BIBLIOTHÈQUE du PARLEMENT
LIBRARY of PARLIAMENT

ÉTUDE GÉNÉRALE

La pénurie d'isotopes médicaux en 2009 et 2010 : cause, effets et considérations futures

Publication n^{o} 2009-04-F
Révisé le 17 novembre 2010

Mohamed Zakzouk

Division de l'industrie, de l'infrastructure et des ressources
Service d'information et de recherche parlementaires

La pénurie d'isotopes médicaux en 2009 et 2010 : cause, effets et considérations futures

(Étude générale)

La présente publication est aussi affichée en versions HTML et PDF sur IntraParl (l'intranet parlementaire) et sur le site Web du Parlement du Canada.

Dans la version électronique, les notes de fin de document contiennent des hyperliens intégrés vers certaines des sources mentionnées.

This publication is also available in English.

Les ***études générales*** de la Bibliothèque du Parlement présentent et analysent de façon objective et impartiale diverses questions d'actualité sous différents rapports. Elles sont préparées par le Service d'information et de recherche parlementaires de la Bibliothèque, qui effectue des recherches et fournit des informations et des analyses aux parlementaires ainsi qu'aux comités du Sénat et de la Chambre des communes et aux associations parlementaires.

Publication n^{o} 2009-04-F
Ottawa, Canada, Bibliothèque du Parlement (2010)

TABLE DES MATIÈRES

1 LA MISE À L'ARRÊT DU RÉACTEUR NATIONAL DE RECHERCHE UNIVERSEL 1

2 LA PÉNURIE MONDIALE D'ISOTOPES MÉDICAUX 2

3 CONSIDÉRATIONS FUTURES 5

3.1 Actes médicaux de substitution 5

3.2 Autres fournisseurs canadiens 7

3.2.1 Les réacteurs MAPLE 7

3.2.2 Le réacteur nucléaire de l'Université McMaster 8

3.2.3 Le Centre canadien de neutrons 8

3.2.4 Autres méthodes de production 8

3.3 Autres fournisseurs ailleurs dans le monde 9

LA PÉNURIE D'ISOTOPES MÉDICAUX EN 2009 ET 2010 : CAUSE, EFFETS ET CONSIDÉRATIONS FUTURES

1 LA MISE À L'ARRÊT DU RÉACTEUR NATIONAL DE RECHERCHE UNIVERSEL

De mai 2009 à août 2010, l'arrêt inattendu du réacteur national de recherche universel (réacteur NRU) qu'exploite Énergie atomique du Canada limitée (EACL) aux Laboratoires de Chalk River, situés dans l'Est ontarien, a entraîné une pénurie mondiale d'isotopes médicaux. Le 14 mai 2009, une panne électrique a provoqué la mise à l'arrêt automatique du réacteur NRU. Ayant découvert une fuite d'eau lourde – à un débit de cinq kilogrammes par heure – causée par la corrosion de la paroi extérieure à la base de la cuve, EACL a décidé de maintenir le réacteur à l'arrêt jusqu'à ce que le problème soit réglé. Selon EACL, l'eau lourde qui s'était écoulée a été recueillie et entreposée dans des fûts et n'a posé aucun risque pour la santé ou la sûreté du public, ni pour l'environnement [1]. Par ailleurs, la quantité de tritium rejetée dans l'atmosphère en raison de l'évaporation de l'eau lourde était « bien inférieur[e] aux limites réglementaires de la CCSN [Commission canadienne de sûreté nucléaire] [2] ».

À la suite d'une évaluation préliminaire de l'étendue de la corrosion, EACL a conclu que les technologies disponibles en matière de réparation nucléaire ne permettaient pas d'envisager une solution simple ou immédiate. Les travaux d'inspection et de réparation étaient très compliqués à cause de l'accès limité à la surface corrodée et parce qu'ils devaient être effectués à distance, en raison des champs de rayonnement élevé [3]. Après 15 mois de travaux de réparation, le réacteur a été redémarré le 17 août 2010. Le 25 août 2010, EACL a annoncé que le réacteur NRU avait « repris la pleine production d'isotopes médicaux [4] ».

Le réacteur a été conçu dans trois buts :

- la production de radio-isotopes médicaux et industriels pour le diagnostic et le traitement de maladies telles que le cancer et les cardiopathies (le réacteur NRU est l'un des plus grands producteurs du monde);
- la recherche dans le domaine des faisceaux de neutrons, discipline qui étudie un large éventail de matériaux et rend possible des avancées dans les domaines médical, industriel et scientifique (le réacteur NRU, qui est l'un des rares réacteurs de recherche du monde utilisé à des fins commerciales, accueille chaque année plus de 200 professeurs, étudiants et chercheurs industriels);
- le soutien à la recherche et au développement pour les réacteurs nucléaires CANDU [5].

