



CMD 25-M27

Date: 2025-06-02

**Written Submission from
CNSC Staff**

**Mémoire du
personnel de la CCSN**

In the matter of the

À l'égard du

**Update on an item from a previous
Commission proceeding**

**Mise à jour sur un sujet découlant d'une
séance précédente de la Commission**

Response to Provide a Technical Update on
Elevated Hydrogen Equivalent Concentration
Research and Development Activities

Réponse visant à fournir une mise à jour
technique sur les activités de recherche et
développement liées à une concentration
équivalente en hydrogène élevée

Public Meeting

Réunion publique

June 3, 2025

Le 3 juin, 2025



NOTE DE SERVICE

Classification de sécurité

Non classifié

Notre dossier :

ccm GEN-006904/e-doc 7529969

Entièrement publiable (AIPRP)

Oui

To Candace Salmon
A Greffe de la Commission

From *version originale anglaise signée le 14 avril 2025 – e-doc Word 7476965*
De

Alexandre Viktorov,
Directeur général, Direction de la réglementation des centrales nucléaires

Objet Réponse du personnel de la CCSN à la directive de la Commission visant à présenter une mise à jour technique à l'égard des activités de R-D sur les concentrations élevées de Heq

But

Lors d'une réunion de la Commission tenue le 29 janvier 2025, M. Lacroix, Ph. D., commissaire, a demandé ce qui suit au personnel de la CCSN [1] :

« J'apprécierais énormément, au cours des prochains mois, du moins dans un proche avenir, qu'on présente à la Commission un rapport d'étape technique comparable au CMD 23-M3 que vous nous avez fourni il y a deux ans, soit en janvier 2023, afin de donner une vue d'ensemble des progrès techniques. J'insiste particulièrement sur les progrès techniques à l'égard du modèle d'amorçage des fissures, du modèle de ténacité à la rupture et du modèle de taux de croissance des fissures ».

La présente note de service du personnel de la CCSN vise à répondre à la demande de mise à jour à propos des constatations qui ont été tirées du programme de recherche et développement (R-D) sur les concentrations élevées d'hydrogène équivalent (Heq) [2,3] et communiquées par Bruce Power et OPG au personnel de la CCSN, dans quatre mises à jour semestrielles et lors de deux ateliers de l'industrie en personne.

Contexte

À l'annexe A du [CMD 23-M3](#) [4], le personnel de la CCSN donne un aperçu de l'incidence potentielle de zones localisées de concentrations élevées de Heq, près des joints d'assemblage des tubes de force, en mettant l'accent sur ce qui suit :

- mises à jour des modèles de Heq
- vérification des modèles d'amorçage de fissuration par hydruration retardée
- incidence potentielle sur le modèle de ténacité à la rupture des tubes de force

La figure 1 montre le rôle joué par ces modèles lors des évaluations des défauts dans les tubes de force.

