



CMD 26-M10 - CNSC Staff Submission

CNSC staff update on the status of licensee R&D program for elevated hydrogen equivalent concentration in the pressure tubes of reactors in extended operation

Classification	UNCLASSIFIED
Type of CMD	Original
CMD Number	26-M10
Reference CMD(s)	CMD 21-M39 , CMD 22-M16 , CMD 22-M37 , CMD 22-M37.4 , CMD 22-M37.5 , CMD 22-M37.1 , CMD22-M37.3 , CMD 23-M27.11 , CMD 25-M27 , DEC 21-H111 , DEC 21-H112 , DEC 21-H113 , DEC 22-H100 , DEC 23-H103 , DEC 24-H5
Type of report	Information
Public meeting date	Week of March 23, 2026
Word SharePoint	3779UC3NXORX-1883431929-427 – EN 3779UC3NXORX-1883431929-600 – FR
PDF SharePoint	3779UC3NXORX-1883431929-597 – EN 3779UC3NXORX-1883431929-601 – FR
Summary	This CMD provides the Commission with CNSC staff's conclusions on the hydrogen equivalent concentration research and development program activities completed to date. Ontario Power Generation and Bruce Power have sufficiently achieved the results necessary to return to compliance under Licence Condition 6.1 - <i>The licensee shall implement and maintain a fitness for service program.</i>
Actions required	There are no actions requested of the Commission. This CMD is for information only.



CMD 26-M10 – Mémoire du personnel de la CCSN

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Classification	NON CLASSIFIÉ
Type de CMD	Original
Numéro de CMD	26-M10
CMD(s) de référence	CMD 21-M39 , CMD 22-M16 , CMD 22-M37 , CMD 22-M37.4 , CMD 22-M37.5 , CMD 22-M37.1 , CMD 22-M37.3 , CMD 23-M27.11 , CMD 25-M27 , DEC 21-H111 , DEC 21-H112 , DEC 21-H113 , DEC 22-H100 , DEC 23-H103 , DEC 24-H5
Type de rapport	Information
Date de la réunion publique	Semaine du 23 mars 2026
Word SharePoint	3779UC3NXORX-1883431929-427 – EN 3779UC3NXORX-1883431929-600 – FR
PDF SharePoint	3779UC3NXORX-1883431929-597 – EN 3779UC3NXORX-1883431929-601 – FR
Résumé	Le présent CMD fournit à la Commission les conclusions du personnel de la CCSN visant les activités du programme de recherche et développement sur la concentration d'hydrogène équivalent réalisées à ce jour. Ontario Power Generation et Bruce Power ont atteint des résultats suffisants pour rétablir leur conformité à la condition de permis 6.1 : <i>Le titulaire de permis doit mettre en œuvre et tenir à jour un programme d'aptitude fonctionnelle.</i>
Mesures requises	Aucune mesure n'est requise de la Commission. Ce CMD est fourni à titre d'information seulement.



CMD 26-M10

**Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du
programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de
la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans
les tubes de force des réacteurs en exploitation
prolongée**

Signé par :

Version originale anglaise signée le 22 janvier 2026



PDF CMD 26-M10 -
CNSC staff Submissi

Alexandre Viktorov

Directeur général, Direction de la réglementation des centrales nucléaires



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Commission canadienne de sûreté nucléaire

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Table des matières

Reconnaissance territoriale	1
Résumé en langage clair	1
1 Vue d'ensemble	3
1.1 Contexte	3
1.2 Points saillants.....	5
2 Activités de R-D visant le Heq	6
2.1 Interventions du personnel de la CCSN	6
2.2 État des activités de R-D visant le Heq.....	7
2.3 Réponse aux commentaires formulés dans les interventions du public	7
3 Évaluation de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force au moyen des CVC associés à la CP 6.1	8
3.1 Aperçu des évaluations de l'aptitude fonctionnelle liées aux défauts	8
3.2 Modélisation de la concentration de Heq aux joints dudgeonnés	9
3.3 Modèles d'amorçage des fissures	11
3.4 Modèle de ténacité à la rupture	11
3.5 Vérification de la conformité à la CP 6.1 pour l'aptitude fonctionnelle des tubes de force 12	
3.6 Poursuite des activités de R-D et mise à jour des CVC associés à la CP 6.2	13
4 Engagement auprès des autochtones	14
5 Conclusions.....	16
6 Documents de référence	17
7 Glossaire.....	18
Appendix A : Concentration élevée de Heq près des joints dudgeonnés	19
A1 Région du joint dudgeonné au point de sortie	20
A2 Zone du joint dudgeonné au point d'entrée	21
Appendix B : État des activités de R-D visant le Heq	23



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Appendix C : Examen par la CCSN de la rétroaction sur les réponses des titulaires de permis aux commentaires des intervenants	26
Appendix D : Ébauche de la section 6.2 révisée des MCP	27



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Reconnaissance territoriale

La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) reconnaît que cette mise à jour sur l'état des engagements de recherche et développement (R-D) d'Ontario Power Generation (OPG) et de Bruce Power concernant la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée se rapporte à des activités réalisées sur les territoires traditionnels et visés par traité de nations et de communautés autochtones. Les activités de Bruce Power se trouvent sur le territoire traditionnel et visé par traité de la Nation Saugeen Ojibway (SON), ainsi que sur les territoires de récolte traditionnels de la Région 7 de la Nation métisse de l'Ontario (NMO) et du peuple métis historique de Saugeen (MHS). Les activités d'OPG se trouvent sur les terres et eaux traditionnelles des Michi Saagiig Anishinaabeg, qui sont couvertes par le Traité Gunshot (1787–1788), les Traités Williams (1923) et l'Accord de règlement des Traités Williams (2018).

Résumé en langage clair

La présente mise à jour informe la Commission des progrès réalisés par Ontario Power Generation (OPG) et Bruce Power en ce qui concerne les engagements en matière de recherche et développement (R-D) à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent (Heq) dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée. Des concentrations élevées de Heq ont été découvertes pour la première fois en 2021 près des zones des joints dudgeonnés des tubes de force. Elles dépassaient la limite antérieure fixée à 120 parties par million (ppm) et ont soulevé des préoccupations au sujet de la ténacité à la rupture et de l'exploitation sûre des tubes de force au-delà de 210 000 heures équivalentes pleine puissance (HEPP). De nouvelles conditions de permis ont été établies, tandis que les titulaires de permis (OPG et Bruce Power) mettaient en œuvre un vaste programme de R-D afin de valider des modèles visant à assurer la sûreté de l'exploitation prolongée.

Le personnel de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) confirme que toutes les activités de R-D dont l'achèvement était prévu avant la fin de 2025 ont bien été terminées. Les titulaires de permis ont démontré qu'ils disposent maintenant des outils analytiques nécessaires pour évaluer l'aptitude fonctionnelle des tubes de force conformément à la condition de permis (CP) 6.1. Les analyses limitatives montrent que les zones de concentration élevée de Heq n'interagiront pas avec des défauts qui pourraient entraîner l'amorçage d'une fissure avant la fin du cycle de vie des tranches de Pickering et de Bruce.

Les critères de vérification de la conformité (CVC) associés à la CP 6.2 seront mis à jour afin de réviser les exigences en matière de surveillance accrue et de poursuite des activités de R-D. D'autres activités de R-D seront axées sur l'amélioration de la modélisation du Heq et sur la



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

prise en compte de la prudence excessive des outils analytiques. À l'avenir, le personnel de la CCSN continuera de surveiller activement les résultats et d'effectuer des examens détaillés des documents sur l'aptitude fonctionnelle soumis par les titulaires de permis.

Le public peut obtenir sur demande les documents cités en référence dans le présent CMD, sous réserve des considérations de confidentialité.



