



Rapport de synthèse du projet d'études sur le tritium

INFO-0800
Révision 1



Janvier 2011



Rapport de synthèse du projet d'études sur le tritium

© Ministre de Travaux publics et Services gouvernementaux Canada 2011

N° de catalogue : CC172-56/2011F-PDF

ISBN 978-1-100-96313-6

Publié par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN)

N° de catalogue de la CCSN : INFO-0800 Révision 1

La reproduction d'un extrait quelconque du présent document à des fins personnelles est autorisée à condition d'en indiquer la source en entier. Toutefois, la reproduction de ce document en tout ou en partie à d'autres fins nécessite l'obtention préalable d'une autorisation écrite de la Commission canadienne de sûreté nucléaire.

Also available in English under the title: *Tritium Studies Project Synthesis Report*

Disponibilité du document

Les personnes intéressées peuvent consulter le document sur le site Web de la CCSN à suretenucleaire.gc.ca, ou en commander des exemplaires, en français ou en anglais, en communiquant avec la :

Commission canadienne de sûreté nucléaire
280, rue Slater
C.P. 1046, Succursale B
Ottawa (Ontario) K1P 5S9
CANADA

Téléphone : (613) 995-5894 ou 1-800-668-5284 (Canada seulement)

Télécopieur : (613) 995-5086

Courriel : info@cnsccsn.gc.ca

Site web : suretenucleaire.gc.ca

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------------|
| SOMMAIRE | iii |
| 1 INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 La réglementation du tritium au Canada | 1 |
| 1.2 Le projet Études sur le tritium | 2 |
| 1.3 Historique des installations de traitement du tritium | 5 |
| 2 CONSTATATIONS | 7 |
| 2.1 Le rejet du tritium et ses conséquences radiologiques au Canada en 2006 | 7 |
| 2.1.1 Rejets de tritium | 7 |
| 2.1.2 Activité du tritium dans l'environnement | 9 |
| 2.1.3 Conséquences sur les doses au public et aux travailleurs du secteur nucléaire | 14 |
| 2.2 Normes et recommandations sur le tritium dans l'eau potable | 15 |
| 2.3 Évaluation des installations de manipulation du tritium | 17 |
| 2.4 Étude sur le devenir environnemental du tritium dans l'atmosphère | 19 |
| 2.5 Études sur le devenir environnemental du tritium dans les sols et la végétation | 21 |
| 2.5.1 Taux de tritium dans les produits maraîchers de Pembroke en 2007 et dose à la population | 21 |
| 2.5.2 Devenir environnemental du tritium dans le sol et dans la végétation | 23 |
| 2.6 Tritium : Effets sur la santé, dosimétrie et radioprotection | 28 |
| 2.6.1 Effets sur la santé | 28 |
| 2.6.2 Efficacité biologique relative | 30 |
| 2.6.3 Dosimétrie | 31 |
| 2.6.4 Options concernant l'évaluation et le contrôle de risques | 32 |
| 3 EXAMEN | 35 |
| 3.1 État et nature des impacts courants du tritium | 35 |
| 3.2 Examen des meilleures pratiques d'ingénierie pour la surveillance du tritium | 39 |
| 3.3 Études du devenir du tritium rejeté dans l'atmosphère | 40 |
| 3.3.1 Connaissances scientifiques actuelles | 40 |
| 3.3.2 Recherche sur les sols et la végétation | 41 |
| 3.4 Examen des risques pour la santé que pose le tritium | 44 |
| 4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS | 46 |
| 5 ACRONYMES | 48 |
| 6 GLOSSAIRE | 49 |
| 7 RÉFÉRENCES | 50 |

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Émissions de tritium dans l'air en 2006 par rapport aux LOD | 8 |
| Figure 2 : Émissions de tritium dans les effluents liquides en 2006 par rapport aux LOD | 9 |
| Tableau 1 : Concentrations de tritium dans les eaux souterraines aux centrales nucléaires, installations de recherche et installations de traitement du tritium | 11 |
| Figure 3 : Dose de tritium reçue par la population en 2006 comparée à la dose de tous les radionucléides et à la limite de dose à la population fixée par la CCSN | 14 |
| Figure 4 : Moyenne des doses de tritium et total des doses efficaces de tous les radionucléides aux travailleurs du secteur nucléaire en 2006 comparés à la limite de dose professionnelle annuelle de la CCSN | 15 |
| Figure 5 : Activité du tritium (HTO) dans l'eau extraite de sols et d'aliments prélevés près de l'installation de SRBT à Pembroke au cours des étés 2008 et 2009 | 27 |
| Figure 6 : Tritium restant dans les sols et les aliments après extraction de l'eau des échantillons de la figure 5 | 27 |

SOMMAIRE

En janvier 2007, le tribunal de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a ordonné au personnel de la CCSN d'entreprendre des recherches sur les rejets de tritium au Canada, et d'étudier et d'évaluer les installations de traitement du tritium qui, dans le monde, ont adopté les meilleures pratiques. Le personnel de la CCSN a donc entrepris plusieurs projets dans le cadre du projet Études sur le tritium. L'objet de ce projet est d'améliorer les données disponibles sur lesquelles s'appuie la surveillance réglementaire du traitement du tritium et des rejets de tritium au Canada.

Ce rapport présente un résumé des résultats de ces études ainsi que les conclusions et les recommandations du personnel de la CCSN. Bien que les études aient été publiées au fur et à mesure de leur élaboration, les conclusions et les recommandations sont ici formulées pour la première fois.

Le premier objectif du projet était de rassembler des données sur l'état et la nature des impacts des rejets de tritium par toutes les installations et activités autorisées importantes au Canada. Des données ont également été compilées sur les normes et les recommandations sur le tritium dans l'eau potable.

- *Le rejet de tritium et ses conséquences radiologiques au Canada en 2006* (INFO-0793)
- *Normes et recommandations sur le tritium dans l'eau potable* (INFO-0766)

Le deuxième objectif visait à examiner les contrôles techniques des rejets par les installations de production, de manipulation ou de gestion du tritium au Canada. Cette activité a consisté également en des évaluations et des visites sur le terrain de toutes les grandes installations de tritium au Canada et d'installations choisies à l'étranger. Les technologies, les pratiques et le rendement en matière d'exploitation des installations canadiennes ont été évalués en fonction des meilleures pratiques internationales.

- *Évaluation des installations de manipulation du tritium* (INFO-0796)

Le troisième objectif était d'étudier le devenir des rejets de tritium dans l'atmosphère. Pour évaluer les connaissances scientifiques courantes, la CCSN a commandé un examen des documents publiés et de la modélisation prédictive dans le domaine du devenir des rejets de tritium. Entre 2007 et 2009, la CCSN a en outre fait faire sous contrat des recherches sur les concentrations « totales » de tritium dans des échantillons de sol et de produits d'origines végétale et animale prélevés près d'installations nucléaires représentatives dans le but d'évaluer les données de surveillance de la conformité environnementale et les stratégies courantes de surveillance. La recherche a été menée sur deux centrales nucléaires et deux installations de traitement de tritium.

- *Étude sur le devenir environnemental du tritium dans l'atmosphère* (INFO-0792)
- *Taux de tritium dans les produits maraîchers de Pembroke en 2007 et dose à la population* (INFO-0798)
- *Devenir environnemental du tritium dans le sol et la végétation* (étude en cours)

Le quatrième objectif était d'effectuer une revue indépendante de la littérature scientifique afin d'évaluer les risques pour la santé des travailleurs et des membres de la population exposés au tritium, d'évaluer les pratiques de dosimétrie relatives à l'incorporation de tritium et d'examiner les méthodes utilisées pour limiter l'exposition au tritium.

- *Tritium : Effets sur la santé, dosimétrie et radioprotection* (INFO-0799).

Constatations

Le rejet de tritium et ses conséquences radiologiques au Canada en 2006

L'examen de la nature et des conséquences des rejets de tritium au Canada en 2006 a permis de déterminer que les rejets dans l'air ou dans l'eau par toutes les installations ne représentent qu'une fraction des limites autorisées. Les taux de tritium dans l'environnement hors-site en surface, près de la plupart des installations ont été néanmoins élevés par rapport aux concentrations de fond naturel. Les taux ont baissé rapidement avec la distance aux points de rejets, pour approcher généralement les niveaux de fond naturel après plusieurs kilomètres.

Bien que les taux de tritium dans l'environnement en surface près des installations aient été généralement faibles, des niveaux élevés de tritium (nettement au-dessus des niveaux de fond), dus aux pratiques passées, à des accidents ou à des défaillances, ont été décelés dans l'eau souterraine près de quelques installations, soit autour de centrales nucléaires, d'installations de recherche et de traitement de tritium. Les concentrations de tritium dans les sources municipales d'eau potable autour des centrales nucléaires ont été inférieures à 100 Bq/L.

Dans la plupart des installations, l'exposition au tritium a contribué en grande majorité à la dose totale de rayonnement aux personnes. Dans toutes les installations qui rejettent du tritium, les doses estimées pour le public et les travailleurs ont été nettement en deçà des limites réglementaires et des doses connues pour avoir des effets sur la santé.

Normes et recommandations sur le tritium dans l'eau potable

L'examen des normes relatives à l'eau potable a révélé que la plupart des pays et des provinces canadiennes ont adopté des concepts similaires de radioprotection contre le tritium dans l'eau potable acceptés à l'échelle internationale. Cela comprend les doses-risques estimées et les facteurs de conversion de dose de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), ainsi que la dose maximale de référence de 0,1 mSv/an adoptée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Le taux de tritium dans l'eau potable près des installations nucléaires au Canada est très inférieur à la limite indicative de 7 000 Bq/L de Santé Canada et généralement bien en deçà du « paramètre seuil d'intervention » indicatif produit par tous les radionucléides de 100 Bq/L pour le tritium adopté par l'Union européenne.

Évaluation des installations de manipulation du tritium

L'examen de conceptions d'installations et de technologies antipollution a permis d'identifier les meilleures pratiques de manipulation et de contrôle du tritium dans treize domaines de la conception et/ou des technologies antipollution : confinement, lits d'adsorption à double paroi, pompes à vide, technologie du vide, pertes dues aux fuites, pertes dues à la purge des canalisations, réduction des émissions, ventilation, conception du point de rejet, récupération du tritium, stockage du tritium, mesure du rendement et rejet dans les égouts. La conclusion générale du rapport est que les pratiques canadiennes sont comparables à celles des installations à l'étranger. Une gestion efficace du tritium est effectuée au moyen d'une gamme étendue de mécanismes. Les pertes courantes dues à l'exploitation de divers procédés dans les installations qui utilisent le tritium se situent entre 0,01 % et 0,40 %.

Étude sur le devenir environnemental du tritium dans l'atmosphère

L'examen des ouvrages publiés sur le devenir environnemental et le comportement du tritium dans l'atmosphère et dans l'environnement en surface a révélé que le comportement du tritium dans l'environnement est raisonnablement bien compris. On a également effectué une évaluation de données récentes sur les taux de tritium dans l'air, les sols, les eaux de surface et l'eau souterraine autour des installations nucléaires en fonction des prédictions obtenues à l'aide d'un modèle environnemental normalisé (Association canadienne de normalisation [CSA] N288.1-08) utilisé à des fins de réglementation. Le modèle de la CSA a été trouvé quelque peu modéré et, par conséquent, convenable pour le calcul des limites de rejet et de la dose annuelle au public. Des incertitudes entachant la prédiction des concentrations environnementales ont été relevées, plus particulièrement près de certaines installations ou dans les installations dont les rejets de tritium tendent à fluctuer.

Recherche sur les sols et la végétation

En 2008 et 2009, une étude financée par la CCSN a été réalisée par l'Université d'Ottawa sur le tritium dans l'environnement, près de quatre installations (centrales nucléaires de Darlington et Gentilly-2, SRB Technologies [SRBT] et installations de traitement du tritium de Shield Source Incorporated [SSI]). Une étude préliminaire a été également menée dans les installations de SRBT en 2007, lorsque le titulaire de permis a cessé temporairement de traiter du tritium après 16 années d'exploitation.

Près des installations de SRBT en 2007, l'activité du tritium dans l'environnement correspondait aux attentes générales basées sur les rejets et les modèles de comportement du tritium. Les premières mesures effectuées à Pembroke sur le tritium lié aux composés organiques (OBT) n'ont pas révélé d'accumulation significative de tritium attribuable aux émissions passées, mais ont permis de mettre en évidence des rapports d'OBT par rapport à l'eau tritiée (HTO) plus élevés que prévus. La dose reçue par les résidents de Pembroke en raison de la consommation de produits locaux était inférieure à 0,004 mSv/an au cours de l'année 2007, en tenant compte des mesures d'OBT et de HTO.

La constatation la plus importante faite dans le cadre de ce grand projet de recherche a été que les niveaux de tritium organiquement lié dans l'environnement étaient plus élevés et plus variables que les valeurs estimées à l'aide des modèles environnementaux actuels pour le

tritium. Ces modèles partent de l'hypothèse que les niveaux d'OBT sont identiques aux niveaux d'HTO (rapport OBT/HTO ~ 1). Toutefois, près des sites nucléaires, les rapports moyens OBT/HTO étaient d'environ 2 ou 3 pour les produits végétaux et de 10 pour les produits d'origine animale. Cela laisse supposer que, même si les doses aux membres du public sont très faibles, des doses de tritium plus grandes qu'attendues sont absorbées en consommant des produits locaux d'origines végétale et animale. Ces résultats doivent être validés avant que leur signification pour les doses estimées au public puissent être confirmée. Cette étude se poursuit.

Tritium : Effets sur la santé, dosimétrie et radioprotection

Le personnel de la CCSN a effectué un examen et une évaluation exhaustifs des principes et des pratiques de radioprotection applicables au tritium. Les points étudiés ont été les propriétés physiques, chimiques et radiologiques du tritium, les effets sur la santé du rayonnement attribuable au tritium déterminés à la suite d'analyses en laboratoire et d'études épidémiologiques, l'efficacité biologique relative (EBR) du rayonnement du tritium et les modèles biocinétique et dosimétrique du tritium. L'approche adoptée par la CIPR dans le but de protéger la population contre l'exposition au tritium et éventuellement de modifier le facteur de pondération radiologique (w_R) a également été étudiée.

D'après les résultats de recherches épidémiologiques approfondies et l'absence observée de risque en excès que pourraient poser des expositions aux rayonnements totaux, l'examen a révélé qu'il existe peu de preuves montrant une incidence accrue du cancer et de la mortalité dans les populations exposées au tritium, aux concentrations actuelles relevées dans l'environnement et dans les milieux de travail. Il est alors raisonnable d'avancer que tout risque éventuel pour la santé spécifiquement lié au tritium serait négligeable et impossible à distinguer de risques similaires observés dans la population générale. Il importe de souligner que des niveaux très élevés de tritium sont nécessaires pour causer ces effets néfastes au cours d'études en laboratoire sur des animaux et que l'examen montre qu'il est très peu probable que les rejets de tritium puissent causer des effets néfastes pour la santé du public ou des travailleurs. Les doses auxquelles ces groupes sont exposés sont inférieures aux limites réglementaires et très nettement plus petites que les doses auxquelles le rayonnement a causé des effets clairement observés.

L'EBR est un concept utilisé pour comparer la capacité de différents types de rayonnement à produire le même résultat biologique. En ajustant les calculs pour tenir compte de l'EBR de différents types de rayonnement, on obtient une unité spéciale applicable à la dose, le sievert (Sv). Plus de 50 estimations différentes de l'EBR du tritium ont été examinées. Ces études indiquent que, si les rayons X sont choisis comme rayonnement de référence, la valeur d'EBR est environ 1,4 et, si les rayons gamma sont utilisés comme référence, la valeur d'EBR est alors de 2,2. Cela signifie que le risque pour la santé que pose le tritium est respectivement de 1,4 et de 2,2 fois plus élevé que pour ces autres types de rayonnement.

Les doses de rayonnement attribuable au tritium ne peuvent pas être mesurées directement et sont habituellement estimées par une évaluation du tritium dans des échantillons biologiques (p. ex. dans l'urine) ou par un échantillonnage environnemental. Une fois que l'estimation de la

quantité de tritium dans l'organisme a été établie, la dose peut être calculée à partir de modèles biologiques, qui permettent d'évaluer les concentrations de tritium dans les organes et tissus. L'examen montre que la validation, l'élargissement et l'incorporation de nouveaux modèles tels que le modèle de Taylor (2003), faciliteraient l'évaluation des doses provenant de l'OBT. Néanmoins, en ce qui concerne les expositions au tritium que subissent actuellement la population et les travailleurs, les modèles de la CIPR fournissent des estimations raisonnables des doses, et donc du risque.

Conclusions et recommandations

La principale conclusion du projet Études sur le tritium est que le cadre de réglementation actuel du Canada a permis de contrôler efficacement les expositions au tritium et donc de protéger la santé et la sécurité des Canadiens. Les pratiques canadiennes de manipulation et de contrôle du tritium sont comparables à celles des installations à l'étranger, grâce à la mise en place de divers mécanismes de contrôle efficaces.

Pour améliorer le cadre de réglementation à des fins de protection de la santé, les mesures suivantes sont recommandées :

- *Que le personnel de la CCSN établisse un groupe de travail multilatéral sur le tritium qui serait chargé de faciliter les études épidémiologiques axées sur les risques liés à l'exposition au tritium à de faibles doses sur la durée de vie et de mener au besoin des études supplémentaires de radiologie et de dosimétrie, y compris l'examen d'un facteur de pondération radiologique des rayonnements à faible transfert linéique d'énergie (TLE) tels que ceux du tritium.*
- *Que le personnel de la CCSN poursuive ses recherches sur la variabilité des rapports OBT/HTO pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et évaluer la sensibilité des doses estimées à des rapports OBT/HTO élevés dans les aliments.*

Bien que le cadre de réglementation en place ait été adéquat pour protéger la santé humaine, les mesures suivantes sont recommandées dans le but de l'améliorer à des fins de protection de l'environnement :

- *Que la CCSN aborde les questions entourant la protection des eaux souterraines à proximité des installations existantes au palier politique, en consultation avec les provinces, qui exercent une compétence légale sur les ressources en eau souterraine. Dans l'intervalle, le personnel de la CCSN pourrait élaborer des ébauches de documents réglementaires, qui formuleraient des attentes en matière de protection des eaux souterraines et fourniraient une orientation sur l'évaluation des sites contaminés en vue d'appuyer l'assainissement et l'adoption d'autres mesures correctives.*
- *Que la CCSN aborde les questions entourant la protection des eaux souterraines à proximité de toutes les installations nucléaires de catégorie I qui rejettent du tritium dans l'atmosphère en envisageant de nouvelles exigences de conception, notamment :*
 - *un objectif nominal pour le niveau de tritium dans l'eau souterraine de 100 Bq/L;*
 - *une zone contrôlée de dimension suffisante dans la zone de contrôle du titulaire de permis pour faire en sorte que l'objectif nominal de 100 Bq/L soit atteint dans le*

périmètre, compte tenu des rejets de tritium dans l'atmosphère en périodes d'exploitation normales;

- un critère de conception des points de rejets (cheminées) pour assurer une dispersion efficace du tritium dans un panache atmosphérique et atténuer la contamination environnementale par transfert vers l'environnement de surface.*
- Que la CCSN entreprenne des travaux visant à déterminer quels facteurs doivent être pris en considération afin d'étalonner adéquatement les échantillonneurs d'air actifs et passifs pour le tritium. Dans l'intervalle, les titulaires de permis seraient invités à fournir des données sur l'incertitude des mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes de contrôle.*

En résumé, le projet Études sur le tritium a atteint ses objectifs, qui étaient d'augmenter les connaissances de la CCSN sur la production, la gestion et les rejets de tritium au Canada. Les résultats et les recommandations liés à ce projet sont présentement utilisés, et seront utilisés dans le futur, par le personnel de la CCSN pour améliorer la surveillance réglementaire des rejets de tritium au Canada.