Le tableau 1 dresse une liste d'isotopes médicaux produits par le réacteur NRU.

Tableau 1 – Isotopes produits par le réacteur NRU à des fins diagnostiques et thérapeutiques

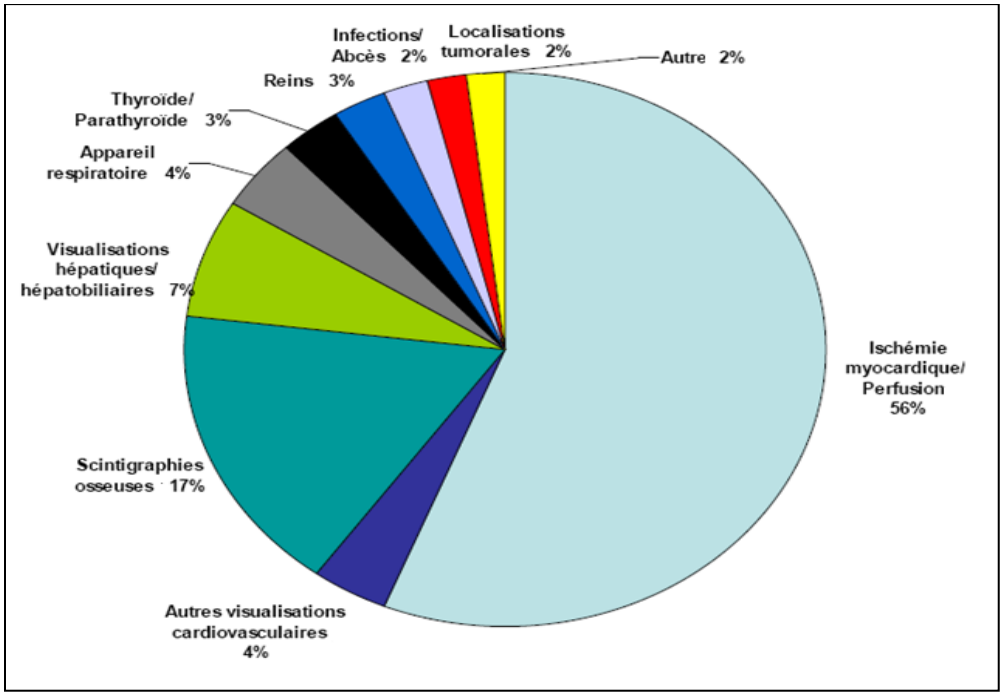
Isotope médical	Usages diagnostiques ou thérapeutiques
Molybdène 99	Diagnostic médical (imagerie) du cerveau, de la thyroïde, du cœur, des poumons, du foie, des reins, de la rate et de la moelle osseuse
Iode 131	Thérapie; imagerie; diagnostic (principalement du cancer de la thyroïde)
Iode 125	Diagnostics in vitro; appareils d'ostéodensitométrie; iodation des protéines; grains radioactifs (l'implantation de grains radioactifs d'iode 125 est courante dans le traitement du cancer de la prostate)
Xénon 133	Scintigraphie des poumons
Cobalt 60 à activité spécifique élevée	Traitement du cancer
Carbone 14	Radiotraceur dans différents composés biologiques
Iridium 192	Thérapie et radiographie du cancer

Source : EACL, *Sciences nucléaires*, « Isotopes médicaux ».

2 LA PÉNURIE MONDIALE D'ISOTOPES MÉDICAUX

Les effets de la pénurie mondiale d'isotopes médicaux occasionnée par la mise à l'arrêt du réacteur NRU se sont fait particulièrement sentir dans le secteur médical, surtout ceux de la pénurie de molybdène 99 (^{99}Mo). Le technétium 99m (^{99m}Tc), produit de désintégration du ^{99}Mo, est utilisé dans la grande majorité des actes posés en médecine nucléaire, principalement pour l'imagerie cardiaque, les scintigraphies osseuses servant à détecter les cancers et les examens scintigraphiques en général [6]. Par comparaison à l'imagerie externe, l'injection de radio-isotopes dans l'organisme permet de poser un diagnostic plus rapide et plus précis en suivant la progression des isotopes, notamment dans les tissus malades. Dans le cas du cancer, on peut aussi utiliser les radio-isotopes à des fins thérapeutiques en les dirigeant directement vers des cellules malades de manière que leur énergie tue ces cellules [7]. La figure 1 illustre la répartition des actes posés en médecine nucléaire où le technétium 99m prédomine, d'après des données de 2006.

