



# Usages bénéfiques et production des isotopes

Mise à jour 2004



Développement de l'énergie nucléaire

## **Usages bénéfiques et production des isotopes**

**Mise à jour 2004**

© OCDE 2005  
NEA n° 5294

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE  
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

## ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 30 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions de l'OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

*Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.*

\* \* \* \* \*

### L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1<sup>er</sup> février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 28 pays membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

© OCDE 2005

Toute reproduction, copie, transmission ou traduction de cette publication doit faire l'objet d'une autorisation écrite. Les demandes doivent être adressées aux Éditions de l'OCDE [rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org) ou par fax (33-1) 45 24 13 91. Les demandes d'autorisation de photocopie partielle doivent être adressées directement au Centre français d'exploitation du droit de copie, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France ([contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com)).

## AVANT-PROPOS

Ce rapport est basé sur une étude entreprise sous les auspices du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN). L'étude a été menée conjointement par l'AEN et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) avec l'aide d'un groupe d'experts nommés par les pays membres de l'AEN. Ce rapport fait suite à celui, portant le même titre, publié en 2000 par l'OCDE. Il contient des données statistiques sur la production et la demande d'isotopes ainsi qu'une analyse des problèmes clés en la matière.

Les objectifs essentiels de l'étude étaient de fournir aux pays membres une vue d'ensemble sur les usages et les capacités de production d'isotopes dans le monde, d'analyser les tendances de l'équilibre entre l'offre et la demande d'isotopes, et d'en tirer des enseignements et des recommandations à l'usage des pouvoirs publics intéressés. Bien que l'importance des questions liées à la réglementation ait été reconnue par le groupe d'experts, elles ont été exclues du champ de l'étude dans la mesure où elles sont déjà traitées dans de nombreuses publications de l'AIEA, de l'Organisation internationale de standardisation (ISO) et de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). La production et les usages des isotopes à des fins militaires ainsi que tout autre utilisation non commerciale ou scientifique sont également exclus du champ de l'étude.

Les informations sur la production et l'utilisation des isotopes présentées dans ce rapport ont été collectées grâce à un questionnaire envoyé par les secrétariats de l'AEN et de l'AIEA. Vingt-quatre pays et le centre de recherche de la Commission européenne d'ISPRA, Italie, ont répondu au questionnaire. Étant donné que plusieurs grands producteurs d'isotopes n'ont pas répondu au questionnaire, les enseignements et les conclusions sur la production d'isotopes fournis dans le rapport ne peuvent être qu'indicatifs. L'information recueillie grâce au questionnaire a été complétée par des données qualitatives sur les usages des isotopes fournies par les membres du groupe d'experts. Ce rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.



## TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS.....	3
NOTE DE SYNTHÈSE.....	7
I. PRODUCTION D'ISOTOPES .....	11
Production en 2002 .....	11
Production d'isotopes à l'aide de réacteurs .....	14
Production à l'aide d'accélérateurs .....	16
Séparation des isotopes des produits de fission.....	18
Séparation des transuraniens et des émetteurs alpha.....	19
Production d'isotopes stables .....	19
Production future.....	20
II. APPLICATIONS DES ISOTOPES .....	23
Applications médicales .....	23
Applications industrielles.....	29
Applications scientifiques et/ou pour la recherche.....	34
III. QUESTIONS SOULEVÉES PAR LA PRODUCTION ET L'USAGE DES ISOTOPES ....	37
Transport .....	37
Gestion des sources scellées.....	37
Maintien du rôle des pouvoirs publics .....	38
Problèmes de responsabilité civile .....	39
Observations finales .....	40
 Annexes	
1. Schéma fonctionnel de la production, de la fabrication et des applications des isotopes ainsi que de la gestion des déchets.....	41
2. Réacteurs de recherche produisant des isotopes.....	43
3. Accélérateurs produisant des isotopes.....	47
4. Pays ayant répondu au questionnaire .....	55
5. Isotopes médicaux courants produits dans des réacteurs et leurs applications.....	57
6. Isotopes médicaux courants produits dans des accélérateurs et leurs applications .....	59
7. Liste des organismes non-gouvernementaux concernés par la production et l'utilisation des isotopes .....	61
8. Membres du groupe de travail.....	63
9. Regroupement des pays et des zones .....	65



## NOTE DE SYNTHÈSE

L'utilisation des isotopes<sup>1</sup> constitue une importante pratique moderne dans de nombreux secteurs de l'économie mondiale. Il est toutefois difficile d'en définir le rôle précis en raison de l'absence d'informations complètes sur la production et la demande d'isotopes, notamment de données quantitatives sur les utilisations et les incidences économiques de l'usage des isotopes dans les divers secteurs et pays du monde. C'est pourquoi il n'a pas été possible de réaliser une évaluation fiable du poids économique globale des usages bénéfiques des isotopes. En outre, le panorama des applications des isotopes présenté dans ce rapport fournit des données pour l'essentiel qualitatives. Bien que le groupe d'experts ait été conscient de l'intérêt d'une étude quantitative complète des utilisations des isotopes, la collecte de données fiables s'est avérée difficile et a mis en lumière un certain nombre de problèmes comme, par exemple, la cohérence entre secteurs et pays, ainsi que la confidentialité des informations commerciales et relatives à la sécurité nationale. Néanmoins, l'examen détaillé de ces questions dépassait le champs de l'étude.

En 2002, des isotopes ont été produits pour des applications nationales et/ou à destination des marchés internationaux dans vingt six pays (comme il ressort des réponses à l'enquête) auxquels s'ajoutaient plus d'une trentaine de pays supplémentaires constituant des producteurs probables d'isotopes bien qu'ils n'aient pas répondu au questionnaire. Les isotopes ont été principalement produits dans des réacteurs de recherche polyvalents et dans des réacteurs et des accélérateurs<sup>2</sup> consacrés exclusivement à la production d'isotopes. Alors que pour la plupart des réacteurs de recherche la production d'isotopes est une activité secondaire par rapport à leur mission principale, les accélérateurs (à l'exception de quelques machines de recherche à haute énergie) sont généralement consacrés à la production d'isotopes. Aujourd'hui, les réacteurs de recherche vieillissent, près de la moitié d'entre eux ayant plus de 35 ans. On compte cependant au moins onze réacteurs en construction ou projetés dans plusieurs pays, des réacteurs à haut flux étant prévus en Allemagne, en France, en Chine et en Russie. Le nombre d'accélérateurs produisant des isotopes, notamment de petites installations dédiées, est en augmentation régulière, s'agissant en majorité de machines relativement récentes.

Les organismes publics possèdent et exploitent la quasi-totalité des réacteurs de recherche, des grands accélérateurs et des installations de séparation chimique utilisés pour la production d'isotopes. Dans le passé, les très grands besoins de capitaux, l'importance des délais exigés par la planification et l'obtention des autorisations, ainsi que les dépenses supplémentaires de fonctionnement ont rendu nécessaire d'en confier la propriété aux pouvoirs publics dans la plupart des cas. Avec leurs installations, les pouvoirs publics offrent des infrastructures destinées à la production d'isotopes et assurent simultanément la formation théorique et pratique de la main-d'œuvre qualifiée nécessaire dans ce domaine. Ces installations relevant du secteur public, jouent aussi un rôle déterminant en étayant la production destinée aux recherches et aux essais cliniques préalables à la commercialisation

- 
1. Dans l'ensemble de la présente étude, par « isotope(s) », on entend des isotopes radioactifs, à moins qu'il ne soit spécifiquement précisé qu'il s'agit d'isotopes stables.
  2. Les réacteurs sont généralement utilisés pour produire des isotopes ayant un excédent de neutrons alors que les accélérateurs le sont pour produire des isotopes ayant un déficit en neutrons.

de toute application prometteuse. On note toutefois une tendance persistante à la privatisation et, par exemple, deux réacteurs relevant du secteur privé, qui sont consacrés à la production d'isotopes, ont été construits au Canada et devraient devenir opérationnels dans un proche avenir. Un certain nombre de cyclotrons de moyenne importance produisant d'importants isotopes destinés à des applications médicales appartiennent à des entreprises du secteur privé qui les exploitent à leur usage exclusif. Ce sont des entreprises privées qui possèdent et exploitent la plupart des petits cyclotrons consacrés à la production d'isotopes médicaux.

Les tendances de la production d'isotopes varient selon les divers types d'installations de production et la région géographique considérée. En particulier, il semble que l'évolution est différente pour les installations dédiées à la production d'isotopes, telles que les cyclotrons produisant des isotopes destinés à des applications médicales et pour les installations qui ne produisent des isotopes qu'accessoirement comme la plupart des réacteurs de recherche. Les augmentations récentes des capacités théoriques de production d'isotopes dans plusieurs régions montrent une tendance à l'émergence de producteurs privés ou semi privés pour répondre à une demande croissante quand cela est commercialement viable. La sécurité des approvisionnements en isotopes majeurs en usage dans les domaines médicaux et industriels ne semble pas poser de problème à court et à moyen termes. Toutefois, vu le vieillissement de l'infrastructure dans un certain nombre de secteurs importants, tels que les réacteurs de recherche à haut flux, qui sont les seuls moyens de production de certains types d'isotopes, et l'incertitude entachant leur remplacement, il subsiste des questions quant au long terme. Il importe d'instaurer un mécanisme de redondance afin de garantir l'offre, dans chaque pays, d'isotopes critiques à courte période tels que le  $^{99}\text{Mo}$ , quels que soient les problèmes techniques (défaillance d'une installation, par exemple), sociaux (grève, par exemple) ou internationaux (fait de terrorisme entraînant la fermeture des frontières) que pourraient rencontrer les fournisseurs.