1 INTRODUCTION

1.1 La réglementation du tritium au Canada

Au Canada, la maîtrise des rejets de tritium dans l'environnement revêt une importance particulière parce que les réacteurs nucléaires canadiens CANDU (Canada Deuterium Uranium) produisent de plus grandes quantités de tritium que les autres types de réacteurs et plusieurs installations spéciales canadiennes en traitent de grandes quantités. Par exemple, le tritium produit par les réacteurs est en partie récupéré dans une installation de Darlington et une certaine quantité est ensuite traitée pour la production de sources et de peintures luminescentes à Pembroke et à Peterborough. Les hôpitaux utilisent de petites quantités de tritium dans leurs tests de diagnostic, dans les médicaments et en radiothérapie. Le tritium est également utilisé par des laboratoires de recherche et sous la forme de traceur dans l'exploration pétrolière et gazière. À cause de ces nombreuses activités, il est absolument nécessaire au Canada d'approfondir les connaissances sur les conséquences pour l'environnement, la santé et la sécurité de tous les aspects de la production et de l'utilisation du tritium.

Les rejets de tritium causés par les activités humaines sont réglementés et étroitement surveillés par la CCSN en vue de préserver la santé et la sécurité des Canadiens et de protéger l'environnement. En plus de la dose provenant des sources naturelles, les règlements de la CCSN limitent à 1 mSv la dose que les membres du public peuvent recevoir d'une installation ou d'une activité autorisée. La dose au public due aux rejets d'installations nucléaires est très faible. Les doses sont estimées parce qu'elles sont trop petites pour être mesurées directement. Les estimations sont principalement faites dans le cadre d'activités de surveillance environnementale menées par les titulaires de permis, qui doivent démontrer que leurs rejets ne dépassent pas la limite de la dose au public. Généralement, les programmes de surveillance comportent des mesures des radionucléides et/ou de la radioactivité dans l'air et l'eau, ainsi que dans les produits végétaux alimentaires cultivés dans le voisinage d'installations nucléaires. En combinant ces données avec les activités et avec les habitudes alimentaires des personnes qui vivent près des installations nucléaires, il est possible d'estimer avec assurance les doses au public.

Le tritium (symbole T ou ^3H) est le seul isotope radioactif de l'élément hydrogène. Il possède un noyau formé d'un proton et de deux neutrons. Lorsqu'il se transforme en isotope stable de l'hélium, le tritium émet des particules bêta de faible énergie, une forme de rayonnement ionisant. Le tritium se trouve soit à l'état naturel dans la haute atmosphère terrestre ou comme un sous-produit de l'exploitation de réacteurs nucléaires de puissance ou de recherche. À l'instar de l'hydrogène, il peut former des molécules d'eau et être incorporé à des matières organiques. C'est pourquoi il existe des concentrations naturelles de tritium partout dans l'environnement où l'eau est présente, notamment les précipitations, les eaux de surface et souterraines, la glace, l'humidité du sol, les animaux et les plantes.

À l'exemple du rayonnement ionisant qu'il produit, le tritium peut représenter un risque pour la santé s'il est ingéré avec de l'eau potable et des aliments ou s'il est inhalé ou absorbé par la peau. C'est l'un des émetteurs de particules bêta de faible énergie. Par conséquent, lorsqu'il pénètre dans un organisme, il émet par désintégration une dose de rayonnement plus faible que celle des autres radioisotopes. L'exposition à des niveaux élevés de rayonnement ionisant augmente la probabilité de répercussions sur la santé (p. ex. contracter le cancer et les effets héréditaires).

La dose qui résulte de l'exposition à un rayonnement mesure la probabilité de répercussions sur la santé en raison de cette exposition. Cette dose est exprimée en sieverts ou plus couramment, en millièmes de sievert (millisievert ou mSv). Les risques pour la santé chez les personnes soumises à une exposition chronique à des doses de rayonnement d'environ 100 mSv ou moins sont faibles et ne peuvent pas être séparés des risques similaires pour la santé (p. ex. le cancer) au sein de la population canadienne dans son ensemble.

Le radioactivité naturelle nous amène à recevoir en moyenne environ 2 mSv par an à cause de l'exposition au radon, aux rayonnements cosmiques et à des matières radioactives (p. ex. le carbone 14 et le potassium 40) présentes à l'état naturel dans la croûte terrestre et le corps humain. La dose de radioactivité naturelle varie d'un endroit à l'autre et peut atteindre plusieurs mSv par année.

1.2 Le projet Études sur le tritium

En 2007, la CCSN a entrepris plusieurs études techniques sur les rejets de tritium au Canada pour augmenter l'ensemble des connaissances sur ces rejets et améliorer la surveillance réglementaire des activités liées au tritium. Le présent rapport de synthèse résume les principales constatations découlant du projet Études sur le tritium. Il s'appuie sur les documents de la série « INFO » produits de 2008 à 2010 à la suite d'examens de la réglementation sur le tritium au Canada effectués par le personnel de la CCSN, ainsi que sur les résultats de recherches financées par la CCSN concernant le tritium dans l'environnement. Les documents susmentionnés peuvent être consultés par le public à l'adresse Internet suretenucleaire.gc.ca.

Le projet a pour origine le *Compte rendu des délibérations, y compris les motifs de décision*, publié par la Commission le 31 janvier 2007, relativement à la *Demande de renouvellement du permis d'exploitation de Catégorie IB de l'installation de fabrication de sources lumineuses au tritium gazeux de Pembroke (Ontario)*, de SRBT. La Commission a ordonné au personnel de la CCSN :

- d'entreprendre des études techniques sur les rejets de tritium au Canada;
- d'étudier et d'évaluer les installations de traitement du tritium qui, dans le monde, ont adopté les meilleures pratiques.

Un plan de projet a été présenté à la Commission au cours d'une séance d'information technique tenue le 12 septembre 2007 (voir le document de référence CMD-07-M34).

L'objet de ce projet était d'améliorer l'information actuellement disponible afin de mieux guider la surveillance réglementaire exercée sur les activités de traitement du tritium et les rejets de tritium au Canada. La portée du projet s'étendait également à la conception des installations et aux questions entourant les rejets qui sont importantes pour la protection de la santé humaine et de l'environnement.

Le premier objectif du projet était de rassembler des données sur l'état et la nature des impacts des rejets de tritium par toutes les installations et activités autorisées importantes au Canada pour appuyer toutes les autres activités du projet. La réglementation des conséquences des rejets de tritium s'inscrit dans le mandat de la CCSN que lui confère la *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires* (LSRN). Des données sur les rejets de tritium ont été compilées et interprétées du point de vue des doses aux travailleurs du secteur nucléaire et au public. Les niveaux d'activité du tritium dans l'environnement ont été résumés de façon détaillée à partir des rapports sur la conformité soumis par les titulaires de permis. Des données ont également été compilées sur les normes et les recommandations limitant les niveaux d'activité du tritium dans l'eau potable, notamment dans les provinces canadiennes qui appliquent des normes relatives à l'eau potable traitant du tritium et/ou de radionucléides. Deux rapports d'information ont été élaborés par le personnel de la CCSN :

- ***Le rejet de tritium et ses conséquences radiologiques au Canada en 2006 (INFO-0793), 2009***
Renseignements sur les rejets, les concentrations environnementales et les conséquences sur les doses concernant les installations de tous les titulaires de permis qui rejetaient d'importantes quantités de tritium en 2006.
- ***Normes et recommandations sur le tritium dans l'eau potable (INFO-0766), 2008***
Renseignements sur les normes et recommandations concernant le tritium dans l'eau potable adoptées dans les pays développés et sur les concentrations de tritium dans l'eau potable au Canada.

Le deuxième objectif visait à examiner les contrôles techniques des rejets par les installations de production, de manipulation ou de gestion du tritium au Canada. Cette activité a consisté également en des évaluations et visites sur le terrain du personnel de la CCSN de toutes les grandes installations au Canada et d'installations choisies à l'étranger. Les technologies, les pratiques et le rendement en matière d'exploitation des installations canadiennes ont été évalués en fonction des meilleures pratiques internationales.

- ***Évaluation des installations de manipulation du tritium (INFO-0796), 2010***
Renseignements sur la conception et les technologies d'atténuation des installations de traitement du tritium qui rejettent du tritium dans l'atmosphère et évaluation des meilleures pratiques internationales.

Le troisième objectif était d'étudier le devenir des rejets de tritium dans l'atmosphère sur la base des données de conformité environnementale fournies par les titulaires de permis. Presque tout le tritium provenant des installations de traitement est rejeté dans l'atmosphère. Pour évaluer les connaissances scientifiques actuelles sur les voies de pénétration du tritium dans l'environnement, la CCSN a demandé à Ecometrix Inc., en collaboration avec RWDI Air Inc., d'examiner la littérature scientifique sur le devenir du tritium rejeté dans l'atmosphère et de comparer l'activité du tritium dans l'air, les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines près d'installations représentatives autorisées par la CCSN. Les données collectées ont été comparées aux prédictions d'un modèle numérique typique utilisé pour établir la conformité aux exigences de la CCSN dans le but de préserver la santé et la sécurité des personnes et de protéger l'environnement.

Pour évaluer les pratiques courantes de surveillance du tritium dans l'environnement terrestre, la CCSN a demandé à l'Université d'Ottawa d'effectuer des mesures indépendantes du tritium « total » dans les sols, les produits maraîchers et d'autres aliments produits localement. À quelques exceptions près récemment observées, les titulaires de permis ne mesurent que l'activité de l'eau tritiée dans les milieux environnementaux pour estimer la dose au public, puisque cette forme de tritium contribue à la presque totalité de la dose. Pour des raisons pratiques, l'OBT, qui est aussi présent dans les aliments, est généralement estimé au lieu d'être directement mesuré. Dans l'ensemble, l'étude visait à augmenter les connaissances sur les voies de pénétration et les mécanismes de transformation des émissions de tritium produites par les activités nucléaires dans la biosphère et l'approvisionnement alimentaire. La recherche a été réalisée dans le voisinage de deux centrales nucléaires et de deux installations de traitement du tritium pour tenir compte des différents types de rejets (HTO et/ou HT – hydrogène tritié). Des expériences ont été effectuées sur la dynamique d'absorption du tritium dans les sols et la végétation, et sur la caractérisation du OBT dans les cercles des arbres comme mesures des rejets dans le passé. Deux rapports ont été publiés et un rapport est en cours d'élaboration dans le cadre de cet objectif.

- ***Étude sur le devenir environnemental du tritium dans l'atmosphère (INFO-0792), 2010***

Examen détaillé de la littérature sur le devenir environnemental des rejets de tritium dans l'atmosphère et comparaison des données de conformité récentes aux prédictions obtenues de modèles actuels de comportement environnemental du tritium.

- ***Taux de tritium dans les produits maraîchers de Pembroke en 2007 et dose à la population (INFO-0798), 2010***

Étude de l'activité du tritium dans les produits maraîchers et les sols menée au cours de la première saison de croissance (2007), après que SRBT eut cessé de traiter le tritium, après 16 ans d'exploitation.

- ***Devenir environnemental du tritium dans le sol et la végétation (étude en cours)***

Étude à grande échelle de l'activité du tritium dans le voisinage de quatre installations nucléaires du Canada menée en 2008 et 2009, et résultats de recherches expérimentales

sur la transformation de l'hydrogène tritié et la concentration d'OBT dans les cercles d'arbres.

Le quatrième objectif était d'effectuer une revue indépendante de la littérature scientifique afin d'évaluer les risques indésirables pour la santé des travailleurs et des membres de la population exposés au tritium, d'évaluer les pratiques de dosimétrie employées au Canada et dans divers pays relatives à l'incorporation du tritium, d'examiner les méthodes utilisées actuellement pour limiter l'exposition au tritium et, dans l'ensemble, d'analyser la pertinence des exigences actuelles en matière de radioprotection contre ce radionucléide.

- ***Tritium : Effets sur la santé, dosimétrie et radioprotection (INFO-0799), 2010***

Examen et analyse exhaustifs des aspects suivants :

- propriétés physiques, chimiques et radiologiques du tritium;
- effets indésirables pour la santé du rayonnement attribuable au tritium, y compris des examens en laboratoires et des études épidémiologiques;
- études expérimentales fournissant une estimation de l'EBR du rayonnement du tritium;
- modèles biocinétiques et dosimétrie du tritium;
- approche adoptée par la CIPR pour protéger la population contre l'exposition au tritium et éventuellement modifier le facteur de pondération radiologique.

L'objectif général du projet était de produire à l'intention du public des données de grande qualité et à jour sur le tritium, dans le contexte canadien. L'objectif a été principalement réalisé avec la publication des documents susmentionnés de la série INFO. De plus, la CCSN a tenu deux séances d'information publiques majeures. La première a eu lieu le 8 janvier 2008, à Ottawa, et a porté sur les risques pour la santé que pose le tritium. Plusieurs experts internationaux ayant des points de vue divergents ont été invités à présenter des exposés. Un compte rendu complet de la séance a été publié dans le *Journal of Radiological Protection*¹. Une séance d'information publique portes ouvertes a également eu lieu le 28 avril 2010, à Ottawa, pour présenter les résultats finals du projet.

1.3 Historique des installations de traitement du tritium

Les deux installations de traitement du tritium au Canada sont celles de SRBT à Pembroke (Ontario), et de SSI à Peterborough (Ontario). Elles figurent parmi la poignée d'installations similaires en exploitation dans le monde. Les deux entreprises canadiennes sont classées comme des Installations nucléaires de catégorie IB par la CCSN et sont réglementées par les règlements pris en vertu de la LSRN, et plus particulièrement par le *Règlement sur les installations nucléaires de catégorie I*. Avant l'entrée en vigueur de la LSRN en juin 2000, les deux installations étaient réglementées en vertu de permis de possession de radioisotopes conformément à la *Loi sur le contrôle de l'énergie atomique* (LCEA). Cette loi était administrée par la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA), qui a été remplacée par la CCSN. En plus de l'adoption en 2000 de nouvelles dispositions de base sur l'octroi des permis, le

passage de la CCEA à la CCSN a été assorti d'une nouvelle obligation majeure : la nouvelle loi comprend en effet une clause qui exige des titulaires de permis qu'ils prennent « *les mesures voulues [...] pour protéger l'environnement* », en plus de préserver la santé et la sécurité des personnes (article 24.4(b)).

2 CONSTATATIONS

Cette section présente un résumé des constatations formulées dans les rapports publics produits au cours des activités de collecte de renseignements dans le cadre du projet. Une synthèse des questions transectorielles traitées dans chacun des rapports est également présentée dans la partie finale du présent document.

2.1 *Le rejet de tritium et ses conséquences radiologiques au Canada en 2006* (INFO-0793)

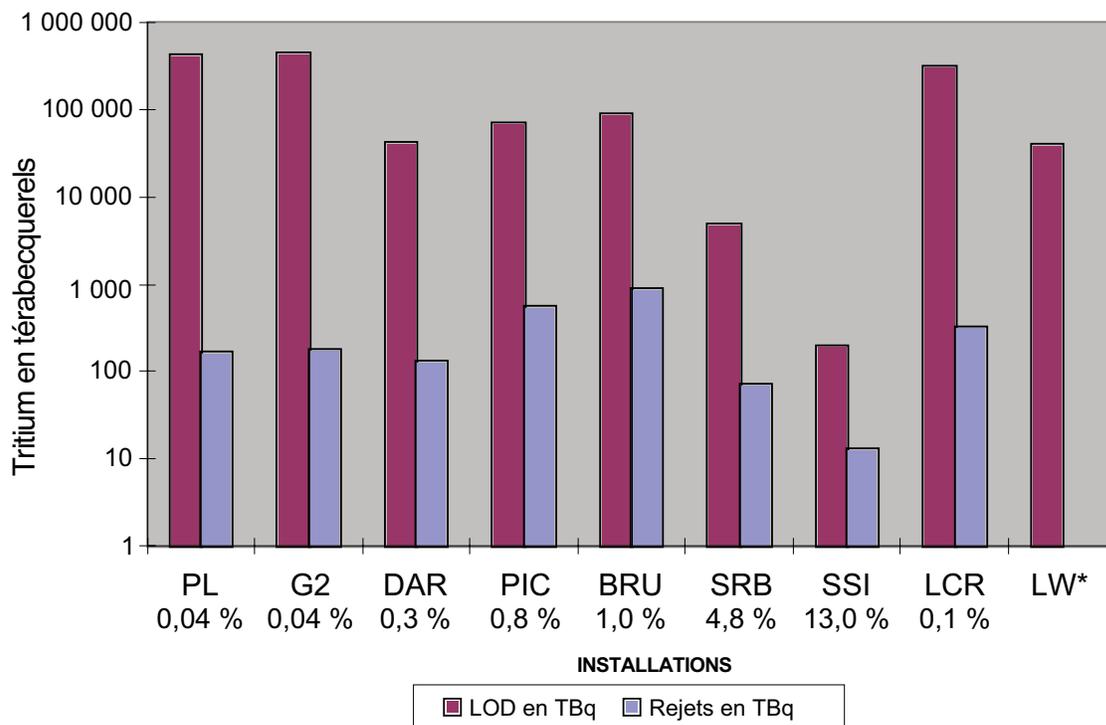
Ce rapport est le résultat d'une compilation, effectuée par le personnel de la CCSN, de renseignements sur l'état et la nature des conséquences des rejets de tritium au Canada. Ces renseignements ont été rassemblés à partir des données soumises à la CCSN au cours de l'année civile 2006. Le rapport fournit aussi un relevé détaillé des rejets de tritium de toutes les installations qui rejettent d'importantes quantités de ce radioisotope au Canada (réacteurs nucléaires de puissance, réacteurs de recherche, installations de gestion des déchets de réacteurs nucléaires, installations de traitement du tritium, installations de recherche et laboratoires chimiques). Les niveaux d'activité du tritium dans l'environnement sont résumés à partir des rapports de conformité soumis par les titulaires de permis et de quelques études spéciales. Enfin, les doses aux travailleurs du secteur de l'énergie nucléaire et au public sont présentées dans un tableau et comparées aux limites réglementaires.

2.1.1 Rejets de tritium

Toutes les installations nucléaires autorisées rejettent, d'une manière contrôlée, de petites quantités de substances radioactives dans l'atmosphère et les plans d'eau. Les rejets sont mesurés en becquerels (Bq) et déclarés à intervalles réguliers. Ils sont maintenus aux niveaux les plus faibles qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (ALARA) et ne doivent pas dépasser les limites opérationnelles dérivées (LOD) imposées. Une LOD est une limite maximale autorisée de rejet d'une substance radioactive, qui ne peut pas être légalement dépassée. Elle provient de renseignements sur le lieu, le mode de vie, les habitudes alimentaires, etc., de personnes représentatives qui vivent ou pourraient vivre dans le voisinage d'une installation nucléaire. Le respect de cette LOD donne l'assurance raisonnable que la limite de dose au public de 1 mSv/an n'est pas dépassée. Une concentration LOD incorpore toutes les voies d'exposition au tritium et représente par conséquent un rejet qui peut transmettre une dose de 1 mSv/an à un groupe critique. Un groupe critique est un groupe de membres du public identifiés comme étant les plus susceptibles de recevoir les doses les plus élevées par suite de l'exposition à des rejets de matières radioactives.

En 2006, tous les rejets dans l'air ou l'eau de toutes les installations n'ont représenté qu'une faible fraction des LOD. Les rejets de tritium par rapport aux LOD pour toutes les grandes installations sont décrits sur les figures 1 et 2. Des rejets minimes, qui ne sont pas pris en compte dans ces figures, ont aussi été produits par l'installation de gestion des déchets Western de la centrale de Bruce Power et deux installations de services techniques de Brampton (Ontario), à savoir Kinectrics Limited et Monserco Limited.

Figure 1. Émissions de tritium dans l'air en 2006 par rapport aux LOD (avec pourcentage des rejets en abscisse).



* Les Laboratoires de Whiteshell n'ont rejeté que 0,0076 Tbq ($1,84 \times 10^{-5}$ % de la LOD).