Figure 1 – Répartition des actes posés en médecine nucléaire où le technétium 99m prédomine, 2006



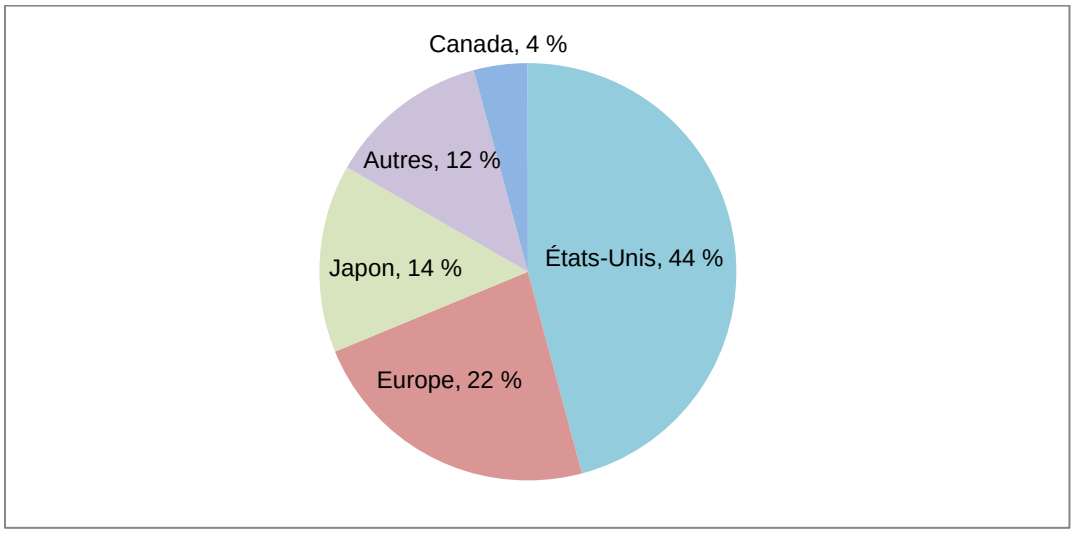
Source : Ressources naturelles Canada, document présenté au Comité permanent des ressources naturelles de la Chambre des communes, séance n° 23, 2 juin 2009.

La pénurie d'isotopes de 2009-2010 a entraîné une restriction des tests diagnostiques (mais non des traitements thérapeutiques). Les patients atteints du cancer ont été particulièrement touchés, car un diagnostic rapide et précis est d'une importance capitale dans le cas de cette maladie [8]. On estime que l'arrêt du réacteur NRU a entraîné une diminution de 30 % de l'approvisionnement en isotopes à l'échelle mondiale, avec des variations d'un pays ou d'une région à l'autre. L'Amérique du Nord, par exemple, qui est fortement tributaire de la production canadienne de ^{99}Mo, a été plus touchée par la pénurie que l'Europe, où les sources d'approvisionnement sont plus diversifiées [9]. La gravité de la pénurie variait également d'une région à l'autre du Canada, l'approvisionnement en isotopes étant géré par les provinces et les territoires [10].

La demande mondiale de ^{99}Mo et de ^{99m}Tc est évaluée à environ 40 millions de doses par année, dont 30 à 40 % viennent normalement du réacteur NRU [11] (la figure 2 présente une ventilation de la demande mondiale de ^{99}Mo et de ^{99m}Tc). Selon EACL, les isotopes médicaux produits par le réacteur NRU permettent d'aider plus de 76 000 personnes chaque jour, dans plus de 80 pays [12]. Cependant, même si le réacteur NRU est remis en service, il faut accroître la production d'isotopes médicaux pour satisfaire à la demande prévue. En effet, nous assistons partout dans le monde à une augmentation continuelle de la demande de ^{99m}Tc en raison du vieillissement des populations de l'Europe et de l'Amérique du Nord, et aussi à cause de l'utilisation plus intensive que l'on fait de l'isotope dans les pays émergents. Par ailleurs, comme le souligne Jean Koclas, professeur de génie nucléaire à l'École polytechnique de Montréal, « [l]e technétium 99 a l'immense avantage d'être une

technique non invasive […] [et] il y a un plus grand éventail de traitements qui en font usage », ce qui contribue encore plus à l'accroissement de la demande mondiale de cet isotope [13].