1 Vue d'ensemble

1.1 Contexte

En 2021, Bruce Power a découvert une concentration élevée d'hydrogène équivalent (Heq) dans les tubes de force dont l'exploitation prolongée dépassait 210 000 heures équivalentes pleine puissance (HEPP). Les concentrations élevées ont été découvertes près de la marque de brunissage du joint dudgeonné au point de sortie (JDPS) ([CMD 21-M39](#)) ainsi que de la marque de brunissage du joint dudgeonné au point d'entrée (JDPE) ([CMD 22-M16](#)) des tubes de force (voir la [figure A4](#) pour une illustration de la zone du joint dudgeonné d'un tube de force). Bruce Power a signalé que les essais de surveillance des matériaux du tube de force B6S13 avaient donné lieu à une mesure élevée de la concentration de Heq près de la marque de brunissage au point de sortie, et que des concentrations élevées de Heq semblables ont été ultérieurement signalées à la suite de l'échantillonnage par grattage de tubes de force en service à la tranche 3 de Bruce-A. Les mesures des concentrations de Heq à la tranche 3 ont été obtenues à partir d'échantillons prélevés sur la surface intérieure des tubes de force durant l'arrêt aux fins d'entretien. Après d'autres essais sur le même tube de contrôle B6S13 de la tranche 6 de Bruce-B, Bruce Power a découvert une concentration élevée de Heq près de la marque de brunissage du JDPE, à une orientation d'environ 1 heure, qui a été mesurée à partir d'échantillons prélevés par perforation. Un examen approfondi des échantillons prélevés par perforation du tube B6S13 près du point d'entrée a également révélé un gradient de Heq considérable sur toute l'épaisseur, qui présentait des valeurs beaucoup plus élevées sur la surface extérieure que sur la surface intérieure. Les valeurs de Heq mesurées dans les tubes de force de Bruce Power dépassaient la limite de 120 parties par million (ppm) en poids établie pour le modèle de ténacité à la rupture des tubes de force accepté au moment des événements. Le personnel de la CCSN a conclu que les constatations pouvaient avoir une incidence sur toutes les tranches en exploitation prolongée, y compris celles d'Ontario Power Generation (OPG). Les titulaires de permis n'ont pas été en mesure de confirmer que les modèles et processus qui servaient, à ce moment-là, à évaluer l'aptitude fonctionnelle des tubes de force conformément aux critères de vérification de la conformité (CVC) établis pour la condition de permis (CP) 6.1 étaient valides pour les concentrations élevées de Heq. Voir l'[annexe A](#) pour obtenir des renseignements supplémentaires sur les mécanismes qui génèrent des concentrations élevées de Heq aux joints dudgeonnés.

À la suite de plusieurs séances de la Commission tenues entre octobre 2021 et février 2022, la Commission a conclu que, pour les tranches en exploitation prolongée d'OPG et de Bruce Power, la ténacité à la rupture des tubes de force dans la zone du JDPS était suffisante



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

pour une exploitation sûre au-delà de 120 ppm, compte tenu de la faible probabilité de défauts qui entraîneraient l'amorçage d'une fissure dans cette zone ([DEC 21-H111](#), [DEC 21-H112](#), [DEC 21-H113](#), [DEC 22-H100](#)).

Le personnel de la CCSN a tiré les mêmes conclusions en ce qui concerne les zones de concentration élevée de Heq près des JDPE aux tranches de Pickering puisqu'il n'existe aucun mécanisme actif de formation de défauts susceptibles d'entraîner l'amorçage d'une fissure. Toutefois, dans le cas des tranches de Bruce et de Darlington, les constatations relatives aux concentrations élevées de Heq dans la zone du JDPE ont remis en question l'applicabilité des approches servant à évaluer les défauts dans les tubes de force à cet endroit. Dans le [CMD 22-M37](#), le personnel de la CCSN a fourni les résultats de son évaluation des risques liés à une concentration élevée de Heq dans la zone du JDPE des tubes de force et a déterminé que ce risque était négligeable durant au plus 3 ans d'exploitation prolongée, ou jusqu'au 31 décembre 2025. La conclusion relative au processus décisionnel tenant compte du risque (PDTCR) a permis d'établir un calendrier en vue d'entreprendre un programme de recherche et développement (R-D) visant à étudier les causes et répercussions des zones localisées de concentration élevée de Heq sur l'aptitude fonctionnelle des tubes de force. À la fin de 2023, toutes les tranches de Darlington avaient déjà été remises à neuf ou étaient en cours de réfection et n'étaient donc plus visées par les découvertes de concentrations élevées de Heq.

La découverte de zones de concentration élevée de Heq a nécessité de modifier les conditions de permis pertinentes. Pour permettre le renouvellement des permis en 2018, la CP 15.3 (*Avant que les concentrations équivalentes d'hydrogène ne dépassent 120 ppm, le titulaire de permis doit démontrer que la ténacité à la rupture des tubes de force sera suffisante pour assurer un fonctionnement sûr au-delà de 120 ppm*) a été incluse dans les permis d'exploitation d'un réacteur de puissance (PERP) de Pickering ainsi que Bruce-A et Bruce-B. La CP 15.3 et les CVC connexes ont établi les exigences réglementaires et attentes relatives à l'élargissement des limites de validité du modèle de ténacité à la rupture ainsi qu'à la déclaration des concentrations mesurées de Heq. À l'époque, le modèle de ténacité à la rupture des tubes de force avait été élaboré à partir de données empiriques provenant de matériaux dont les concentrations de Heq ne dépassaient pas 120 ppm, alors qu'on s'attendait à ce que les concentrations de Heq en fin de vie des canaux de combustible atteignent 160 ppm. L'industrie exécutait un programme actif en vue de recueillir des données supplémentaires et d'élargir ainsi la limite de validité de sorte à permettre des concentrations supérieures de Heq. D'après les événements survenus aux centrales de Bruce en 2021, Bruce Power a conclu que certains tubes de force en exploitation présentaient des concentrations de Heq supérieures à 120 ppm dans les zones des points d'entrée et de sortie, et que les concentrations de Heq en fin de vie des canaux de combustible dépasseraient 160 ppm. À la suite de 2 audiences de la Commission



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

tenues en mars 2023 et en février 2024, la Commission a conclu que le fondement de l'exploitation des tubes de force au-delà de 210 000 HEPP avait évolué et que la CP 15.3 n'était plus pertinente. Par conséquent, la Commission a approuvé le retrait de la CP 15.3 des permis d'exploitation ainsi que son remplacement par la nouvelle CP 6.2 ([DEC 23-H103](#), [DEC 24-H5](#)). La CP 6.2 des PERP d'OPG et de Bruce Power exige que les titulaires de permis mettent en œuvre et tiennent à jour un programme d'aptitude fonctionnelle renforcé visant à assurer la sûreté des tubes de force en exploitation prolongée, et produisent des rapports sur l'état des activités de R-D.

1.2 Points saillants

1.2.1 État des activités de R-D visant le Heq

- Le personnel de la CCSN a confirmé que les titulaires de permis ont mené à bien les tâches du programme de R-D dont l'achèvement était prévu avant la fin de 2025.
- Les titulaires de permis ont donné suite aux questions et commentaires soulevés par le personnel de la CCSN et les intervenants ([CMD 22-M37.4](#) et [CMD 22-M37.5](#)).

1.2.2 Évaluation de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force au moyen des CVC associés à la CP 6.1

- Le personnel de la CCSN a évalué la compréhension qu'avaient les titulaires de permis des facteurs qui ont mené à la formation des zones de concentration élevée de Heq, et a confirmé ce qui suit :
 - La zone de concentration élevée de Heq près du JDPS des tubes de force peut s'expliquer par la variation du gradient circonférentiel de température due à la dérivation de l'écoulement.
 - La zone de concentration élevée de Heq près du JDPE des tubes de force peut s'expliquer par un contact localisé avec le raccord d'extrémité et une voie de conductance thermique vers le tube de réseau.
- Les évaluations limitatives indiquent que la zone de concentration élevée de Heq près du JDPS ne s'étendra pas sur le plan axial et circonférentiel de sorte à interagir avec des défauts induits par l'exploitation qui sont susceptibles d'entraîner l'amorçage d'une fissure.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

- Les évaluations limitatives indiquent que la zone de concentration élevée de Heq près du JDPE sera limitée sur le plan axial, circonférentiel et radial. Il n'y aura donc aucune interaction avec les défauts de la surface intérieure.
- D'après les progrès réalisés dans le cadre du programme de R-D à ce jour, le personnel de la CCSN conclut que les titulaires de permis seront en mesure d'utiliser les CVC associés à la CP 6.1 aux fins d'évaluation de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force, sous réserve de l'apport de modifications aux outils analytiques, comme suit :
 - modification du modèle d'amorçage de fissuration par hydruration retardée afin d'évaluer les défauts dans le matériau dont la valeur de Heq dépasse 120 ppm
 - modification du modèle de ténacité à la rupture pour le matériau d'extrémité avant (soit celle qui est extrudée en premier durant le processus de fabrication) dont la valeur de Heq dépasse 100 ppm

1.2.3 Travaux à venir

- Bien que les analyses limitatives montrent que les zones de concentration élevée de Heq n'interagiront pas avec des défauts susceptibles d'entraîner l'amorçage d'une fissure avant la fin de vie des tranches de Pickering et de Bruce, les titulaires de permis poursuivront leurs activités de R-D afin d'affiner davantage les processus de modélisation de la diffusion du Heq ainsi que le modèle de ténacité à la rupture visant les matériaux d'extrémité avant dont la valeur de Heq dépasse 100 ppm.
- Le personnel de la CCSN continuera de surveiller les activités de R-D liées à la modélisation du Heq ainsi que les résultats des inspections en service.
- Le personnel de la CCSN s'attend à ce que les titulaires de permis recueillent des données de surveillance des matériaux qui permettent de confirmer que les constatations et recommandations demeurent valides jusqu'à la fin de vie de tous les tubes de force en exploitation prolongée.