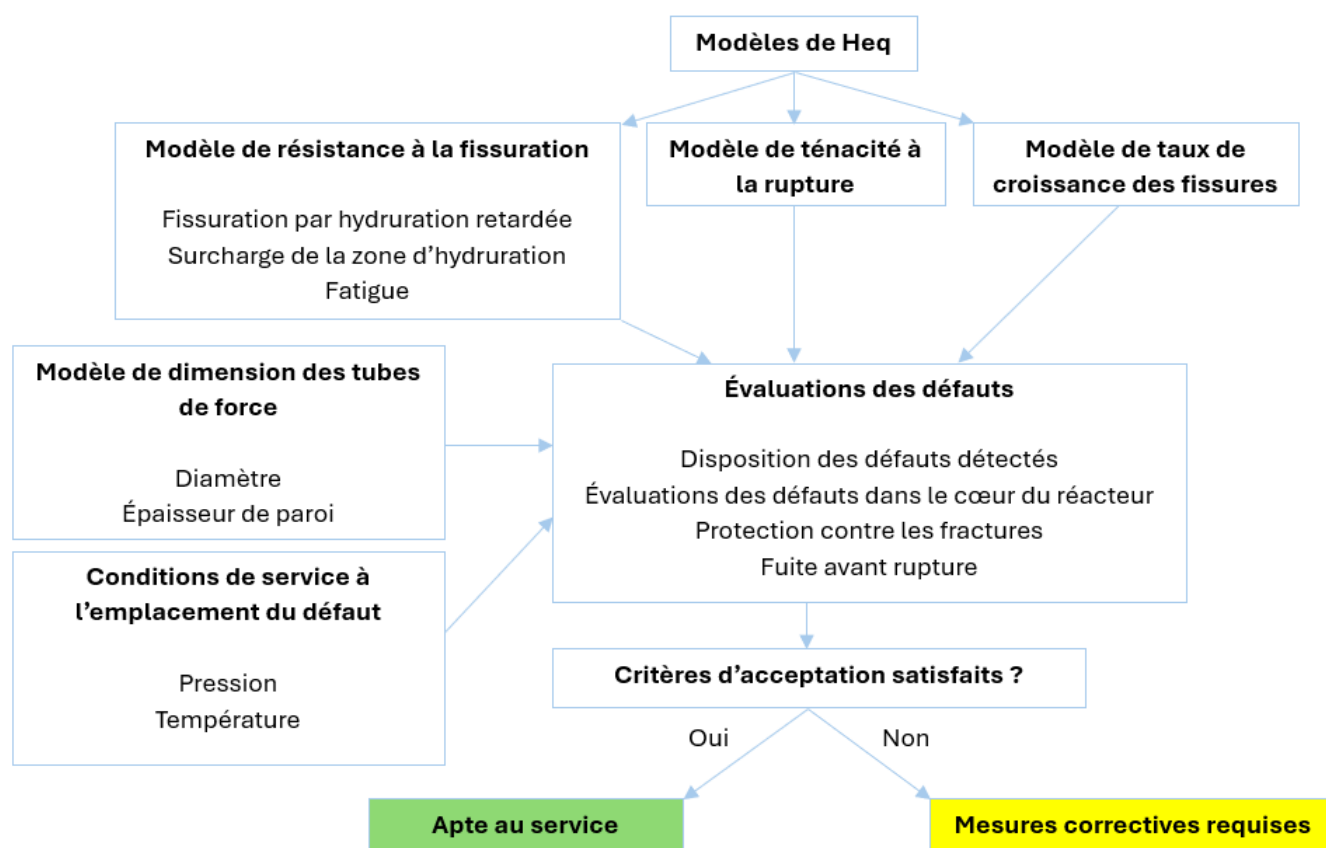


Figure 1 : Aperçu des évaluations de l'aptitude fonctionnelle liées aux défauts dans les tubes de force

Mises à jour des modèles de Heq

L'industrie a entrepris la mise au point de deux modèles tridimensionnels de pénétration et de diffusion des isotopes de l'hydrogène afin de raffiner les prévisions relatives à la concentration de Heq près des marques de brunissage des joints dudgeonnés, dans des conditions associées à l'exploitation prolongée des tubes de force au-delà de 210 000 heures équivalentes pleine puissance (HEPP).

Zone du joint dudgeonné au point de sortie (JDPS)

- Selon une modélisation thermohydraulique des configurations de canaux de combustible vieillissants, la température pourrait varier d'environ 20°C entre les parties supérieure et inférieure d'un tube de force, près du JDPS, après que le tube de force a été soumis à une expansion diamétrale due au fluage thermique et au fluage induit par irradiation.
- L'expansion diamétrale accroît l'écart entre la partie supérieure des grappes de combustible et celle du tube de force, ce qui permet à davantage de caloporteur de contourner les grappes et entraîne donc un refroidissement local accru par rapport à la partie inférieure du tube de force, lorsque les patins des grappes reposent sur la surface intérieure du tube de force (voir la figure 2).

- Bien que l'expansion diamétrale maximale du tube de force survienne à quelques longueurs de grappe en amont de la marque de brunissage, on peut tout de même observer des effets de refroidissement près du joint dudgeonné.

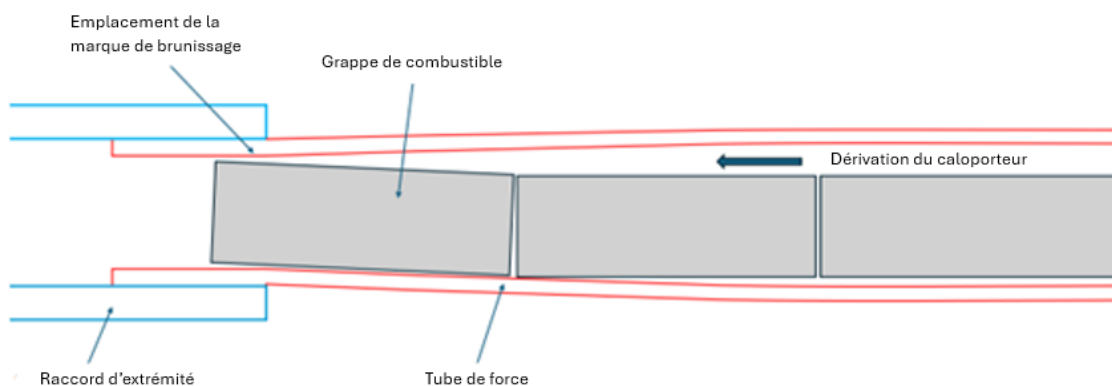


Figure 2 : Illustration de la dérivation du caloporteur à l'extrémité de sortie d'un tube de force, qui génère un gradient circonférentiel de température (pas à l'échelle)

- Puisque l'hydrogène dans les tubes de force diffusera vers des endroits plus froids, le gradient de température peut provoquer une accumulation accrue d'hydrogène dans la partie supérieure du tube de force.
- La modélisation tridimensionnelle réalisée jusqu'à présent montre que l'intégration de gradients circonférentiels de température issus des conditions d'écoulement à l'extrémité de sortie des tubes de force peut produire des zones de concentrations élevées de Heq, conformément aux résultats observés en 2021 dans les tubes de force des tranches 3 et 6 de Bruce.