Figure 2 – Demande mondiale approximative de molybdène 99 et de technétium 99m

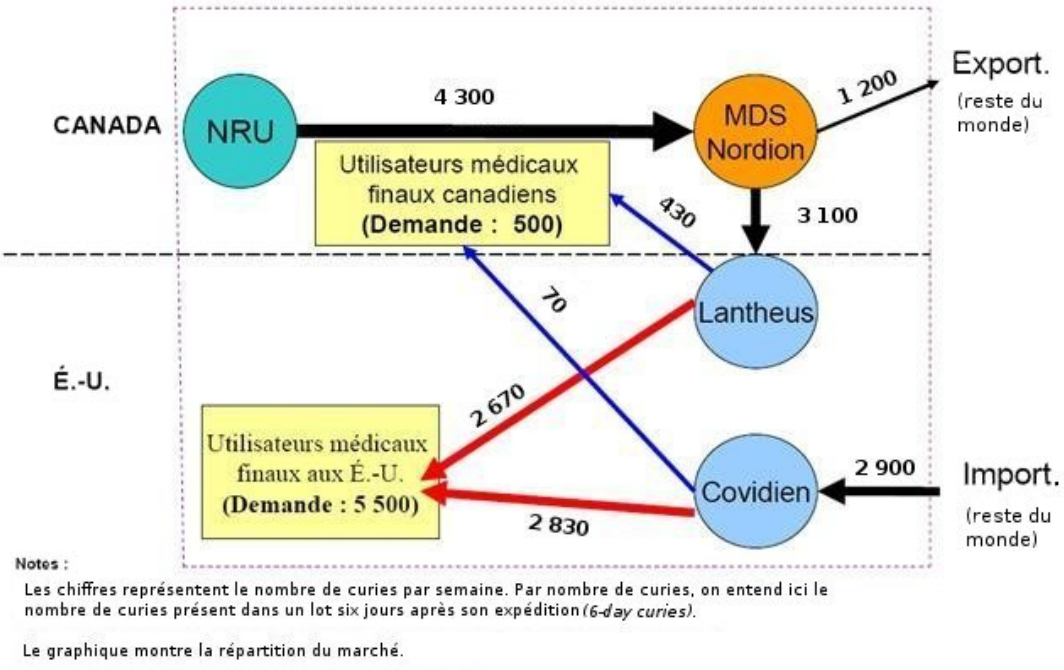


Note : Les chiffres ayant été arrondis, leur somme n'est pas égale à 100.

Source : Ressources naturelles Canada, présentation au Comité permanent des ressources naturelles de la Chambre des communes, séance n° 23, 2 juin 2009.

Environ 95 % de l'approvisionnement mondial en ^{99}Mo est assuré par cinq réacteurs gouvernementaux : le réacteur NRU; le réacteur de Petten, aux Pays-Bas; le réacteur BR2, en Belgique; le réacteur OSIRIS, en France; enfin, le réacteur SAFARI, en Afrique du Sud. Plusieurs autres petits réacteurs assurent un certain approvisionnement dans des marchés régionaux ou nationaux, sans toutefois avoir une influence importante sur le marché mondial [14]. Comme il n'y a pas de fabricants de ^{99m}Tc au Canada, le ^{99}Mo est exporté aux États-Unis et au Japon, où l'on peut produire des générateurs de ^{99m}Tc. Une partie du ^{99}Mo exporté aux États-Unis est réimportée au Canada sous forme de générateurs de ^{99m}Tc à des fins médicales [15]. Il est d'autant plus difficile de pallier la pénurie mondiale d'isotopes qu'il faut prendre tout au long de la chaîne d'approvisionnement des mesures spécifiques pour satisfaire à diverses exigences techniques et réglementaires. Après avoir été traité au réacteur NRU, le ^{99}Mo, qui a une demi-vie d'environ 66 heures, est expédié à MDS Nordion à Ottawa (Kanata), pour y être extrait et purifié. Il doit ensuite être exporté au fabricant de ^{99m}Tc approprié avant que la matière radioactive ne se désintègre et ne devienne inutile. Les générateurs de ^{99m}Tc produits à partir du ^{99}Mo ont une durée de vie utile de 10 à 14 jours et doivent être acheminés aux hôpitaux et aux radiopharmacies à l'intérieur d'un délai approprié. Le ^{99m}Tc a quant à lui une demi-vie de seulement six heures, de sorte qu'il est impossible de le stocker. Toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement sont en outre assujetties à des règlements destinés à assurer la santé et la sécurité dans les domaines nucléaire et médical [16]. La figure 3 présente la chaîne d'approvisionnement en ^{99}Mo et en ^{99m}Tc entre le Canada et les États-Unis.