Abréviations :

PL : Centrale nucléaire de Point Lepreau (Énergie Nouveau-Brunswick)

G2 : Centrale nucléaire Gentilly-2 (Hydro-Québec)

DAR : Centrale nucléaire de Darlington (Ontario Power Generation)

PIC : Centrale nucléaire de Pickering (Ontario Power Generation)

BRU : Centrales nucléaires Bruce A et B (Bruce Power)

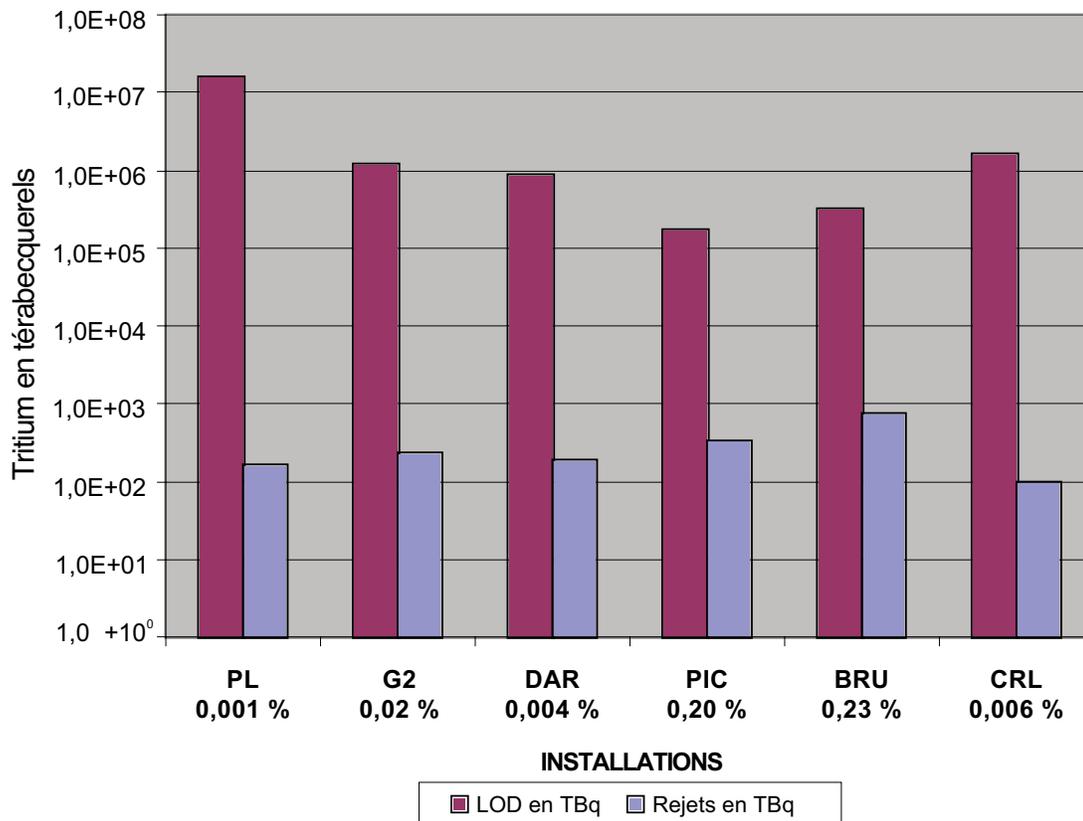
SRB : Installation de traitement du tritium de SRB Technologies (Canada) Incorporated

SSI : Installation de traitement du tritium de Shield Source Incorporated

LCR : Laboratoires de Chalk River d'Énergie atomique du Canada limitée

LW : Laboratoires de Whiteshell d'Énergie atomique du Canada limitée

Figure 2. Émissions de tritium dans les effluents liquides en 2006 par rapport aux LOD (avec pourcentage des rejets en abscisse).



* SRBT, SSI et les LW ont rejeté chacune moins de 1 TBq (sous la limite de l'échelle). Les abréviations sont identiques à celles de la figure 1.

2.1.2 Activité du tritium dans l'environnement

Les concentrations de tritium dans les milieux environnementaux (air, eau, végétation, animaux terrestres et aquatiques, y compris les produits alimentaires) ont été compilées en 2006. Les concentrations dans les environnements de surface près de la plupart des installations ont été basses et approchaient les concentrations naturelles sur plusieurs kilomètres autour des points de rejet.

Les concentrations de tritium dans l'air du voisinage de toutes les installations ont varié entre 0,4 Bq/m³ et 35,7 Bq/m³ comparativement à une concentration naturelle mesurée loin des installations nucléaires d'environ 0,1 Bq/m³. Près des centrales nucléaires, les concentrations dans les précipitations, les sources d'eau potable urbaines, les puits hors site, les eaux de surface et le lait ont en général été inférieurs à 50 Bq/L par comparaison à une concentration naturelle de 2 à 7 Bq/L. Quelques concentrations élevées de tritium ont été mesurées dans les précipitations autour de la centrale nucléaire de Pickering (493 Bq/L) et dans les eaux de surface près de la zone de retraitement des combustibles nucléaires épuisés de la centrale nucléaire Gentilly-2

(892 Bq/L). Autour des centrales nucléaires, les concentrations de tritium dans les légumes, les fruits, l'ensilage, le miel et les animaux terrestres et aquatiques ont été en général inférieures à 50 Bq/L, à quelques exceptions près (p. ex., dans la viande de chevreuil, où la concentration s'est élevée à 819 Bq/L dans les environs de la centrale nucléaire de Bruce, et dans les fruits autour de la centrale nucléaire de Pickering, où la concentration a atteint 1 194 Bq/L).

Les concentrations de tritium dans l'eau de surface, la viande, le lait, les légumes et les fruits mesurées près des installations de traitement du tritium et des laboratoires de Chalk River (LCR), ont été parfois plus élevées que les valeurs typiques autour des centrales nucléaires. Pour ce qui est des deux installations de traitement du tritium, des échantillons ont été prélevés beaucoup plus près des points de rejet dans l'atmosphère que pour les centrales nucléaires où les zones d'exclusion sont très larges. Dans ces échantillons prélevés sur les légumes et les fruits cultivés autour de ces deux installations, les concentrations de tritium ont atteint des niveaux allant jusqu'à 3 091 Bq/L et, dans les échantillons d'eaux de surface, jusqu'à 1 490 Bq/L. Aux LCR, les concentrations dans la végétation ou les animaux ont atteint 1 447 Bq/L. Principalement à cause de fuites incontrôlées dans la zone de gestion des déchets des LCR, la concentration de tritium dans la rivière des Outaouais, à neuf kilomètres de l'installation, est élevée (114 Bq/L). À neuf kilomètres plus loin en aval de l'installation, dans l'eau de la rivière prélevée pour la consommation, la concentration n'est que légèrement supérieure à la concentration naturelle (6 Bq/L à Petawawa).

Bien que les taux de tritium dans l'environnement en surface près des installations aient été généralement faibles, des niveaux élevés de tritium (nettement au-dessus des niveaux de fond) ont été décelés dans les eaux souterraines à la fois sur le lieu ou éloigné de certaines installations. Cela s'est produit dans les centrales nucléaires, les installations de recherche et installations de traitement du tritium aux LCR, les masses d'eau dans les zones de gestion des déchets nucléaires sont touchées par la contamination des eaux souterraines (p. ex., le Lac Perch – niveau de 6 530 Bq/L, déversoir du ruisseau Duke – niveau de 20 400 Bq/L). Sur les autres sites, les eaux de surface ne sont pas trop affectées à cause de l'emplacement des panaches ou de facteurs de dilution élevée dans les masses d'eau avoisinantes. Dans toutes ces situations, comme l'exige la CCSN, les titulaires de permis ont combattu ou s'emploient à contenir la contamination des eaux souterraines en adoptant des mesures d'atténuation à la source ou de gestion adaptative. Une surveillance fréquente et exhaustive de l'environnement fait également partie des mesures en place sur les sites contaminés.

L'ampleur, le contexte et les origines de la contamination des eaux souterraines varient considérablement d'un lieu à l'autre (tableau 1). Dans la plupart des cas, la contamination est due à des pratiques antérieures inadéquates ou à des défaillances. Aux deux installations de traitement du tritium (SRBT et SSI), c'est le lavage par les précipitations du tritium dans le panache des environs immédiats des points de rejet (cheminées) dans l'atmosphère qui est la cause de la contamination souterraine. Historiquement, les cheminées trop basses et les taux de ventilation trop faibles de ces installations étaient moins qu'optimaux pour les quantités de tritium rejetées. Aujourd'hui, les capacités de dispersion atmosphérique de ces installations sont adéquates grâce aux mesures réglementaires prises par la CCSN.

À l'exception de ces deux installations de traitement, les panaches de tritium sont contenues dans les limites clôturées et protégées des installations autorisées. Pour tous les sites, la contamination des eaux souterraines à l'intérieur et à l'extérieur des installations contribue peu aux doses de rayonnement aux travailleurs ou au public (figures 3 et 4 de la prochaine section), car l'eau souterraine proche des principales panaches de tritium n'est pas consommée ni utilisée à d'autres fins (telles que l'irrigation).

Les concentrations de tritium dans les sources d'eau potable urbaines près des centrales nucléaires sont surveillées de façon routinière. Les valeurs moyennes ont fluctué entre 7 et 18 Bq/L en 2006 (des données plus détaillées pour le Canada ont été publiées dans le volet INFO-0766). Les niveaux courants près des centrales nucléaires sont similaires et demeurent inférieurs aux limites de 7 000 Bq/L des *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* et de 20 Bq/L récemment proposée par le Conseil consultatif sur les normes de qualité et d'analyse de l'eau potable de l'Ontario. La valeur la plus élevée mesurée dans un puits d'eau potentiellement potable en 2006 a été de 1 875 Bq/L. Il s'agissait du puits d'une résidence près des installations de SRBT, qui ne sert pas de source d'eau potable. Depuis la publication de ce document, la concentration de tritium dans le puits a chuté à 423 Bq/L (en mars 2010).

Tableau 1. Concentrations de tritium dans les eaux souterraines aux centrales nucléaires, installations de recherche et installations de traitement du tritium (tirées des données fournies à la CCSN jusqu'à janvier 2008)

| Installation | Nombre de puits de surveillance | Concentration maximale (Bq/L) | Remarques sur les sources de contamination | Année des données |
|---|---------------------------------|-------------------------------|---|-------------------|
| SRB Technologies | 15 | 108 879 | Lavage des émissions des cheminées par les précipitations | 2007 |
| Shield Source Inc. | 4 | 6 996 | Lavage des émissions des cheminées par les précipitations | 2007 |
| Darlington | 8 | Sous le seuil de détection | | 2005 |
| Bruce-A | 12 | 667 | Lavage des émissions dans l'atmosphère par les précipitations | 2005 |
| Bruce-B | 14 | 1 593 | Lavage des émissions dans l'atmosphère par les précipitations | 2005 |
| Bruce – Installation de gestion des déchets Western | 18 | 41 000 | Fondation et drainage souterrain | 2005 |

| Installation | Nombre de puits de surveillance | Concentration maximale (Bq/L) | Remarques sur les sources de contamination | Année des données |
|---|---|-------------------------------|--|-------------------|
| Point Lepreau – Centrale et zone de gestion des déchets | 11 | 1 100 | Lavage des émissions par les précipitations | 2006 |
| Point Lepreau – Installation de gestion des déchets solides radioactifs | 34 | 400 | Lavage des émissions dans l'atmosphère par les précipitations | 2006 |
| Gentilly-2 Zone de gestion des déchets : ASSCI | 7 | 20 553 | Lavage des émissions par les précipitations | 2006 |
| Pickering – Centrale | La majeure partie du tritium dans les eaux souterraines sur le site est absorbée par les drains de fondation, qui sont les points les plus bas agissant comme un puits hydraulique. | | | 2006 |
| Pickering – Zone des tranches 1 à 4 | 30 | 128 800 000 | Sources : (1) Fuites dans la fosse de béton dans la salle de purification du modérateur. La fosse reçoit le tritium présent dans les déversements sur le sol; (2) Les puisards du bâtiment auxiliaire du réacteur qui fuient reçoivent du tritium provenant du réservoir de stockage de résine épuisée. Problème corrigé. La concentration de tritium diminue. | |
| Pickering – Zone de l'installation d'augmentation de la teneur isotopique | 32 | 888 000 | Par le passé, la pratique consistait à déverser l'eau tritiée sur le sol. Pratique abandonnée. Pas de nouveaux rejets. La concentration de tritium dans le sol diminue. | 2006 |
| Pickering – Piscines de combustible irradié A et B (puits et puisards) | 13 | 21 100 000 | Contamination due à la migration du tritium à partir de la zone de la tranche 1 et aux fuites des puisards. Réparations entreprises en 2007. | |
| Pickering – Zone du bâtiment sous vide | 11 | 1 200 000 | Contamination due à la migration du tritium à partir de la zone de la tranche 1 et aux fuites des puisards. Réparations entreprises en 2007. | |

| Installation | Nombre de puits de surveillance | Concentration maximale (Bq/L) | Remarques sur les sources de contamination | Année des données |
|---|---|--|---|-------------------|
| Pickering – Puisard 97 | 6 | 108 410 | Sources passées dans les années 1970 et 1980 dues au dispositif d'augmentation de la teneur isotopique du modérateur (Sulzer).. | |
| Pickering-B – Piscine auxiliaire des réacteurs (puisards) | 4 | 10 200 000 | Fuites dans les canalisations des puisards. Réparées dans les tranches 5 et 7. Les réparations dans l'unité 6 ont été terminées en 2007. La concentration de tritium dans les puisards diminue. Les concentrations sont normales dans la tranche 8. | |
| Laboratoires de Chalk River – Site du réacteur NRU | 8 puits de surveillance entourent la travée de stockage des barres de combustible et 21 puits de surveillance se trouvent entre le bâtiment du réacteur NRU et la rivière des Outaouais | Entre le bâtiment du réacteur NRU et la rivière des Outaouais : 3 240 000 | EACL a déterminé que la source des fuites est dans la travée de stockage des barres. EACL est en train de régler ce problème. | 2006 |
| Laboratoires de Chalk River – Travée de stockage du combustible du réacteur NRX | | 3 000 000 | À cause de fuites, la travée de stockage du combustible a été vidée de son eau en juin 2006. | 2005 |

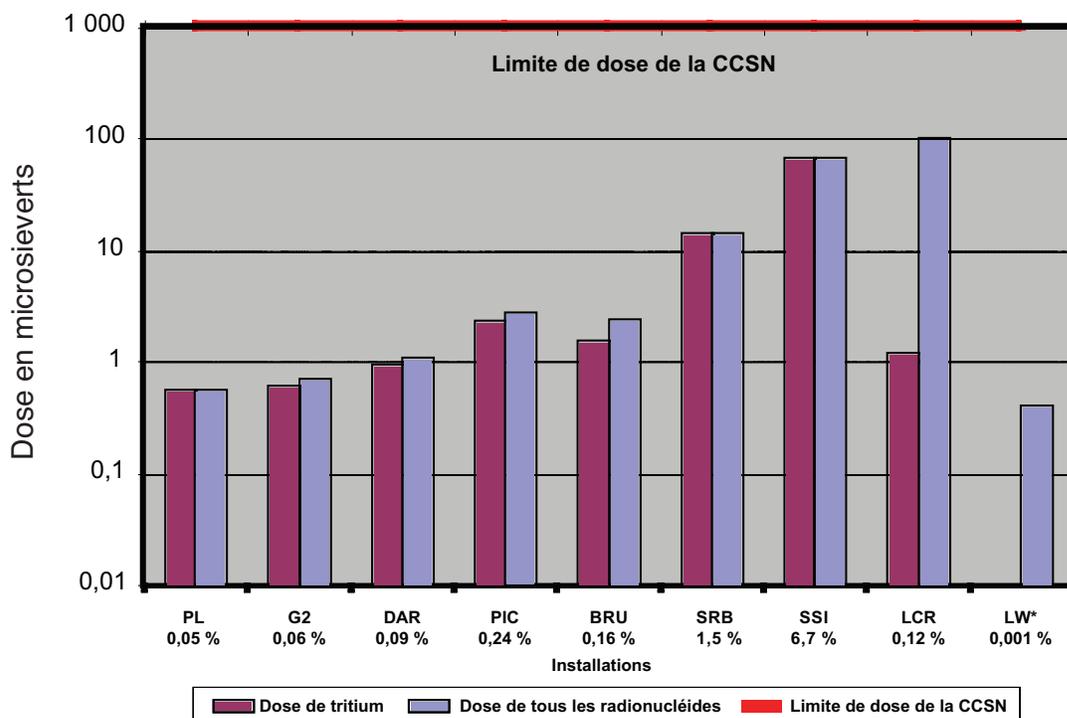
2.1.3 Conséquences sur les doses au public et aux travailleurs du secteur nucléaire

Les concentrations de tritium dans l'environnement sont mesurées (dans l'air, l'eau, la végétation, les animaux et le lait) pour estimer les doses au public vivant à proximité des installations nucléaires. Cela sert à confirmer que les conséquences sur la dose des rejets autorisés ne dépassent pas la limite de dose au public de 1 mSv par année fixée par la CCSN.

En 2006, les doses de rayonnement attribuables à l'exposition au tritium transmises aux personnes vivant à proximité des centrales nucléaires ont varié entre 0,00045 et 0,00236 mSv/an (figure 3). Des estimations réalistes des doses de tritium au public vivant à proximité des installations de traitement ont également été très faibles (0,00001 à 0,0145 mSv/an, à l'exclusion de la dose estimée pour l'installation de SSI, qui a été établie à 0,067 mSv/an sur une base très prudente pour un individu hypothétique).

À l'exception des LCR, l'exposition au tritium compte pour la majeure partie de la dose de rayonnement totale de toutes les installations. Mais, les estimations de l'exposition à ce rayonnement et à d'autres radionucléides sont bien en deçà de la limite de dose réglementaire

Figure 3. Dose de tritium reçue par la population en 2006 comparée à la dose de tous les radionucléides et à la limite de dose à la population fixée par la CCSN (avec en abscisse la dose attribuable au tritium en pourcentage de la limite de dose à la population)

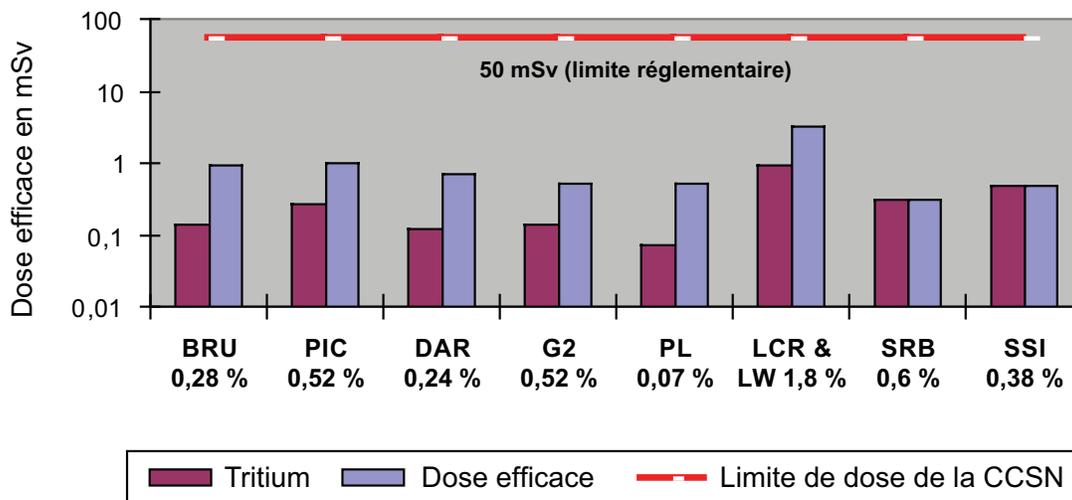


* La dose de tritium au public des LW est de 0,01 µSv/an et, par conséquent, n'est pas représentée sur la figure. Les abréviations sont celles de la figure 1.

pour le tritium, et dans des ordres de grandeur inférieurs aux doses connues pour causer des effets sur la santé.

Les doses de tritium professionnelles (c.-à-d. aux travailleurs) sont décrites sur la figure 4. Les doses aux travailleurs du secteur nucléaire sont comparées à la limite de dose réglementaire annuelle de 50 mSv/an. Ces travailleurs sont également visés par une limite de dose cumulative de 100 mSv sur cinq ans. En 2006, les doses professionnelles moyennes attribuables à l'exposition au tritium ont varié entre 0,07 et 0,26 mSv chez les travailleurs des centrales nucléaires, et entre 0,30 et 0,90 mSv chez les travailleurs des installations de traitement et de recherche. Dans tous les cas, les doses reçues ont été très inférieures aux limites de doses professionnelles annuelles de la CCSN.