Il existe des applications des isotopes dans presque chaque secteur de l'économie et dans la quasi totalité des pays du monde. Les isotopes ont été utilisés en médecine nucléaire dès 1946 ( $^{14}\text{C}$  à l'Université de Chicago) et le sont de façon courante depuis plusieurs décennies. La médecine nucléaire se caractérise par une évolution permanente des techniques et l'apparition continue de nouveaux modes opératoires exigeant la production de nouveaux isotopes ou de nouvelles applications pour les isotopes existants. Globalement, le nombre de pratiques médicales ayant recours à des isotopes ne cesse de s'accroître et ces pratiques nécessitent un spectre toujours plus large d'isotopes. Dans l'industrie, les usages des isotopes sont très variés et leur importance relative dans les divers secteurs diffère largement. En général cependant, les isotopes occupent des créneaux spécialisés où ils sont plus efficaces que les solutions de rechange ou n'ont aucun produit de remplacement. Il est à noter que les solutions de rechange non nucléaires sont souvent préférées lorsqu'elles sont économiquement comparables.

Les informations recueillies en vue de la présente étude mettent en évidence le rôle déterminant des gouvernements et des organismes du secteur public dans la production et l'utilisation des isotopes. Bien que les prérogatives directes des pouvoirs publics dans le domaine des isotopes se limitent normalement à établir les règlements de sûreté et à contrôler le respect de ces règlements, la politique nationale en matière de recherche et de développement et de soins médicaux, par exemple, demeure un élément moteur essentiel de la demande d'isotopes et, encore que dans une moindre mesure, de leur production. Avec la participation croissante de sociétés privées et le passage à une gestion plus commerciale des activités liées à la production et à l'utilisation des isotopes, les pouvoirs publics pourraient envisager un soutien supplémentaire afin d'assurer la production stable d'isotopes en vue de la recherche et d'usages non commerciaux dans le cadre de leurs politiques nationales, étant donné l'importance des usages bénéfiques des isotopes pour la science et le bien-être de l'humanité.

Plusieurs questions supplémentaires revêtent une importance croissante pour l'application des isotopes. À mesure que la distribution des isotopes se mondialise, les problèmes de transport

deviennent manifestes. Le nombre limité d'installations de production de réserve et l'utilisation croissante d'isotopes à courte période exigent une infrastructure de transports internationaux qui soit efficace et sûre. Les règles de bonne pratique devraient assurer que la maîtrise et la gestion des isotopes, en particulier des sources scellées à vie longue, fassent l'objet d'une attention soutenue. En outre, à mesure que la production et l'usage des isotopes se répandent, il devient plus évident que les questions de responsabilité soulevées par une utilisation ou une exposition accidentelle ou malveillante appellent un surcroît d'attention et d'analyse.

Étant donné la nature dynamique de la production et de l'utilisation des isotopes et leur importance dans de nombreux secteurs, il est recommandé que l'OCDE et l'AIEA continuent de suivre l'évolution de ce domaine.



## I. PRODUCTION D'ISOTOPES

La production d'isotopes exige une série d'étapes aboutissant à un produit se prêtant à des utilisations finales (voir annexe 1). D'ordinaire, l'ensemble du processus ne se déroule pas dans une seule installation, mais plutôt dans plusieurs installations différentes. Ce rapport s'intéresse essentiellement à la partie nucléaire du processus, à savoir la production de l'isotope recherché. C'est pourquoi seuls les réacteurs, accélérateurs et installations de séparation figurent dans la description des installations de production des isotopes que l'on trouvera ci-dessous. Ne sont abordées dans ce rapport ni la partie amont du processus, c'est-à-dire la sélection et la préparation du matériau cible, ni les opérations aval, à savoir le traitement chimique, le conditionnement et le contrôle des isotopes, permettant d'obtenir un produit commercial prêt à l'usage.

Il ressort des résultats de l'étude que la production d'isotopes est une activité pratiquée à l'échelon de la planète et qu'il existe des installations de production d'isotopes dans le monde entier. Ventilées par région, c'est en Afrique et en Amérique centrale et du Sud que les installations de production sont les moins nombreuses, alors que c'est en Europe occidentale, en Scandinavie et en Amérique du Nord qu'elles sont les plus nombreuses (voir tableau 1.1).

Tableau 1.1 **Répartition régionale des installations de production d'isotopes**  
(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Région	Installations d'isotopes lourds	Accélérateurs	Réacteurs de recherche	Total
Afrique	0	2	4	6
Amérique centrale et du Sud	0	6	3	9
Europe centrale, orientale et du Sud-Est	1	18	11	30
Asie de l'Est	0	53	8	61
Moyen Orient, Asie centrale et méridionale	0	8	5	13
Amérique du Nord	3	84	9	96
Asie du Sud-Est et Zone du Pacifique	0	9	5	14
Europe occidentale et Scandinavie	1	93	9	103
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>273</b>	<b>54</b>	<b>332</b>

### Production en 2002

Vingt cinq pays ont répondu à un questionnaire sollicitant des informations sur la production et la demande d'isotopes (voir annexe 4)<sup>3</sup>. La Commission européenne a aussi rendu compte de la production d'isotopes dans son installation d'accélérateur à Ispra, Italie. Parmi ceux qui ont répondu, 23 ont fait état d'une production d'isotopes en 2002 (voir tableau 1.2). Des informations supplémentaires émanant de l'AIEA indiquent que 31 autres pays ont produit des isotopes au cours de cette année. [1,2]

3. Un certain nombre de producteurs importants n'a pas répondu au questionnaire. C'est pourquoi toutes les analyses et conclusions relatives à la production d'isotopes doivent être considérées sous certaines réserves.

Tableau 1.2 Récapitulatif de la production d'isotopes notifiée en 2002

Pays	Isotopes majeurs produits en 2002	Quantité produite en 2002 (FdI)	Autres isotopes produits en 2002	Quantité totale produite en 2002 (FdI)	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
Afrique du Sud	<sup>99</sup> Mo	NC	<sup>32</sup> P, <sup>35</sup> S, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>192</sup> Ir	NC	NC
Allemagne	<sup>18</sup> F	15.0 TBq	NC	30.0 TBq	<sup>211</sup> Ac
	<sup>123</sup> I	15.0 TBq			
Australie	<sup>192</sup> Ir	1 074.5 TBq	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>51</sup> Cr, <sup>60</sup> Co, <sup>64</sup> Cu, <sup>67</sup> Ga, <sup>90</sup> Y, <sup>123</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm, <sup>201</sup> Tl	1 551.9 TBq	<sup>76</sup> Br, <sup>124</sup> I, <sup>177</sup> Lu
	<sup>99</sup> Mo	453.6 TBq			
	<sup>169</sup> Yb	17.8 TBq			
Autriche	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>18</sup> F	NC	NC	NC	NC
Bélarus	NC	0	NC	0	<sup>99m</sup> Tc
Belgique	<sup>99</sup> Mo	30 170.0 TBq	<sup>11</sup> C, <sup>18</sup> F, <sup>90</sup> Y, <sup>103</sup> Pd, <sup>125</sup> I, <sup>153</sup> Sm, <sup>186</sup> Re, <sup>177</sup> Lu, <sup>203</sup> Hg	47 515.9 TBq	<sup>188</sup> Re
	<sup>192</sup> Ir	15 000.0 TBq			
	<sup>131</sup> I	2 220.0 TBq			
Brésil	<sup>18</sup> F	3.0 TBq	<sup>35</sup> S, <sup>51</sup> Cr, <sup>60</sup> Co, <sup>82</sup> Br, <sup>123</sup> I, <sup>192</sup> Ir, <sup>203</sup> Hg	7.9 TBq	<sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>201</sup> Tl
	<sup>67</sup> Ga	1.8 TBq			
	<sup>153</sup> Sm	1.7 TBq			
Chili	<sup>99m</sup> Tc	32.0 TBq	<sup>82</sup> Br, <sup>192</sup> Ir	39.1 TBq	<sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga
	<sup>131</sup> I	6.8 TBq			
	<sup>153</sup> Sm	0.2 TBq			
Commission européenne	<sup>123</sup> I	3.0 TBq	<sup>211</sup> At	4.0 TBq	NC
	<sup>18</sup> F	1.0 TBq			
	<sup>64</sup> Cu	10 GBq			
Corée	<sup>192</sup> Ir	2 625.2 TBq	<sup>7</sup> Li, <sup>11</sup> C, <sup>18</sup> F, <sup>32</sup> P, <sup>41</sup> Ar, <sup>60</sup> Co, <sup>67</sup> Ga, <sup>79</sup> Kr, <sup>123</sup> I, <sup>166</sup> Ho, <sup>201</sup> Tl	2 638.5 TBq	<sup>33</sup> P, <sup>75</sup> Se, <sup>89</sup> Sr, <sup>125</sup> I, <sup>125</sup> Sb, <sup>152</sup> Eu, <sup>169</sup> Yb
	<sup>131</sup> I	10.8 TBq			
	<sup>99</sup> Mo	1.2 TBq			
Egypte	<sup>99m</sup> Tc*	1.3 TBq	NC	1.7 TBq	<sup>99</sup> Mo, <sup>153</sup> Sm, <sup>188</sup> Re, <sup>188</sup> W
	<sup>131</sup> I	370 GBq			
	<sup>32</sup> P	3.7 GBq			
Espagne	<sup>18</sup> F	61 GBq	NC	61 GBq	NC
États-Unis	<sup>192</sup> I	7.0 TBq	<sup>7</sup> Be, <sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>22</sup> Na, <sup>24</sup> Na, <sup>32</sup> Si, <sup>41</sup> Ar, <sup>44</sup> Ti, <sup>46</sup> Sc, <sup>49</sup> V, <sup>55</sup> Fe, <sup>60</sup> Co, <sup>60</sup> Cu, <sup>61</sup> Cu, <sup>64</sup> Cu, <sup>65</sup> Zn, <sup>66</sup> Ga, <sup>67</sup> Cu, <sup>68</sup> Ge, <sup>73</sup> As, <sup>76</sup> Br, <sup>77</sup> As, <sup>77</sup> Br, <sup>82</sup> Br, <sup>82</sup> Sr, <sup>85</sup> Sr, <sup>86</sup> Y, <sup>88</sup> Y, <sup>88</sup> Zr, <sup>94m</sup> Tc, <sup>95m</sup> Tc, <sup>109</sup> Cd, <sup>124</sup> I, <sup>194</sup> Hg, <sup>194</sup> Sb, <sup>198</sup> Au, <sup>207</sup> Bi, <sup>252</sup> Cf	30.4 TBq	<sup>63</sup> Ni, <sup>57</sup> Co, <sup>75</sup> Se, <sup>177</sup> Lu, <sup>186</sup> Re
	<sup>125</sup> I	8.1 TBq			
	<sup>188</sup> W	2.5 TBq			
Finlande	<sup>15</sup> O	23.7 TBq	<sup>24</sup> Na, <sup>41</sup> Ar, <sup>64</sup> Cu, <sup>82</sup> Br, <sup>123</sup> I, <sup>129</sup> Cs, <sup>132</sup> Cs, <sup>136</sup> Cs, <sup>140</sup> La, <sup>153</sup> Sm, <sup>198</sup> Au	42.5 TBq	NC
	<sup>11</sup> C	8.7 TBq			
	<sup>18</sup> F	6.0 TBq			
France	<sup>99</sup> Mo	4 000.0 TBq	<sup>11</sup> C, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>81m</sup> Kr, <sup>140</sup> La, <sup>169</sup> Er, <sup>186</sup> Re	4 063.5 TBq	NC
	<sup>153</sup> Sm	30.0 TBq			
	<sup>90</sup> Y	13.0 TBq			