Zone du joint dudgeonné au point d'entrée (JDPE)

- Le mécanisme attribué à la formation d'une zone de concentration élevée de Heq près du JDPS des tubes de force ne peut être à l'origine de la zone de concentration élevée de Heq près du JDPE, car aucune dérivation de l'écoulement ne survient quand le caloporteur entre dans l'extrémité d'entrée des tubes de force.
- Un examen métallurgique du matériau de la zone du point d'entrée des tubes de force affectés a révélé la présence d'une zone de concentration élevée de Heq (souvent appelé un « blip ») près de la surface extérieure des tubes de force, ainsi que de concentrations de loin inférieures près de la surface intérieure (voir la figure 3), ce qui est également illustré dans une figure fournie par les titulaires de permis dans leurs mises à jour, dans les [CMD 25-M19](#) [6] et [CMD 25-M19.1](#) [7].
- Selon l'industrie, les blips pourraient découler d'un contact entre le matériau des tubes de force et une partie alésee des raccords d'extrémité, en raison d'un fléchissement localisé survenant quand les tubes de force s'allongent sous l'effet d'un fluage thermique et d'un fluage induit par irradiation au fil de la vie utile du réacteur (voir les figures 4 et 5). Une zone froide localisée se forme et attire l'hydrogène vers la surface extérieure, car ces raccords sont plus froids que le caloporteur qui traverse les tubes de force.

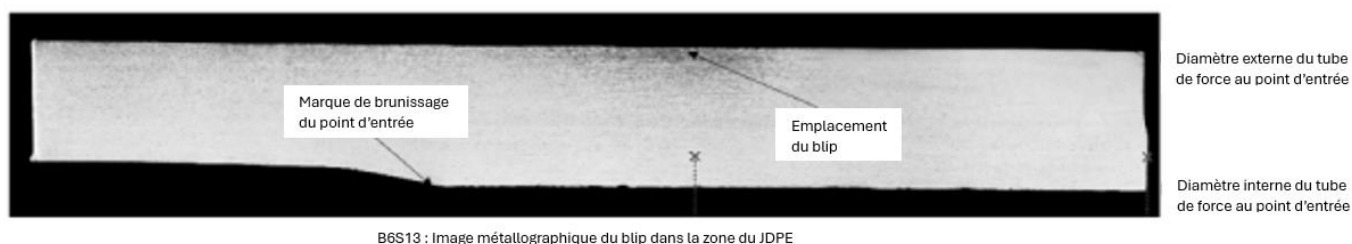


Figure 3 : Illustration d'un blip de concentrations élevées de Heq dans la zone du JDPE [6,7] (la zone foncée, près de la surface extérieure, correspond à une zone d'hydrure de zirconium dense et témoigne de concentrations élevées de Heq)

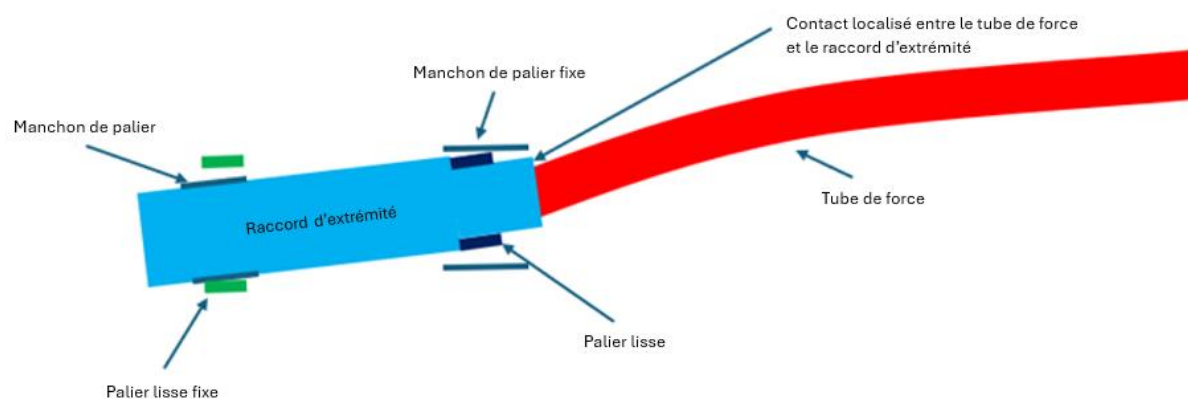


Figure 4 : Illustration d'un scénario de déformation (exagérée) qui pourrait causer un blip de Heq (pas à l'échelle)