2 Activités de R-D visant le Heq

2.1 Interventions du personnel de la CCSN

En mars 2023, le personnel de la CCSN a mis en œuvre des mesures de suivi aux termes desquelles OPG et Bruce Power sont tenus d'assurer un suivi de l'achèvement des travaux de R-D visant le Heq et de lui présenter des mises à jour. Les critères suivants ont été établis en vue de la clôture des mesures de suivi :



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

- présentation de rapports sur l'achèvement de toutes les activités décrites dans les plans de R-D ([CMD 22-M37.1](#) et [22-M37.3](#)), y compris :
 - les activités liées à la validation du modèle d'amorçage des fissures
 - les activités liées à la validation du modèle de ténacité à la rupture
- réponse aux commentaires formulés dans les interventions du public ([CMD 22-M37.4](#) et [CMD 22-M37.5](#))
- présentation de rapports d'étape semestriels
- réponses à tous les commentaires découlant de l'examen par le personnel de la CCSN des activités de R-D

2.2 État des activités de R-D visant le Heq

Le personnel de la CCSN a examiné les livrables de R-D inclus dans 6 mises à jour semestrielles d'OPG (1; 2; 3; 4; 5; 6) et de Bruce Power (7; 8; 9; 10; 11; 12), ainsi que les réponses de ces derniers à tous les commentaires découlant de l'examen du personnel de la CCSN, afin de déterminer si les titulaires de permis ont achevé les activités conformément au plan.

Le personnel de la CCSN confirme que les titulaires de permis ont soumis toutes les mises à jour dans les délais prescrits et que toutes les activités de R-D dont les dates d'achèvement étaient prévues avant la fin de 2025 ont été menées à bien, y compris la production de rapports sur la validation du modèle d'amorçage des fissures et du modèle de ténacité à la rupture. L'état actualisé de chaque activité est résumé à l'[annexe B](#).

Il ne reste qu'une seule activité en cours, conformément aux plans de R-D des titulaires de permis ([CMD 22-M37.1](#), [22-M37.3](#)): élaborer un modèle prédictif complet de Heq d'ici le printemps 2026. Par conséquent, les mesures mises en œuvre aux fins du suivi de l'achèvement du plan de R-D demeureront ouvertes jusqu'à ce que les résultats de la dernière activité de R-D aient été soumis et examinés par le personnel de la CCSN. Ce livrable demeure en bonne voie d'être atteint et n'a aucune incidence sur la capacité des titulaires de permis à appliquer les CVC associés à la CP 6.1 aux fins d'évaluation de l'aptitude fonctionnelle.

2.3 Réponse aux commentaires formulés dans les interventions du public

En novembre 2022, le personnel de la CCSN ([CMD 22-M37](#)) et les titulaires de permis ([CMD 22-M37.1](#) et [CMD 22-M37.3](#)) ont présenté à la Commission une mise à jour sur l'état des activités exécutées par l'industrie en vue de donner suite aux découvertes liées aux concentrations élevées de Heq. Cette mise à jour comprenait les commentaires de



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

2 intervenants ([CMD 22-M37.4](#) et [CMD 22-M37.5](#)), que la Commission considérait comme des ajouts utiles à la question des concentrations élevées de Heq. Compte tenu de ce qui précède, le personnel de la CCSN a inclus la réponse des titulaires de permis aux commentaires des intervenants en tant que critère de clôture des mesures de suivi du plan de R-D.

Le personnel de la CCSN reconnaît que les commentaires de l'intervenant formulés dans le [CMD 22-M37.5](#) ont été retirés par l'auteur au terme de sa propre analyse de suivi présentée dans le [CMD 23-M27.11](#). L'examen par le personnel de la CCSN de cette analyse de suivi a permis de conclure que les titulaires de permis n'étaient plus tenus de répondre aux commentaires formulés par cet intervenant.

Dans la deuxième mise à jour semestrielle (2; 8), les titulaires de permis ont répondu à chacun des commentaires formulés dans le [CMD 22-M37.4](#). Le personnel de la CCSN a conclu que les titulaires de permis avaient fourni des réponses acceptables et qu'ils n'étaient pas tenus de prendre d'autres mesures (voir les commentaires du personnel de la CCSN à l'[annexe C](#)).

3 Évaluation de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force au moyen des CVC associés à la CP 6.1

3.1 Aperçu des évaluations de l'aptitude fonctionnelle liées aux défauts

La norme N285.8, *Exigences techniques relatives à l'évaluation en service des tubes de force en alliage de zirconium dans les réacteurs CANDU* de l'Association canadienne de normalisation (Groupe CSA) sert à évaluer l'aptitude fonctionnelle des tubes de force. Bon nombre des modèles et processus d'évaluation visés par cette norme n'ont pas été validés pour les concentrations de Heq qui ont été mesurées en 2021 près des marques de brunissage des joints dudgeonnés dans certains tubes de force en exploitation prolongée de Bruce-A et Bruce B. La concentration de Heq est un paramètre clé des modèles servant à évaluer l'amorçage et la croissance des fissures, la ténacité à la rupture ainsi que la résistance à l'amorçage des fissures. Le [CMD 25-M27](#) présentait la plus récente mise à jour technique du personnel de la CCSN sur les essais de résistance à la fissuration, sur les essais de taux de croissance des fissures par hydruration retardée (FHR) et sur la ténacité à la rupture. La figure 1 illustre le rôle de la

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

modélisation des concentrations de Heq dans le processus utilisé par les titulaires de permis pour évaluer l'aptitude fonctionnelle des tubes de force.

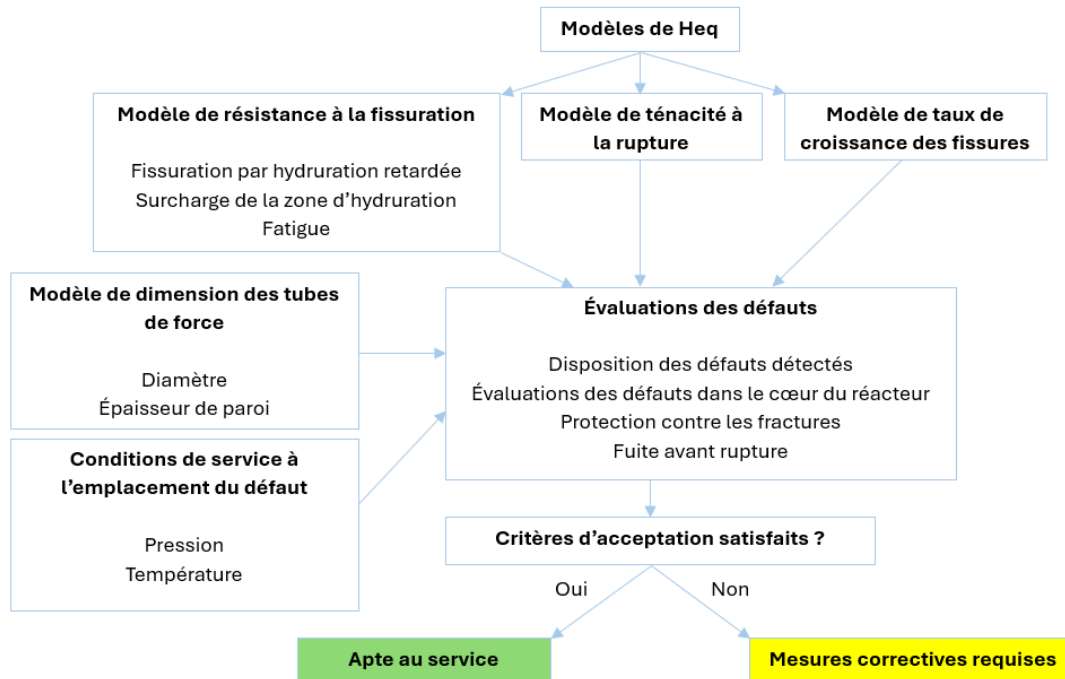


Figure 1 : Aperçu des évaluations de l'aptitude fonctionnelle liées aux défauts dans les tubes de force

Au moment des découvertes de concentrations élevées de Heq, l'incertitude des résultats des modèles qui prédisent les concentrations de Heq dans les tubes de force et qui dépendent de ces valeurs empêchait de tirer des conclusions définitives quant au respect des critères d'acceptation. Des approches de rechange ont été adoptées à titre temporaire pour évaluer l'incidence des défauts dans les tubes de force près des marques de brunissage sur l'exploitation en toute sûreté, conformément au CVC en vertu de la CP 6.2.