Figure 4. Moyenne des doses de tritium et total des doses efficaces de tous les radionucléides aux travailleurs du secteur nucléaire en 2006 comparés à la limite de dose professionnelle annuelle de la CCSN (avec en abscisse la dose attribuable au tritium en pourcentage de la limite de dose professionnelle annuelle)



Les abréviations sont celles de la figure 1.

2.2 Normes et recommandations concernant le tritium dans l'eau potable (INFO-0766)

Ce rapport est une compilation, par le personnel de la CCSN, des normes et recommandations nationales et internationales concernant le tritium dans l'eau potable et de leurs fondements scientifiques et politiques. Les concentrations actuelles de tritium dans l'eau potable au Canada sont également résumées.

Les normes, règlements et recommandations concernant les radionucléides dans l'eau potable adoptés par la majorité des pays sont fondés sur des concepts de radioprotection reconnus à l'échelle internationale, tels que les estimations de dose-risque et les facteurs de conversion de

dose de la CIPR et la dose de référence de 0,1 mSv par an de l'OMS. Conjointement, ces concepts suggèrent d'arrondir la valeur de référence à 7 600 Bq/L. Les *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* fixent une concentration indicative arrondie à 7 000 Bq/L.

Deux exceptions notables à cette approche sont les États-Unis d'Amérique (É.-U.) et l'Union européenne (UE). Les É-U ont adopté en 1976 une limite de concentration du tritium dans l'eau de 20 000 pCi/L (740 Bq/L). Cette limite établie en 1976 est fondée sur des concepts radiologiques différents de ceux de la CIPR et de l'OMS. Les É.-U. tiennent à ce vieux critère pour des raisons de gestion des risques. L'UE a choisi d'utiliser une valeur *indicative* pour le tritium de 100 Bq/L comme paramètre de dépistage, indiquant la présence possible d'autres radionucléides artificiels potentiellement plus nocifs. L'UE n'a pas adopté de paramètre réglementaire de qualité de l'eau pour le tritium.

Au Canada, les concentrations courantes de tritium mesurées dans l'eau potable sont de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à la valeur indicative de 7 000 Bq/L, près des installations nucléaires, et généralement bien en deçà de la valeur de dépistage de 100 Bq/L de l'UE. Les niveaux de tritium sont mesurés de façon routinière dans les sources d'eau potable urbaines. Près des installations nucléaires qui rejettent du tritium, les concentrations dans l'eau potable varient entre moins de 1,9 Bq/L et 20 Bq/L.

Quelques autorités réglementaires ont recommandé d'autres valeurs pour le tritium dans l'eau potable basées sur des niveaux beaucoup plus bas de risque de cancer acceptable estimé pour la durée d'une vie que ceux promulgués par la CIPR dans son cadre de radioprotection globale. En 2006, l'Office of Environmental Health Hazard Assessment de la California Environmental Protection Agency a adopté un objectif de santé publique (OSP) de 400 pCi/L (14,8 Bq/L) pour le tritium dans l'eau potable. Toutefois, ces OSP n'ont aucune valeur réglementaire et ce ne sont que des objectifs sans caractère obligatoire. Ils sont fondés uniquement sur des considérations scientifiques et de santé publique, sans égard au coût économique ou à la faisabilité technique. La Californie continue d'appliquer la limite réglementaire fédérale pour le tritium dans l'eau potable de 20 000 pCi/L ou 740 Bq/L.

En 1994, le Comité consultatif des normes environnementales (CCNE) de l'Ontario a produit un rapport intitulé *A Standard for Tritium. A Recommendation to the Minister of Environment and Energy [of Ontario]*, dans lequel il recommandait une valeur seuil provisoire de 100 Bq/L pour le tritium dans l'eau potable. Un groupe de travail mixte fédéral a été constitué peu après en janvier 1995 pour examiner la recommandation du CCNE. Ce groupe était composé de représentants de la CCEA, des Comités consultatifs de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, de Santé Canada et du Groupe des conseillers médicaux. Ce groupe de travail a conclu que la valeur proposée par le CCNE ne concordait pas avec la position internationale en matière de réglementation. Il a indiqué qu'il penchait plutôt pour la limite de 7 000 Bq/L et a conclu que la stratégie de gestion des risques qui sous-tend les recommandations de 1995 fournissait un degré élevé de protection de la santé². Plusieurs années après, le gouvernement ontarien a officiellement adopté comme norme la recommandation provisoire de 7 000 Bq/L pour le tritium dans le Règlement 242/07 de l'Ontario [MEO, 2007].

La norme ontarienne relative au tritium dans l'eau potable a été réexaminée en 2007 par le successeur du CCNE. Le Conseil consultatif sur les normes de qualité et d'analyse de l'eau potable de l'Ontario a revu la Norme de qualité de l'eau potable de l'Ontario pour le tritium à la demande du ministre de l'Environnement de l'Ontario. En 2009, le Conseil consultatif a recommandé qu'une norme de 20 Bq/L soit adoptée en indiquant qu'elle répondait aux exigences relatives à l'établissement d'un niveau adéquat de risque et de sécurité publique, tout en demeurant pratique et réalisable pour le secteur nucléaire. Le gouvernement de l'Ontario n'a toujours pas répondu à cette recommandation.

2.3 Évaluation des installations de manipulation du tritium (INFO-0796)

Ce rapport présente une compilation des conceptions d'installation et des technologies antipollution employées par les principaux titulaires de permis réglementés par la CCSN qui rejettent du tritium dans l'atmosphère. Il comprend aussi une évaluation par le personnel de la CCSN des meilleures pratiques adoptées par des installations semblables à l'extérieur du Canada. Plus particulièrement, le présent rapport :

- précise les meilleures pratiques de manipulation et de contrôle du tritium au Canada;
- évalue le rendement en matière d'exploitation des producteurs, des transformateurs et des principaux utilisateurs canadiens de tritium;
- compare les pratiques d'exploitation des titulaires de permis d'installations de traitement du tritium canadiens aux meilleures pratiques de l'industrie.

L'évaluation des installations canadiennes visait six titulaires de permis qui produisent ou traitent du tritium, ou qui gèrent des déchets de tritium :

- l'installation de détritiation de Darlington (la plus grande installation de manipulation du tritium au Canada);
- le Laboratoire de tritium de Chalk River, propriété d'Énergie atomique du Canada limitée (qui fournit du tritium aux utilisateurs de tritium d'Ontario Power Generation);
- SRB Technologies (Canada) Inc. (fabricant de sources lumineuses au tritium gazeux);
- Shield Source Inc. (fabricant de sources lumineuses au tritium gazeux);
- Kinectrics Inc. (société de conception technique qui réalise des travaux de développement sur le tritium);
- GE Hitachi Nuclear Energy Canada Inc. (qui travaille actuellement à la conception d'une installation de détritiation).

Trois installations ont également été visitées à l'étranger :

- Royaume-Uni : GE Healthcare Ltd. (installation de récupération du tritium);
- Afrique du Sud : NTP Radioisotopes (Pty) Ltd. (installations de production de radioisotopes et de sources lumineuses au tritium gazeux);
- Suisse : Mb-Microtec AG (fabricant de sources lumineuses au tritium gazeux).

Les résultats sont rapportés dans les treize catégories suivantes : confinement, lits d'adsorption à double paroi, pompes à vide, technologie du vide, pertes dues aux fuites, pertes dues à la purge des canalisations, réduction des émissions, ventilation, conception du point de rejet, récupération du tritium, stockage du tritium, mesure du rendement et rejet dans les égouts.

La conclusion générale de cet examen du personnel de la CCSN est que les pratiques canadiennes actuelles sont comparables à celles qui prévalent à l'étranger. Une gestion efficace du tritium comprend le recours à une grande variété de mécanismes et à des stratégies bien adaptées qui permettent de bien contrôler les concentrations de tritium au moyen de ces mécanismes.

Exemples des meilleures pratiques courantes suivies en diverses combinaisons :

1. Utiliser un équipement à vide à rendement élevé pour la manipulation du tritium gazeux.
2. Se concentrer sur la qualité du confinement, c.-à-d. maintenir une installation pratiquement étanche, ce qui constituera la caractéristique de contrôle la plus importante, grâce à l'utilisation de vannes, conduites et raccords de conduites de grande qualité.
3. Utiliser des lits d'adsorption à l'uranium pour stocker le tritium gazeux.
4. Utiliser des lits d'adsorption au titane pour le stockage à long terme du tritium gazeux.
5. Avoir recours à l'adsorption directe sur des lits d'adsorption, ou à la purge et au piégeage de gaz inertes durant les opérations de traitement. Les rejets intentionnels de tritium gazeux par les canalisations et dans des récipients ne constituent pas une bonne pratique.
6. Utiliser des pompes à spirale sans huile dans la mesure du possible.
7. Éliminer le tritium gazeux et le HTO à l'orifice d'évacuation des pompes à vide, pourvu qu'il y ait un traitement ou une voie d'évacuation pour ce tritium.
8. Réduire les rejets chroniques en ajoutant un confinement secondaire aux lits d'adsorption, particulièrement dans le cas des lits qui sont utilisés à des températures élevées et sur de longues périodes.
9. Se concentrer sur la technologie de réduction des émissions au point de rejet.
10. Utiliser des points de rejets (cheminées) de conception appropriée pour les systèmes de ventilation, afin d'assurer une bonne dispersion du tritium gazeux et de la vapeur d'eau tritiée.

Les pertes actuelles dues aux divers procédés utilisés dans les installations de traitement du tritium sont estimées à :

- 0,01 % pour le transfert du tritium d'un lit d'adsorption à un autre;
- 0,03 % pour les procédés complexes de récupération du tritium;
- 0,40 % pour la fabrication de sources lumineuses au tritium gazeux.

Dans le droit fil de cette évaluation, le rapport indique que les pertes pourraient être mesurées de façon routinière et qu'il serait possible d'établir des mécanismes de mesure du rendement pour faciliter l'amélioration continue des installations canadiennes. Les titulaires de permis seraient tenus de déclarer à la CCSN le pourcentage des pertes dans l'environnement et dans les transferts vers les installations de gestion des déchets. Cela permettrait d'étoffer les données statistiques sur les mécanismes réglementaires de mesure du rendement déjà en place en ce qui concerne les doses aux travailleurs et au public et les niveaux dans l'environnement (p. ex. dans l'eau souterraine). Dans le cas des nouvelles installations, ces mesures du rendement pourraient être utilisées comme des spécifications recherchées.

2.4 Étude sur le devenir environnemental du tritium dans l'atmosphère (INFO-0792)

Ce rapport est le résultat d'un examen de la documentation mené par Ecometrix Inc., en collaboration avec RWDI Air Inc., sur le devenir environnemental et le comportement du tritium dans l'atmosphère et dans les milieux environnementaux de surface. Il présente des comparaisons de l'activité du tritium dans l'air, le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines autour des installations nucléaires, par rapport à des prévisions obtenues à l'aide d'un modèle environnemental normalisé pour le tritium. L'objectif était de passer en revue les connaissances scientifiques actuelles et de fournir des renseignements pratiques et scientifiques sur le comportement du tritium dans l'environnement en vue d'appuyer les approches de réglementation concernant le tritium.

Le tritium est généralement rejeté par les cheminées sous la forme de vapeur d'eau tritiée ou de gaz élémentaire, le HT. Le HT est converti en HTO dans l'environnement par une oxydation chimique ou biologique. La dynamique du comportement du tritium est régie par des phénomènes physiques et chimiques et différents séjours de durée variable dans les milieux environnementaux. Le piégeage du tritium dans l'atmosphère s'effectue par les précipitations, ce qui a des effets sur le sol, la végétation et les eaux souterraines. De nombreux modèles existent pour prédire le devenir des rejets de tritium dans l'atmosphère sous différentes conditions météorologiques et pour les dépôts secs et humides du tritium dans différentes conditions de rejet.

L'examen de la documentation commence par une description des différentes sources anthropiques et naturelles du tritium, de ses formes chimiques et de son comportement physique et chimique dans l'atmosphère. Il résume ensuite le comportement dynamique complet du tritium dans le cycle hydrologique, y compris son transfert de l'air vers le sol et les eaux de surface, du sol vers les eaux souterraines, et son comportement dans les lacs et les rivières. Enfin, le rapport décrit en détail les méthodes de modélisation utilisées pour expliquer la dispersion atmosphérique du tritium provenant de sources ponctuelles et la répartition du tritium (HTO) allant de l'air à l'eau du sol, à l'eau de surface et aux eaux souterraines.

Le rapport se termine par des comparaisons des niveaux observés et prédits d'activité du tritium dans les milieux environnementaux près de plusieurs installations nucléaires. À la lumière de ces comparaisons, la capacité de prédire les concentrations environnementales, d'après les connaissances actuelles du comportement du tritium, fait l'objet d'un examen et

les facteurs contribuant aux incertitudes du modèle sont identifiés. Le modèle de dispersion gaussien à moyenne sur les secteurs décrit dans la norme de l'Association canadienne de normalisation (CSA) N288.1-08 a été appliqué à trois centrales nucléaires et à deux installations de fabrication de sources lumineuses au tritium.

Dans tous les cas de détermination de l'activité du tritium dans l'air, le modèle de la CSA s'est révélé prudent, avec une tendance à la surestimation de la concentration (les valeurs observées se révélant en général deux fois plus faibles que les valeurs prédites). Pour ce qui est des programmes de surveillance de la conformité, les valeurs mesurées sont souvent obtenues à l'aide d'échantillonneurs passifs de grande variabilité inhérente. Des questions demeurent sans réponse dans des études récentes concernant la précision des données sur le tritium dans l'air obtenues à l'aide d'échantillonneurs passifs par comparaison aux échantillonneurs actifs censés fournir des données plus précises, mais qui sont plus difficiles à utiliser. Par conséquent, il est important que les modèles de dispersion atmosphérique (sur lesquels sont basées les estimations de doses) demeurent prudents.

Les concentrations prédites de tritium dans l'eau du sol ont été comparées soit aux concentrations mesurées dans l'eau du sol ou dans l'eau de pluie (étant donné que l'eau dans le sol provient de la pluie et qu'elle devrait être semblable). Dans trois cas, les prévisions étaient légèrement supérieures aux valeurs mesurées (de 35 % à 62 % en moyenne, soit d'un facteur de 2). Dans un cas, le tritium dans l'eau du sol était considérablement surestimé (deux fois plus en moyenne). Lorsque les concentrations dans l'air augmentent ou diminuent rapidement, il faut un certain temps avant que les concentrations de tritium dans l'eau du sol ne changent aussi à la hausse ou à la baisse.

La concentration de tritium estimée par le modèle dans les eaux souterraines a été comparée aux concentrations mesurées dans les eaux souterraines d'une installation. Les valeurs prévues se sont révélées prudentes et de 52 % plus élevées en moyenne (généralement d'un facteur de 3). Les prévisions pour les eaux souterraines peuvent être affectées par de nombreux autres facteurs parfois incontrôlables, tels que les effets de l'accumulation de neige et les variations locales de l'écoulement horizontal des eaux souterraines, des infiltrations verticales et des conditions subsuperficielles. Les concentrations dans les eaux souterraines peuvent prendre un temps considérable, parfois des années, pour réagir aux changements de concentration du tritium dans l'eau du sol à cause de la profondeur des puits et du temps de transport vertical.

La concentration de tritium prévue a été comparée aux concentrations mesurées dans des eaux stagnantes près d'une installation et il a été constaté qu'elle était 28 % plus élevée en moyenne (généralement d'un facteur de 2). Les étangs et les marais peuvent subir des arrivées d'eau de sol ou d'eaux souterraines et pourraient alors ne pas être en équilibre avec les concentrations locales réelles dans l'air.

L'examen et les connaissances scientifiques actuelles appliquées à la prévision des concentrations dans les milieux environnementaux ont permis de tirer les conclusions générales suivantes :

- Le comportement du tritium dans l'atmosphère et dans l'eau est raisonnablement bien compris. Cela inclut la dispersion dans l'air et l'eau, la répartition du tritium

atmosphérique dans l'eau du sol et les eaux de surface et son transfert de l'eau du sol vers les eaux souterraines.

- Les modèles atmosphériques gaussiens à moyenne à long terme sont quelque peu prudents (surestimation) et sont adéquats dans leur utilisation pour estimer les doses aux personnes. Pour la modélisation des événements à court terme ou des rejets dans des terrains complexes, des modèles plus complexes sont disponibles et devraient être utilisés.
- Il semble exister un manque de précision quant à la concentration de tritium dans l'air parmi les données actuelles de surveillance de la conformité, qui a été révélée par des comparaisons entre les résultats des échantillonneurs actifs et des échantillonneurs passifs. Dans certains cas, les résultats des échantillonneurs passifs produisent des résultats presque deux fois plus élevés que pour les échantillonneurs actifs. En attendant que le phénomène soit étudié, les valeurs les plus élevées obtenues avec n'importe quel type d'échantillonneur sont toujours utilisées pour estimer les doses au public.
- Les concentrations dans l'air influent sur les concentrations dans l'eau du sol et dans les eaux souterraines sous le panache atmosphérique à long terme, en supposant qu'il n'y a aucun rejet en amont dans les eaux souterraines.
- Le décalage peut être important entre l'eau du sol et les eaux souterraines étant donné que ces milieux prennent des mois ou des années à s'équilibrer par rapport au panache atmosphérique. Le décalage dans la réaction de ces milieux est particulièrement évident lorsqu'il y a une tendance à long terme dans les concentrations atmosphériques. Ce décalage dépend de la texture du substrat et des temps de trajet vertical.
- L'écoulement des eaux souterraines provenant de l'amont, ainsi que la répartition du tritium dans l'air au-dessus d'un puits peuvent avoir des incidences importantes sur les concentrations de tritium dans l'eau des puits.

Compte tenu des résultats de cet examen et des analyses qui s'y rattachent, le rapport recommande de mener des études en vue de résoudre les écarts entre les valeurs obtenues avec des échantillonneurs passifs et celles obtenues avec des échantillonneurs actifs. Il recommande également de réaliser des études en champ proche de l'air, de l'eau du sol et des eaux souterraines afin de mieux comprendre les décalages entre l'eau du sol et les eaux souterraines, ainsi que l'importance des effets en amont.

2.5 Études sur le devenir environnemental du tritium dans les sols et la végétation

2.5.1 *Taux de tritium dans les produits maraîchers de Pembroke en 2007 et dose à la population* (INFO-0798)

Ce rapport résume les résultats d'une étude réalisée par l'Université d'Ottawa et financée par la CCSN sur la quantité de tritium dans les légumes et les fruits de jardin et dans quelques échantillons de sol correspondants prélevés par le personnel de la CCSN à la mi-août 2007. Les prélèvements ont été faits à Pembroke et dans d'autres régions pour en déterminer les concentrations naturelles. L'échantillonnage s'est fait durant la première saison de croissance, alors que SRBT avait cessé le traitement du tritium après 16 années d'exploitation. L'objectif était de documenter les processus de récupération de l'environnement local, après la fermeture

d'une source de rejet à long terme de tritium dans l'atmosphère. Des données sur des produits maraîchers similaires rassemblées en 2005 par le personnel de la CCSN ont fourni une base de comparaison adéquate. Les doses aux personnes ayant consommé des produits maraîchers locaux ont aussi été calculées.

L'activité de l'eau tritiée dans les produits croissant près de l'installation de SRBT en 2007 était environ 20 fois supérieure au niveau naturel du tritium; ensemble, les niveaux d'activité étaient environ 100 fois inférieurs aux niveaux enregistrés pendant les activités régulières de l'entreprise en 2005. La radioactivité totale du tritium dans les produits maraîchers et les sols a diminué considérablement au fur et à mesure qu'on s'éloignait de l'installation de SRBT. Elle approchait celle du niveau naturel du tritium à environ 3 km (dernier point de prélèvement des échantillons). La dose de tritium reçue par la consommation de fruits et de légumes produits localement a aussi considérablement diminué avec la distance séparant les jardins des installations de SRBT.

Les premières mesures des concentrations de tritium lié aux OBT dans les produits et les sols de surface, effectuées à Pembroke en 2007, n'ont pas révélé d'accumulation significative de tritium attribuable aux émissions passées, mais ont permis de mettre en évidence certains rapports élevés d'OBT par rapport au HTO. Les résultats de la CCSN et de l'Université d'Ottawa pour le HTO correspondaient généralement aux données de surveillance réglementaire communiquées par SRBT. Au total, les concentrations de tritium dans les produits maraîchers et les sols correspondaient aux valeurs attendues basées sur les émissions rapportées par SRBT et sur des modèles pour le tritium dans l'environnement.