Tableau 1.2 Récapitulatif de la production d'isotopes notifiée en 2002 (suite)

Pays	Isotopes majeurs produits en 2002	Quantité produite en 2002 (FdI)	Autres isotopes produits en 2002	Quantité totale produite en 2002 (FdI)	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
Inde	<sup>60</sup> Co	19 550.0 TBq	<sup>32</sup> P, <sup>46</sup> Sc, <sup>51</sup> Cr, <sup>82</sup> Br, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>153</sup> Sm, <sup>203</sup> Hg	20 431.7 TBq	<sup>125</sup> I, <sup>177</sup> Lu
	<sup>192</sup> Ir	815.0 TBq			
	<sup>99</sup> Mo	21.0 TBq			
Indonésie	<sup>153</sup> Sm	9.7 TBq	<sup>32</sup> P, <sup>35</sup> S, <sup>46</sup> Sc, <sup>51</sup> Cr, <sup>65</sup> Zn, <sup>82</sup> Br, <sup>131</sup> I, <sup>141</sup> Ce, <sup>192</sup> Ir	11.5 TBq	<sup>18</sup> F, <sup>54</sup> Mn, <sup>57</sup> Co, <sup>64</sup> Cu, <sup>103</sup> Pd, <sup>111</sup> Ag, <sup>165</sup> Ho, <sup>177</sup> Lu
	<sup>99</sup> Mo	0.6 TBq			
	<sup>186</sup> Re	0.6 TBq			
Iran, Rép. islamique	<sup>192</sup> Ir	1 491.7 TBq	<sup>32</sup> P, <sup>67</sup> Ga, <sup>81m</sup> Kr, <sup>201</sup> Tl	1 546.5 TBq	<sup>11</sup> C, <sup>18</sup> F, <sup>103</sup> Pd, <sup>123</sup> I
	<sup>99m</sup> Tc	39.9 TBq			
	<sup>131</sup> I	14.8 TBq			
Japon	<sup>192</sup> Ir	947.8 TBq	<sup>60</sup> Co	982.4 TBq	NC
	<sup>169</sup> Yb	27.7 TBq			
	<sup>198</sup> Au	6.8 TBq			
Pakistan	<sup>131</sup> I	3.7 TBq	NC	3.7 TBq	<sup>166</sup> Ho, <sup>177</sup> Lu
	<sup>24</sup> Na	19 GBq			
	<sup>153</sup> Sm	10 GBq			
République tchèque	<sup>192</sup> Ir	27.4 TBq	<sup>90</sup> Y, <sup>203</sup> Hg	32.8 TBq	NC
	<sup>153</sup> Sm	5.4 TBq			
	<sup>166</sup> Ho	20 GBq			
Suisse	<sup>18</sup> F	0.7 TBq	<sup>11</sup> C	0.7 TBq	<sup>94m</sup> Tc
	<sup>67</sup> Cu	20 GBq			
Syrie	<sup>99m</sup> Tc*	2.0 TBq	NC	2.0 TBq	<sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>103</sup> Pd, <sup>123</sup> I, <sup>201</sup> Tl
Turquie	<sup>18</sup> F	1.3 TBq	NC	1.3 TBq	NC

\* Produit au plan local à l'aide de <sup>99</sup>Mo importé d'Afrique du Sud. NC : Non Communiqué.  
FdI : Fin d'irradiation.

Les cinq isotopes majeurs produits en 2002 par rapport à ceux produits dans le plus grand nombre de pays ont été <sup>18</sup>F (13 sur les 23 pays ayant notifié une production d'isotopes)<sup>4</sup>, <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc (10 sur 23), <sup>192</sup>Ir (10 sur 23) et <sup>11</sup>C et <sup>131</sup>I (chacun dans huit pays). Classés en fonction de l'activité (exprimée en TBq à la fin de l'irradiation), les cinq principaux isotopes produits en 2002 ont été le <sup>99</sup>Mo, le <sup>192</sup>Ir, le <sup>60</sup>Co, le <sup>131</sup>I et le <sup>18</sup>F (voir tableau 1.3).

Tableau 1.3 Isotopes majeur produits en 2002

Rang	En fonction de l'activité (TBq à la fin de l'irradiation)	En fonction du nombre de pays producteurs
1	<sup>99</sup> Mo	<sup>18</sup> F
2	<sup>192</sup> Ir	<sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc
3	<sup>60</sup> Co	<sup>192</sup> Ir
4	<sup>131</sup> I	<sup>11</sup> C
5	<sup>18</sup> F	<sup>131</sup> I

4. En plus de la production indiquée dans les réponses au questionnaire, de nombreux pays supplémentaires ont probablement produit du <sup>18</sup>F (et d'autres isotopes courants) en 2002. Par exemple, les données de l'AIEA indiquent que 38 pays ont produit du <sup>18</sup>F en 2002 (voir annexe 3).

## Production d'isotopes à l'aide de réacteurs

Les réacteurs sont généralement utilisés pour produire par irradiation neutronique des noyaux riches en neutrons. La grande majorité des réacteurs qui servent à produire des isotopes sont des réacteurs de recherche polyvalents. Toutefois, certains isotopes (le  $^{60}\text{Co}$  principalement) sont produits dans des centrales nucléaires commerciales, accessoirement à la production d'électricité. Deux réacteurs exclusivement consacrés à la production de  $^{99}\text{Mo}$  ont été construits au Canada et devraient être opérationnels sous peu.

### *Réacteurs de recherche*

Par définition, les réacteurs de recherche ont pour finalité principale de servir d'outil à la recherche scientifique. Ils sont cependant un nombre non négligeable à produire des isotopes dans le cadre de cette vocation et, dans de nombreux cas, à des fins industrielles et médicales. Les réacteurs de recherche considérés dans cette étude sont ceux qui produisent des quantités notables d'isotopes, autrement dit qui consacrent, dans la plupart des cas, au moins cinq pour cent de leur capacité à la production d'isotopes ou qui représentent à cet égard une source notable de production dans un pays particulier. Ces réacteurs ont en général un niveau de puissance thermique sensiblement supérieur à 1 MW. Pour les besoins de l'étude, on ne considère pas l'analyse par activation neutronique comme un mode de production d'isotopes. D'après cette définition, sur un total de près de 270 réacteurs en service dans le monde, 54 sont considérés comme des installations de production d'isotopes aux fins du présent rapport (voir annexe 2).

### *Puissance des réacteurs*

La puissance d'un réacteur de recherche fournit une certaine indication de sa capacité à produire des isotopes. D'une façon générale, plus la puissance est grande, plus la capacité à produire des isotopes est importante en raison du plus grand nombre de neutrons disponibles et du volume matériel supérieur disponible pour les sites cibles. Environ 30 % des réacteurs de recherche produisant des isotopes ont une puissance comprise entre 1 et 5 MW, 46 % environ comprise entre 5 et 30 MW et 24 % environ supérieure à 30 MW (voir tableau 1.4).