3.2 Modélisation de la concentration de Heq aux joints dudgeonnés

Le modèle de concentration de Heq utilise des renseignements liés à la pénétration de l'hydrogène ainsi qu'aux gradients de température et de contrainte pour prédire le mouvement de l'hydrogène dans le matériau. L'hydrogène soluble dans l'alliage de zirconium se diffuse dans le matériau plus froid, ce qui pourrait causer une augmentation du volume d'hydrogène au point froid par rapport aux zones dont la température est plus élevée.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Dans son examen des rapports de R-D des titulaires de permis liés à la modélisation de la concentration de Heq, le personnel de la CCSN a tenu compte des questions suivantes :

- La modélisation a-t-elle reproduit les gradients de Heq mesurés dans les tubes de force en service qui présentaient des zones de concentration élevée de Heq?
- Les gradients de Heq peuvent-ils s'expliquer par les gradients de température, de concentration et de contrainte seuls, ou y a-t-il raison de penser que d'autres sources de pénétration d'hydrogène dans le matériau sont nécessaires?
- Les zones de concentration élevée de Heq continuent-elles de s'étendre sur le plan axial, circonférentiel et, dans le cas du JDPE, radial? Le cas échéant, dans quelle mesure?
- Le modèle peut-il expliquer pourquoi certains tubes seulement semblent touchés?

L'examen par le personnel de la CCSN des résultats du programme de R-D des titulaires de permis liés à la modélisation permet de confirmer ce qui suit :

- La zone de concentration élevée de Heq près du JDPS des tubes de force peut s'expliquer par la variation du gradient circonférentiel de température due à la dérivation de l'écoulement.
- La zone de concentration élevée de Heq près du JDPE des tubes de force peut s'expliquer par un contact localisé avec le raccord d'extrémité et une voie de conductance thermique vers le tube de réseau.
- Les sources de pénétration établies (raccord d'extrémité au raccord du tube de force et mécanismes de corrosion de la surface interne) représentent une quantité d'hydrogène suffisante pour produire les zones de concentration élevée de Heq près des marques de brunissage.
 - Rien n'indique qu'une pénétration accrue causée par le circuit du gaz annulaire (CGA) ait contribué au phénomène.
- À l'heure actuelle, les titulaires de permis ne sont pas en mesure d'identifier les tubes particuliers qui sont touchés par ce phénomène ni d'estimer avec précision les valeurs réelles de Heq susceptibles d'être atteintes à la fin de la vie utile de certains tubes de force¹. Toutefois, les évaluations limitatives indiquent que les zones de concentration élevée de Heq ne s'étendront pas suffisamment sur le plan axial, circonférentiel et radial de sorte à interagir avec des défauts induits par l'exploitation qui sont susceptibles d'entraîner l'amorçage d'une fissure.

¹ À l'aide des renseignements obtenus dans le cadre du programme de R-D, il est possible d'identifier les tubes qui sont les plus susceptibles d'être touchés par les phénomènes causant les zones de concentration élevée de Heq, mais il n'est pas possible de confirmer quels tubes sont touchés sans mesurer cette concentration.



3.3 Modèles d'amorçage des fissures

Les modèles d'amorçage et de croissance des fissures ont été validés, en fonction des données récentes tirées des activités de R-D, pour des matériaux présentant une concentration de Heq nominale² de 240 ppm, par rapport à la limite antérieure, soit 120 ppm. Des ajustements doivent être apportés au modèle d'amorçage de fissuration par hydruration retardée pour les matériaux dont la concentration de Heq est supérieure à 120 ppm, mais aucun ajustement n'est requis pour la surcharge localisée d'hydrures et l'amorçage de fissures par fatigue dans les modèles de taux de croissance des fissures par hydruration retardée.

3.4 Modèle de ténacité à la rupture

Le modèle de ténacité à la rupture demeure valide pour les matériaux situés entre une distance de 1,5 m à partir de l'extrémité avant d'un tube de force et l'extrémité arrière du tube de force lorsque les valeurs de Heq dépassent 240 ppm. Toutefois, le modèle actuel ne s'applique pas au comportement de rupture observé pour les matériaux dont la concentration de Heq dépasse 100 ppm à moins de 1,5 m de l'extrémité avant d'un tube de force. Ce modèle était fondé sur des essais qui permettaient de supposer que tous les matériaux atteignaient une résistance typique de la plage supérieure (maximale) à une température de 250 C. Cela portait à croire que le matériau aurait toujours une résistance typique de la plage supérieure à des températures normales d'exploitation à pleine puissance. Des essais plus récents sur des matériaux d'extrémité avant à résistance inférieure et dont les valeurs Heq dépassaient 100 ppm ont indiqué que la transition vers le comportement typique de la plage supérieure peut dépasser 250 C.

Le [CMD 25-M27](#) présentait la plus récente mise à jour technique du personnel de la CCSN sur le modèle de ténacité à la rupture des tubes de force. 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 (désigné en tant qu'essai BT-49) a donné un résultat non conforme à la révision 2 du modèle. Depuis l'élaboration de ce CMD, un autre essai de ténacité à la rupture a été effectué sur le matériau d'extrémité avant, et les résultats étaient semblables

² La valeur cible pour les essais de matériaux était de 240 ppm, mais certains essais ont été effectués sur des matériaux présentant des concentrations de Heq supérieures.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

à ceux de l'essai BT-49, indiquant que le matériau n'a pas atteint le comportement typique de la plage supérieure à 250 C.

La seule zone de l'extrémité avant d'un tube de force où on s'attend à voir une valeur de Heq supérieure à 100 ppm est la zone très localisée de concentration élevée de Heq au point d'entrée associée à un blip qui, selon la modélisation, ne dépassera pas 15 mm à partir d'une marque de brunissage. Le personnel de la CCSN reconnaît que les titulaires de permis ont présenté une procédure en vue de gérer la réduction observée de la ténacité du matériau d'extrémité avant dans les évaluations des tubes de force.

3.5 Vérification de la conformité à la CP 6.1 pour l'aptitude fonctionnelle des tubes de force

À la suite de l'examen du programme de R-D, le personnel de la CCSN confirme qu'il est possible pour OPG et Bruce Power de recommencer à utiliser les CVC associés à la CP 6.1 aux fins d'évaluation de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force, comme l'indiquent les conclusions suivantes :

- En ce qui concerne les tubes de force des tranches 5-8 de Pickering, l'analyse limitative a indiqué que les zones de concentration élevée de Heq aux points d'entrée et de sortie ne s'étendront pas aux emplacements où des défauts susceptibles d'entraîner la formation de fissures pourraient exister avant la mise à l'arrêt des tranches d'ici la fin de 2026. Les bouchons écran à chaque extrémité des tubes de force couvriront les zones potentielles de concentration élevée de Heq et protégeront les tubes de force contre les mécanismes de formation de défauts en cours d'exploitation.
- En ce qui concerne les tubes de force en exploitation prolongée de Bruce-A et Bruce-B, l'analyse limitative démontre que la zone de concentration élevée de Heq au point de sortie ne s'étendra pas aux emplacements où des défauts sont susceptibles de présenter un risque d'amorçage de fissures. La position des grappes de combustible dans la zone au point de sortie élimine les interactions entre les grappes et le tube de force qui mèneraient à la formation de défauts dans les zones où la concentration de Heq pourrait être élevée.
- En ce qui concerne la zone de concentration élevée de Heq au point d'entrée des tubes de force de Bruce-A et Bruce-B, il est possible que des défauts et des blips de concentration élevée de Heq (voir la description d'un blip à l'[annexe A](#)) soient présents dans la même étendue axiale. Toutefois, l'examen par le personnel de la CCSN des progrès du programme de R-D à ce jour permet de confirmer ce qui suit :
 - Il a été démontré que la présence d'un blip sur la surface extérieure n'a aucun effet négatif sur l'accumulation d'hydrure à l'emplacement d'un défaut sur la surface intérieure.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

- Les modèles d'amorçage et de croissance des fissures peuvent être appliqués à des matériaux dont la concentration de Heq globale peut atteindre 240 ppm, et il est peu probable qu'il se trouve des défauts dans des matériaux présentant des valeurs de Heq supérieures en fin de vie canaux de combustible.
- Bien que le modèle actuel de ténacité à la rupture ne s'applique pas aux matériaux d'extrémité avant qui présentent une concentration de Heq supérieure à 100 ppm, l'incidence d'une fluctuation de la température dans le contexte de la transition vers un comportement typique de la plage supérieure peut être gérée dans les évaluations requises des tubes de force. Étant donné qu'il n'est pas possible d'identifier les tubes particuliers qui sont touchés par le phénomène qui génère les zones de concentration élevée de Heq près des marques de brunissage, les évaluations de l'aptitude fonctionnelle doivent supposer que ces zones existent dans tous les tubes de force en exploitation prolongée.