En se basant sur les mesures des concentrations de HTO et d'OBT dans les produits de jardin, la dose reçue par les résidents de Pembroke en raison de la consommation de produits locaux était inférieure à 0,004 mSv/an, ce qui est nettement en deçà de la limite de dose au public de 1 mSv/an, et dans des ordres de grandeur inférieurs aux niveaux connus pour causer des effets sur la santé. Cette dose, qui a été de 0,0002 mSv, peut être avantageusement comparée aux doses annuelles de tritium dans les produits maraîchers calculées à partir des échantillons prélevés pour déterminer les concentrations naturelles du tritium.

Dans l'ensemble, l'étude financée par la CCSN a conclu que les concentrations de tritium dans les légumes et fruits de jardins locaux produits à Pembroke en 2005 et 2007 étaient celles prévues. Il n'y a aucune preuve d'une accumulation significative de tritium dans les sols de surface après 16 années d'émissions de tritium par l'installation de SRBT. Toutefois, les mesures d'OBT dans les fruits à Pembroke et dans plusieurs produits d'autres endroits affichant un niveau naturel ont permis de révéler une diversité beaucoup plus grande des rapports OBT/HTO que prévue. Des résultats similaires ont été obtenus dans le cadre des recherches de plus grande envergure effectuées par la CCSN en 2008 et 2009 (voir la section 2.5.2).

2.5.2 *Devenir environnemental du tritium dans le sol et dans la végétation* (étude en cours)

Introduction

Cette étude consiste en des recherches financées par la CCSN et réalisées par l'Université d'Ottawa sur des mesures du tritium total (HTO + OBT) dans les sols, la végétation et les produits d'origine animale en 2008 et 2009, près de quatre sites de rejets continus de tritium dans l'atmosphère. L'objectif était de fournir des mesures indépendantes des quantités de tritium pour valider et/ou améliorer les stratégies de surveillance de la biosphère et des aliments destinés aux humains. Deux sites témoins ont été choisis pour le niveau de radioactivité naturelle, l'un dans une province où existent plusieurs sources anthropiques de tritium, l'Ontario (à Russell, près d'Ottawa), et un site éloigné de toute source anthropique de tritium (à Warman-Langenburg, en Saskatchewan). Près des sources de rejets de tritium dans l'atmosphère, les études ont été menées à quatre installations nucléaires bien établies aux émissions différentes : la centrale nucléaire de Darlington, la centrale nucléaire Gentilly-2 au Québec, l'installation de SRBT et l'installation de SSI. La centrale nucléaire de Darlington est la plus récente au Canada. Elle compte quatre réacteurs CANDU et une installation de récupération du tritium (le HTO est récupéré de l'eau du modérateur pour prolonger la durée de vie de ce dernier).

La centrale nucléaire de Darlington rejette de grandes quantités de HTO et de plus petites quantités de HT. L'activité du tritium dans les eaux souterraines est en deçà des limites de détection; tous les autres sites ont un peu de tritium dans leurs eaux souterraines et, par conséquent, un peu de tritium d'origine anthropique dans le sol sous-jacent. La centrale Gentilly-2 possède un réacteur nucléaire qui rejette du HTO et une installation de gestion des déchets qui émet des rejets passifs de tritium. Les installations de SRBT et de SSI rejettent du HT et du HTO au cours des opérations de traitement. Ces rejets diffèrent de ceux des autres installations en ce sens qu'ils se produisent surtout de façon transitoire, lorsque le traitement du tritium est effectué au cours des heures de travail.

Un objectif clé de cette étude était de détecter toute accumulation potentielle de tritium atmosphérique dans les aliments destinés aux humains ou dans l'environnement autour des sites au long passé de rejets de tritium. Cela a été fait en mesurant l'OBT et le HTO dans divers milieux, y compris les produits d'origine animale et les sols. En général, les programmes de conformité et de surveillance des aliments visent principalement à mesurer le HTO dans les produits de jardins et à mener des travaux restreints dans d'autres contextes. Les données sur l'OBT sont particulièrement rares sur presque tous les plans. Les méthodes actuelles d'évaluation des risques et d'estimation des doses au public (p. ex. le modèle de la norme CSA N288.1-08) sont fondées sur l'hypothèse que le HTO et l'OBT se trouvent en concentrations identiques dans les aliments, lorsque les conditions d'équilibre sont réunies (c.-à-d. qu'il existe un rapport OBT/HTO de 0,7 exprimé en unités équivalentes)⁴. Cette hypothèse n'a été que partiellement vérifiée à la lecture des données de terrain et n'a été testée que dans un nombre limité de contextes. Des résultats récents de mesure de l'OBT dans des zones de rayonnement naturel ont révélé des tendances déroutantes montrant des rapports OBT/HTO³ élevés qui contredisent cette hypothèse importante.

Compte tenu des recherches limitées sur la dynamique du HT dans les sols et les plantes, des études expérimentales ont été effectuées dans des milieux riches en HT, près des cheminées de l'installation de SSI, sur l'absorption du tritium dans les sols et les végétaux d'une serre expérimentale.

Des analyses de laboratoire viennent tout juste de se terminer dans le cadre de ce grand projet. Le personnel de la CCSN examine les résultats intégrés reçus à la fin de mars 2010. Par conséquent, un sommaire uniquement est présenté ci-dessous avec des exemples de données collectées. Une interprétation des résultats des recherches menées par l'Université d'Ottawa sera préparée par le personnel de la CCSN dans un document de la série INFO en 2010, après qu'il aura examiné et résumé les résultats. Comme ceux-ci prêteront à la controverse, le rapport ne sera publié qu'après avoir été examiné par des pairs.

Observations sur les sites de rayonnement naturel

- L'activité du HTO dans l'eau du sol a varié de 1,5 à 3 Bq/L et celle de l'OBT, de 0,9 à 3,6 Bq/kg. L'activité typique du tritium naturel dans les précipitations, laquelle est le reflet du tritium créé par le rayonnement cosmique, est d'environ 1,2-1,8 Bq/L, ce qui est comparable à la radioactivité naturelle mesurée dans les sols.
- L'activité du HTO dans les végétaux a été corrélée à l'activité du HTO dans l'eau du sol. Par contre, l'activité de l'OBT dans les végétaux a souvent été enrichie par rapport à l'eau du sol pour atteindre des valeurs allant jusqu'à 12,2 Bq/L en Ontario et à 19,9 Bq/L en Saskatchewan¹.
- Les résultats dans les zones de rayonnement naturel indiquent que les végétaux pourraient capturer du tritium provenant de l'eau, mais aussi de la matière organique dans le sol (en quantité importante). Il s'agit d'une nouvelle constatation de la science environnementale appliquée au tritium. Par conséquent, une caractérisation plus élaborée des formes de tritium qui demeurent dans le sol après le retrait total de l'eau est nécessaire pour déterminer les mécanismes en jeu. Ce résultat pourrait expliquer les rapports élevés OBT/HTO trouvés parfois lors des mesures de l'activité du tritium dans les zones de rayonnement naturel.

Observations près d'installations nucléaires

- Pour toutes les installations, l'activité du HTO et de l'OBT dans les sols, les fruits, les légumes, le fourrage et les produits d'origine animale approchait généralement des niveaux de rayonnement naturel après plusieurs kilomètres.
- À l'installation de SRBT, l'activité du HTO a plafonné à 225 Bq/L (dans les pommes) et celle de l'OBT, à 210 Bq/kg (dans le sol), à 400 m de l'installation (figures 5 et 6). Les

¹ Les valeurs de l'OBT mesurées en Bq/kg dans la végétation ont été converties en Bq/L équivalents dans l'eau parce que la matière organique des végétaux a été bien caractérisée et qu'il est par conséquent possible d'interpréter directement ces résultats. Les autres valeurs mesurées pour l'OBT sont exprimées en Bq/kg. Il est donc important de faire preuve de prudence en comparant l'OBT au HTO.

niveaux ont approché les niveaux naturels à 6 km. La reprise des activités de traitement du tritium s'est accompagnée de niveaux beaucoup plus bas d'émissions de cheminée que ceux enregistrés dans le passé. Dans l'ensemble, grâce aux contrôles optimisés des rejets mis en place au cours des dernières années, les niveaux d'activité du tritium dans les sols et les végétaux ont été bas et comparables aux résultats obtenus en 2007, en l'absence de traitement du tritium (INFO-0798).

- À l'installation de SSI, l'activité du HTO a plafonné à 1,012 Bq/L et celle de l'OBT, à 208 Bq/kg dans les pommes de terre à 800 m de l'installation. Les niveaux d'activité mesurés à 8 km ont été quelque peu plus élevés que le niveau naturel.
- À la centrale nucléaire de Darlington, l'activité du HTO a culminé à 25 Bq/L (dans les tomates, à 5 km), et celle de l'OBT, à 138 Bq/kg (dans le lait, à 4 km). Les niveaux d'activité mesurés à 6 km ont été quelque peu plus élevés que le niveau naturel.
- À la centrale nucléaire Gentilly-2, l'activité du HTO a plafonné à 25 Bq/L (dans le maïs à 1,5 km), et celle de l'OBT, à 82 Bq/kg (dans les haricots à 9 km). Les niveaux d'activité mesurés à 14 km ont été quelque peu plus élevés que le niveau naturel et comparables au niveau naturel à 20 km.

Les cercles des arbres comme enregistrements de l'activité du tritium atmosphérique

- Une analyse de l'OBT dans les cercles d'arbres récemment abattus et échantillonnés au hasard près des installations de SRBT (à 20 m), de SSI (à 340 m) et de Darlington (à 1 760 m) a été effectuée à titre préliminaire. L'activité de l'OBT (non corrigée pour la désintégration depuis l'année de formation) a plafonné à 25 700 Bq/L à SRBT. La variation d'une année à l'autre de l'activité de l'OBT a été considérable à l'installation de SRBT et partiellement conforme aux tendances pluriannuelles des rejets.
- L'activité de l'OBT a atteint un maximum de 3 000 Bq/L à l'installation de SSI, la plupart des valeurs s'établissant autour de 1 000 Bq/L avec quelques fluctuations au fil des ans. À l'instar de SRBT, les données sur les cercles des arbres ne suivent pas toujours les tendances pluriannuelles des rejets.
- L'activité de l'OBT dans l'arbre examiné près de la centrale nucléaire de Darlington a été très faible et de l'ordre de 15 Bq/L, ou environ cinq fois le niveau naturel, avec une variation minimale d'une année à l'autre. La variation d'une année à l'autre des rejets de tritium de l'installation de Darlington n'a pas été bien représentée dans les cercles de l'arbre.

Études en serre de l'absorption du tritium par les sols et les végétaux

- Au cours de l'expérience principale réalisée en 2009, quatre types de végétaux ont été cultivés en pot et dans trois types de sols : compost de champignons; terreau de rempotage courant constitué de tourbe, de fumier composté et de terre noire; et terreau de rempotage à très haute teneur en matières organiques. Seules les tomates ont poussé et permis de collecter un ensemble complet de données; les autres légumes n'ont pas bien poussé.

- Les concentrations d'OBT étaient proches de celles du HTO, ce qui indique que ces végétaux ont mobilisé la plus grande partie de leur hydrogène du HT et du HTO activement introduits dans le cycle hydrologique, plutôt que dans le stock de matières organiques du sol. Les sols avaient des concentrations comparables à celles du HTO dans les végétaux, mais de très faibles concentrations d'OBT.
- Même en arrosant les végétaux avec de l'eau à faible teneur en tritium, des effets confusionnels d'échange entre le HTO de l'eau du sol et le HTO atmosphérique ont limité l'utilité de l'expérience. Des membranes de diffusion du HT fixées sur des bouteilles remplies de sol ont alors été utilisées pour mesurer avec plus de précision les processus dans les sols.
- La présence d'hydrogénase extracellulaire libre dans le sol a joué un rôle important dans la conversion du HT, mais en général, les taux de conversion dans tous les types de sols ont été comparables aux taux de conversion de l'hydrogène naturel.

Observations générales sur le cycle du tritium dans l'environnement

- Les activités de l'OBT dans les sols et les végétaux ont montré une variabilité beaucoup plus élevée lorsqu'elles ont été comparées aux données correspondantes sur le HTO.
- Les activités du HTO et de l'OBT dans les produits maraîchers peuvent rapidement réagir aux changements des rejets des cheminées.
- Les activités maximales du HTO dans les végétaux ont été plus élevées que dans les sols et les produits d'origine animale, probablement à cause de l'échange rapide de HTO entre la vapeur d'eau et les végétaux.
- Les rapports OBT/HTO calculés pour les sols, les végétaux et les produits d'origine animale ont montré de grandes variations.
- L'activité de l'OBT dans les produits d'origine animale a souvent été amplifiée par rapport à celle du HTO, conséquence de la non-uniformité des concentrations de tritium dans le fourrage produit localement.
- Près des sites nucléaires, les rapports moyens OBT/HTO ont été de l'ordre de 2 à 3 pour les produits végétaux et de 10 pour les produits d'origine animale. Ces rapports sont notablement plus élevés que les valeurs prévues par les modèles physiologiques du comportement du HTO et de l'OBT dans les végétaux et chez les animaux.
- Les études expérimentales n'ont pas révélé de différence significative entre les taux de conversion du HT en HTO et/ou en OBT pour divers sols et végétaux.
- L'OBT dans les cercles des arbres est un indicateur utile des émissions passées dans quelques cas uniquement.

Figure 5. Activité du tritium (HTO) dans l'eau extraite de sols et d'aliments prélevés près de l'installation de SRBT à Pembroke au cours des étés 2008 et 2009. Les points représentent les sols, les produits maraîchers (légumes et fruits), le fourrage et les produits d'origine animale (miel, viande, lait et œufs). L'activité est exprimée en Bq/L (litre d'eau).

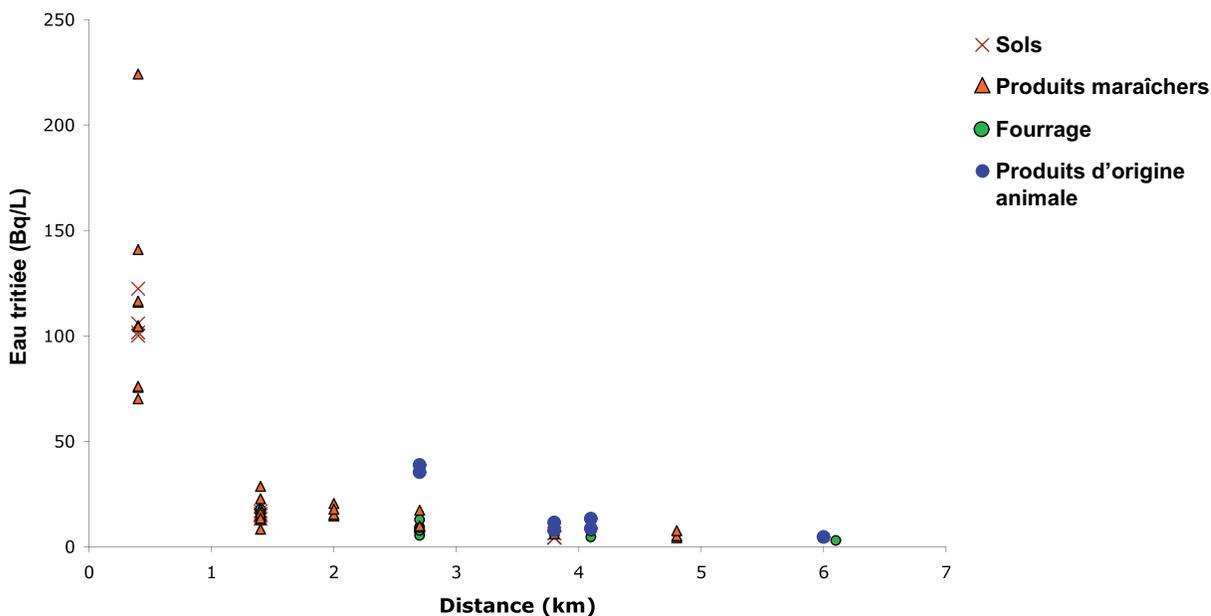
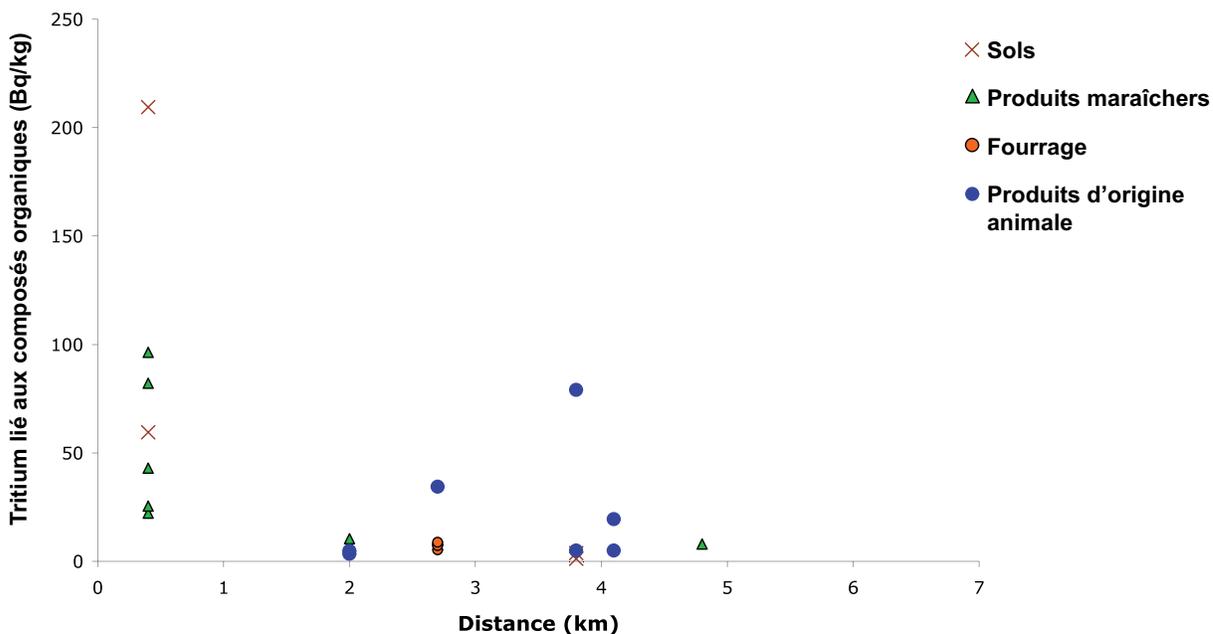


Figure 6. Tritium restant dans les sols et les aliments après extraction de l'eau des échantillons de la figure 5. Ce tritium est lié aux composés organiques dans tous les produits échantillonnés, sauf dans les sols où d'autres formes de tritium peuvent être présentes. Les points représentent les sols, les produits maraîchers (légumes et fruits), le fourrage et les produits d'origine animale (miel, viande, lait et œufs). L'activité est exprimée en Bq/kg (poids frais).



2.6 *Tritium : Effets sur la santé, dosimétrie et radioprotection* (INFO-0799)

Ce rapport présente les résultats d'un examen et d'une évaluation effectués par le personnel de la CCSN des principes et des pratiques de radioprotection concernant le tritium. Il fournit :

- un aperçu des propriétés physiques, chimiques et radiologiques du tritium;
- une analyse détaillée des effets nocifs sur la santé du rayonnement attribuable au tritium, y compris un examen des résultats d'analyses en laboratoire et d'études épidémiologiques;
- un examen des études expérimentales qui fournissent une estimation de l'EBR du rayonnement du tritium;
- une description des modèles biocinétique et dosimétrique du tritium;
- un examen de l'approche adoptée par la CIPR afin de protéger la population contre l'exposition au tritium et éventuellement de modifier le facteur de pondération radiologique (w_R).

2.6.1 Effets sur la santé

À la lumière des vastes recherches épidémiologiques effectuées et de l'absence d'excès de risque associé à l'exposition au rayonnement total, il existe peu de preuves démontrant une fréquence accrue des cas de cancer ou de décès dans les populations exposées au tritium aux concentrations actuelles relevées dans l'environnement et dans les milieux de travail. Devant le manque de données permettant de démontrer un excès de risque dans ces populations, il est raisonnable d'affirmer que tout risque éventuel pour la santé spécifiquement lié au tritium serait négligeable et impossible à distinguer de risques similaires observés dans la population générale.