Tableau 1.4 **Répartition géographique des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes par niveau de puissance**  
(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Région	Nombre de réacteurs			Total
	< 5 MW	5 à 30 MW	> 30 MW	
Afrique	1	3	0	<b>4</b>
Amérique centrale et du Sud	0	3	0	<b>3</b>
Amérique du Nord	5	1	3	<b>9</b>
Asie de l'Est	2	4	2	<b>8</b>
Asie du Sud-Est et Zone du Pacifique	4	1	0	<b>5</b>
Europe centrale, orientale et du Sud-Est	0	8	3	<b>11</b>
Europe occidentale et Scandinavie	3	2	4	<b>9</b>
Moyen Orient, Asie centrale et méridionale	1	3	1	<b>5</b>
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>13</b>	<b>54</b>

## Flux des réacteurs

Le flux neutronique est un autre paramètre déterminant de la capacité de production d'isotopes d'un réacteur. D'ordinaire, le flux neutronique détermine les types d'isotopes qui peuvent être produits. Plus d'un tiers des réacteurs de recherche ont un flux de neutrons thermiques inférieur à  $1 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s. Il s'agit principalement de machines appartenant à des universités et des centres de recherche, qui s'en servent d'abord pour la recherche scientifique et produisent en général accessoirement des isotopes à usage interne ou national. La moitié environ des réacteurs ont un flux de neutrons thermiques de l'ordre de 1 à  $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s (voir tableau 1.5).

Tableau 1.5 Répartition régionale des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes par niveau maximal du flux thermique (au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Région	Nombre de réacteurs			Total
	$\leq 1 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> s	De 1 à $5 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> s	$\geq 5 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> s	
Afrique	1	3	0	4
Amérique centrale et du Sud	1	2	0	3
Amérique du Nord	5	1	3	9
Asie de l'Est	4	3	1	8
Asie du Sud-Est et Zone du Pacifique	4	1	0	5
Europe centrale, orientale et du Sud-Est	1	8	2	11
Europe occidentale et Scandinavie	3	5	1	9
Moyen Orient, Asie centrale et méridionale	2	3	0	5
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>26</b>	<b>7</b>	<b>54</b>

Les réacteurs à haut flux neutronique (à savoir, ceux qui ont un flux thermique supérieur à  $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>s) sont indispensables pour produire certains isotopes ayant une activité massique élevée comme le <sup>60</sup>Co, le <sup>63</sup>Ni, le <sup>75</sup>Se, le <sup>188</sup>W et le <sup>252</sup>Cf. Sept de ces réacteurs à haut flux sont en service en Belgique, en Chine, en Russie et aux États-Unis (voir tableau 1.6).

Tableau 1.6 Réacteurs de recherche à haut flux (au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Pays	Nom	Site
Belgique	BR2	Mol
Chine	HFETR	Chengdu
États-Unis	ATR	Idaho Falls
	HFIR	Oak Ridge
	MURR	Columbia
Russie	SM2	Dimitrovgrad
	MIR-M1	Dimitrovgrad

Tous les réacteurs de recherche producteurs d'isotopes appartiennent à des établissements publics, à deux exceptions près, un réacteur en République tchèque et un autre, en Suède, qui appartiennent et sont exploités par des entreprises privées. Aux Pays-Bas et aux États-Unis, trois réacteurs appartenant aux pouvoirs publics, sont exploités par des entreprises privées. On note, dans les pays de l'OCDE en particulier, une participation accrue du secteur privé dans le domaine de la production d'isotopes. Les deux réacteurs dédiés à la production d'isotopes, qui sont actuellement mis en service au Canada, appartiennent au secteur privé mais seront exploités par les pouvoirs publics.

La majorité des réacteurs de recherche, qui produisent des isotopes, sont équipés de cellules chaudes consacrées au traitement, au conditionnement et à la manutention de l'isotope brut sortant du

réacteur, avant son transport et sa livraison à une installation de traitement ou au client final. Une grande majorité de ces réacteurs possèdent des capacités de stockage des isotopes sur le site même du réacteur ou à proximité, ainsi que des cellules chaudes destinées au traitement et à la manipulation.

### ***Centrales nucléaires***

Les centrales nucléaires commerciales ne sont pas normalement utilisées pour produire des isotopes. Cependant, dans quelques pays, comme l'Argentine, le Canada, la Hongrie, l'Inde et la Russie, certaines centrales nucléaires commerciales servent à produire certains isotopes. Par exemple, les centrales nucléaires en Inde sont utilisées pour produire du  $^{60}\text{Co}$ . En outre, au Canada, on récupère le tritium ( $^3\text{H}$ ) contenu dans l'eau lourde qui sert de caloporteur dans les réacteurs de puissance.

### **Production à l'aide d'accélérateurs**

En règle générale, les accélérateurs sont utilisés pour obtenir des isotopes pauvres en neutrons par bombardement à l'aide de protons, de deutéron ou de particules alpha. Ces isotopes se désintègrent en général par émission de positrons ou capture d'électrons. Certains accélérateurs, notamment les machines de haute énergie, servent essentiellement à la recherche et ne produisent des isotopes qu'avec des faisceaux excédentaires ou des déflecteurs de faisceaux. D'autres machines sont dédiées à la production des isotopes, principalement à usage médical.

D'après les informations disponibles, il apparaît que 273 accélérateurs produisaient des isotopes en 2002 (voir annexe 3). Il est probable que ce nombre est notablement supérieur, compte tenu de la mise en place constante de petits cyclotrons dédiés à la production d'isotopes pour la tomographie par émission de positrons (TEP).

Comme le montre l'annexe 3, la gamme des isotopes produits en 2002 est large, mais les isotopes les plus couramment produits ont été ceux utilisés dans des caméras TEP à des fins de diagnostic médical, à savoir le  $^{11}\text{C}$ , le  $^{13}\text{N}$ , le  $^{15}\text{O}$  et le  $^{18}\text{F}$ .

Sur la base des réponses au questionnaire, abstraction faite des isotopes destinés à la TEP, les autres isotopes les plus couramment produits en 2002 (eu égard au nombre de pays les produisant) ont été le  $^{123}\text{I}$ , le  $^{67}\text{Ga}$ , le  $^{201}\text{Tl}$  et le  $^{64}\text{Cu}$ , qui sont aussi utilisés dans le secteur médical.

### ***Énergie du faisceau***

Un paramètre clé d'un accélérateur, déterminant sa capacité à produire des isotopes, est l'énergie du faisceau. Généralement, plus l'énergie du faisceau est faible, moins grand est le nombre de types d'isotopes que l'accélérateur est capable de produire. Dans une certaine mesure, l'énergie du faisceau influe également sur la capacité de production, car des énergies de faisceau plus élevées améliorent le taux de production, étant donné que les sections efficaces de capture augmentent avec l'accroissement de l'énergie du faisceau.

La plupart des accélérateurs en usage dans le monde sont des machines à basse énergie (< 25 MeV) utilisées principalement pour produire des isotopes pour caméras TEP (voir tableau 1.7). Celles-ci représentent environ 63 % du total mondial, les machines à énergie moyenne (25 à 180 MeV) constituant l'essentiel du parc restant (environ 32 %).

Il existe huit accélérateurs de haute énergie, autrement dit capables de fonctionner à des niveaux d'énergie supérieurs à 180 MeV (voir tableau 1.8). Cinq de ces machines sont exploitées aux États-Unis, une au Canada, une en Afrique du Sud et une en Suisse. Bien qu'ils soient principalement consacrés à la recherche, ces accélérateurs produisent parfois des isotopes. D'ordinaire ils ne produisent que de petites quantités d'isotopes destinés à la recherche, qui ne sont pas disponibles par d'autres moyens, encore que certains, tels que le  $^{82}\text{Sr}$  et le  $^{68}\text{Ge}$ , soient produits en quantités commerciales.

Tableau 1.7 **Répartition régionale des accélérateurs en fonction de l'énergie du faisceau**  
(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Région	Nombre d'accélérateurs				Total
	< 25 MeV	25-180 MeV	> 180 MeV	Informations non disponibles	
Afrique	1	0	1	0	2
Amérique centrale et du Sud	1	4	0	1	6
Amérique du Nord	54	21	6	3	84
Asie de l'Est	37	15	0	1	53
Asie du Sud-Est et zone du Pacifique	7	2	0	0	9
Europe centrale, orientale et du Sud-Est	8	9	0	1	18
Europe occidentale et Scandinavie	60	32	1	0	93
Moyen Orient, Asie centrale et méridionale	3	5	0	0	8
<b>Total</b>	<b>171</b>	<b>88</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>273</b>

Tableau 1.8 **Accélérateurs de haute énergie** (au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Pays	Nom de l'accélérateur/Emplacement	Énergie maximale du faisceau (MeV)
Afrique du Sud	Centre national de l'accélérateur, Faure	200
Canada	TRIUMF, Vancouver	500
États-Unis	Installation de production d'isotopes de l'accélérateur linéaire de Brookhaven (BLIP), Upton	200
	Université de l'Indiana, Bloomington	205
	LANCSE, Los Alamos	800
	Laboratoire national du Cyclotron supraconducteur, East Lansing	200
	Texas A&M, College Station	240
Suisse	Institut Paul Scherrer, Villigen	590

### *Intensité du faisceau*

Un autre paramètre déterminant est l'intensité du faisceau, qui influe sur la capacité de production pour une énergie donnée du faisceau. Conjointement, l'énergie du faisceau et son intensité déterminent les types d'isotopes que la machine est capable de produire et avec quelle capacité.