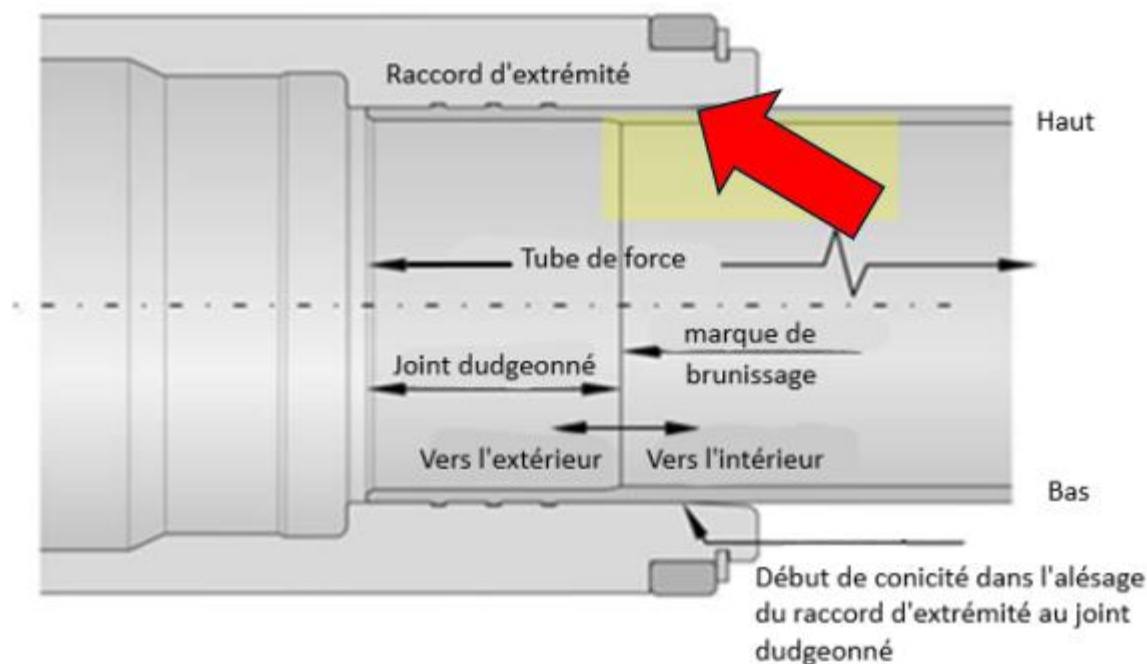


Figure 5 : Illustration de la zone du joint dudgeonné d'un tube de force – dans des conditions normales, il n'y a aucun contact à l'emplacement du blip de Heq (flèche rouge), en raison de l'alésage du raccord d'extrémité; le scénario de déformation de la figure 4 peut entraîner un contact, d'après la modélisation de déformation.

- L'industrie a effectué une analyse par éléments finis pour démontrer le scénario de déformation d'un canal de combustible menant à un contact localisé et à des gradients de température traversant la paroi près de la marque de brunissage du JDPE. Avec les données ainsi recueillies, une modélisation de pénétration et de diffusion des isotopes d'hydrogène a permis de reproduire des blips de Heq dans la zone du point d'entrée.

État actuel

- Une étude approfondie du phénomène a indiqué que des blips pourraient se former à l'extrémité de sortie des tubes de force et accentuer les effets de concentrations élevées de Heq en raison de gradients circonférentiels de température à l'extrémité de sortie des tubes de force.
- Des travaux ont été entrepris pour valider davantage les prévisions modélisées et confirmer les paramètres d'entrée qui ont le plus d'incidence, ainsi que la sensibilité de ces prévisions à ces paramètres.

Résultat attendu

- D'ici la fin de 2025, les titulaires de permis devraient pouvoir modéliser l'étendue axiale et circonférentielle maximale des zones de concentrations élevées de Heq attendues d'ici la fin de l'exploitation prévue, et être en mesure de déterminer si ces zones peuvent interagir avec des zones où l'on sait que les tubes de force peuvent présenter des défauts.

- Si aucune interaction entre les défauts connus et les zones de concentrations élevées de Heq n'est attendue d'ici la fin prévue de l'exploitation des réacteurs, les titulaires de permis devraient pouvoir prouver que des marges d'exploitation sûre sont maintenues.

Essais de résistance à la fissuration

Trois mécanismes d'amorçage des fissures sont pris en considération dans les évaluations des défauts des tubes de force :

- Fissuration par hydruration retardée (FHR) – Des hydrures de zirconium fragiles peuvent s'accumuler à l'emplacement d'un défaut, sous une charge appliquée de manière constante (pression interne), en raison de l'effet de concentration de contrainte de la géométrie du défaut, puis ceux-ci peuvent croître jusqu'à ce que la contrainte qui en découle entraîne leur fissuration.
- Surcharge de la zone d'hydruration (SZH) – Des hydrures peuvent s'accumuler au point d'origine d'un défaut, sous une charge appliquée de manière constante, sans toutefois croître jusqu'à ce que la contrainte qui en découle entraîne leur fissuration. Cependant, si la charge (pression interne) augmente, la contrainte accrue peut provoquer une fissuration des hydrures.
- Fatigue – Des fluctuations de la charge appliquée (pression interne) peuvent entraîner une fissuration par la fatigue, sous l'effet de concentration de la contrainte due à la géométrie du défaut. Ce mécanisme d'amorçage des fissures n'est pas directement influencé par les concentrations de Heq, mais si ces dernières s'avèrent assez importantes pour que le matériau présente de gros hydrures de zirconium, la présence d'hydrures pourrait modifier la résistance à la fatigue du matériau.

Fissuration par hydruration retardée

- L'incidence des concentrations de Heq sur le mécanisme de fissuration par hydruration retardée (FHR) est abordée dans le [CMD 23-M3](#) [4].
- Dans l'industrie, trois types d'essai, sur des éprouvettes semblables, sont exécutés pour évaluer la résistance à la FHR du matériau des tubes de force (voir les figures 6 à 8) :
 - essai visant à établir le seuil d'intensité de contrainte lié à l'amorçage d'une FHR, en raison d'un défaut émoussé, K_{TH}
 - essai visant à établir le seuil d'intensité de contrainte lié à l'amorçage d'une FHR, à partir de la pointe d'une fissure, K_{IH}
 - essai visant à établir le seuil de contrainte lié à l'amorçage d'une FHR, à partir d'un matériau sans défaut, p_c
- La valeur de K_{TH} n'est pas directement utilisée dans le modèle d'amorçage des fissures, mais peut servir à en vérifier les prévisions. Elle est déterminée dans le cas d'un défaut d'une géométrie particulière et permet d'évaluer tout changement du seuil d'amorçage d'une fissure lié à cette géométrie, en fonction des changements affectant le matériau (valeurs de Heq distinctes) ou les conditions d'essai (température, etc.).
- Les valeurs de K_{IH} et de p_c sont des paramètres employés dans le modèle de FHR pour estimer le potentiel d'amorçage d'une fissure associé à un défaut aléatoire.