Études en laboratoires

Des études en laboratoire sur des animaux ont révélé que le tritium, comme d'autres sources de rayonnement, peut nuire au développement de l'embryon ou du fœtus et qu'il peut entraîner des effets génétiques et des effets sur l'appareil reproducteur ainsi que la mort cellulaire, mais seulement s'il est libéré à des doses des millions de fois supérieures à celles auxquelles la population est exposée. Le tritium favorise et induit le cancer chez les animaux dans certaines conditions expérimentales, mais seulement à des doses également élevées. La quantité de tritium requise pour causer ces effets graves est de l'ordre du gigabecquerel (c.-à-d. des milliards d'atomes de tritium se désintégrant et émettant une particule bêta à chaque seconde) par gramme de poids corporel. Ces doses dépassent les 500 millisieverts (mSv). À titre de comparaison, la limite de dose fixée pour la population, pour toutes les sources de rayonnement d'origine humaine autres que médicales, n'est que de 1 mSv par année, et la limite de dose pour les travailleurs est de 50 mSv par année ou 100 mSv par période de cinq ans.

Épidémiologie

Lorsqu'il s'agit d'estimer les risques pour la santé humaine liés à l'exposition au rayonnement, les études épidémiologiques fondées sur des données de bonne qualité concernant l'exposition

représentent la meilleure source. C'est parce que, concernant les humains, ces études évaluent les effets réels sur leur santé résultant de leur exposition au rayonnement.

Dans le cadre de l'examen, un grand nombre d'études épidémiologiques englobant des travailleurs exposés au rayonnement du tritium, leur progéniture et des citoyens vivant à proximité d'installations nucléaires, ainsi que plusieurs recensions de la littérature scientifique faisant autorité, ont été passées en revue. Toutefois, ces études ne contenaient pas suffisamment de renseignements pour estimer directement les risques pour la santé découlant de l'exposition au tritium. Cela s'explique par un manque de données sur les doses spécifiques au tritium, les faibles doses de rayonnement total, un petit nombre de cas d'exposition et une puissance statistique insuffisante.

Les études de populations qui vivent près d'installations nucléaires ont d'importantes limites. Elles ne fournissent aucune preuve des résultats néfastes pour la santé de l'exposition au rayonnement et il est très peu probable que ces études épidémiologiques augmentent de façon significative les connaissances sur les risques pour la santé dus au tritium. De la même façon, en général les études menées sur la progéniture des travailleurs exposés aux rayonnements ne contiennent pas assez de données permettant d'estimer les risques liés à l'exposition au tritium. Les études menées à ce jour sur les travailleurs sous rayonnements fournissent les meilleures données disponibles. Toutefois, quelques études font état de mesures directes de l'exposition au tritium et un plus petit nombre encore ont évalué les risques pour la santé dus au tritium seul. Il est difficile aujourd'hui d'isoler la part de risque attribuable au tritium seul, parce que sa contribution à l'exposition totale est très petite par comparaison aux autres sources de rayonnement.

En évaluant la littérature scientifique, le personnel de la CCSN a pris ces lacunes en considération. Dans l'ensemble, des recherches épidémiologiques approfondies ont été menées et ont révélé un manque de données prouvant l'excès de risque du rayonnement total à de faibles niveaux d'exposition. Pour les populations étudiées, la littérature scientifique fournit également peu de preuves indiquant que les anomalies congénitales, les cas de cancer ou les décès augmentent chez les populations exposées au tritium aux concentrations actuellement relevées dans l'environnement et dans les milieux de travail. Ce manque de preuves d'un excès de risque laisse supposer que tout risque attribuable au tritium uniquement est négligeable et serait difficile à isoler du risque d'effets sur la santé similaires dans la population générale.

Les études épidémiologiques futures devront être spécialement conçues pour fournir plus d'éclaircissements sur les doses de tritium. Elles pourraient s'appuyer sur des études épidémiologiques des travailleurs exposés au tritium uniquement et sur des données dosimétriques de bonne qualité. Toutefois, il n'y a relativement peu de travailleurs sous rayonnement de tritium dans les pays où existent des données pertinentes (Canada, R.-U., É.-U., France). Les expositions au tritium généralement faibles rendent difficile la détection de leurs effets sur la santé avec assurance (autrement dit, les études n'auraient qu'une faible puissance statistique). Il faudrait qu'une étude conjointe soit menée à l'échelle internationale de manière à regrouper les données sur les travailleurs du tritium de divers pays pour avoir la puissance statistique nécessaire à une évaluation précise du risque lié au tritium.

En conclusion, il est très peu probable que les expositions au tritium entraînent des effets néfastes sur la santé des membres du public ou des travailleurs. Les doses auxquelles sont exposés ces groupes sont bien inférieures aux doses de rayonnement dont les effets nocifs sur la santé ont été démontrés :

- Au Canada, les doses auxquelles le public est exposé en raison des rejets de tritium des installations nucléaires sont de beaucoup inférieures à la limite de dose au public. Les doses de rayonnement de tritium reçues par les personnes vivant à proximité d'installations nucléaires canadiennes sont de l'ordre de 0,0001 à 0,1 mSv/année (voir l'INFO-0793 dans une section précédente pour plus d'information). Non seulement ces doses sont bien en dessous de la limite, mais elles sont également négligeables comparativement au rayonnement naturel, y compris celui du radon (qui est d'environ 2 à 3 mSv/année selon l'emplacement géographique).
- Les travailleurs des installations de manipulation du tritium ne reçoivent qu'une petite partie de leurs doses de rayonnement totales; généralement, la dose moyenne totale de ces travailleurs est inférieure à 1 mSv par année.

2.6.2 Efficacité biologique relative

L'EBR est un concept utilisé pour comparer l'efficacité de différents types de rayonnement dans la manière dont ils causent les mêmes effets biologiques. La correction pour l'EBR des différentes formes de rayonnements ionisants facilite l'interprétation des effets des rayonnements en les exprimant au moyen d'une unité spéciale d'équivalent de dose absorbée — le sievert (Sv). Cette unité peut servir à cumuler des effets similaires de différentes formes de rayonnement. Elle est aussi utile dans les études rétrospectives, qui sont effectuées lorsqu'une mesure de dose plus précise est nécessaire. Ordinairement, cela se fait dans les cas d'expositions suffisamment fortes pour exiger un traitement médical. Les valeurs de l'EBR sont également utilisées dans des études épidémiologiques pour établir la meilleure estimation possible de chaque dose individuelle.

La plus grande partie de l'analyse présentée dans le rapport et d'autres examens est axée sur le choix d'une valeur unique qui permettrait de mesurer l'EBR pour le tritium dont il existe plus de 50 estimations différentes. Toutefois, les données radiobiologiques présentent un degré important de variation et d'incertitude, d'où la difficulté de choisir une valeur nominale unique pour l'EBR à des fins de radioprotection. Les estimations de l'EBR pour le tritium diffèrent d'une étude à l'autre pour de nombreuses raisons, mais l'une des sources principales de cette variation est le choix du rayonnement de référence utilisé pour déterminer l'EBR. Deux types de rayonnement de référence (les rayons X et les rayons gamma) sont en général utilisés, et ils ont des EBR différentes.

Les études visant à déterminer une EBR unique pour le rayonnement du tritium indiquent que :

- lorsque les rayons X ont été choisis comme rayonnement de référence, l'EBR serait d'environ 1,4;
- lorsque le rayonnement gamma est le rayonnement de référence, l'EBR serait d'environ 2,2.

Les rayons gamma semblent être le choix privilégié pour les raisons avancées dans la *Publication 92* (2003) de la CIPR, qui s'appuie sur le fait que les principes de radioprotection reposent fortement sur les données d'études concernant les survivants de la bombe atomique et que ces survivants ont été principalement exposés à des rayons gamma. De plus, le rayonnement gamma est habituellement étudié dans la plupart des expériences portant sur les effets des expositions chroniques (de longue durée) au rayonnement, et il est le principal rayonnement auquel les travailleurs sont exposés.

En ce qui concerne les expositions chroniques des travailleurs et du public, l'effet sur la santé le plus pertinent lorsqu'il s'agit de déterminer une EBR est le cancer causé par le rayonnement.

2.6.3 Dosimétrie

Étant donné que le rayonnement attribuable au tritium ne peut pas être mesuré directement, les doses sont habituellement estimées par une évaluation du tritium dans des échantillons biologiques (p. ex. dans l'urine) ou par un échantillonnage environnemental. Une fois que l'estimation de la quantité de tritium dans l'organisme a été établie, la dose peut être calculée à partir de modèles biologiques permettant d'estimer les concentrations de tritium dans les organes et tissus.

Pour estimer la dose résultant de l'incorporation du tritium, les composés contenant du tritium sont souvent classés en deux groupes : ceux qui se comportent comme de l'HTO après avoir pénétré dans l'organisme, et ceux qui se comportent comme de l'OBT après leur pénétration dans l'organisme. Le présent rapport traite également de l'absorption cutanée du tritium par le contact avec des surfaces contaminées par le HT et aborde la question de la biocinétique des composés tritiés durant la grossesse et l'allaitement.

La CIPR recommande deux modèles métaboliques principaux pour l'estimation de la dose attribuable aux composés tritiés :

- 1 Le **modèle HTO de la CIPR**, qui sert à estimer la dose résultant de l'incorporation d'eau tritiée ou d'autres composés tritiés qui se transforment partiellement en HTO, après avoir été absorbés par l'organisme.

Ce modèle est utilisé pour évaluer la dose associée à l'absorption du HTO sous forme de liquide et du HTO formé par l'incorporation, notamment, de gaz tritié (HT), de vapeurs et de gaz d'hydrocarbures tritiés (p. ex. le méthane), et de particules tritiées (p. ex. les particules en suspension dans l'air qui contiennent du tritium). Les composés de cette catégorie qui produisent la plus forte dose par unité d'incorporation sont les particules tritiées de solubilités modérée et faible, ainsi que l'eau tritiée. L'eau tritiée produit, de loin, les doses les plus élevées découlant de l'incorporation de composés tritiés par les travailleurs et le public.

Dans le cas des femmes enceintes, l'incorporation d'eau tritiée ou d'autres composés tritiés entraîne chez le fœtus des doses environ deux fois supérieures à celles produites chez l'adulte, pour une même quantité de tritium incorporée.

2 Le modèle OBT de la CIPR, qui sert à estimer la dose résultant de l'incorporation de divers composés organiques tritiés.

Ce modèle s'applique à l'inhalation et à l'ingestion de tritium lié aux composés organiques, qui entraînent des doses par unité d'incorporation environ deux fois plus grandes que celles associées à l'eau tritiée. Il est utilisé pour l'estimation des doses auxquelles le public est exposé par l'ingestion alimentaire de tritium lié aux composés organiques, par exemple du tritium lié aux nutriments.

Un nouveau modèle (Taylor, 2003) a récemment été proposé pour le HTO. Ce modèle diffère de celui de la CIPR dans la façon dont il traite l'OBT formé dans l'organisme après l'inhalation ou l'ingestion d'eau tritiée. Il ne s'applique qu'aux adultes, et il faudrait l'élargir à différents groupes d'âge avant de l'utiliser dans un cadre de réglementation pour estimer les doses au public. Bien que le modèle OBT de la CIPR semble produire des résultats qui concordent généralement avec les résultats expérimentaux, il ne prend pas en compte les différentes façons dont l'OBT se dépose dans les organes et les tissus. La validation et l'incorporation de modèles, tels que celui de Taylor (2003), en codes machines faciliteraient l'évaluation des doses provenant de l'OBT. En outre, l'élargissement de ce modèle à la population non productive de tous les groupes d'âge, y compris les nourrissons exposés par la voie de l'allaitement maternel, serait utile, en particulier dans les cas d'expositions très fortes, par exemple lors d'accidents. Dans l'ensemble, les modèles de la CIPR fournissent des estimations raisonnables des doses, et donc du risque, en ce qui concerne les expositions au tritium que subissent actuellement la population et les travailleurs.

2.6.4 Options concernant l'évaluation et le contrôle des risques

À titre de groupe le plus influent en matière de radioprotection à l'échelle mondiale, la CIPR a élaboré ce qu'elle juge être un système pratique et applicable de protection radiologique, qui repose sur des bases scientifiques solides et des hypothèses simples. Le Canada et d'autres pays ont largement adopté les principes et les recommandations énoncés dans la *Publication 60* (1991) de la CIPR afin de protéger les travailleurs et le public exposés aux rayonnements (les recommandations de 2007 de la CIPR, dans la *Publication 103*, n'ont pas beaucoup changé depuis celles de 1991).

Le cadre de radioprotection de la CIPR repose sur trois principes clés :

- Justification : les avantages de toute activité utilisant le rayonnement sur les personnes ou la société doivent contrebalancer le dommage qu'il cause;
- Optimisation : les doses doivent demeurer les plus faibles qu'il est raisonnablement possible d'atteindre (le principe ALARA) en prenant en compte les facteurs économiques et sociétaux ainsi que les limitations;

- Application de limites de dose : les doses reçues par les personnes autres que l'exposition médicale d'un patient, ne devraient pas dépasser les limites appropriées spécifiées par la CIPR.

La CIPR a élaboré un système de protection vaste, mais simple, pour mettre ce cadre en œuvre. Ce système permet de cumuler les expositions à tous les types de rayonnement et fournit des limites pour réduire la probabilité de risques stochastiques (comme le cancer) et de risques déterministes (comme le rougissement de la peau et les brûlures dues au rayonnement).

La CIPR a conçu le sievert (Sv) pour mesurer les doses pour tous les rayonnements ionisants. Cette mesure est obtenue en appliquant des facteurs de pondération (w_R) pour tenir compte des divers types de rayonnement (c.-à-d. alpha, bêta et gamma) et des degrés de sensibilité différents des organes et des tissus. Quelques caractéristiques du sievert sont décrites ci-dessous :

- Le sievert est une unité strictement utilisée à des fins de radioprotection.
- Il fournit une unité de dose unique de tous les rayonnements ionisants aux fins d'optimisation et de comparaison aux doses limites.
- À cause des simplifications, le facteur w_R rend compte approximativement de l'efficacité biologique relative du type de rayonnement mesuré et ne constitue par conséquent qu'un indicateur approximatif du risque.
- Les électrons (rayonnement bêta) et les photons ont un facteur de pondération de 1 (un).
- Le facteur w_R ne prend pas en compte la source du rayonnement (p. ex. un appareil de radiographie ou un radioisotope).
- Les doses sont indépendantes du sexe; les doses équivalentes et efficaces sont calculées pour une « personne représentative » en fonction d'une population composée d'hommes et de femmes, de l'ethnicité et de l'âge.
- Le sievert ne doit pas servir à évaluer les doses, lorsque des évaluations de risque ponctuelles sont nécessaires dans le cas, par exemple, de recherches sur des incorporations élevées ou d'études épidémiologiques. Dans ces cas, il faut plutôt utiliser les doses pondérées absorbées par les tissus avec des EBR appropriées. Les caractéristiques des personnes doivent également être prises en compte.

La façon dont la CIPR traite l'exposition au tritium a fait l'objet de critiques. En effet, la CIPR attribue un facteur de pondération w_R de 1 à tous les rayonnements à faible TLE, y compris les rayons bêta du tritium. Cependant, de nombreuses études indiquent que l'EBR dans le cas du tritium provoquant le cancer pourrait être le double de celle correspondant aux autres rayonnements à faible TLE. Le recours à un facteur différent de pondération du rayonnement plus proche des EBR expérimentales permettrait donc de mieux représenter le risque attribuable au rayonnement du tritium. Toutefois :

- L'amélioration de la corrélation avec le risque pourrait être trompeuse étant donné les nombreuses incertitudes reliées aux autres variables importantes propres à chaque personne (sexe, âge, poids, vitesse du métabolisme, prédispositions génétiques, etc.), qui ne sont pas prises en compte dans le système global de radioprotection.

- Ce changement ne cadrerait pas avec le système de radioprotection de la CIPR pour les raisons qui suivent :
 - il n'existe pas d'autre w_R spécifiques aux isotopes;
 - le sievert ne conviendrait pas pour exprimer les doses équivalentes et efficaces;
 - il serait difficile de comparer les pratiques appliquées aux échelles nationale et internationale en matière de radioprotection, parce que l'unité de mesure serait différente.

3 EXAMEN

Le projet Études sur le tritium avait pour but d'augmenter les connaissances sur le tritium afin d'améliorer la surveillance réglementaire. Il a été mis en œuvre à la suite d'une décision de la Commission prise en janvier 2007 de ne pas renouveler le permis d'exploitation d'une installation de traitement du tritium de SRBT à Pembroke (Ontario). La Commission était d'avis que cette société n'avait pas pris toutes les précautions raisonnables pour protéger l'environnement, ni pour contrôler le rejet d'une substance nucléaire radioactive dans l'environnement. La décision de la Commission était surtout motivée par les questions relatives à la protection des eaux souterraines.

Le projet avait quatre objectifs :

- rassembler des données sur l'état et la nature des impacts actuels du tritium;
- évaluer les meilleures pratiques d'ingénierie appliquées au contrôle du tritium;
- examiner le devenir environnemental du tritium rejeté dans l'atmosphère;
- examiner les effets du tritium sur la santé.

Les messages clés rattachés à ces objectifs sont examinés ci-dessous et suivis d'un survol des questions courantes en suspens et d'une étude de leurs conséquences réglementaires.

3.1 État et nature des impacts courants du tritium

Les données compilées sur les impacts de toutes les activités importantes liées au tritium au Canada indiquent que les conséquences sur les doses au public ou aux travailleurs du secteur nucléaire attribuables aux rejets dans l'air et l'eau par les installations de traitement du tritium sont minimales. Les doses ne représentent qu'une faible fraction des limites réglementaires et sont de plusieurs ordres de grandeur en deçà des doses connues pour causer des effets sur la santé. Compte tenu des connaissances actuelles, les rejets de tritium non contrôlés dans le passé dus à des pratiques, à des défaillances ou à des accidents ne posent pas non plus de risque pour la santé du public et des travailleurs. Toutefois, de telles pratiques ont mené à des concentrations élevées inacceptables de tritium dans les eaux souterraines de quelques régions. Cela a eu un impact sur l'environnement (et sur les eaux souterraines comme ressource), ce qui n'est pas conforme à de saines pratiques de protection de l'environnement.

Les rejets de tritium à la plupart des installations sont élevés par rapport au faible taux de production cosmogénique de tritium dans l'atmosphère. Il s'agit d'une valeur conceptuellement élevée puisque l'empreinte globale de l'industrie nucléaire canadienne est faible. Il en découle que la radioactivité du tritium d'origine anthropique peut être facilement détectée et qu'elle est généralisée dans l'environnement des installations nucléaires qui rejettent du tritium. Cette radioactivité diminue rapidement et approche le niveau naturel à quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres des points de rejet. Aux endroits où les centrales nucléaires rejettent de grandes quantités de tritium, le tritium d'origine anthropique est aussi présent à de très faibles concentrations sur des distances considérables. Cela se vérifie dans les masses d'eau de l'Ontario en aval des installations qui rejettent environ 100 TBq ou plus de tritium par an

sous forme liquide (réacteurs nucléaires près des Lacs Huron et Ontario, LCR sur la rivière des Outaouais). Les rejets dans l'atmosphère n'ont eu qu'un très petit impact sur les concentrations de tritium dans l'air, loin des installations nucléaires.

L'activité moyenne du tritium dans les aliments et l'eau potable près des principales installations nucléaires est faible, et comme il a été indiqué plus haut, les conséquences sur les doses à la population sont minimes. Il y a néanmoins des exemples d'activité de tritium dans les milieux environnementaux ou dans les produits alimentaires près d'installations nucléaires de l'ordre de 100 ou bien plus élevé qu'au rayonnement naturel. Ces résultats concordent en général avec les mesures des concentrations de tritium dans les précipitations et ils se retrouvent dans les milieux environnementaux, tels que les eaux de surface et les eaux souterraines. Des données sont maintenant réunies sur le tritium lié aux composés organiques dans les aliments dans le cadre des programmes de surveillance, mais il n'existe encore que très peu de données sur le tritium dans le sol, autres que celles fournies dans les études sur les eaux souterraines.