Dans la plupart des accélérateurs du monde, l'intensité du faisceau est inférieure à 100  $\mu\text{A}$  (62 % environ), ce qui correspond à leur fonction de producteurs de la gamme étroite d'isotopes utilisés dans les caméras TEP. Le reste des accélérateurs ont pour l'essentiel des intensités de faisceaux comprises entre 100 et 500  $\mu\text{A}$  (21 % environ). Seules 10 machines ont des intensités maximales supérieures à 500  $\mu\text{A}$  (voir tableau 1.9).

Tableau 1.9 Répartition régionale des accélérateurs en fonction de l'intensité du faisceau  
(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Région	Nombre d'accélérateurs				
	< 100 µA	100-500 µA	> 500 µA	Informations non disponibles	Total
Afrique	0	2	0	0	2
Amérique centrale et du Sud	2	2	1	1	6
Amérique du Nord	41	21	2	20	84
Asie de l'Est	42	10	0	1	53
Asie du Sud-Est et zone du Pacifique	4	0	0	5	9
Europe centrale, orientale et du sud-est	11	4	2	1	18
Europe occidentale Scandinavie	67	16	3	7	93
Moyen Orient, Asie centrale et méridionale	3	3	2	0	8
<b>Total</b>	<b>170</b>	<b>58</b>	<b>10</b>	<b>35</b>	<b>273</b>

Les accélérateurs ne sont pas uniformément répartis dans le monde. Ils sont situés en grande majorité dans les pays membres de l'OCDE d'Europe occidentale et d'Amérique du Nord. Les régions de l'Afrique, de l'Amérique centrale et du Sud, du Moyen Orient, de l'Asie centrale et méridionale ainsi que de l'Asie du Sud-est et de la zone du Pacifique comptent ensemble moins de 10 % des accélérateurs du monde.

### Séparation des isotopes des produits de fission

L'isotope le plus important obtenu par séparation à partir des produits de fission est le  $^{99}\text{Mo}$ , isotope précurseur utilisé pour produire le  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , qui est largement utilisé en médecine nucléaire. Étant donné que les utilisateurs actuels ont besoin de  $^{99}\text{Mo}$  d'activité massique élevée, il est principalement obtenu par séparation des produits de fission résultant de l'irradiation de cibles enrichies en  $^{235}\text{U}$  dans des réacteurs. Il existe des installations en service, qui produisent du  $^{99}\text{Mo}$  à partir de produits de fission à grande échelle en Afrique du Sud, en Belgique, au Canada, et aux Pays-Bas, puis expédient ce  $^{99}\text{Mo}$  à d'autres pays en vue de la production de générateurs de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Par exemple, l'Égypte et la Syrie ont fait état de la production de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  à l'aide de  $^{99}\text{Mo}$  importé d'Afrique du Sud. Il existe un certain nombre d'autres producteurs en Australie et dans des pays d'Europe n'appartenant pas à l'OCDE, qui utilisent du  $^{99}\text{Mo}$  importé obtenu par fission pour fabriquer des générateurs de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Certaines des installations utilisées pour produire du  $^{99}\text{Mo}$  d'activité massique élevée, produisent aussi d'autres isotopes tels que le  $^{131}\text{I}$  et le  $^{133}\text{Xe}$ . Une installation de production de  $^{99}\text{Mo}$  a été construite aux États-Unis, mais demeure en réserve sans avoir été mise en service.

Par ailleurs, plusieurs installations produisent des isotopes tels que le  $^{85}\text{Kr}$ , le  $^{90}\text{Sr}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  à partir du combustible irradié (usé). De telles installations sont exploitées en Russie, en Inde et aux États-Unis. Depuis peu, la production de  $^{90}\text{Y}$  (dérivé du  $^{90}\text{Sr}$  contenu dans les produits de fission du combustible usé) fait l'objet d'un intérêt croissant aux États-Unis où un stock de  $^{90}\text{Sr}$ , associé à un procédé de production, a été transféré à une entreprise privée. Des entreprises ailleurs dans le monde exploitent une technologie analogue de production de  $^{90}\text{Y}$ .

Parmi les autres activités signalées, on peut mentionner les suivantes :

- Le Bélarus a fait état de la mise en place d'une capacité de production de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  à l'aide d'une technologie à base de gel de Zr-Mo utilisant du  $^{99}\text{Mo}$  issu de cibles irradiées de  $\text{MoO}_3$ . D'autres technologies permettant la concentration de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  à partir de  $^{99}\text{Mo}$  produit en réacteur, ont également été mises au point aux États-Unis.

- L'Inde est un important producteur de  $^{60}\text{Co}$  par irradiation dans des centrales nucléaires commerciales.
- La Belgique a fait état de la production de  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{99}\text{Mo}$  et  $^{131}\text{I}$  à partir du traitement de l'uranium irradié dans une installation de production d'isotopes à Fleurus. Le  $^{99}\text{Mo}$  était le principal isotope produit dans cette installation à l'aide d'uranium irradié dans plusieurs réacteurs de recherche en Europe.

### Séparation des transuraniens et des émetteurs alpha

Un certain nombre d'installations produit une variété d'isotopes lourds destinés à diverses applications. La technologie à mettre en œuvre est relativement complexe et le volume de la production assez faible par rapport aux stocks traités. La répartition géographique de ces installations est donnée dans le tableau 1.10.

Tableau 1.10 Répartition géographique des installations produisant des transuraniens et des émetteurs alpha (au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Pays	Nom de l'installation	Emplacement	Principaux isotopes produits
Allemagne	Institut des éléments transuraniens	Karlsruhe	$^{213}\text{Bi}$ , $^{225}\text{Ac}$
États-Unis	ORNL LANL AlphaMed (PNNL)	Oak Ridge, TN Los Alamos, NM Hanford, WA	$^{224}\text{Ra}$ , $^{225}\text{Ac}$ , $^{229}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{242}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{249}\text{Bk}$ , $^{252}\text{Cf}$
Fédération de Russie	Dmitrovgrad	Dmitrovgrad	$^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{252}\text{Cf}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$

### Production d'isotopes stables

Approximativement 300 isotopes stables différents de quelque 60 éléments ont été produits par un certain nombre de techniques de séparation. En général, ces isotopes stables sont classés soit comme lourds (soufre ou éléments à numéro atomique plus élevé), soit comme légers. Les techniques de séparation, mais aussi les obstacles financiers et institutionnels, varient considérablement selon que les isotopes appartiennent à l'un ou à l'autre de ces groupes. Les techniques de séparation applicables aux isotopes stables lourds peuvent être utilisées pour séparer des matières fissiles et sont, de ce fait, soumises à des contrôles internationaux très sévères. En revanche, les technologies utilisées pour séparer les isotopes stables légers sont plus faciles à mettre en œuvre et moins « sensibles ».

#### *Production d'isotopes stables lourds*

Les isotopes stables lourds sont aujourd'hui produits par trois techniques : le procédé de séparation électromagnétique ancien et très adaptable, faisant appel à des spectromètres de masse dédiés, appelés calutrons, un procédé plus moderne et plus efficace, la centrifugation gazeuse et le procédé d'enrichissement par séparation de plasma récemment commercialisé, mis en place par Theragenics aux États-Unis. Le procédé de la centrifugation gazeuse ne peut être utilisé que pour des éléments qui forment des composés gazeux appropriés. Toutes ces techniques sont fort complexes, et les obstacles à l'accès à ce marché de nouveaux producteurs potentiels sont extrêmement sérieux. Les producteurs d'isotopes stables lourds sont donc très peu nombreux. Les installations appartiennent en général au secteur public, à l'exception d'une usine d'enrichissement aux Pays-Bas, dont en fait les pouvoirs publics détiennent un petit pourcentage et de l'installation de Theragenics aux États-Unis qui appartient au secteur privé. On trouvera au tableau 1.11 la répartition géographique des installations de production d'isotopes lourds.

**Tableau 1.11 Répartition géographique des installations de production d'isotopes stables lourds (au 1<sup>er</sup> janvier 2003)**

<b>Pays</b>	<b>Exploitant</b>	<b>Technologie</b>
Chine	CIAE	Séparation électromagnétique
États-Unis	Oak Ridge Nat. Lab./DOE Theragenics	Séparation électromagnétique Séparation de plasma
Pays-Bas	Urenco	Centrifugation
Russie	Centrotech ECP, St. Pétersbourg ECP Zelenogorsk, Krasnoïarsk Institut Kourtchatov, Moscou Groupe sibérien SCC, Tomsk EKPC, Sverdlovsk OKB GAZ, Nijny-Novgorod VNIIEF, Nijny Novgorod	Centrifugation Centrifugation Séparation électromagnétique, centrifugation Centrifugation Séparation électromagnétique Centrifugation Centrifugation

Les producteurs d'isotopes faisant appel au procédé de séparation électromagnétique utilisent des installations relativement anciennes, coûteuses à exploiter, avec les risques que cela comporte pour la sécurité d'approvisionnement. En revanche, les producteurs qui ont recours à la méthode de centrifugation, ont l'avantage d'exploiter un matériel plus moderne et moins onéreux. Toutefois, cette technique est moins polyvalente et ne permet pas de produire une large gamme d'isotopes stables. Par ailleurs, l'importance des producteurs russes sur le marché mondial est une source de préoccupation supplémentaire. Sachant les problèmes financiers et organisationnels que connaît ce pays, il y a lieu de s'interroger sur l'aptitude de ces producteurs à assurer des niveaux de production suffisants.

Parmi les autres techniques de production d'isotopes stables lourds, qui ont été ou sont étudiées, figurent les techniques laser, une variété de procédés de séparation du plasma, et quelques dispositifs de séparation chimique.