- Les défauts induits par l'exploitation, en particulier ceux causés par le piégeage de débris entre une grappe de combustible et la paroi d'un tube de force, peuvent provoquer des géométries de défaut aléatoires et diverses concentrations de contrainte, ce qui rend impossible la réalisation d'essais visant directement le seuil d'amorçage d'une fissure pour toutes les géométries de défaut possibles.
- Aux fins d'estimation du potentiel d'amorçage des fissures de défauts particuliers, le modèle de FHR repose sur deux scénarios extrêmes dans lesquels une fissure est présente (K_{IH}) ou aucun défaut n'est présent (p_c), dans les conditions de contrainte associées à des géométries de défaut particulières.

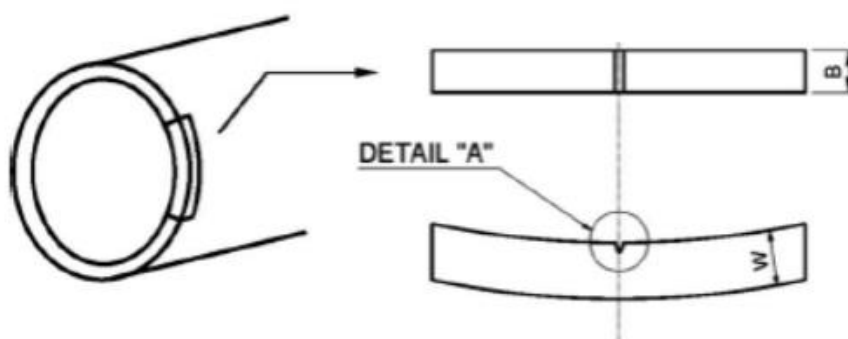


Figure 6 : Illustration d'une éprouvette d'essai de FHR à encoche émoussée utilisée aux fins d'essais de K_{TH} (source : Bruce Power)

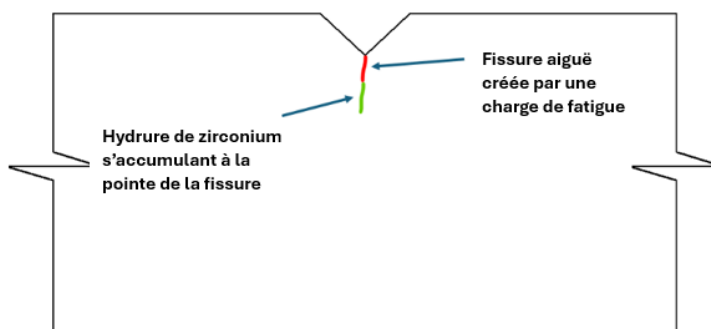


Figure 7 : Éprouvette d'essai de FHR employée aux fins d'essais de K_{IH} (fissure par la fatigue formée au point d'origine de l'encoche, avant l'essai)

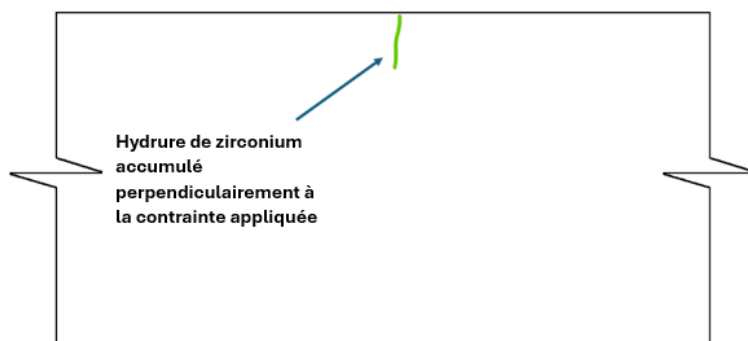


Figure 8 : Éprouvette d’essai de p_c durant lequel la contrainte appliquée est assez importante pour permettre aux hydrures d’être orientés perpendiculairement à la surface intérieure, sans la présence d’un défaut

- Les essais d’amorçage des FHR du programme de R-D sur les concentrations élevées de Heq [2,3] ont pour objet de comparer les résultats d’essais visant un matériau présentant une concentration de Heq nominale de 60 ppm à ceux d’un matériau présentant une concentration de Heq supérieure à 200 ppm, afin de déceler tout changement observable du seuil d’amorçage, dans les conditions d’essai particulières établies.
- Depuis la dernière mise à jour officielle de l’industrie au sujet de l’état des essais d’amorçage des FHR (septembre 2024), les travaux suivants ont été réalisés :
 - Des essais prévus de K_{IH} ont été réalisés, sans réduction de la valeur seuil observée.
 - Des essais prévus de p_c étaient en cours, sans réduction de la valeur seuil observée dans le cadre des essais achevés à ce moment.
 - Des essais de K_{TH} se poursuivaient. Les premiers résultats obtenus indiquent une réduction d’environ 20 % de la valeur seuil du matériau présentant des concentrations élevées de Heq, par rapport à celle du matériau présentant de faibles concentrations. On pose comme hypothèse que ces résultats pourraient découler d’une interaction entre de gros hydrures dans la majeure partie du matériau présentant des concentrations élevées de Heq et le champ de contrainte au point d’origine de l’encoche.
 - Puisque les valeurs seuils de K_{IH} et de p_c n’ont pas changé, mais que la valeur de K_{TH} a subi un changement observable, le modèle d’amorçage des FHR pourrait devoir être actualisé en tenant compte du matériau présentant des concentrations élevées de Heq afin d’ajuster la relation entre les deux scénarios extrêmes (fissuration, et sans défaut) et un défaut à géométrie arbitraire.
 - Les constatations n’ont aucune incidence immédiate sur la sûreté. Le matériau demeure résistant à l’amorçage des fissures même en présence de concentrations élevées de Heq, et la modélisation actuelle indique que les zones de concentrations élevées de Heq ne risquent pas de croître au point où elles pourraient interagir avec les défauts présents dans les tubes de force, ce qui devra être confirmé après les études de sensibilité visant les modèles de Heq.