Figure 3 – Chaîne d'approvisionnement en ^{99}Mo et en ^{99m}Tc entre le Canada et les États-Unis



Source : Ressources naturelles Canada, document présenté au Comité permanent des ressources naturelles de la Chambre des communes, séance n^{o} 23, 2 juin 2009.

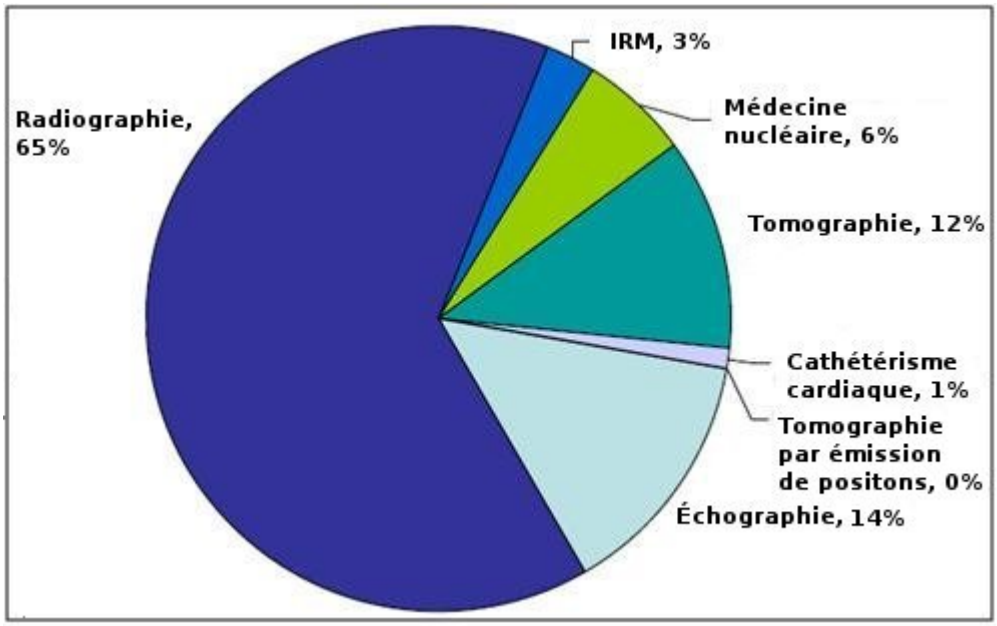
Comme tous les réacteurs doivent systématiquement être mis à l'arrêt à des fins d'entretien, il est essentiel que les fournisseurs d'isotopes harmonisent leurs calendriers afin d'assurer le maintien de l'équilibre entre l'offre et la demande mondiales. L'arrêt imprévu du réacteur NRU a eu pour effet de créer un grave déséquilibre au sein d'une chaîne d'approvisionnement complexe, ce qui met en relief la nécessité de trouver de nouveaux moyens ou de nouvelles sources pour assurer l'approvisionnement en isotopes médicaux à l'avenir [17].

3 CONSIDÉRATIONS FUTURES

3.1 ACTES MÉDICAUX DE SUBSTITUTION

Les techniques de la médecine nucléaire ne représentent que quelques-unes des nombreuses techniques d'imagerie employées en médecine, et le ^{99m}Tc n'est pas le seul isotope utilisé pour diagnostiquer le cancer, bien qu'il intervienne dans environ 80 % des actes posés en médecine nucléaire. Il est notamment possible de remplacer le ^{99m}Tc par le thallium 201 en imagerie cardiaque, par le fluorure (^{18}F) avec des caméras de TEP (tomographie par émission de positons) pour des scintigraphies osseuses, par l'iode 123 pour les scintigraphies rénales, par le gallium 67 pour la détection de la maladie de Hodgkin et de lymphomes, par la TEP pour d'autres cancers et pour certains troubles cardiaques, ainsi que par la radiographie, la tomodensitométrie (TDM), l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et l'échographie [18]. La figure 4 ventile les divers usages de l'imagerie médicale dans les hôpitaux de l'Ontario, selon des données de 2007.

Figure 4 – Usages de l'imagerie médicale dans les hôpitaux de l'Ontario, 2007



Note : Les chiffres ayant été arrondis, leur somme n'est pas égale à 100.

Source : Ressources naturelles Canada, document présenté au Comité permanent des ressources naturelles de la Chambre des communes, séance n° 23, 2 juin 2009.