### ***Production d'isotopes stables légers***

Un certain nombre d'isotopes légers (situés en dessous du sodium dans la classification périodique des éléments) ont de multiples applications en médecine et dans la recherche. Divers isotopes stables de l'oxygène, de l'azote, du carbone, entre autres, sont utilisés couramment. Il existe différentes technologies de séparation des isotopes stables. La séparation électromagnétique, qui a été employée dans le passé pour certains de ces éléments, est assez inefficace et tend à être remplacée par des techniques plus performantes dont la diffusion thermique et la distillation cryogénique. Les isotopes légers sont plus faciles à produire que les isotopes lourds, et les obstacles technologiques ou institutionnels sont minimes. Les principaux producteurs d'isotopes stables légers sont les États-Unis, la Russie et Israël. Les entreprises sont surtout privées. Toutefois, les installations où sont produits ces isotopes ne sont pas traitées dans ce rapport, étant donné que la production d'isotopes stables légers ne pose pas de véritable problème d'approvisionnement.

### **Production future**

Au cours des quelques prochaines années, la production des isotopes devrait continuer d'augmenter. Sur les 25 réponses au questionnaire, 21 font état de projets visant à accroître soit les quantités, soit les types d'isotopes produits, soit encore les deux dans les trois ans à venir. D'importantes progressions de la production de  $^{18}\text{F}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^{192}\text{Ir}$  sont prévues.

Onze réacteurs de recherche sont soit en cours de mise en service, soit en construction, soit encore prévus (voir tableau 1.12). Ces nouveaux réacteurs amélioreront la capacité théorique et la capacité mondiales de production des isotopes.

Les États-Unis ont mis en service une importante installation nouvelle d'accélérateur destinée à la production d'isotopes en janvier 2004. Alors qu'elle permet la production de plus de 30 types différents d'isotopes en quantités notables, les isotopes essentiels qu'il est prévu de produire initialement sont le  $^{67}\text{Cu}$ , le  $^{68}\text{Ge}$ , le  $^{73}\text{As}$  et le  $^{82}\text{Sr}$ .

Bien que l'on ne dispose pas de chiffres spécifiques, on s'attend à ce que des nombres croissants de cyclotrons dédiés à la TEP continuent d'être installés dans les hôpitaux et les centres médicaux dans le monde entier, à mesure que les techniques de diagnostic faisant appel à la TEP connaîtront un succès grandissant et se généraliseront.

Tableau 1.12 Réacteurs de recherche en cours de mise en service, en construction ou prévus<sup>5</sup>  
(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

Pays	Nom du réacteur	Puissance (MWth)	Flux thermique maximal (n/cm <sup>2</sup> s)	En cours de mise en service, prévu ou en construction (MS/P/EC)	Date de fonctionnement prévue
Allemagne	FRM II	20	8×10 <sup>14</sup>	EC	
Australie	RRR	20	3×10 <sup>14</sup>	EC	2006
Canada	MAPLE I et II	10	2×10 <sup>14</sup>	MS	2005
Chine	CARR	60	1×10 <sup>15</sup>	P	
Fédération de Russie	PIK	100	4×10 <sup>15</sup>	EC	
France	JHR	100	7×10 <sup>14</sup>	P	2015
Indonésie	RIP	10	1×10 <sup>14</sup>	P	
Maroc	MA-R1	2	4.4×10 <sup>13</sup>	EC	
Thaïlande	TRR-2	10	1×10 <sup>14</sup>	EC	2005
Tunisie	TRR	2	n.d.	P	

n.d. : non disponible.

## Références

- [1] AIEA, *Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States*, IAEA-CDRP/CD, ISBN 92-0-133302-1, Vienne, Autriche, 2003.
- [2] AIEA, *Research Reactors Database*, [www.iaea.org/worldatom/rrdb](http://www.iaea.org/worldatom/rrdb), Vienne, Autriche.

5. Les cases ombrées indiquent qu'il s'agira d'un réacteur à haut flux ayant un flux maximal de neutrons thermiques supérieur à 5×10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup>sec.



## II. APPLICATIONS DES ISOTOPES

Les isotopes sont utilisés à de nombreuses fins différentes. Ces applications peuvent plus ou moins être regroupées dans trois secteurs, à savoir ceux de la médecine, de l'industrie, ainsi que de la recherche et du développement. Le chapitre suivant ne prétend pas dresser une liste exhaustive des applications des isotopes, mais plutôt illustrer par des exemples, quelques uns des principaux usages des isotopes dans ces différents secteurs. Les isotopes utilisés pour la fabrication des combustibles des réacteurs nucléaires (l'uranium et le plutonium) ou pour des applications non civiles, ne sont pas traités dans la présente étude.

### Applications médicales

Voilà plus de 40 ans que les isotopes sont utilisés couramment en médecine, domaine dans lequel ils trouvent de nouvelles applications chaque fois que de nouvelles technologies et procédés voient le jour ou sont mis en œuvre. On estime que plus de 30 millions d'actes médicaux essentiels faisant appel aux isotopes sont pratiqués chaque année. Le recours aux isotopes en médecine peut, en majeure partie se répartir en deux grandes catégories, à savoir les applications diagnostique et thérapeutiques.

Le diagnostic de maladies courantes, telles que les affections cardiaques et le cancer, peut être opéré à l'aide de rayons gamma émis par des isotopes de manière à obtenir des images au moyen de caméras. Une autre technique appelée tomographie par émission de positrons (TEP) utilise des caméras pour détecter des émissions gamma provoquées par l'annihilation d'un positron.

La thérapeutique constitue un autre domaine dans lequel l'application des isotopes s'accroît rapidement comme technique de choix pour le traitement de certaines maladies, tant bénignes que malignes. Des thérapies ciblées au moyen de produits radiopharmaceutiques sont mises en œuvre pour le traitement de l'hyperthyroïdie, de la synovite et du cancer aussi bien que pour le traitement palliatif de la douleur liée aux cancers secondaires. Une autre forme de thérapie a recours à des sources radioactives scellées pour traiter des cancers par exposition des cellules cancéreuses à de fortes doses de rayonnements ciblés afin d'éliminer les cellules cancéreuses tout en évitant d'endommager les tissus sains.

En général, les isotopes servant au diagnostic, autres que le  $^{99m}\text{Tc}$ , sont produits à l'aide d'accélérateurs, alors que les isotopes utilisés à des fins thérapeutiques sont principalement produits dans des réacteurs de recherche (voir tableau 2.1). Les isotopes courants à usage médical, leurs méthodes de production et leurs applications sont indiqués dans les annexes 5 (réacteurs de recherche) et 6 (accélérateurs). On trouvera ci-après une étude de certaines techniques spécifiques et des isotopes utilisés.

## Techniques de diagnostic

En médecine nucléaire, l'imagerie diagnostique est une technique unique en son genre qui permet d'obtenir des informations fonctionnelles sur une diversité de pathologies importantes. Les techniques d'imagerie nucléaire sont des outils non invasifs puissants fournissant des informations de grande qualité sur les processus physiologiques et biochimiques. Elles viennent compléter d'autres méthodes d'imagerie, telles que la radiologie conventionnelle (rayons X), l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) et les ultrasons qui, de leur côté, sont d'excellentes sources d'informations physiques et structurelles. Par ailleurs, l'imagerie diagnostique est capable de donner des informations au niveau cellulaire révélatrices de la biochimie locale des tissus malades ou endommagés.

Tableau 2.1 Isotopes médicaux classés par catégorie d'usage et méthode de production

	Produits à l'aide d'accélérateurs	Produits à l'aide de réacteurs
Isotopes à usage de diagnostic	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{55}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Co}$ , $^{61}\text{Cu}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{74}\text{As}$ , $^{76}\text{Br}$ , $^{81\text{m}}\text{Kr}$ , $^{82\text{m}}\text{Rb}$ , $^{94\text{m}}\text{Tc}$ , $^{97}\text{Ru}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{124}\text{I}$ , $^{179}\text{Ta}$ , $^{201}\text{Tl}$	$^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{97}\text{Ru}$ , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{133}\text{Xe}$ , $^{153}\text{Gd}$ , $^{195\text{m}}\text{Pt}$
Isotopes à usage thérapeutique	$^{64}\text{Cu}$ , $^{67}\text{Cu}$ , $^{77}\text{Br}$ , $^{80\text{m}}\text{Br}$ , $^{88}\text{Y}$ , $^{89}\text{Zr}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{124}\text{I}$ , $^{186}\text{Re}$ , $^{211}\text{At}$	$^{32}\text{P}$ , $^{47}\text{Sc}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{67}\text{Cu}$ , $^{89}\text{Sr}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{90}\text{Y}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{103}\text{Ru}$ , $^{106}\text{Ru}$ , $^{109}\text{Cd}$ , $^{109}\text{Pd}$ , $^{117\text{m}}\text{Sn}$ , $^{115}\text{Cd}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{145}\text{Sm}$ , $^{153}\text{Sm}$ , $^{165}\text{Dy}$ , $^{166}\text{Dy}$ , $^{166}\text{Ho}$ , $^{169}\text{Er}$ , $^{169}\text{Yb}$ , $^{170}\text{Tm}$ , $^{175}\text{Yb}$ , $^{177}\text{Lu}$ , $^{186}\text{Re}$ , $^{188}\text{Re}$ , $^{192}\text{Ir}$ , $^{195\text{m}}\text{Pt}$ , $^{198}\text{Au}$ , $^{199}\text{Au}$ , $^{213}\text{Bi}$ , $^{241}\text{Am}$

L'imagerie diagnostique contribue de manière déterminante à l'identification et à la prise en charge de pathologies telles que les maladies cardiovasculaires, les dysfonctionnements cérébraux ainsi que les dysfonctionnements pulmonaires et rénaux et un large éventail de cancers. La sensibilité et la spécificité très grandes des techniques d'imagerie diagnostique présentent les avantages suivants : elles permettent d'identifier des affections à un stade précoce, de suivre la progression de la maladie, d'en déterminer précisément les divers stades d'évolution et de fournir des informations permettant de juger du succès éventuel de différentes thérapies possibles.