- Les essais de SZH sont réalisés à partir d'éprouvettes semblables à celles visées par les essais de K_{TH} . Les hydrures sont formés à la pointe de l'encoche, sous une contrainte particulière, laquelle est ensuite accrue pour déterminer la résistance des éprouvettes à l'amorçage des fissures.
- Selon la dernière mise à jour officielle de l'industrie au sujet du programme de R-D sur les concentrations élevées de Heq (septembre 2024), des essais de SZH étaient en cours.

Fatigue

- Les essais de fissuration par la fatigue nécessitent l'usage d'éprouvettes qui sont semblables aux éprouvettes plates normalisées destinées aux essais de traction, mais qui présentent une encoche comme celle des éprouvettes de K_{TH} (figure 9). Plutôt que de laisser des hydrures se former à la pointe du défaut, sous une charge appliquée de façon constante, on exerce une contrainte de manière cyclique afin d'évaluer le potentiel d'amorçage des fissures par la fatigue au point d'origine de l'encoche.
- Selon la dernière mise à jour officielle de l'industrie au sujet du programme de R-D sur les concentrations élevées de Heq (septembre 2024), des essais de résistance à la fatigue étaient en cours, et les résultats obtenus à ce moment n'indiquaient aucun changement à l'égard du seuil d'amorçage d'une fissure par la fatigue.

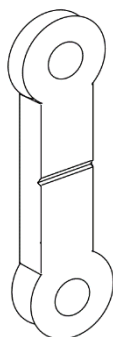


Figure 9 : Illustration d'une éprouvette d'essai visant l'amorçage d'une fissure par la fatigue

Essais de taux de croissance des fissures de FHR

- Quand des fissures sont issues d'un défaut, elles peuvent continuer de se propager sous l'effet du mécanisme de FHR, et les hydrures qui continuent de s'accumuler à la pointe des fissures entraînent la croissance de ces dernières. Il est important de caractériser le taux de croissance afin de pouvoir prévoir le moment où les fissures atteignent une taille critique qui cause une défaillance des tubes de force.
- Les essais de taux de croissance des fissures de FHR sont exécutés avec des éprouvettes préalablement fissurées par la fatigue et visent à surveiller, en fonction du temps écoulé, la propagation provoquée par l'accumulation d'hydrures à la pointe des fissures, sous une charge continue.
- Dans la dernière mise à jour officielle de l'industrie au sujet du programme de R-D sur les concentrations élevées de Heq (septembre 2024), on a signalé l'exécution d'essais de taux de croissance des fissures de FHR ainsi que l'absence d'effet des concentrations élevées de Heq sur les taux de croissance.

Ténacité à la rupture

- Le [CMD 23-M3](#) [4] aborde le comportement des tubes de force en matière de ténacité à la rupture ainsi que l'incidence possible de la concentration de Heq sur la ténacité. Rappel :
 - la figure 10 présente une illustration du comportement et une description des divers régimes de comportement de rupture, selon la température
 - la figure 11 illustre l'effet d'une augmentation des concentrations de Heq sur la ténacité à la rupture
- Comme signalé à la Commission dans le [CMD 22-M37](#) [5], le personnel de la CCSN a accepté le recours à la révision 2 du modèle de ténacité à la rupture aux fins d'évaluation de l'aptitude fonctionnelle, dans les cas suivants :
 - concentrations de Heq d'au plus 100 ppm à l'extrémité avant du tube de force
 - concentrations de Heq d'au plus 140 ppm dans le reste du tube de force