Durant la pénurie d'isotopes, le milieu médical a eu recours à certaines solutions de rechange à titre de mesure d'urgence à court terme pour pallier les problèmes occasionnés par la mise à l'arrêt du réacteur NRU. Toutefois, ces solutions ne peuvent remplacer le ^{99m}Tc que temporairement, et ce, à cause de leur efficacité, de leur accessibilité ou de leur fiabilité moindres [19]. Ainsi, l'accès à la tomodensitométrie et à l'IRM est limité, et l'utilisation de l'échocardiographie (pour vérifier la fonction cardiaque) ne convient pas pour 15 à 20 % des patients [20]. Selon l'Agence canadienne des médicaments et des technologies de la santé, « l'infrastructure actuelle ne peut soutenir l'abandon du technétium ^{99m} au profit de la TEP en cardiologie ainsi que dans le diagnostic et la stadification du cancer [21] ». En juillet 2009, il y avait 28 centres fournissant des services d'imagerie subventionnés par l'État dans sept provinces canadiennes [22], dont le Québec, où l'accessibilité de la TEP est la plus grande [23]. Selon le D^{r} Jean-Luc Urbain, président de l'Association canadienne de médecine nucléaire, c'est en Australie, en Chine, en Europe, en Inde, au Koweït, à Singapour, en Amérique du Sud et aux États-Unis que la TEP est la plus répandue [24]. Cependant, même si la TEP était utilisée à une plus grande échelle au Canada, elle ne pourrait remplacer le ^{99m}Tc dans les scintigraphies osseuses effectuées pour les cancers en pédiatrie, et ce, en raison des fortes doses de rayonnement qu'elle produit [25]. De plus, la TEP coûte plus cher que la tomographie monophotonique d'émission conventionnelle, qui utilise le ^{99m}Tc. Selon le D^{r} Karen Gulenchyn, directrice médicale du département de médecine nucléaire au Hamilton Health Sciences et au St. Joseph's Healthcare Hamilton, une dose de fluorodéoxyglucose (un isotope utilisé pour la TEP) coûte au moins 250 $ à 300 $, alors qu'une dose d'un produit à base de ^{99m}Tc coûte entre 15 $ et 20 $ [26]. Une commercialisation

accrue de la TEP au Canada pourrait réduire le coût des examens effectués au moyen de cette technologie.

3.2 AUTRES FOURNISSEURS CANADIENS

De nouveaux fournisseurs ou produits de remplacement du ^{99}Mo pourraient voir le jour au Canada. Toutefois, dans la majorité des cas, ces solutions ne sont pas réalisables à court terme. En effet, les nouveaux fournisseurs doivent respecter un certain nombre de critères, dont les suivants :

- la faisabilité technique et la capacité d'appliquer la solution à l'échelle commerciale;
- la capacité de mettre la solution en œuvre dans un délai raisonnable;
- la capacité de travailler au sein d'une chaîne d'approvisionnement internationale;
- la capacité de remplir les exigences réglementaires, notamment en matière de santé, de sécurité et de gestion des déchets [27].

3.2.1 LES RÉACTEURS MAPLE

Les réacteurs MAPLE (*Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment*) 1 et 2, qui sont situés aux laboratoires d'EACL à Chalk River, ont été conçus et construits exclusivement afin d'assurer la production d'isotopes médicaux. Initialement destinés à remplacer le réacteur NRU vieillissant, ils n'ont jamais été mis en service en raison de problèmes techniques. En effet, comme l'a expliqué Hugh MacDiarmid, président et chef de la direction d'EACL, « le comportement du réacteur […] n'était pas conforme à celui du modèle informatique », de sorte qu'il ne satisfaisait pas aux exigences d'EACL en matière de sécurité [28]. Avant que les réacteurs puissent être remis en marche, la différence devra être expliquée « à la satisfaction d'EACL […] [et] de la CCSN [29] ». Hugh MacDiarmid estime que le programme MAPLE a coûté environ 250 millions de dollars au total [30].

Les avis sont partagés quant à la possibilité de relancer le programme. Steve West, président de MDS Nordion, a cité un rapport de la National Academy of Sciences dans lequel on dit qu'EACL pourrait probablement conclure un contrat avec un autre organisme afin de se procurer l'expertise ou les ressources techniques nécessaires pour corriger les réacteurs MAPLE. Le comité responsable de la rédaction du rapport « suppose que le pire des scénarios pour corriger les réacteurs MAPLE comporte le remplacement des cœurs des réacteurs », ce qui coûterait probablement moins cher que la construction d'un nouveau réacteur [31]. John Waddington confirme que les réacteurs pourraient en principe être remis en service, mais que cela nécessiterait « beaucoup […] d'efforts humain[s] et financier[s] [32] ». Hugh MacDiarmid estime que les réacteurs MAPLE ne représentent pas une solution viable à court terme, puisqu'il faudrait « bien des années et des centaines de millions de dollars avant qu'ils reçoivent une licence et soient mis en service [33] ».