Le personnel de la CCSN conclut que les titulaires de permis ont démontré qu'ils disposent d'un ensemble approprié d'outils analytiques pour effectuer les évaluations requises conformément à la CP 6.1. Pour l'instant, il ne formule pas de conclusions quant à l'aptitude fonctionnelle des tubes de force dans des réacteurs précis d'OPG et de Bruce Power, mais il peut confirmer ce qui suit :

- Le personnel de la CCSN ne prévoit pas qu'il sera nécessaire pour OPG de mettre à jour les évaluations actuelles de l'aptitude fonctionnelle des tranches 5 à 8 de Pickering avant la fin de leur exploitation en 2026.
- Dans l'immédiat, il n'est pas nécessaire que Bruce Power mette à jour ses évaluations de l'aptitude fonctionnelle pour appuyer l'exploitation avant le prochain arrêt prévu d'une tranche donnée.

Le personnel de la CCSN continuera d'examiner les documents soumis par les titulaires de permis à l'égard de l'aptitude fonctionnelle, conformément aux pratiques établies.

3.6 Poursuite des activités de R-D et mise à jour des CVC associés à la CP 6.2

Le personnel de la CCSN s'attend à ce que les 2 titulaires de permis poursuivent leurs activités de R-D afin d'affiner davantage les modèles de concentration de Heq, les essais de résistance à la fissuration à des concentrations élevées de Heq et les essais de ténacité à la rupture. Bon nombre de ces activités viseront probablement à atténuer la prudence excessive des outils analytiques élaborés dans le cadre du programme actuel de R-D. Toutefois, le personnel de la CCSN évaluera les résultats de ces activités, et les titulaires de permis sont tenus de soumettre des rapports d'événement si des constatations remettent en question les conclusions relatives à l'aptitude fonctionnelle des tubes de force. Si un tel rapport d'événement est reçu, le



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

personnel de la CCSN informera la Commission par tout moyen jugé approprié (ex: rapport d'étape sur les réacteurs de puissance, rapport initial d'événement, etc.).

Les exigences renforcées en matière d'aptitude fonctionnelle pour les canaux de combustible en exploitation prolongée demeurent avantageuses, mais l'accent du CVC sera déplacé de l'évaluation de l'intégrité des tubes de force vers des activités renforcées de surveillance de l'Heq. Bien que le personnel de la CCSN conclue que les titulaires de permis sont maintenant en mesure d'effectuer les évaluations requises de l'aptitude fonctionnelle conformément à la CP 6.1, les exigences minimales en matière de prise de mesure de la concentration de Heq prévues aux termes de la norme CSA N285.4 ne sont pas suffisamment détaillées pour tenir compte des zones de concentration élevée de Heq près des marques de brunissage et pour caractériser ces zones, et la CP 6.2 peut clarifier les attentes réglementaires à cet égard. Pour tout réacteur exploité au-delà de 210 000 HEPP, un programme renforcé de surveillance de la concentration de Heq doit être établi pour assurer l'échantillonnage par grattage de tubes de force en service ainsi que l'échantillonnage de tubes de contrôle retirés du service de manière à permettre de caractériser l'étendue axiale, circonférentielle et radiale des zones de concentration élevée de Heq près des joints dudgeonnés aux points d'entrée et de sortie, lesquelles peuvent survenir en raison de gradients de température circonférentiels ou localisés. Les titulaires de permis devraient s'efforcer d'élargir les activités de modélisation des concentrations de Heq dans la zone du point d'entrée afin d'inclure un plus grand échantillon de données obtenues à partir de tubes de force retirés du service, ce qui pourrait permettre d'améliorer davantage le processus de modélisation. Les titulaires de permis devraient poursuivre les activités de surveillance des matériaux tant à partir des tubes de contrôle visés par le programme d'inspections planifiées qu'à partir des matériaux additionnels prélevés dans le cadre des arrêts aux fins de réparation.

La CP 6.2 demeurera dans les permis d'exploitation d'un réacteur de puissance respectives jusqu'à ce que les titulaires de permis soumettent à la Commission une demande visant à modifier les permis applicables. Si un titulaire de permis choisit de demander une modification de son permis, le personnel de la CCSN examinera la demande et présentera sa recommandation à la Commission. L'[annexe D](#) présente une ébauche révisée de la section 6.2 des manuels des conditions de permis (MCP) des centrales de Pickering et de Bruce-A et Bruce-B.

4 Engagement auprès des autochtones

L'obligation de consulter issue de la common law s'applique lorsque la Couronne envisage des mesures susceptibles d'avoir des effets préjudiciables sur des droits ancestraux ou issus de traités, potentiels ou établis. La CCSN veille à ce que toutes ses décisions en matière de délivrance de permis en vertu de la [LSRN](#) respectent l'honneur de la Couronne et les droits ancestraux ou issus de traités potentiels ou établis des peuples autochtones, conformément à



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

l'article 35 de la [Loi constitutionnelle de 1982](#). Les considérations du personnel de la CCSN incluent, sans toutefois s'y limiter, les droits potentiels ou établis des Nations et communautés autochtones relativement aux terres et aux eaux en lien avec l'installation, ainsi que les répercussions prévues ou potentielles des activités menées sur le site conformément à un permis délivré par la CCSN.

Le [REGDOC-3.2.2, Mobilisation des Autochtones](#), énonce les exigences et l'orientation à l'intention des titulaires de permis dont les projets proposés peuvent faire naître l'obligation de consulter de la Couronne. Bien que la CCSN ne puisse déléguer son obligation, elle peut déléguer certains aspects procéduraux du processus de consultation aux titulaires de permis, lorsque cela est approprié. Les renseignements recueillis et les mesures proposées par les titulaires de permis pour éviter, atténuer ou compenser les effets potentiellement négatifs du renouvellement de permis proposé peuvent être utilisés par le personnel de la CCSN pour s'acquitter de ses obligations en matière de consultation.

Comme le présent CMD vise uniquement à informer et à fournir à la Commission une mise à jour sur la découverte de valeurs élevées d'Heq dans les tubes de force en exploitation prolongée, le personnel de la CCSN a déterminé que cette mise à jour ne fait pas naître l'obligation de consulter et, le cas échéant, d'accommoder les Nations et communautés autochtones. Toutefois, le personnel de la CCSN a fourni et continuera de fournir des mises à jour aux Nations et communautés autochtones intéressées concernant la découverte d'Heq élevé, ainsi que des renseignements relatifs à la réunion de la Commission et au contenu du présent CMD.

Dans la décision de la Commission ([DEC 23-H103](#), paragraphe 81) concernant la demande de Bruce Power de modifier le permis d'exploitation d'un réacteur de puissance en remplaçant la CP 15.3 par la CP 6.2, la Commission s'attendait à ce que le personnel de la CCSN respecte son engagement à continuer de collaborer avec la SON ainsi qu'avec d'autres Nations et communautés autochtones et parties intéressées au sujet de l'Heq élevé dans les tubes de force et d'autres sujets liés aux permis. La CCSN a proposé de discuter de l'Heq élevé dans les tubes de force lors de réunions régulières prévues dans le cadre de protocoles d'entente à long terme avec la SON ainsi qu'avec la région 7 de la MNO. Le 28 octobre 2025, le personnel de la CCSN a présenté un exposé et tenu une discussion avec le personnel du bureau de l'environnement de la SON concernant l'Heq élevé et les exigences en matière de R-D, portant sur toutes les activités réglementaires à venir à la centrale nucléaire de Bruce liées aux tubes de force et aux engagements de R-D. Le personnel de la CCSN a également fourni des mises à jour sur ce processus, ainsi que sur les demandes parallèles présentées par Bruce Power concernant la centrale nucléaire de Bruce, lors de réunions régulières conformément aux protocoles d'entente et au plan de travail annuel élaboré entre la SON et le personnel de la CCSN.

Le personnel de la CCSN a rencontré la région 7 de la MNO lors de la réunion semestrielle du 5 novembre 2025 et a discuté des constatations liées à l'Heq élevé ainsi que des activités



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

générales de prolongation de la durée de vie des tubes de force. Cette réunion semestrielle s'est tenue conformément au calendrier établi dans les protocoles d'entente.