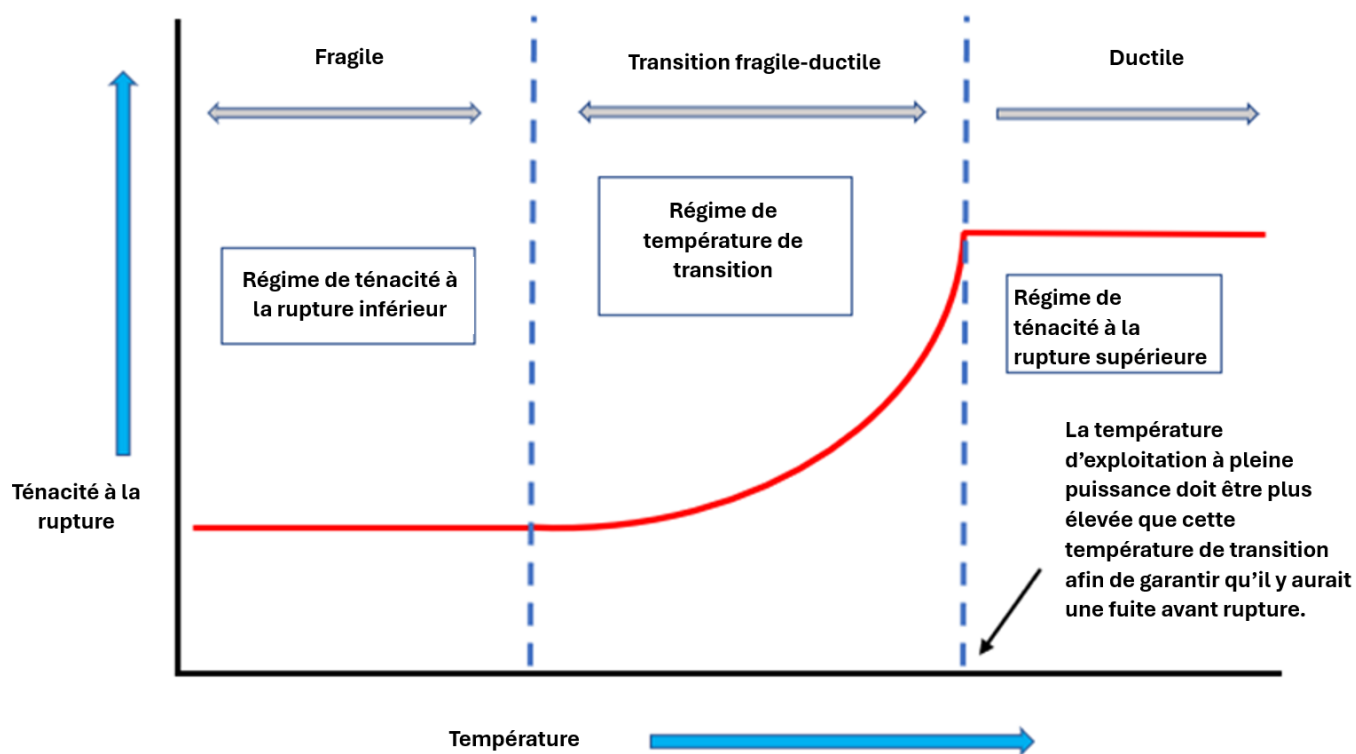


Figure 10 : Comportement du matériau des tubes de forces au chapitre de la ténacité à la rupture en fonction d'une valeur de Heq donnée

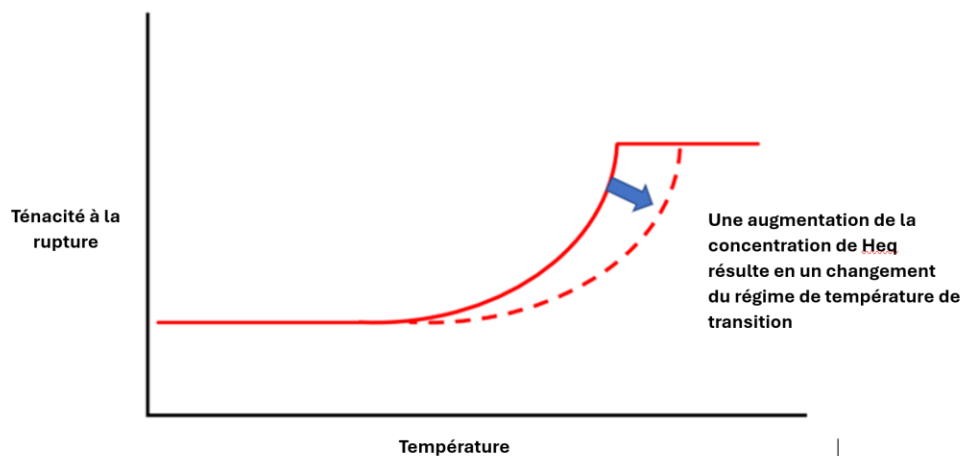


Figure 11 : Effet d’une augmentation des concentrations de Heq sur la ténacité à la rupture

- Comme signalé à la Commission dans le [CMD 21-M4](#) [8], l’extrémité avant des tubes de force est la première formée durant leur fabrication. Des différences de taux de refroidissement survenant après le procédé d’extrusion peuvent faire en sorte que la microstructure de cette extrémité s’avère distincte de celle du reste du tube de force et que sa ténacité à la rupture en est diminuée.
- Des éprouvettes de tube de force ont été soumises à huit essais d’éclatement, à des concentrations de Heq supérieures à 200 ppm :
 - matériau de l’extrémité avant et du reste d’un tube de force
 - concentrations de Heq d’au plus 368 ppm
 - températures d’essai allant de 65 à 250 C
- Au moment de l’élaboration de la présente note de service, le personnel de la CCSN disposait des résultats de sept des huit essais susmentionnés; ces résultats respectaient la plage de prévisions de la révision 2 du modèle de ténacité à la rupture.
- En décembre 2024, Bruce Power et OPG ont signalé au personnel de la CCSN que le dernier essai d’éclatement réalisé en fonction de valeurs de Heq supérieures à 200 ppm (essai BT-49) a donné un résultat non conforme à la révision 2 du modèle. Le personnel de la CCSN ne possède pas encore d’information précise à ce sujet, mais les données ci-après ont été fournies :
 - le matériau de l’extrémité avant a été mis à l’épreuve à une température de 250 C
 - à la température d’essai, le matériau n’a pas présenté un comportement typique d’une plage supérieure
- Effets de ce résultat :
 - puisqu’un matériau d’extrémité avant présentant des concentrations élevées de Heq peut ne présenter aucun comportement typique de la plage supérieure dans des conditions d’exploitation normale, il n’est pas certain qu’un comportement de fuite avant rupture surviendra dans le cas d’une fissure qui s’amorce en cours d’exploitation normale à pleine puissance