Les sources urbaines d'eau potable situées près des installations montrent des niveaux d'activité du tritium plusieurs fois plus élevés que le niveau naturel, la valeur la plus grande s'établissant à environ 18 Bq/L. Une activité beaucoup plus élevée est constatée dans quelques puits de résidences près d'installations nucléaires, mais tous ces niveaux sont inférieurs à la recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada, qui est de 7 000 Bq/L. Toutefois, plusieurs de ces puits ne servent pas de sources d'eau potable. Les critères relatifs à l'eau potable au Canada sont fondés sur les principes de protection recommandés par la CIPR et sont semblables à ceux adoptés dans plusieurs pays et provinces, à quelques exceptions près. Un nouveau développement d'importance à ce sujet est la possibilité que la norme ontarienne de 7 000 Bq/L soit abaissée à 20 Bq/L. Si cette nouvelle norme devait être adoptée, l'impact sur la gestion des rejets de tritium par les centrales nucléaires et les installations de traitement du tritium serait considérable. Cela aurait aussi des conséquences majeures sur l'utilisation des eaux souterraines près des zones contaminées.

La contamination des eaux souterraines par le tritium rejeté par les installations nucléaires canadiennes est un nouveau sujet de préoccupation. La plupart des zones d'eaux souterraines contaminées ont été bien caractérisées au cours des dernières années seulement. Les panaches de tritium existants dans les eaux souterraines sont principalement la conséquence des pratiques passées (telles qu'une gestion inappropriée des déchets radioactifs, une conception et une ventilation inadéquates des cheminées) et/ou des défaillances ou des accidents (p. ex. des déversements ou des fuites dans les cuves de combustible), et se situent principalement à l'intérieur des limites des installations autorisées. Une contamination importante des eaux souterraines sur des terres publiques s'est produite aux deux installations de traitement du tritium au Canada (SRBT et SSI) essentiellement par suite du lessivage du tritium dans l'atmosphère par les précipitations. Un tel lessivage se produit également autour des centrales nucléaires, comme le montrent les niveaux élevés d'activité du tritium dans les échantillons de précipitations prélevés sur les sites. Toutefois, les impacts sur les terres publiques autour des centrales nucléaires ont été minimes à cause de la grandeur des zones d'exclusion entourant ces installations. Dans le cadre du projet Études sur le tritium, les limites de rejet imposées dans les permis de SRBT et de SSI ont été considérablement réduites pour prendre en compte les impacts sur les eaux

souterraines et l'absence de zones d'exclusion autour des deux installations de ces deux titulaires de permis.

La contamination des eaux souterraines par le tritium a augmenté, malgré les contrôles réglementaires des rejets, l'application du principe ALARA et les nombreuses mesures prises pour éviter les accidents et les défaillances. Étant donné les constatations du projet sur le devenir du tritium rejeté dans l'atmosphère à cause des activités autorisées, il faut s'attendre à ce que les niveaux de tritium dans l'environnement, près des installations qui rejettent ce radionucléide, soient augmentés au-dessus du niveau naturel sur une distance de quelques kilomètres à plusieurs kilomètres – et cela pourra se produire même pour les rejets contrôlés dans l'atmosphère – à cause du lessivage par les précipitations, ce qui aura également des impacts sur les eaux souterraines locales.

Pour protéger l'environnement, le permis des nouvelles installations nucléaires de catégorie I devra par conséquent énoncer très clairement les mesures spéciales à prendre sur le devenir environnemental et la grande mobilité du tritium. La meilleure façon de procéder serait d'imposer un objectif nominal de protection des eaux souterraines, par exemple dans le périmètre d'une zone délimitée contrôlée par le titulaire de permis. Comme la période radioactive du tritium est de 12,3 ans, toute contamination qui pourrait survenir dans la zone contrôlée aurait des impacts minimums sur l'environnement avoisinant. La distance et le faible taux de migration des eaux souterraines fourniraient un degré raisonnable de protection de l'environnement que viendrait renforcer l'adoption d'un faible niveau nominal d'activité dans les eaux souterraines. Bien qu'il faille tenir compte de nombreux aspects spécifiques aux sites lors de la délimitation de telles zones contrôlées, l'adoption de ce concept dans le cadre de réglementation de la CCSN devrait empêcher la contamination des eaux souterraines par le tritium sur des terres publiques, près des installations qui rejettent du tritium à un niveau qui interdirait l'utilisation de cette ressource comme eau potable. Cette approche proposée permettrait également de s'assurer, grâce aux contrôles réglementaires et à la désintégration radioactive du tritium, que la qualité des eaux souterraines sur le site autorisé ne soit pas affectée à long terme.

Recommandation : *La protection des eaux souterraines serait améliorée en adoptant des exigences de conception pour toutes les nouvelles installations nucléaires de catégorie I qui rejettent du tritium dans l'atmosphère, notamment :*

- *un objectif nominal de 100 Bq/L pour le niveau de tritium dans les eaux souterraines;*
- *une zone contrôlée de taille suffisante dans la zone de contrôle du titulaire de permis pour garantir que l'objectif nominal de 100 Bq/L sera atteint dans le périmètre, compte tenu des rejets de tritium dans l'atmosphère en périodes d'exploitation normales;*
- *un critère de conception des points de rejet (cheminées) pour assurer une dispersion efficace du tritium dans un panache atmosphérique et atténuer la contamination environnementale par transfert vers l'environnement de surface.*

L'eau souterraine est une source d'eau potable essentielle aux générations futures. Il est difficile, voire impossible de la nettoyer lorsqu'elle est contaminée. Par conséquent, l'eau souterraine nécessite une attention particulière en termes de protection contre la dégradation à long terme.

Le personnel recommande donc un niveau de tritium de 100 Bq/L dans l'eau souterraine. Une valeur de 100 Bq/L de tritium pour la protection d'une source potentielle d'eau potable représente une prise en compte équilibrée des facteurs scientifiques, de la politique sur la santé publique, de la faisabilité et des attentes sociétales. Plus particulièrement, la société s'attend à ce que l'eau potable soit non seulement sécuritaire, mais également « propre ».

Il est reconnu que la ligne directrice canadienne actuelle de 7 000 Bq/L pour l'eau potable est sécuritaire (0,1 mSv par an pour cette voie critique comparée à la limite de dose intégrée du public de 1 mSv par an fixée par la CCSN). Cela signifie qu'aucun effet sur la santé n'est prévu à ce niveau. En ce qui concerne le processus d'autorisation de la CCSN, un objectif de protection de l'eau souterraine de 100 Bq/L s'harmonise davantage avec l'exigence de la LSRN visant à prendre toutes les mesures raisonnables pour contrôler le rejet de substances nucléaires et de substances radioactives sur le site de l'activité autorisée et dans l'environnement. De plus, la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE, 1999) souligne l'importance de s'employer à atteindre le plus haut niveau de qualité environnementale. La LCPE identifie la prévention de la pollution comme un objectif national et une approche prioritaire de la protection de l'environnement.

Compte tenu des résultats d'une analyse détaillée des niveaux de tritium dans l'eau souterraine aux alentours d'installations nucléaires de catégorie 1 qui rejettent du tritium, et des circonstances qui ont mené à la contamination de l'eau souterraine par le tritium, il a été déterminé qu'un objectif de 100 Bq/L pour la protection de l'eau souterraine était pratique et réalisable. La majeure partie de l'industrie a déjà adopté ce niveau de tritium comme objectif volontaire pour la protection de l'eau potable. Cet objectif pourrait également être atteint pour les nouveaux réacteurs nucléaires prévus sur le site de la centrale de Darlington, compte tenu d'une zone contrôlée pour la protection de l'eau souterraine autour de l'installation.

Pendant l'exécution du processus visant à établir un objectif de protection de l'eau potable pour répondre aux besoins réglementaires de la CCSN, le personnel a également tenu compte des objectifs de santé publique fixés par l'OMS et Santé Canada en ce qui concerne les substances cancérigènes chimiques sans seuil d'exposition dans l'eau potable. Ces organisations ont jugé qu'un risque de cancer se situant entre un sur cent mille et un sur un million (de 1×10^{-5} à 1×10^{-6}) constituait un risque à vie « essentiellement négligeable ». Selon le cadre de la CIPR (y compris le modèle linéaire sans seuil d'exposition), un niveau de 100 Bq/L dans l'eau potable représente un risque de cancer à vie essentiellement négligeable de cinq sur un million (5×10^{-6}). Bien que ces objectifs aient rarement été appliqués aux radionucléides (p. ex. l'objectif de santé publique de la Californie pour le tritium, tel qu'illustré dans le document INFO-0766), leur utilisation pour le tritium, en tant que principal contributeur à la dose du public au Canada tel qu'indiqué dans le document INFO-0793, est appropriée.

La contamination des eaux souterraines dans les zones contrôlées des installations autorisées (centrales nucléaires et LCR d'EACL) a augmenté à cause de diverses pratiques passées, telles que l'évacuation directe autorisée des eaux usées contaminées dans le sol, d'accidents (p. ex. des déversements) et de défaillances (fuites dans les cuves de combustible, la tuyauterie et les enceintes de confinement). Depuis l'entrée en vigueur en 2000 de la LSRN, la CCSN a les

pouvoirs réglementaires nécessaires (p. ex. alinéas 2(1)c) et f) du *Règlement général sur la sûreté et la réglementation nucléaires* et l'article 6 du *Règlement sur les installations nucléaires de catégorie I*) pour interdire des pratiques démodées de gestion des eaux usées et exiger la mise en place de contrôles techniques (p. ex. le confinement secondaire) et administratifs (p. ex. surveillance et entretien préventif) pour empêcher ou maintenir au minimum la fréquence des accidents ou des défaillances. Dans les zones de contamination importante continue des eaux souterraines, la CCSN a exigé des titulaires qu'ils mettent en œuvre des mesures correctives. À l'appui du nettoyage et d'autres mesures correctives, le personnel de la CCSN élabore une ébauche de guide réglementaire destiné à orienter les titulaires sur les évaluations à effectuer sur les sites contaminés.

Une question entourant la réglementation du tritium demeure en suspens. Il s'agit de l'utilisation future des eaux souterraines dans les installations qui rejettent du tritium et dont les pratiques et les défaillances ou les accidents ont dans le passé mené à la contamination de ces eaux. La protection contre une source de rayonnement est un problème émergent suscitant plusieurs considérations relativement aux sites et au contexte qui doivent faire l'objet d'une attention concernant la réglementation. La contamination inattendue des eaux souterraines par le tritium aux installations de traitement du tritium a été l'un des principaux facteurs à l'origine de ce projet. L'utilisation raisonnable des ressources en eau souterraine doit par conséquent être abordée dans le cadre de la délivrance des permis d'exploitation des installations de traitement du tritium. Des critères liés à ces considérations doivent être élaborés parce qu'il existe peu de précédents sur l'établissement de critères transparents.

Recommandation : *Que la CCSN aborde au palier politique les questions entourant la protection des eaux souterraines à proximité des installations existantes, en consultation avec les provinces, lesquelles exercent une compétence juridique sur ces ressources. Dans l'intervalle, le personnel de la CCSN pourrait élaborer des ébauches de documents réglementaires, qui formuleraient des attentes en matière de protection des eaux souterraines et fourniraient une orientation sur l'évaluation des sites contaminés en vue d'appuyer l'assainissement et l'adoption d'autres mesures correctives.*

3.2 Examen des meilleures pratiques d'ingénierie pour la surveillance du tritium

Le secteur du traitement du tritium à l'échelle internationale gère les rejets de ce radioisotope au moyen de divers mécanismes et stratégies. Des pratiques exemplaires et efficaces sont suivies pour maintenir au minimum l'exposition des travailleurs et surveiller les rejets dans l'environnement. Une surveillance stricte de ces rejets aux points d'émission est à la fois possible et pratique, et est couramment exercée. Une conception appropriée des points de rejet (cheminées) et des systèmes de ventilation est un important aspect des meilleures pratiques, et plusieurs codes et normes adéquats sont disponibles à cette fin.

Les installations canadiennes utilisent aujourd'hui diverses pratiques exemplaires pour atteindre des niveaux de contrôle suffisants à la source. La dilution et la dispersion des rejets par les cheminées sont également satisfaisantes. Dans le cas de SRBT et de SSI, les améliorations sur le plan des pratiques exemplaires ont été imposées au moyen de mesures réglementaires visant à resserrer les contrôles et à améliorer les systèmes de ventilation. Ces mesures ont été

prises avant le lancement du projet Études sur le tritium de même que parallèlement à celui-ci, mais il y a place encore à une amélioration continue. Les meilleures pratiques identifiées dans cet examen fournissent une base solide pour continuer à réglementer les conceptions d'installations nouvelles ou rénovées. Le programme courant de délivrance de permis et de surveillance de la conformité de la CCSN convient à ces fins et peut être guidé par les renseignements obtenus dans le cadre de cet examen.

Recommandation : *Ces constatations devraient être prises en compte à l'étape de la conception des installations de manipulation du tritium nouvelles ou rénovées afin de s'assurer que les meilleures pratiques soient intégrées à chaque opération de transformation. Le personnel de la CCSN devrait utiliser ce rapport dans le cadre de son examen de la pratique réglementaire visant le tritium. Sur un plan plus particulier, les points de rejets (cheminées) devraient être conçus conformément aux codes et aux recommandations disponibles de manière à assurer une dispersion efficace des rejets de tritium dans l'atmosphère.*

Il est aussi recommandé de rassembler des données statistiques de rendement sur les quantités de tritium perdues par rapport au tritium traité par les installations existantes et futures afin de faciliter l'amélioration continue et le resserrement de la surveillance réglementaire. Ces données statistiques n'ont pas été réunies de façon routinière parce qu'il n'y a pas de mécanisme en place de collecte ou de déclaration connexe.

3.3 Études sur le devenir du tritium rejeté dans l'atmosphère

3.3.1 Connaissances scientifiques actuelles

Le devenir du tritium après son rejet dans l'atmosphère par les cheminées des installations nucléaires est bien compris, comme l'a montré un examen exhaustif des connaissances scientifiques actuelles. À des fins de réglementation, les niveaux d'activité d'équilibre à long terme dans l'environnement peuvent être prévus, avec une prudence raisonnable, dans l'air, l'eau, la végétation, les sols, etc. à l'aide du modèle de la norme CSA N288.1-08. Il s'agit d'un modèle généralement utilisé au Canada. Les prédictions du modèle concordent mieux avec les valeurs mesurées à des distances éloignées des points de rejet (p. ex. > 1 km), mais des déductions utiles peuvent être faites pour des distances de quelques centaines de mètres. Dans l'ensemble, les données récentes de surveillance environnementale de cinq installations canadiennes concordent avec les prévisions du modèle de la CSA.

Il existe néanmoins des lacunes pour ce qui est de la compréhension du comportement du tritium dans l'environnement. Ces lacunes portent sur la dynamique à long terme du tritium dans les eaux souterraines et sur la dynamique à court terme à la surface dans l'air, la végétation, les eaux de surface, le sol, etc. Plus particulièrement, les impacts des rejets variables typiques des installations de traitement du tritium sur la formation et la rétention de l'OBT dans les sols et les plantes ont été très peu étudiés. Des modèles dynamiques simples ont été jusqu'ici élaborés pour des rejets accidentels, principalement dans le but de prévoir le comportement du HTO dans l'environnement. Des modèles améliorés sont en cours de développement dans le cadre du Programme de surveillance environnementale de la sûreté des rayonnements II de

l'Agence internationale de l'énergie atomique. Ces modèles ne seront disponibles que dans quelques années. Le personnel de la CCSN doit continuer de participer activement à cette initiative internationale.

La validation des rejets de tritium par les modèles de dispersion dans l'atmosphère présente une lacune mineure en ce qui a trait à l'application réglementaire des techniques disponibles. Cette validation consiste habituellement en un contrôle combiné aux cheminées et dans l'air, à diverses distances des cheminées. Des échantillonneurs passifs sont généralement utilisés pour contrôler l'air, mais ils ne conviennent que pour s'assurer que les doses au public sont très petites dans cette voie de dispersion. Toutefois, il existe des écarts dans les niveaux d'activité du tritium mesurés à l'aide de différentes techniques. Par conséquent, il a été difficile d'obtenir des mesures précises de ces faibles doses. Pour cela et d'autres raisons, les modèles de dispersion du tritium dans l'atmosphère sont structurés de manière à donner des valeurs prudentes en surestimant les doses au public. Les problèmes techniques que posent les divers types d'échantillonneurs ne sont pas résolus après plusieurs années de recherche du Groupe des propriétaires de CANDU. Même si les estimations des doses au public ne seraient pas modifiées de façon significative, les améliorations à apporter aux échantillonneurs passifs sont souhaitables. L'emploi de ce type d'échantillonneurs étalonnés individuellement semble être la meilleure solution pendant que les recherches se poursuivent sur ces appareils. De même, il y aurait lieu de chercher à améliorer la collecte des données pour obtenir des renseignements plus complets sur le fonctionnement des échantillonneurs actifs afin de diminuer les incertitudes sur les mesures du HTO et du HT dans l'air.

Recommandation : *Que la CCSN entreprenne des travaux visant à déterminer quels facteurs doivent être pris en considération afin d'étalonner adéquatement les échantillonneurs d'air actifs et passifs pour le tritium. Dans l'intervalle, les titulaires de permis seraient invités à fournir des données concernant l'incertitude sur les mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes de surveillance.*

3.3.2 Recherche sur les sols et la végétation

Avant que ce projet ne soit lancé, très peu d'études sur le tritium dans l'environnement étaient menées près des installations de traitement du tritium, lesquelles rejettent principalement du HT, alors que les autres installations nucléaires rejettent essentiellement, sinon uniquement, du HTO. Le HT est lentement converti en HTO par des bactéries du sol et il est ensuite impossible à distinguer du HTO rejeté directement dans l'environnement. Par conséquent, les connaissances sur le devenir du HT dans le sol peuvent être importantes s'il est rejeté en très grandes quantités.

À l'instar du devenir du HT dans l'interface entre le sol et l'air, on sait très peu de choses sur le devenir du HTO dans le sol par rapport à la formation d'OBT ou d'autres formes de tritium (p. ex. des complexes avec un sol minéral). Par contre, la dynamique du HTO et son incorporation à l'OBT dans les végétaux sont bien documentées. Concernant les végétaux, les lacunes dans les connaissances scientifiques portent principalement sur la façon dont l'OBT est formé dans différentes conditions, d'où les études financées par la CCSN confiées à l'Université d'Ottawa dans le but d'apporter des clarifications sur quelques manques de connaissances du comportement du tritium dans les sols et les végétaux, près d'installations

en exploitation représentatives. Ces études ont aussi servi à obtenir des données indépendantes sur le tritium autour des installations nucléaires afin de les comparer avec des données similaires transmises à la CCSN par les titulaires de permis.

État de l'environnement à Pembroke en 2007-2009

Les études environnementales menées en 2007 à Pembroke ont permis de documenter une récupération rapide au cours de la première saison de croissance, après une réduction considérable des rejets de SRBT à partir de février 2007. SRBT a constamment rejeté du tritium dans l'atmosphère pendant 16 ans, sous la forme de HT principalement. Globalement, il n'existe pas de preuve d'accumulation ou de mobilisation importante du tritium (ou d'accumulation d'OBT) dans les sols de surface, après l'arrêt des rejets dans l'atmosphère. À notre connaissance, c'est la première fois qu'il a été possible de vérifier directement l'existence de tels processus. Des faibles activités de tritium ont été observées dans les sols, les plantes et les produits d'origine animale en 2008 et 2009, après la reprise du traitement. Ces résultats concordent avec les attentes si on se base sur la surveillance très efficace des rejets de tritium qui a été exercée lorsque le traitement a repris en 2008.