Le personnel de la CCSN a fourni des renseignements et participé à une discussion relative à l'Heq élevé lors de la réunion semestrielle HSM-CCSN du 6 novembre 2025 conformément aux protocoles d'entente.

5 Conclusions

Le personnel de la CCSN conclut ce qui suit :

- Les titulaires de permis ont terminé toutes les activités de R-D dont l'achèvement était prévu avant la fin de 2025.
- Une activité de R-D visant l'élaboration d'un modèle exhaustif de prévision des concentrations de Heq devrait être achevée, comme prévu, au printemps 2026 :
 - Cela n'a aucune incidence sur la capacité des titulaires de permis à appliquer les CVC associés à la CP 6.1 aux évaluations de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force.
- Les titulaires de permis ont démontré qu'ils disposent d'un ensemble approprié d'outils analytiques pour effectuer les évaluations requises conformément à la CP 6.1.
- D'autres activités de R-D sur divers sujets liés aux concentrations élevées de Heq se poursuivront, et le personnel de la CCSN évaluera les résultats de ces activités et leur incidence sur les évaluations de l'aptitude fonctionnelle des tubes de force.
- Les titulaires de permis doivent établir un programme renforcé de surveillance de la concentration de Heq pour assurer l'échantillonnage par grattage de tubes de force en service ainsi que l'échantillonnage de tubes de contrôle retirés du service de manière à permettre de caractériser l'étendue axiale, circonférentielle et radiale des zones de concentration élevée de Heq près des joints d'assemblage aux points d'entrée et de sortie, lesquelles peuvent survenir en raison de gradients de température circonférentiels ou localisés. Ils doivent ensuite présenter ce programme au personnel de la CCSN aux fins d'examen.
- Dans les MCP, les CVC associés à la CP 6.2 seront révisés afin de refléter les exigences actualisées d'un programme amélioré d'aptitude fonctionnelle visant les canaux de combustible en exploitation prolongée.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

6 Documents de référence

1. **Lettre d'OPG, M. Knutson à A. Mathai et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #1 (Quarter 1 2023).* le 27 mars, 2022. e-Doc 7019997.
2. **Lettre d'OPG, M. Knutson à A. Mathai et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #2 (Quarter 3 2023).* le 29 septembre, 2023. e-Doc 7137721.
3. **Lettre d'OPG, M. Knutson à A. Mathai et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #3 (Quarter 1 2024).* le 28 mars, 2024. e-Doc 7252312.
4. **Lettre d'OPG, M. Knutson à A. Mathai et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #4 (Quarter 3 2024).* le 27 septembre, 2024. e-Doc 7372336.
5. **Lettre d'OPG, M. Knutson à A. Mathai et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #5 (Quarter 1 2025).* le 31 mars, 2025. e-Doc 7492194.
6. **Lettre d'OPG, M. Knutson à K. Lun et R. Richardson.** *Darlington and Pickering NGS – Activities Related to the Discovery of Elevated Hydrogen Equivalent Concentration Semi-Annual Update #6 (Quarter 3 2025).* le 30 septembre, 2025. e-Doc 7583218.
7. **Lettre de Bruce Power, M. Burton à M. Hornof.** *Bruce A and B: Update Regarding Elevated Hydrogen Equivalent Concentration and Response to CNSC Risk Assessment, Action Item 2022-07-26737, Closed Action Item 2022-07-23135.* le 29 mars, 2023. e-Doc 7010601.
8. —. *Bruce A and B: Update Regarding Detailed Plan to Further Evaluate the Effect of Hydrogen Equivalent Concentration on Pressure Tube Fitness for Service, Action Item 2023-07-27173.* le 27 septembre, 2023. e-Doc 7135588.
9. **Lettre de Bruce Power, M. Burton à K. Lun.** *Bruce A and B: Semi-Annual Update on Industry R&D Plan on Elevated Hydrogen Equivalent Concentration, Action Items 2023-07-27173, 2022-07-26737.* le 25 mars, 2024. e-Doc 7249743.
10. **Lettre de Bruce Power, M. Burton à A. Bulkan.** *Bruce A and B: Semi-Annual Update on Industry R&D Plan on Elevated Hydrogen Equivalent [H]eq Concentrations, Action Item 2023-07-27173 and 2022-07-26737.* le 26 septembre, 2024. e-Doc 7171763.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

11. **Letter de Bruce Power, M. Burton à A. Bulkan.** *Bruce A and B: Semi-Annual Update on Industry R&D Plan on Elevated Hydrogen Equivalent [H]eq Concentrations, Action Item 2023-07-27173 and 2022-07-26737.* le 20 mars, 2025. e-Doc 7486066.
12. **Lettre de Bruce Power, M. Burton à A. Bulkan.** *Bruce A and B: Semi-Annual update on industry R&D Plan on Elevated Hydrogen Concentrations, Action Items 2023-07-27173 and 2022-07-26737.* le 24 septembre, 2025. e-Doc 7581421.

7 Glossaire

Les définitions des termes utilisés dans le présent document figurent dans le [REGDOC-3.6, Glossaire de la CCSN](#), qui comprend des termes et des définitions tirés de la [Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires](#), de ses règlements d'application, ainsi que des [documents d'application de la réglementation](#) de la CCSN et d'autres publications.

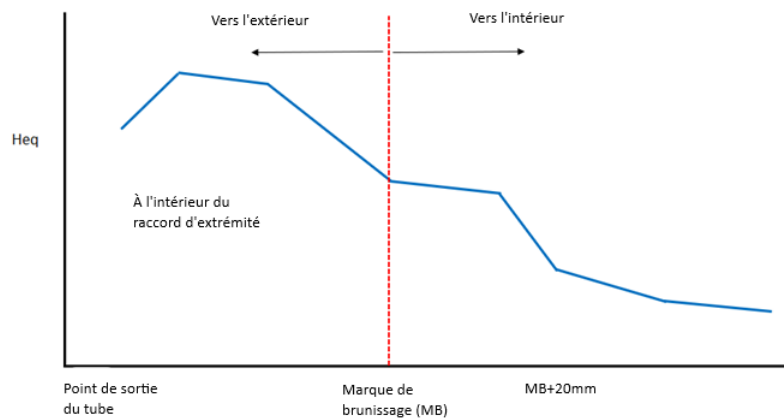
La liste des termes et acronymes additionnels utilisés dans le présent CMD est dressée ci-dessous :

CCSN	Commission canadienne de sûreté nucléaire
CGA	circuit du gaz annulaire
CMD	document à l'intention des commissaires
CP	condition de permis
CSA	Association canadienne de normalisation (Groupe CSA)
CVC	critères de vérification de la conformité
DE	diamètre extérieur
DI	diamètre intérieur
HEPP	heures équivalentes pleine puissance
Heq	hydrogène équivalent
JDPE	joint dudgeonné au point d'entrée
JDPS	joint dudgeonné au point de sortie
MCP	manuel des conditions de permis
PDTCR	processus décisionnel tenant compte du risque
PERP	permis d'exploitation d'un réacteur de puissance
ppm	parties par million
R-D	recherche et développement

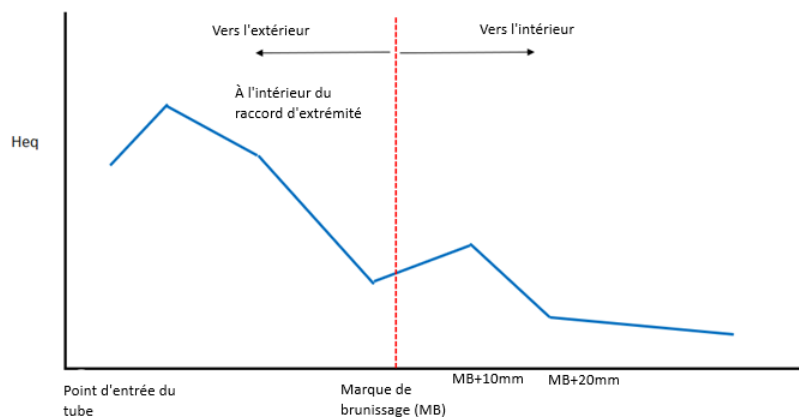
Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Appendix A : Concentration élevée de Heq près des joints dudgeonnés

La figure A1 illustre les profils axiaux des zones de concentration élevée de Heq près des marques de brunissage aux points d'entrée et de sortie des tubes de force en 2021, à l'emplacement circonférentiel de la concentration maximale de Heq mesurée. Le pic local à environ 10 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du joint dudgeonné au point d'entrée (JDPE) est souvent appelé « blip ».



