange 2 a été faite à l'aide de la machine d'inspection en service belge (MIS-B). Cette machine est utilisée depuis plus de 30 ans pour inspecter les cuves des réacteurs nucléaires belges. La machine et la procédure d'inspection sont soumises à un processus de qualification, fonction des défauts recherchés. En 2012, l'inspection visait à s'assurer de l'absence de défaut sous revêtement dans les cuves ; la technique d'inspection avait été qualifiée pour ce type de recherche.

Les indications relevées se sont avérées d'un type différent. La procédure n'était à ce moment pas qualifiée formellement pour la détection et l'identification de ce type d'indications. L'exploitant a procédé à une première validation de la méthode en la testant sur le bloc VB-395/1, morceau d'une virole de générateur contenant des défauts d'hydrogène, ainsi que par des simulations numériques. Des actions court-terme ont été requises par AIB-Vinçotte, l'organisme agréé en la matière en Belgique. Comme mentionné dans le rapport final d'évaluation d'AIB-Vinçotte, après examen des résultats complémentaires fournis pour les actions court-terme, les incertitudes quant à la capacité de la technique d'inspection à détecter et caractériser proprement les indications dans les cuves des réacteurs ont été levées.

En parallèle, l'exploitant a préparé un second morceau (VB-395/2) de la virole pour procéder sur le moyen-long terme à une qualification totalement représentative. Les résultats de cette action devront être disponibles avant les prochaines inspections (prévues aux prochains arrêts). Cette qualification formelle sera effectuée en caractérisant les défauts du morceau VB-395/2 par la même technique d'inspection que celle utilisée sur les cuves. La différence entre les deux étapes de qualification provient du fait que le bloc VB-395/2 a été préparé de manière à avoir des caractéristiques similaires à celles des cuves, à savoir un recouvrement (cladding) semblable au recouvrement des cuves et un traitement thermique final.

5. Propriétés des matériaux

Deux mécanismes de vieillissement sont susceptibles d'avoir un effet pénalisant sur les propriétés de l'acier affecté d'hydrogen flaking: le vieillissement sous irradiation et le vieillissement thermique.

Le mécanisme de vieillissement sous irradiation, ou fragilisation sous irradiation, dépend de la teneur en éléments fragilisants présents dans l'acier (phosphore, cuivre et nickel). La fragilisation sous irradiation se traduit par l'augmentation d'une température caractéristique des propriétés de l'acier de cuve (température de transition du domaine fragile au domaine ductile). Cette température se calcule par une équation qui tient compte de l'irradiation subie et de la teneur en éléments fragilisants. Le conservatisme de cette équation est vérifié par les expertises faites sur les capsules d'irradiation à intervalles réguliers (programme de

surveillance). L'effet de l'irradiation sur l'acier de cuve dans les zones affectées par l'hydrogen flaking, pourrait être plus sévère que celui attendu dans les zones non affectées parce que l'hydrogen flaking apparaît dans les zones à macro-ségrégation positive où la teneur locale en éléments fragilisants est plus élevée. Dans la démonstration de la tenue des cuves de Doel 3 et Tihange 2, l'effet de l'hydrogen flaking sur la fragilisation sous irradiation de l'acier de cuve est pris en compte lors du calcul de cette température caractéristique : on utilise des valeurs conservatives dans les zones macro-ségrégées pour les teneurs en éléments fragilisants. Les essais mécaniques sur échantillons irradiés qui seront réalisés après le redémarrage sont une validation expérimentale additionnelle de l'approche adoptée. Une revue de la littérature technique a été réalisée afin de dresser un état des connaissances en matière de vieillissement thermique des aciers de cuve. Il en ressort qu'on ne s'attend pas à un effet de vieillissement thermique pour les aciers des viroles de cœur qui voient la température des branches froides. Des essais d'évaluation de la sensibilité au vieillissement thermique seront réalisés après redémarrage de Doel 3 et Tihange 2 pour confirmation.

6. Inspection des cuves lors des prochains arrêts

Il est actuellement prévu de procéder à la réinspection complète des cuves de Doel 3 et Tihange 2 lors du prochain arrêt. Entretemps, plusieurs actions long terme seront terminées et auront fourni leurs résultats. En fonction de ceux-ci et des nouveaux résultats d'inspection, la nécessité ou non d'inspection ultérieure sera évaluée.

7. Essais à grande échelle

Le caractère critique d'un défaut de type *hydrogen flaking* dépend bien sûr de sa taille mais également de son inclinaison par rapport à la surface intérieure et de la position radiale dans l'épaisseur de la paroi de la cuve. Ainsi, pour une même position radiale, un défaut de grande taille peut être moins critique qu'un défaut incliné de plus petites dimensions. Les essais « à grande échelle » ont ainsi été dénommés pour les distinguer des essais réalisés sur des éprouvettes normalisées de petites dimensions mais ils ne visaient nullement à représenter le comportement de la cuve à l'échelle unitaire. Les essais sur éprouvettes de grande taille (diamètre de 25 mm) sont des essais structuraux qui ont pour objectif d'appréhender le comportement global d'un matériau affecté d'*hydrogen flaking*, par exemple concernant la présence de ductilité, et cet objectif peut être atteint sans exiger que les défauts présents aient la taille maximale détectée sur les cuves de Doel 3 et Tihange 2.

8. Consultation d'experts allemands.

L'Autorité de sûreté belge a mis au point une approche unique pour pouvoir évaluer efficacement le problème des cuves de Doel 3 et Tihange 2. Cette approche repose d'une part sur l'expertise belge (la filiale technique Bel V, l'organisme de contrôle AIB-Vinçotte, et des professeurs d'université belges en support au Conseil scientifique) et international. Au niveau international, il a été fait appel aux autorités de sûreté étrangères et à un groupe d'experts indépendants. Aucun expert étranger n'a été consulté à titre individuel.

Les autorités de sûreté étrangères ont été amenées à discuter de la problématique lors de réunions. Il s'agissait de discussions ouvertes afin de s'assurer que le problème était bien

traité dans son ensemble et de rassembler toute information utile disponible. Les experts délégués par les autorités ont eu à leur disposition les évaluations d'Electrabel en vue de préparer les discussions. Ces experts, dont certains membres du régulateur allemand, ont partagé leurs connaissances et exprimé leur avis sur la question. Ces avis ont été récoltés et pris en compte dans l'évaluation finale, mais sans production d'un rapport formel écrit. Ils sont de fait incorporés dans le rapport d'évaluation provisoire de janvier 2013.

Dans le groupe d'évaluation indépendante, une personnalité allemande a été retenue. Il s'agit du Dr. Helmut Schultz. L'AFCN a reçu un rapport d'évaluation de l'ensemble du groupe, et non des rapports séparés par expert. Ce rapport a été rendu disponible sur le site web de l'AFCN ([lien](#)).