3.2.2 LE RÉACTEUR NUCLÉAIRE DE L'UNIVERSITÉ MCMASTER

Le réacteur nucléaire de l'Université McMaster à Hamilton, en Ontario, est un réacteur d'essais de matériaux (*materials test reactor* – MTR) de 5 mégawatts. L'Université a proposé de produire suffisamment de ^{99}Mo pour satisfaire à environ 20 % de la demande nord-américaine à moyen terme, ce qui équivaut à près de quatre fois la demande canadienne. À l'heure actuelle, le réacteur, dont le permis d'exploitation est valide jusqu'en 2014, est exploité à une puissance de 3 mégawatts et fonctionne 16 heures par jour, 5 jours par semaine. Pour produire la quantité d'isotopes proposée, il devrait fonctionner 24 heures par jour, 7 jours par semaine. Il pourrait par ailleurs y avoir des problèmes techniques liés à l'intégration des isotopes de l'Université MacMaster à la chaîne d'approvisionnement existante, en raison de différences entre la géométrie des cibles du NRU, de forme étoilée, et celle des cibles de McMaster, de forme plissée [34]. EACL a aussi souligné qu'il y avait des problèmes d'ordre logistique associés au transport de certaines matières dans les régions du Grand Toronto et de Hamilton, mais s'est montrée favorable « sous toute réserve » à cette solution [35].

3.2.3 LE CENTRE CANADIEN DE NEUTRONS

Le Centre canadien de neutrons est un projet de construction d'un nouveau réacteur de recherche destiné à remplacer le réacteur NRU vieillissant. Selon les plans actuels, il s'agirait d'un réacteur de recherche multifonctionnel, capable de produire du ^{99}Mo [36]. Dominic Ryan, président de l'Institut canadien de la diffusion des neutrons, a indiqué que, selon une estimation présentée au Sénat au début de 2008, la construction d'un réacteur de recherche qui pourrait en tout point remplacer le réacteur NRU coûterait environ 800 millions de dollars. Il a toutefois ajouté qu'il ne s'agissait que d'un coût approximatif et qu'il faudrait « procéder à l'établissement en bonne et due forme des coûts associés à l'ingénierie avant de pouvoir fournir des chiffres plus précis [37] ».

3.2.4 AUTRES MÉTHODES DE PRODUCTION

Le groupe TRIUMF de l'Université de la Colombie-Britannique a proposé une autre méthode de production de ^{99}Mo, qui ferait appel à un accélérateur pour provoquer la photofission de l'U230[a] (un des isotopes de l'uranium). Parce qu'il faut du temps pour la mettre idée au point et la mettre à l'essai, cette idée ne pourrait pas constituer une solution à court terme. L'accélérateur coûterait environ 50 millions de dollars [38].

Par ailleurs, le Conseil national de recherches du Canada a proposé de produire du ^{99}Mo en retirant un neutron du ^{100}Mo. Le centre Exploitation des techniques de pointe en physique, une filiale de TRIUMF, a aussi proposé de produire du ^{99}Mo en ajoutant un neutron au ^{98}Mo, ce qui se fait maintenant partout dans le monde selon Nigel Lockyer, directeur du groupe TRIUMF [39].

3.3 AUTRES FOURNISSEURS AILLEURS DANS LE MONDE

La capacité de répondre à la demande mondiale en isotopes médicaux dépend du rendement des principaux réacteurs producteurs d'isotopes dans le monde. Ces réacteurs (le réacteur BR2, en Belgique, le réacteur OSIRIS, en France, le réacteur de Petten, aux Pays-Bas, et le réacteur SAFARI, en Afrique du Sud) sont tous aussi vieux que le réacteur NRU et il n'est pas certain qu'ils puissent assurer une production durable d'isotopes. En outre, le maintien de l'approvisionnement mondial en isotopes médicaux durant l'arrêt prévu d'un réacteur dépend de la capacité de production des autres réacteurs [40]. En plus des réacteurs susmentionnés, d'autres réacteurs pourraient contribuer à l'approvisionnement mondial d'isotopes médicaux, dont les suivants :

- ***En Australie*** **:** Le réacteur OPAL est déjà mandaté pour produire et exporter du ^{99}Mo, et on étudie la possibilité d'approvisionner le marché nord-américain. Sa capacité de production pourra être doublée ou triplée à long terme, mais elle ne pourra atteindre que le quart de celle du réacteur NRU à court terme.
- ***En France*** **:** Le réacteur Jules Horowitz, qui devrait être mis en service en 2015, peut produire du ^{99}Mo. Le réacteur a toutefois été construit à d'autres fins, et il est peu probable qu'on le consacre entièrement à la production de ^{99}Mo.
- ***Aux États-Unis*** **:** Le réacteur de recherche de l'Université du Missouri pourrait être mis à contribution pour produire du ^{99}Mo, mais on ne peut pas compter là-dessus, car aucun engagement ferme n'a été pris en ce sens [41].