Marque de brunissage au point de sortie



Marque de brunissage au point d'entrée

Figure A1 : Comparaison des profils axiaux de Heq à la marque de brunissage aux points d'entrée et de sortie (les illustrations schématiques ne sont pas à l'échelle)

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

A1 Région du joint dudgeonné au point de sortie

- Selon une modélisation thermohydraulique des configurations de canaux de combustible vieillissants, la température pourrait varier de plus de 20°C entre les parties supérieure et inférieure d'un tube de force, près du joint dudgeonné au point de sortie (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 A2).
- 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.

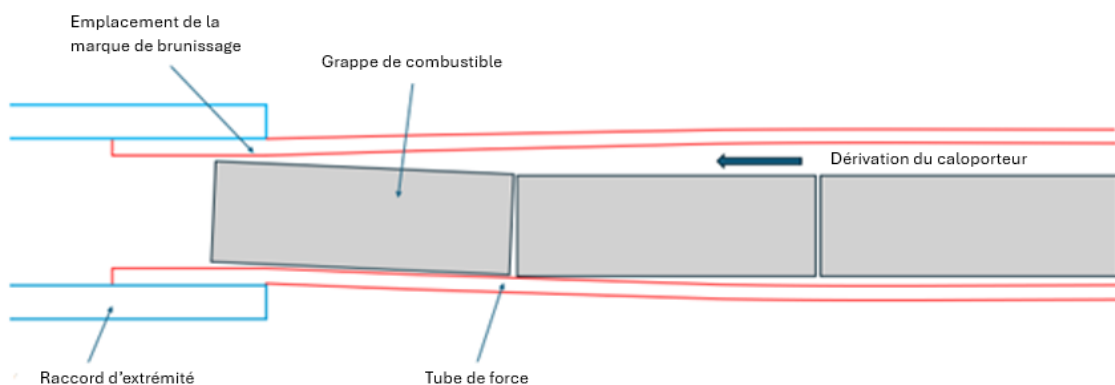


Figure A2 : Illustration de la dérivation du caloporteur à l'extrémité de sortie d'un tube de force, qui génère un gradient circonférentiel de température (pas à l'échelle)

- 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.

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

A2 Zone du joint dudgeonné au point d'entrée

- 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 JDPE des tubes de force affectés révèle la présence d'une zone de concentration élevée de Heq (souvent appelée un « blip ») près de la surface extérieure des tubes de force, ainsi que de concentrations de loin inférieures près de la surface intérieure.
- On a démontré que les blips peuvent découler d'un contact entre le matériau des tubes de force et une partie alésée 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 A3 et A4). Cela crée une zone froide localisée sur la surface extérieure du tube de force en raison d'une voie de conductance thermique entre le tube de force et le tube de réseau du bouclier d'extrémité de la calandre.

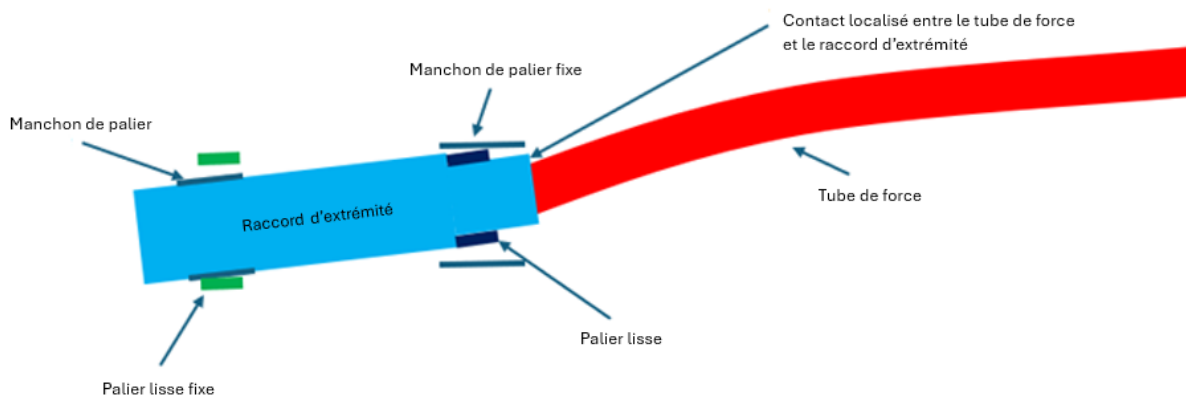


Figure A3 : Illustration d'un scénario de déformation (exagérée) qui pourrait causer un blip de Heq (pas à l'échelle)

Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

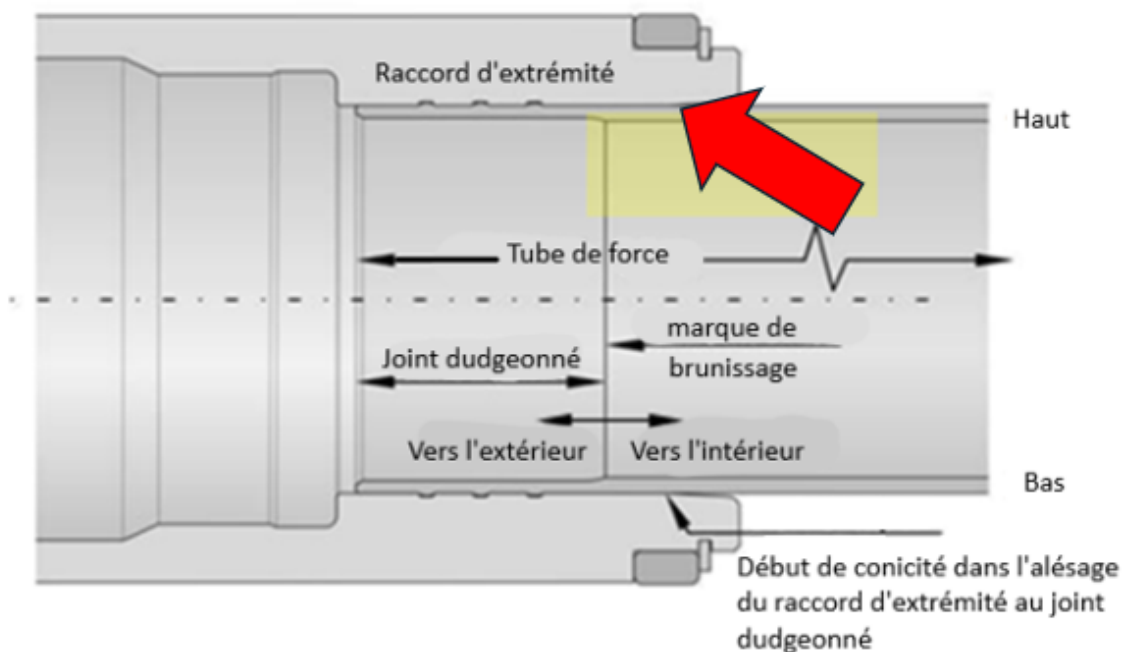


Figure A4 : Illustration de la zone du joint dudgeonné d'un tube de force – dans des conditions normales, il n'y a aucun contact à l'emplacement du blip de Heq (flèche rouge), en raison de l'alésage du raccord d'extrémité; le scénario de déformation de la figure A2 peut entraîner un contact, d'après la modélisation de déformation.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Appendix B : État des activités de R-D visant le Heq

Activité de R-D	Date d'achèvement prévue (selon les CMD 22-M37.1 et 22-M37.3)	État actualisé des activités de R-D
Mettre à jour le logiciel des éléments finis pour simuler l'évolution des concentrations de Heq dans la zone du joint dudgeonné au point de sortie	Automne 2023	Les travaux sont terminés.
Mettre au point un logiciel des éléments finis pour simuler l'évolution des concentrations de Heq dans la zone du joint dudgeonné au point d'entrée	Automne 2023	Les travaux sont terminés.
Évaluer l'incidence potentielle des concentrations élevées de Heq sur les défauts de la surface intérieure des tubes de force près de la zone d'intérêt au point d'entrée	Automne 2023	Les travaux sont terminés.
Améliorer la caractérisation du « blip » et de l'évolution prévue des concentrations élevées de Heq dans la zone du JDPE en fonction de l'exploitation prolongée	Printemps 2024	Les travaux sont terminés.
Confirmer les effets potentiels de la pénétration et de la redistribution des isotopes de l'hydrogène sur l'évolution des zones de concentrations élevées de Heq au point d'entrée	Été 2023	Les travaux sont terminés.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Activité de R-D	Date d'achèvement prévue (selon les CMD 22-M37.1 et 22-M37.3)	État actualisé des activités de R-D
Améliorer la caractérisation du comportement de solubilité des isotopes de l'hydrogène dans les tubes présentant des concentrations élevées de Heq	Hiver 2024	Les travaux sont terminés.
Améliorer la modélisation de la distribution des températures près de la zone du joint dudgeonné au point de sortie des tubes de force	Été 2023	Les travaux sont terminés.
Définir les paramètres d'entrée requis pour les mises à jour provisoires du modèle de concentrations de Heq	Été 2023	Les travaux sont terminés.
Mettre au point un modèle provisoire de concentrations de Heq	Automne 2024	Les travaux sont terminés.
Valider le modèle provisoire de concentrations de Heq afin d'appuyer la mise au point d'un modèle définitif et exhaustif	Automne 2025	Les travaux sont terminés.
Définir les paramètres d'entrée requis pour le modèle définitif et exhaustif de concentrations de Heq	Été 2025	Les travaux sont terminés.
Définir l'importance relative des variables ayant une influence sur l'évolution des concentrations de Heq	Automne 2025	Les travaux sont terminés.
Mettre au point le modèle définitif et exhaustif de concentrations de Heq	Printemps 2026	Progresse comme prévu