Dans le cas des cancers, par exemple, l'imagerie diagnostique permet d'évaluer efficacement les réactions au traitement et de détecter toute rechute à un stade précoce. Ces informations autorisent une prise en charge précise et exacte de la maladie et peuvent avoir une influence déterminante sur la décision médicale, par exemple, l'intervention chirurgicale.

### Imagerie gamma

Des gamma-caméras sont utilisées pour diagnostiquer les affections touchant divers organes, dont le cœur, le cerveau, les os, les poumons et la thyroïde. Les diagnostics par imagerie gamma utilisent en grande majorité du  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Les autres isotopes utilisés sont le  $^{201}\text{Tl}$ , le  $^{67}\text{Ga}$ , le  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ , le  $^{111}\text{In}$ , le  $^{123}\text{I}$ , le  $^{131}\text{I}$  et le  $^{133}\text{Xe}$ . Ces isotopes sont produits soit dans des réacteurs ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^{133}\text{Xe}$ ), soit dans des accélérateurs ( $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$  et  $^{201}\text{Tl}$ ). On trouvera récapitulées dans le tableau 2.2 les principales applications de l'imagerie diagnostique à l'aide de gamma-caméras.

Plusieurs isotopes spécifiques destinés à l'immunodiagnostic ont atteint divers stades de développement. Des combinaisons d'isotopes (surtout du  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) et d'anticorps monoclonaux ou de peptides sont à l'heure actuelle développées pour des utilisations en oncologie, pour l'imagerie des maladies infectieuses et des troubles moteurs et pour la détection de phlébothromboses profondes. La radiosynoviorthèse apparaît comme une option complémentaire pour le traitement de la polyarthrite

rhumatoïde par administration loco-régionale de radiopharmaceutiques marqués à l'aide d'isotopes émetteurs bêta, tels que le  $^{90}\text{Y}$ , le  $^{188}\text{Re}$ , le  $^{32}\text{P}$ , le  $^{166}\text{Ho}$ , etc., dans les articulations affectées. Par ailleurs, des entreprises mettent actuellement au point des sondes peropératoires destinées à la chirurgie assistée par isotope afin de détecter les marqueurs isotopiques liés à des anticorps spécifiques ou à d'autres biomolécules, comme moyen contribuant à l'élimination efficace des cellules cancéreuses au cours d'une intervention chirurgicale.

Tableau 2.2 Principaux isotopes utilisés pour l'imagerie gamma

Organes	Isotopes utilisés	Maladie recherchée
Poumons	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{133}\text{Xe}$ , $^{81\text{m}}\text{Kr}$	Embolies, affections respiratoires
Os	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	Tumeurs, infections, fractures osseuses
Thyroïde	$^{131}\text{I}$ , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{123}\text{I}$	Hyper/hypothyroïdie, tumeurs
Rein	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{131}\text{I}$	Fonctions rénales
Cerveau	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{133}\text{Xe}$	Embolies, débit sanguin, tumeurs, troubles neurologiques
Foie, pancréas	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$	Tumeurs
Abdomen	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{67}\text{Ga}$	Tumeurs
Sang	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$	Infections, volume sanguin et circulation sanguine
Cœur	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{201}\text{Tl}$ , $^{82}\text{Rb}$	Fonction et viabilité du myocarde
Tous les organes	$^{67}\text{Ga}$ , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{201}\text{Tl}$	Tumeurs

Plusieurs isotopes spécifiques destinés à l'immunodiagnostic ont atteint divers stades de développement. Des combinaisons d'isotopes (surtout du  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) et d'anticorps monoclonaux ou de peptides sont à l'heure actuelle développées pour des utilisations en oncologie, pour l'imagerie des maladies infectieuses et des troubles moteurs et pour la détection de phlébothromboses profondes. La radiosynoviorthèse apparaît comme une option complémentaire pour le traitement de la polyarthrite rhumatoïde par administration loco-régionale de radiopharmaceutiques marqués à l'aide d'isotopes émetteurs bêta, tels que le  $^{90}\text{Y}$ , le  $^{188}\text{Re}$ , le  $^{32}\text{P}$ , le  $^{166}\text{Ho}$ , etc., dans les articulations affectées. Par ailleurs, des entreprises mettent actuellement au point des sondes peropératoires destinées à la chirurgie assistée par isotope afin de détecter les marqueurs isotopiques liés à des anticorps spécifiques ou à d'autres biomolécules, comme moyen contribuant à l'élimination efficace des cellules cancéreuses au cours d'une intervention chirurgicale.

L'étalonnage des instruments d'imagerie nucléaire s'effectue au moyen de sources gamma scellées dont les pics d'énergie sont proches de ceux des isotopes utilisés dans les radiopharmaceutiques. Ces sources comprennent des sources étendues de grande surface, des sources ponctuelles et des fantômes anatomiques.

En outre, depuis peu, on fixe une source externe à la caméra pour compenser l'atténuation du signal radioactif dans les tissus. Cette technique appelée « correction d'atténuation » améliore la qualité de l'image. Depuis 1995, l'Administration fédérale pour l'alimentation et les produits pharmaceutiques (*Food and Drug Administration – FDA*), aux États-Unis, ainsi que les organismes de réglementation d'autres pays ont autorisé l'utilisation de gamma-caméras équipées de plusieurs sources de correction d'atténuation. Les isotopes employés sont le  $^{57}\text{Co}$ , le  $^{153}\text{Gd}$  et le  $^{241}\text{Am}$ .

Parmi les autres applications dans ce domaine, on peut citer l'utilisation du  $^{57}\text{Co}$ , du  $^{133}\text{Ba}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  comme sources de référence pour les activimètres et d'autres instruments. Des stylos marqueurs et des règles rigides ou souples de radioactivité servent à décrire l'anatomie des patients.

### *Tomographie par émission de positrons (TEP)*

Les tomographes sont utilisés essentiellement pour le diagnostic et la détermination des stades d'évolution du cancer. Le radiopharmaceutique le plus couramment utilisé dans les applications cliniques de la TEP est le fluorodésoxyglucose (FDG) marqué au  $^{18}\text{F}$  qui se comporte dans le corps de la même manière que le glucose ordinaire dans son métabolisme initial. Quatre-vingt dix pour cent environ des TEP réalisées font appel au FDG, cette application connaissant une popularité croissante notamment pour la détection du métabolisme des cellules cancéreuses. De nombreuses molécules supplémentaires marquées au  $^{18}\text{F}$ , qui présentent une absorption spécifique dans les tissus cancéreux, sont actuellement mises au point et utilisées cliniquement. Le marquage radioactif de médicaments ou de molécules biologiquement actives par des isotopes tels que le  $^{11}\text{C}$ , le  $^{13}\text{N}$  et le  $^{15}\text{O}$  est moins courant.

L'imagerie par émission de positrons se caractérise à l'heure actuelle par la très courte période des isotopes mis en jeu, ce qui exige de les utiliser à proximité du lieu où ils sont produits. La période maximale entre production et utilisation est de l'ordre de deux heures. C'est pourquoi les utilisateurs produisent pour la plupart leurs propres isotopes. Les accélérateurs spécifiquement conçus pour produire des isotopes destinés à la TEP sont disponibles dans le commerce et leur usage se développe rapidement en Australie, aux États-Unis, en Europe et au Japon.

Les caméras TEP emploient des isotopes tels que le  $^{68}\text{Ga}$  comme source d'étalonnage. Des systèmes utilisant des sources de  $^{57}\text{Co}$ , de  $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ , de  $^{133}\text{Ba}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  peuvent être ajoutés aux caméras TEP pour corriger l'atténuation du signal. La technologie de la TEP évolue rapidement et les fabricants produisent maintenant pour la plupart des machines capables d'exécuter simultanément une tomographie informatisée (TI) à l'aide de rayons X parallèlement à une TEP. L'association TI/TEP donne une excellente imagerie combinant les informations fonctionnelle et anatomiques.

On envisage d'utiliser d'autres isotopes pour la TEP, comme le  $^{64}\text{Cu}$ , le  $^{86}\text{Y}$  et le  $^{124}\text{I}$  à des fins de diagnostic et comme marqueurs de certaines pathologies.

### *Mesure de la densité osseuse*

On utilise, dans les centres de radiologie, des appareils qui mesurent la densité osseuse. Ces unités emploient des sources de  $^{125}\text{I}$ , de  $^{153}\text{Gd}$  ou de  $^{241}\text{Am}$ . Toutefois, la demande diminue car la tendance est à la construction de dispositifs à rayons X pour remplacer les systèmes à isotopes, de sorte que seules les machines actuellement en service sont encore exploitées. Trois entreprises privées, dont deux en Europe, fournissent ces sources.