NOTES

1. Chambre des communes, Comité permanent des ressources naturelles (RNNR), *Témoignages*, séance n° 24, 4 juin 2009 (Bill Pilkington, vice-président principal et agent principal du nucléaire, Énergie atomique du Canada limitée).
2. *Ibid.* (Michael Binder, président, Commission canadienne de sûreté nucléaire).
3. *Ibid.* (Pilkington).
4. EACL, *Rapport d'étape n° 73 sur le réacteur NRU – EACL fait le point sur le réacteur NRU*, communiqué, 25 août 2010.
5. Les réacteurs CANDU (Canada Deuterium Uranium) sont des réacteurs de puissance de conception canadienne qui utilisent l'uranium naturel comme combustible et l'eau lourde comme modérateur et caloporteur. Pour plus de précisions au sujet du réacteur NRU, voir EACL, *Sciences nucléaires*, « Profil du réacteur National Research Universal ».
6. RNNR, *Témoignages*, séance n° 23, 2 juin 2009 (Meena Ballantyne, sous-ministre adjointe, Direction générale des produits de santé et des aliments, Santé Canada).
7. Citizens for Medical Isotopes, *Frequently Asked Questions*.
8. RNNR, *Témoignages*, séance n° 25, 9 juin 2009 (Karen Gulenchyn, directrice médicale, Département de médecine nucléaire, Hamilton Health Sciences et St. Joseph's Healthcare Hamilton).
9. RNNR, *Témoignages*, séance n° 26, 11 juin 2009 (Steve West, président, MDS Nordion).
10. RNNR (9 juin 2009) (Jean-Luc Urbain, président, Association canadienne de médecine nucléaire).

11. RNNR (2 juin 2009) (Serge Dupont, sous-ministre délégué, ministère des Ressources naturelles).
12. EACL, *Sciences nucléaires*, « Isotopes médicaux ».
13. RNNR, *Témoignages*, séance n° 28, 18 juin 2009 (Jean Koclas, professeur, Institut de génie nucléaire, Département de génie physique, École polytechnique de Montréal).
14. RNNR (2 juin 2009) (Dupont).
15. *Ibid.*
16. *Ibid.*
17. *Ibid.*
18. *Ibid.* (Ballantyne).
19. *Ibid.*
20. RNNR (9 juin 2009) (Gulenchyn).
21. Agence canadienne des médicaments et des technologies de la santé (ACMTS), « Futures solutions de rechange à la production du molybdène-99 (^{99}Mo) pour les besoins de l'imagerie médicale », *Tour d'horizon des technologies de la santé*, n° 11, août 2009.
22. Pour des renseignements sur la répartition des services de TEP subventionnés par l'État, voir le tableau 2, « Répartition des appareils de TEP financés par le secteur public au Canada (2009) », dans ACMTS (2009), p. 5.
23. ACMTS (2009).
24. RNNR (9 juin 2009) (Urbain).
25. RNNR (2 juin 2009) (Ballantyne).
26. RNNR (9 juin 2009) (Gulenchyn).
27. RNNR (2 juin 2009) (Dupont).
28. RNNR (4 juin 2009) (Hugh MacDiarmid, président et chef de la direction d'Énergie atomique Canada limitée).
29. RNNR (11 juin 2009) (John Waddington, conseiller en sûreté nucléaire).
30. RNNR (4 juin 2009) (MacDiarmid).
31. RNNR (11 juin 2009) (West).
32. *Ibid.* (Waddington).
33. RNNR (4 juin 2009) (MacDiarmid).
34. RNNR, *Témoignages*, séance n° 27, 16 juin 2009 (Christopher Heysel, directeur, Activités et installations nucléaires, McMaster Nuclear Reactor).
35. RNNR (4 juin 2009) (MacDiarmid).
36. *Ibid.*
37. RNNR (16 juin 2009) (Dominic Ryan, président de l'Institut canadien de la diffusion des neutrons).
38. *Ibid.* (Nigel Lockyer, directeur de TRIUMF).
39. *Ibid.*
40. RNNR (11 juin 2009) (West).
41. RNNR (2 juin 2009) (Dupont).