- la révision 2 du modèle devra être modifiée à nouveau pour en permettre l'application à un matériau présentant des concentrations élevées de Heq
- À l'heure actuelle, ce résultat d'essai n'a pas d'incidence sur les conditions d'exploitation sûre :
 - c'est à l'emplacement du blip au JDPE qu'on trouve la seule zone de l'extrémité avant des tubes de force demeurant en exploitation où les concentrations de Heq devraient dépasser la limite actuelle de 100 ppm prise en compte dans la révision 2 du modèle
 - dans le cas des tubes de force de Pickering, l'emplacement du blip est recouvert d'un bouchon de blindage, de sorte qu'il ne devrait pas y avoir de défaut entraînant l'amorçage d'une fissure près d'un blip
 - cette constatation n'a aucune incidence sur les hypothèses présentées dans l'évaluation du processus décisionnel tenant compte du risque (PDTCT) relative aux activités d'exploitation de Bruce Power d'ici la fin de 2025
 - comme mentionné précédemment, la modélisation des concentrations élevées de Heq dans la zone du JDPE indique actuellement que le blip ne devrait pas influencer sur l'amorçage d'une fissure lorsqu'un défaut sur la surface intérieure coïncide avec un blip
- Les effets de cette constatation devront tous être pris en considération afin d'appuyer l'exploitation des réacteurs de Bruce-B jusqu'à leurs dates de réfection prévues, après l'échéance de l'évaluation du PDTCT.

Résumé

- Les constatations découlant des activités de R-D réalisées jusqu'à présent n'ont aucune incidence sur les conclusions antérieures du personnel de la CCSN à l'égard de la sûreté des réacteurs en exploitation prolongée.
- D'après les progrès réalisés à ce jour, le personnel de la CCSN s'attend à ce que les titulaires de permis accomplissent les tâches énumérées dans les plans de R-D [2,3], et il estime que l'ensemble des livrables du projet sont en bonne voie d'être achevés d'ici la fin de 2025.
- Puisque des activités de R-D demeurent en cours, le personnel de la CCSN continuera d'analyser les nouvelles données obtenues, de mobiliser les titulaires de permis à propos des constatations de son évaluation et d'informer la Commission au sujet des progrès accomplis par le biais du rapport d'étape sur les centrales nucléaires.

Reconnaissance et approbation de la décision du directeur général :

J'approuve

Je n'approuve pas

X

Ramzi Jammal
Premier vice-président et CRO

X

Ramzi Jammal
Premier vice-président et CRO

Pièce jointe : bordereau d'acheminement du CMD – note de service aux fins de mise à jour technique à l'égard de la R-D sur le Heq, mars 2025, e-Doc [7486326](#).

c.c. : R. Jammal, D. Haslip, M. Rickard, A. Bulkan, R. Richardson, V. Tavasoli, B. Carroll et D. Carrière

Documents de référence

1. Transcription de la réunion publique de la Commission du 29 janvier 2025, e-Doc [7469355](#).
2. Document à l'intention des commissaires, « Bruce A and B: Update to the Commission regarding Elevated Hydrogen Equivalent Concentrations - Action Item 2022-07-23135 », 19 juillet 2022, CMD 22-M37.3, e-Doc [6858728](#).
3. Document à l'intention des commissaires, « OPG Response – Darlington and Pickering NGS – Request for an Update to the Commission on Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration (Heq) – New Action Item 2022-OPG-23135 », 19 juillet 2022, CMD 22-M37.1, e-Doc [6858724](#).
4. Document à l'intention des commissaires, « Responses to the questions from the External Advisory Committee regarding the update on the discovery of elevated hydrogen equivalent concentrations in the pressure tubes of reactors in extended operation », 25 janvier 2023, CMD 23-M3, e-Doc [6951418](#).
5. Document à l'intention des commissaires, « CNSC staff update on elevated hydrogen equivalent concentration discovery events in the pressure tubes of reactors in extended operation », 3 novembre 2022, CMD 22-M37, e-Doc [6848197](#).
6. Document à l'intention des commissaires, « Written submission from Bruce Power – Update from OPG and Bruce Power on Hydrogen Equivalent Concentration in Pressure Tubes », 24 janvier 2025, CMD 25-M19, e-Doc [7464423](#).
7. Document à l'intention des commissaires, « Written submission from Ontario Power Generation Inc. – Update from OPG and Bruce Power on Hydrogen Equivalent Concentrations in Pressure Tubes », 27 janvier 2025, CMD 25-M19.1, e-Doc [7464414](#).
8. Document à l'intention des commissaires, « Status Update: Condition of Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors in Canada », 21 janvier 2021, CMD 21-M4, e-Doc [6459353](#).