En 2007, à Pembroke et dans les études élargies en 2008 et 2009 à plusieurs autres sites, une forme de tritium qui pourrait être nouvelle a été détectée dans les sols au moyen de la spectroscopie de masse et de techniques de combustion. Ce tritium peut être organique, mais il est plus probable qu'il puisse prendre des formes de tritium séquestré dans la composante minérale des sols. Cette constatation est nouvelle, bien qu'on sache déjà que les argiles ont la capacité d'adsorber et de retenir fortement le tritium. Les résultats obtenus pour les sols doivent être approfondis pour mieux documenter la nature du tritium qui reste dans le sol, après que le HTO a été enlevé. Cette nouvelle constatation indique que le tritium est présent sous diverses formes en plus de l'OBT. Étant donné la faible activité du HTO dans les végétaux cultivés à Pembroke de 2007 à 2009, ce tritium dans le sol ne semble pas directement assimilable par les végétaux, car autrement des niveaux d'activité plus élevés de HTO et/ou d'OBT dans les végétaux auraient été mesurés au cours des dernières années. Il en ressort que cette nouvelle constatation n'a pas d'incidence réglementaire pour les installations qui, depuis longtemps, ont rejeté de grandes quantités de tritium.

Les études menées sur des produits maraîchers à Pembroke ont révélé l'existence de relations entre le HTO dans l'air, les sols et les végétaux qui concordent avec celles publiées dans la littérature scientifique et celles des modèles environnementaux réglementaires. L'activité du HTO et de l'OBT a diminué avec la distance à l'installation de SRBT, comme il a été prévu compte tenu de la dispersion atmosphérique. L'activité du HTO dans les produits maraîchers a été très faible par comparaison aux années précédentes, alors que SRBT rejetait de grandes quantités de tritium et, par conséquent, les doses au public résultant de la consommation de légumes locaux ont été très faibles. Dans l'ensemble, l'environnement de surface ne présente pas de problèmes hérités du passé en ce qui a trait à la protection de la santé humaine ou de l'environnement. Toutefois, l'utilisation raisonnable future des eaux souterraines contaminées à Pembroke reste un problème potentiel. Il faudra peut-être résoudre rapidement ce problème, si la norme de qualité de l'eau potable de l'Ontario devait être radicalement abaissée. Cela dépendra de la décision de l'Ontario de désigner les eaux souterraines de Pembroke comme

une ressource à protéger et/ou à assainir pour les rendre conformes aux nouvelles normes. Actuellement, le resserrement par la CCSN de la surveillance réglementaire de l'installation de SRBT a entraîné d'importantes réductions des rejets de tritium dans l'environnement. Les limites de rejet imposées dans le permis ont été établies dans le but de protéger les eaux souterraines. En conséquence, les rejets de SRBT ne devraient pas empêcher l'utilisation future des ressources en eaux souterraines à Pembroke, même si les normes actuelles pour l'eau potable sont maintenues. L'activité du tritium dans les eaux souterraines devrait diminuer avec le temps à cause de la désintégration de ce radioisotope.

Dans cette étude et les études élargies à plusieurs sites en 2008 et 2009, la grande majorité des résultats concernant l'activité du HTO dans l'environnement concordent avec les données de conformité plus restreintes pour le HTO fournies à la CCSN par les titulaires de permis. Ces données sont essentielles pour démontrer que la limite de dose au public n'est pas dépassée en cours d'exploitation normale des installations nucléaires. Les résultats concernant l'OBT ont aussi généralement concorde avec les résultats sur le HTO, avec quelques exceptions qui sont abordées dans la section suivante. Dans l'ensemble, l'activité actuelle du tritium près des installations nucléaires est faible et semblable aux niveaux d'activité de 2006 (INFO-0793). Il est donc possible d'affirmer que le tritium d'origine anthropique au Canada ne contribue pas significativement à l'exposition du public aux rayonnements ionisants par rapport aux niveaux naturels et ne représente qu'une fraction négligeable de la limite de dose au public de 1 mSv par an.

Le tritium lié aux composés organiques

Les résultats sur l'OBT obtenus près des installations caractérisées par des réservoirs et/ou des sources et des régimes différents de rejet de tritium ont révélé des niveaux élevés inattendus d'OBT par rapport au HTO dans les sols et dans un petit nombre de produits alimentaires. Des valeurs extrêmes ont été facilement mesurées à des sites où il n'y a qu'un rayonnement naturel, ce qui reflète la capacité de ces analyses à mesurer le tritium séquestré dans le sol (à l'époque d'essais nucléaires) en l'absence d'autres sources confusionnelles de tritium d'origine anthropique. Près des installations à rejets variables, les fruits et quelques produits d'origine animale contenaient parfois des concentrations élevées d'OBT par rapport au HTO. Les rapports OBT/HTO faibles ont été plus rares. Des rapports OBT/HTO plus élevés que prévus ont aussi été observés par d'autres, mais dans des contextes⁴ plus restreints. En conséquence, les rapports OBT/HTO moyens peuvent être plus élevés que prévus et semblent clairement plus variables que ne le laissent présumer les modèles courants de comportement du tritium. Cette question a été relevée par la communauté scientifique et fait l'objet de recherches au Canada (Groupe de propriétaires de CANDU, Énergie atomique du Canada limitée) et à l'étranger (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et d'autres organismes).

Dans le contexte actuel des faibles rejets dans l'atmosphère par les installations nucléaires canadiennes, les concentrations relativement élevées d'OBT dans quelques produits alimentaires cultivés localement n'ont pas de conséquences sur la santé et la sécurité, parce que les doses demeurent très faibles (INFO-0793). Lorsque de nouveaux résultats des études auront été confirmés, les rapports OBT/HTO estimés par défaut dans les sols, les végétaux et les produits

d'origine animale à l'aide des modèles de transfert environnemental du tritium pourraient devoir être révisés.

Recommandation : *Bien qu'en général, les rapports OBT/HTO aient été voisins de 1 (un), il y avait une grande variabilité dans les rapports mesurés près des installations nucléaires. À court terme, le personnel de la CCSN recommande que les titulaires de permis pour les installations qui rejettent du tritium accompagnent d'une analyse de sensibilité leurs calculs des doses au public et que les modèles prennent en compte les conséquences sur les doses d'un rapport OBT/HTO maximum de 3 dans les produits maraîchers et le fourrage cultivés localement, et d'un rapport OBT/HTO maximum de 10 dans les produits dérivés d'animaux d'élevage locaux (viande, lait et œufs).*

Il est également recommandé que le personnel de la CCSN poursuive son programme de recherche dans ce domaine pour mieux comprendre les mécanismes que sous-tendent ces rapports OBT/HTO observés. Le personnel de la CCSN devrait collaborer avec d'autres organismes nationaux et internationaux pour élaborer des procédures plus normalisées d'analyse de l'OBT dans divers milieux environnementaux. Étant donné la complexité de ces mesures, les comparaisons entre laboratoires sont particulièrement importantes.

3.4 Examen des risques pour la santé que pose le tritium

Des examens majeurs des risques pour la santé posés par le tritium, dans le contexte de la littérature scientifique et des pratiques de radioprotection courantes, ont été effectués par des groupes faisant autorité au cours des dernières années. L'examen de cet aspect par le personnel de la CCSN constitue une évaluation supplémentaire indépendante et exhaustive de la littérature originale. Les constatations suivantes sont bien documentées dans cet examen :

- Selon les données probantes tirées aussi bien des études épidémiologiques que des études en laboratoire, la probabilité que les expositions au tritium aient des effets néfastes sur la santé, aux niveaux actuellement observés au Canada, est très faible.
- Les résultats de plus de 50 études expérimentales concernant la détermination d'une EBR unique pour le tritium confirment que les rayons bêta du tritium ont une efficacité biologique environ 1,4 fois supérieure à celle des rayons X de 250 kV_p et environ 2,2 fois plus efficace biologiquement que le rayonnement des rayons gamma.
- Le recours à une EBR de 1 dans le cadre actuel de radioprotection prévu par la CIPR n'a pas entraîné de diminution de la protection offerte aux travailleurs ou aux membres de la population. En effet, la mise en vigueur de mesures d'optimisation s'est traduite par des expositions au tritium qui sont très faibles et bien inférieures aux doses auxquelles on observe une hausse du risque de cancer.
- Les modèles dosimétrique et biocinétique utilisés actuellement pour évaluer les doses sont acceptables à des fins de radioprotection.

Dans le contexte de la radioprotection, ces constatations indiquent que le cadre de réglementation actuel du Canada permet de contrôler efficacement l'exposition au tritium.

Recommandation : *Pour combler les manques de connaissance des risques potentiels pour la santé que pose l'exposition au tritium sur toute une vie et à faibles doses, les études épidémiologiques sur le tritium sont toujours justifiées. Il est recommandé que le personnel de la CCSN poursuive son programme de recherche dans ce domaine et accorde une importance particulière : (1) à la conduite d'une étude de cohortes internationale de la mortalité et de l'incidence du cancer chez les travailleurs du secteur nucléaire, et (2) à des études de cas-témoins de cancers et d'anomalies congénitales dues à l'exposition in utero de la progéniture des travailleurs canadiens du secteur nucléaire. À cette fin, le personnel de la CCSN propose d'établir un groupe de travail sur le tritium, formé de représentants d'organismes de santé publique, de registres des cancers, d'universités et d'organisations non gouvernementales pour concevoir et examiner les études nationales et internationales proposées.*

Ce groupe de travail pourrait examiner aussi la possibilité de mener des études supplémentaires de la relation dose-réponse dans le but d'évaluer les effets importants du rayonnement du tritium tels que le cancer. Des estimations de l'efficacité biologique relative du rayonnement sur les organes devraient être évaluées du point de vue de leur contribution à la production de meilleures données pour l'évaluation de cas individuels de grande incorporation du tritium.

Même si les doses reçues sur l'exposition au tritium sont faibles, d'autres recherches pourraient se révéler utiles aux études épidémiologiques et à la dosimétrie individuelle pour confirmer que les modèles biocinétiques sont adéquats et réduire les incertitudes. Des études dans les domaines suivants doivent être envisagées :

- Pour étudier la rétention de l'OBT chez les enfants et les effets de la croissance des organes sur la rétention de l'OBT, un modèle biocinétique qui tienne compte de l'âge pour la détermination de l'incorporation d'OBT dans les aliments devrait être élaboré. Ce modèle pourrait prendre en compte tous les groupes d'âge, y compris les nourrissons, et les variations physiologiques et anatomiques liées à l'âge.*
- Le modèle biocinétique de Taylor pour le HTO devrait être évalué en fonction d'un ensemble plus vaste de données sur les humains dans le but d'augmenter les connaissances sur les conséquences de la variation dans les données limitées. Une telle évaluation pourrait être effectuée en comparant les données d'échantillons d'urine des travailleurs exposés à l'eau tritiée.*
- Le modèle biocinétique de Taylor pour le HTO s'applique aux adultes. Aux fins de l'évaluation des doses au public, il faudrait élargir le modèle à divers groupes d'âge.*

Des préoccupations au sujet du manque de représentativité pour le risque en ce qui concerne le facteur de pondération du rayonnement ont été soulevées par d'autres, notamment le groupe consultatif du R.-U. sur les rayonnements ionisants. Le groupe de travail proposé pourrait aussi examiner le facteur de pondération des rayonnements à faible TLE tels que celui du tritium.

4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La conclusion principale du projet est que des dispositions adéquates ont été prises dans le cadre des mécanismes réglementaires existants de protection de la santé et de la sécurité des Canadiens contre le tritium. Les pratiques canadiennes de manipulation et de contrôle du tritium sont actuellement comparables à celles des installations à l'étranger, et un contrôle efficace est exercé au moyen de divers mécanismes.

Des contrôles efficaces sont maintenant uniformément en place dans le secteur nucléaire canadien grâce aux mesures de surveillance de la conformité et d'application des règlements prises dans les deux installations de traitement du tritium auparavant autorisées en vertu de permis de possession de radioisotopes conformément à la LCEA. Cet effort a été réalisé à la suite de considérations entourant la protection de l'environnement ajoutées au mandat élargi de la CCSN, après la promulgation en 2000 de la LSRN. Il reste à résoudre les problèmes de contamination des eaux souterraines par le tritium hérités du passé à ces deux installations et à d'autres sites nucléaires, mais des mesures de gestion et de surveillance sont en place et sont efficaces. Dans l'ensemble, la gestion du tritium et des rejets d'exploitation courante suit les meilleures pratiques internationales et comporte un niveau élevé de contrôle. Les contrôles sont donc adéquats et les conséquences des rejets sur l'environnement et sur les doses au public sont en général aussi faibles qu'il soit raisonnablement possible et semblent proches du minimum qu'il soit possible de réaliser.

La surveillance de l'environnement est une deuxième exigence fondamentale imposée aux titulaires de permis délivrés par la CCSN pour l'exploitation d'installations nucléaires de catégorie I. Les niveaux de tritium dans l'environnement sont efficacement surveillés pour en assurer la conformité aux exigences réglementaires. Comme pour les contrôles, le raffinement technique accru des programmes de surveillance environnementale est en très grande partie dû aux considérations soulevées au cours des dernières années et des approches réglementaires prudentes combinées avec l'imposition de limites de rejet strictes sont prises dans les cas où subsistent des incertitudes scientifiques (p. ex. les concentrations exactes de tritium dans l'air ou les formes physiques de tritium dans les produits alimentaires). Les sciences de l'environnement appliquées au tritium comportent des lacunes, mais celles-ci sont négligeables pour ce qui est des faibles niveaux d'exposition actuels pour les personnes ou la biosphère. Cela a été clairement démontré par une évaluation approfondie des risques pour la santé que pose le tritium.

Pour améliorer le cadre de réglementation à des fins de protection de la santé, les mesures suivantes sont recommandées :

- *Que le personnel de la CCSN crée un groupe de travail multilatéral sur le tritium qui serait chargé de faciliter les études épidémiologiques axées sur les risques liés à l'exposition au tritium à de faibles doses sur la durée d'une vie et de mener au besoin des études supplémentaires de radiologie et de dosimétrie, y compris l'examen d'un facteur de pondération radiologique des rayonnements à faible TLE tels que ceux du tritium.*

- *Que le personnel de la CCSN poursuive ses recherches sur la variabilité des rapports OBT/HTO pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et évaluer la sensibilité des doses estimées à des rapports OBT/HTO élevés dans les aliments.*

Le cadre de réglementation en place a été adéquat pour protéger la santé humaine. Cependant, l'approche de réglementation du tritium visant à protéger le public a eu des impacts sur l'environnement et plus particulièrement sur les ressources en eau souterraine. Les mesures suivantes sont recommandées dans le but d'améliorer le cadre de protection de l'environnement :

- *Que la CCSN aborde les questions entourant la protection des eaux souterraines à proximité des installations existantes au palier politique, en consultation avec les provinces, lesquelles exercent une compétence juridique sur les ressources en eau souterraine. Dans l'intervalle, le personnel de la CCSN pourrait élaborer des ébauches de documents réglementaires, qui formuleraient des attentes en matière de protection des eaux souterraines et une orientation sur l'évaluation des sites contaminés en vue d'appuyer l'assainissement et l'adoption d'autres mesures correctives.*
- *Que la CCSN aborde les questions entourant la protection des eaux souterraines à proximité de toutes les installations nucléaires de catégorie I qui rejettent du tritium dans l'atmosphère en envisageant de nouvelles exigences de conception, notamment :*
 - *un objectif nominal pour le niveau de tritium dans les eaux souterraines de 100 Bq/L;*
 - *une zone contrôlée de dimensions suffisantes dans la zone de contrôle du titulaire de permis pour que l'objectif nominal de 100 Bq/L soit atteint dans le périmètre, compte tenu des rejets de tritium dans l'atmosphère en périodes d'exploitation normales;*
 - *un critère de conception des points de rejet (cheminées) pour assurer une dispersion efficace du tritium dans un panache atmosphérique et atténuer la contamination environnementale par un transfert vers l'environnement de surface.*
- *Que la CCSN entreprenne des recherches visant à déterminer quels facteurs doivent être pris en considération afin d'étalonner adéquatement les échantillonneurs d'air actifs et passifs pour le tritium. Dans l'intervalle, les titulaires de permis seraient invités à fournir des données sur l'incertitude des mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes de contrôle.*

En résumé, le projet Études sur le tritium a atteint ses objectifs, qui étaient d'augmenter les connaissances de la CCSN sur la production, la gestion et les rejets de tritium au Canada. Cela a été réalisé dans le cadre de plusieurs activités de collecte de renseignements et de la publication de rapports d'examen sur des questions importantes pour la protection de la santé humaine et de l'environnement. Les résultats et les recommandations liés à ce projet sont présentement utilisés, et seront utilisés dans le futur, par le personnel de la CCSN pour améliorer la surveillance réglementaire des rejets de tritium au Canada.

5 SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-------|--|
| ALARA | Au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre |
| CANDU | Canada Deuterium Uranium |
| CCEA | Commission de contrôle de l'énergie atomique |
| CCNE | Comité consultatif des normes environnementales |
| CCSN | Commission canadienne de sûreté nucléaire |
| CIPR | Commission internationale de protection radiologique |
| CSA | Association canadienne de normalisation |
| EACL | Énergie atomique du Canada limitée |
| EBR | Efficacité biologique relative |
| HT | Hydrogène tritié |
| HTO | Eau tritiée |
| LCEA | Loi sur le contrôle de l'énergie atomique |
| LCR | Laboratoires de Chalk River |
| LOD | Limite opérationnelle dérivée |
| LSRN | Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires |
| OBT | Tritium lié aux composés organiques |
| OMS | Organisation mondiale de la santé |
| SRBT | SRB Technologies (Canada) Inc. |
| SSI | Shield Source Inc. |
| TLE | Transfert linéique d'énergie |

6 GLOSSAIRE

Pour en faciliter la compréhension, certains termes sont définis en langage clair et peuvent différer des définitions normalisées.

| | |
|-------------------------------|--|
| ALARA | Principe de radioprotection selon lequel on doit maintenir les expositions au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre en deçà des limites réglementaires, compte tenu des facteurs sociaux et économiques. |
| Becquerel | Unité d'activité; vitesse à laquelle une substance radioactive se désintègre. 1 Bq = 1 transformation ou désintégration par seconde. |
| Groupe critique | Groupe homogène de membres du public reconnus comme étant les personnes les plus susceptibles de recevoir les doses les plus élevées par suite d'une exposition à une matière radioactive. Le concept de groupe critique est le même pour tous les titulaires de permis de la CCSN. Toutefois, la description du groupe critique peut varier d'un titulaire de permis à un autre, certains voulant être plus prudents dans leur description. Cette description est basée sur l'analyse, propre à chaque site, des radionucléides rejetés, des voies d'exposition et de l'information sur l'utilisation du terrain. |
| Limite de dose | Limite supérieure de la dose de rayonnement fixée par le <i>Règlement sur la radioprotection</i> de la CCSN. |
| Limite opérationnelle dérivée | Limite établie pour le rejet d'une substance radioactive par une installation nucléaire autorisée. La limite opérationnelle dérivée (LOD) est calculée de telle sorte que son respect donne l'assurance raisonnable de ne pas dépasser la limite de dose réglementaire. Elle représente un rejet qui se traduirait par une dose de 1 mSv/an pour le groupe critique. |
| Rayonnement ionisant | Toute particule atomique ou subatomique ou toute onde électromagnétique ayant suffisamment d'énergie pour ioniser la matière (c.-à-d. produire des atomes chargés par suite de la perte ou du gain d'électrons). Le rayonnement ionisant inclut les particules alpha et bêta et les rayons gamma, ainsi que les neutrons et certaines autres particules. |
| tritium | Isotope radioactif de l'hydrogène, naturellement présent ou produit par l'activité humaine. Le tritium est également produit en cours d'exploitation normale des réacteurs nucléaires canadiens. Le tritium est un émetteur de particules bêta (rayonnement ionisant). |

7 RÉFÉRENCES

- ¹ Bundy, K.R. & J. Burtt (2008), Report on the CNSC workshop on the assessment and control of tritium's health risk held on January 8, 2008 in Ottawa, Canada. *Journal of Radiological Protection* 29: 113-117.
- ² Commission de contrôle de l'énergie atomique. Santé Canada et le ministère de l'Environnement et de l'Énergie de l'Ontario. 1998. *Évaluation et gestion des risques de cancer associés aux rayonnements ionisants et aux agents chimiques*, rapport 98-DHM-216, Ottawa, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada.
- ³ CANDU Owner's Group (2009), *Vegetable OBT/HTO ratios in background areas of Ontario*, COG-09-3015.
- ⁴ CANDU Owners Group (2008), *OBT/HTO ratios in plants*, COG-06-3053-R1

L'organisme de réglementation
nucléaire du Canada



Commission canadienne
de sûreté nucléaire

Canadian Nuclear
Safety Commission

Canada