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Activité de R-D	Date d'achèvement prévue (selon les CMD 22-M37.1 et 22-M37.3)	État actualisé des activités de R-D
Effectuer des expériences sur l'amorçage des fissures par la présence d'hydrure dans des matériaux non irradiés soumis à des concentrations de Heq de 220 ppm ou plus	Automne 2024	Les travaux sont terminés.
Effectuer des expériences sur l'amorçage des fissures par la fatigue dans des matériaux non irradiés soumis à des concentrations de Heq de 220 ppm ou plus	Automne 2024	Les travaux sont terminés.
Effectuer des expériences sur l'amorçage des fissures dans des matériaux irradiés soumis à des concentrations élevées de Heq sans la présence de défauts.	Automne 2024	Les travaux sont terminés.
Effectuer des expériences sur l'amorçage et l'élargissement des fissures dans des matériaux irradiés soumis à des concentrations élevées de Heq et présentant des défauts.	Automne 2024	Les travaux sont terminés.



Appendix C : Examen par la CCSN de la rétroaction sur les réponses des titulaires de permis aux commentaires des intervenants

Le personnel de la CCSN a conclu que les réponses des titulaires de permis étaient acceptables, mais il a laissé entendre que les données relatives à la chimie du CGA ou aux tubes de contrôle retirés du service pourraient améliorer davantage la réponse aux commentaires formulés dans le [CMD 22-M37.4](#). Les titulaires de permis ont signalé que ces renseignements n'étaient pas disponibles ou qu'ils étaient difficiles à obtenir. Aucune autre mesure n'a été recommandée pour les raisons suivantes :

- Sauf pour les zones de concentration élevée de Heq, les modèles d'absorption ont généralement fourni des estimations limitatives du Heq mesuré dans les tubes de force au moyen d'échantillons prélevés par perforation ou par grattage, sans tenir compte du CGA comme source de pénétration.
- La modélisation effectuée dans le cadre du programme de R-D a permis en théorie de reproduire des zones de concentration élevée de Heq qui correspondaient aux constatations relatives aux tubes de force, sans intégrer une source de pénétration supplémentaire provenant du CGA. En fait, la modélisation porte à croire que l'inventaire de masse est probablement déjà surestimé dans la zone du joint dudgeonné au point de sortie (JDPS) d'un tube de force si on tient seulement compte de la pénétration actuelle dans le corps du tube en raison de la corrosion du diamètre intérieur (DI) et de la pénétration dans la zone du joint dudgeonné. Les données de mesure utilisées pour estimer le volume de masse ont traditionnellement été recueillies à partir d'échantillons prélevés par grattage sur des tubes en service ou d'échantillons prélevés par perforation sur des tubes retirés du service, à une orientation d'environ 12 heures, là où des concentrations élevées sont présentes en raison de la redistribution circumférentielle.
- Les problèmes opérationnels relatifs au CGA abordés dans le [CMD 22-M37.4](#) ne se sont pas reproduits depuis plusieurs décennies, soit depuis l'adoption du mélange de gaz annulaire de CO₂ enrichi d'O₂. Cela indique que les processus chimiques identifiés par l'intervenant ne sont plus actifs, du moins pas dans une mesure équivalente à celle où ils ont causé les problèmes passés liés à l'exploitation des tubes de force.



Appendix D : Ébauche de la section 6.2 révisée des MCP

Condition de permis 6.2 :

Le titulaire de permis doit mettre en œuvre et tenir à jour un programme amélioré d'aptitude fonctionnelle pour les canaux de combustible en exploitation prolongée.

Préambule :

Il a été démontré que les exigences du programme d'aptitude fonctionnelle énoncées à la section 6.1 étaient efficaces aux fins d'exploitation des tubes de force pour la durée de vie utile cible initiale de 210 000 heures équivalentes pleine puissance (HEPP). Cependant, bon nombre des modèles et processus servant à évaluer l'aptitude fonctionnelle des tubes de force dans la norme CSA N285.8 nécessitaient d'être étayés pour tenir compte des concentrations d'hydrogène équivalent (Heq) qui pourraient être observées lors de l'exploitation prolongée des tubes de force au-delà de 210 000 HEPP, en particulier près des marques de brunissage des joints dudgeonnés aux points d'entrée et de sortie.

La concentration de Heq est un paramètre d'entrée clé des modèles servant à évaluer l'amorçage et la croissance des fissures, la ténacité à la rupture ainsi que la résistance à l'amorçage des fissures. Une surveillance accrue des concentrations de Heq est requise durant l'exploitation prolongée des tubes de force. De plus, les modèles d'évaluation des défauts ont été mis à jour de sorte à s'appliquer aux zones de concentration élevée de Heq près des marques de brunissage des joints dudgeonnés aux points d'entrée et de sortie lorsque ces concentrations dépassent les limites actuellement énoncées dans la norme CSA N285.8.

Critères de vérification de la conformité :

Évaluation des défauts dans les tubes de force



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

Comme il est indiqué dans la lettre d'OPG du 30 septembre 2025 (7583218), les évaluations des défauts dans les tubes de force doivent être réalisées conformément aux processus consignés dans le document COG-25-1021 ou COG-25-1023 pour les zones suivantes des tubes de force en exploitation prolongée au-delà de 210 000 HEPP :

- la zone englobant la circonférence complète d'un tube de force s'étendant axialement sur 20 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du joint dudgeonné au point d'entrée (JDPE)
- la zone englobant la circonférence complète d'un tube de force s'étendant axialement sur 60 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du joint dudgeonné au point de sortie (JDPS)

En ce qui concerne les défauts situés à une distance axiale de 20 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du JDPE, on doit supposer que la masse globale de Heq est comprise entre 120 et 240 ppm lorsqu'on applique le processus consigné dans le COG-25-1023.

À la suite d'inspections des zones des tubes de force situées à une distance axiale de 60 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du JDPS et de 20 mm vers l'intérieur à partir de la marque de brunissage du JDPE, OPG doit identifier tout défaut détecté dépassant une profondeur de 0,15 mm dans les rapports d'inspection soumis conformément à la clause 12.2.6 de la norme CSA N285.4:19

Programme de mesure de la concentration de Heq

Dans le cas des réacteurs exploités au-delà de 210 000 HEPP, un programme renforcé de surveillance de la concentration de Heq doit être établi pour assurer l'échantillonnage en surface de tubes de force en service ainsi que l'échantillonnage de tubes de contrôle retirés du service de manière à permettre de caractériser l'étendue axiale, circonférentielle et radiale des zones de concentration élevée de Heq près des joints dudgeonnés aux points d'entrée et de sortie, lesquelles peuvent survenir en raison de gradients de température circonférentiels ou localisés. La portée de ce programme sera présentée au personnel de la CCSN.

Orientation :

OPG devrait collaborer avec des partenaires de l'industrie pour élargir les activités de modélisation des concentrations de Heq dans la zone du point d'entrée afin d'inclure un plus grand échantillon de données obtenues à partir de tubes de force retirés du service, ce qui pourrait permettre d'améliorer davantage le processus de modélisation.



Mise à jour du personnel de la CCSN sur l'état du programme de R-D des titulaires de permis à l'égard de la concentration élevée d'hydrogène équivalent dans les tubes de force des réacteurs en exploitation prolongée

OPG devrait poursuivre les activités de surveillance des matériaux tant à partir des tubes de contrôle visés par le programme d'inspections planifiées qu'à partir des matériaux additionnels prélevés dans le cadre des arrêts aux fins de réparation.