### *Détection des ulcères gastriques*

L'urée marquée au  $^{14}\text{C}$  permet de détecter la présence de *helicobacter pylori* qui peut être à l'origine d'ulcères gastriques. Cette technique progresse rapidement, mais elle est concurrencée par une autre technique reposant sur l'utilisation d'un isotope stable, le  $^{13}\text{C}$ , combinée à la spectrométrie de masse. Ce type de produit, qui a été initialement mis au point par un scientifique australien, a été commercialisé par des entreprises privées.

### *Dosages radio-immunologiques*

Les dosages radio-immunologiques sont une technique employée en médecine et en biochimie pour mesurer de très petites quantités de substances biologiques telles que les hormones, les enzymes

et les vitamines dans le sang, les urines, la salive ou d'autres fluides biologiques. Les dosages radio-immunologiques sont couramment pratiqués dans les hôpitaux pour diagnostiquer des affections comme les dysfonctionnements de la thyroïde, les problèmes de procréation, le diabète, l'hypertension. Les dosages radio-immunologiques trouvent aussi des applications dans des domaines non cliniques, par exemple en matière de sécurité alimentaire et surveillance de l'environnement en raison de leur sensibilité élevée, de leur spécificité et de leur aptitude à traiter simultanément de grands nombres d'échantillons.

Pour ces dosages radio-immunologiques, on a besoin d'un traceur radioactif de l'antigène à mesurer et d'un anticorps spécifique à cet antigène. La très grande spécificité et la très forte sensibilité de cette technique, qui résultent de l'utilisation de l'anticorps spécifique en combinaison avec le traceur radioactif, permettent de mesurer les très faibles concentrations de la substance à analyser qui sont présentes dans des matrices complexes. Les dosages radio-immunologiques utilisent des antigènes ou des anticorps marqués à l'aide de l'isotope  $^{125}\text{I}$  ou parfois de  $^3\text{H}$  ou de  $^{57}\text{Co}$ .

D'autres technologies, notamment des méthodes faisant appel à la chimioluminescence, à la fluorescence ou aux enzymes, remplacent progressivement l'usage des isotopes pour les tests par dosage radio-immunologique à des fins de diagnostic.

### ***Techniques thérapeutiques***

#### *Applications des produits radiopharmaceutiques*

Les produits radiopharmaceutiques sont des composés médicaux qui renferment des isotopes radioactifs. Des radiopharmaceutiques marqués à l'aide d'isotopes émetteurs de particules (alpha, électrons Auger, bêta, par exemple) sont utilisés traiter l'hyperthyroïdie, la synovite et les cancers. Pour le traitement palliatif de la douleur liée aux cancers secondaires, on a aussi recours à des radiopharmaceutiques ostéotropes.

On utilise le  $^{131}\text{I}$  pour l'ablation post-opératoire de tissu thyroïdien dans le traitement de l'hyperthyroïdie ou du cancer de la thyroïde. D'autres isotopes, le  $^{32}\text{P}$ , le  $^{90}\text{Y}$  et le  $^{169}\text{Er}$  sont utilisés pour traiter la synovite et les pathologies arthritiques.

De plus en plus d'entreprises commerciales mettent au point des radiopharmaceutiques pour la radiothérapie, et de nombreux laboratoires de recherche travaillent sur ce domaine. On vise actuellement le traitement de divers types de cancers, dont le pronostic est sombre et qui sont difficiles à traiter et guérir par d'autres techniques. Des essais cliniques sont effectués avec des produits combinant des isotopes, tels que le  $^{90}\text{Y}$ , le  $^{131}\text{I}$ , le  $^{153}\text{Sm}$  et le  $^{213}\text{Bi}$ , à des anticorps monoclonaux, des fragments d'anticorps et de plus petites molécules comme les peptides.

#### *Soins palliatifs*

Parmi les évolutions récentes dans le domaine du traitement de la douleur produite par des métastases osseuses liées à la propagation des cancers du sein, de la prostate et du poumon, on peut citer l'utilisation de radiopharmaceutiques ostéotropes marqués au  $^{32}\text{P}$ , au  $^{89}\text{Sr}$ , au  $^{153}\text{Sm}$  et au  $^{186}\text{Re}$ . L'usage de ces techniques ne cesse de se répandre en raison de l'amélioration de la qualité de vie qu'elles apportent aux patients. D'autres agents à base de  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ , de  $^{166}\text{Ho}$  et de  $^{188}\text{Re}$  sont à l'étude.

## ***Radiothérapie à l'aide de sources scellées***

### *Télécobaltothérapie*

On utilise des sources au  $^{60}\text{Co}$  pour la télécobaltothérapie visant à détruire des cellules cancéreuses, mais la demande est en baisse car le  $^{60}\text{Co}$  est remplacé par les accélérateurs d'électrons.

Le « Gamma-Knife » ou « bistouri gamma » est une évolution relativement récente de la cobaltothérapie. Il est utilisé pour intervenir sur les tumeurs cérébrales bénignes et malignes, oblitérer des malformations artérioveineuses et soulager les névralgies.

### *Brachythérapie*

La brachythérapie est une technique médicale de traitement des tumeurs par radiothérapie interne à l'aide de sources radioactives scellées et qui consiste à implanter directement la substance radioactive à l'intérieur ou à proximité de la tumeur. L'implant de brachythérapie est une petite source radioactive, qui peut se présenter sous la forme de fils fins, de capsules ou de grains. L'implant peut être placé directement dans la tumeur ou inséré dans une cavité du corps à l'aide d'un cathéter, parfois encore dans l'espace laissé vide après l'ablation chirurgicale de la tumeur, afin de tuer toutes les cellules tumorales qui pourraient subsister. Les principaux isotopes utilisés en brachythérapie sont le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{192}\text{Ir}$ , le  $^{103}\text{Pd}$ , le  $^{125}\text{I}$ , et, dans une moindre mesure, le  $^{106}\text{Ru}$  et le  $^{198}\text{Au}$ .

Les implants de brachythérapie peuvent avoir un débit de dose faible ou un élevé. Les implants à haut débit de dose sont normalement retirés après quelques minutes, tandis que les implants à bas débit de dose sont laissés dans l'organisme du patient au moins plusieurs jours et, dans certains sites cancéreux, à titre définitif. Les implants à haut débit de dose peuvent être classés dans les techniques de brachythérapie à distance à chargement différé, étant donné que la source radioactive est guidée par un ordinateur à travers un tube jusque dans un cathéter placé à proximité de la tumeur. Le mérite de cette dernière technique est qu'il ne reste aucune substance radioactive dans l'organisme à la fin du traitement. Elle a été utilisée pour traiter des cancers du col de l'utérus, de l'utérus, du sein, du poumon, du pancréas, de la prostate et de l'œsophage.

Il s'est avéré que l'implantation permanente de grains à faible débit de dose ( $^{125}\text{I}$  et  $^{103}\text{Pd}$ ) donne des résultats extrêmement satisfaisants pour le traitement du cancer de la prostate à un stade précoce. En conséquence, la demande de ces isotopes s'est rapidement accrue.

### ***Irradiation du sang pour transfusion***

L'irradiation du sang est connue comme le moyen le plus efficace de réduire le risque d'une réaction immunologique consécutive à la transfusion sanguine, qui porte le nom de réaction du greffon contre l'hôte. On utilise du sang irradié à très faible dose pour les patients immunodéprimés, qui ont subi notamment une transplantation d'organe ou une chimiothérapie lourde. L'irradiation s'effectue dans des irradiateurs autoprotégés, équipés, par exemple, de sources de  $^{137}\text{Cs}$ . On peut également utiliser à cet effet du  $^{60}\text{Co}$ , mais l'irradiateur aura une durée de vie utile plus brève et exigera des changements de source plus fréquents. La dose de rayonnement permet d'inactiver les lymphocytes du sang avant la transfusion. Les autres méthodes actuellement utilisées dans les banques du sang pour éliminer les lymphocytes par lavage et filtration n'assurent pas une protection efficace contre la réaction du greffon contre l'hôte.

## Applications industrielles

Les applications des isotopes dans l'industrie sont à la fois vastes et diverses, couvrant une multiplicité de radionucléides, en général sous la forme de sources scellées. Beaucoup d'entre elles n'utilisent que de faibles quantités de radioactivité et correspondent à des créneaux spécialisés. Néanmoins, il existe aussi de grands segments de marché qui consomment d'importantes quantités de substances radioactives, s'agissant, par exemple, des radio-traitements et de la radiographie industrielle.

Les utilisations industrielles des isotopes peuvent être classées en quatre grandes catégories : l'instrumentation nucléonique, le traitement par les rayonnements (radio-traitements), notamment la stérilisation et l'irradiation des aliments, les technologies utilisant des traceurs radioactifs et les essais non destructifs. (Voir tableau 2.3).

Tableau 2.3 Isotopes industriels courants et leurs applications

Isotope	Période	Méthode de production	Applications
$^3\text{H}$	12,3 ans	Réacteur	Traceur radioactif, peintures luminescentes
$^{14}\text{C}$	5730 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique, traceur radioactif
$^{55}\text{Fe}$	2,7 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique (imagerie industrielle)
$^{57}\text{Co}$	271,8 jours	Accélérateur	Instrumentation nucléonique (imagerie industrielle)
$^{60}\text{Co}$	5,3 ans	Réacteur	Stérilisation, irradiation des aliments, instrumentation nucléonique, essais non destructifs (radiographie gamma)
$^{63}\text{Ni}$	100 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique (e.g. détecteurs d'explosifs)
$^{75}\text{Se}$	119,8 jours	Réacteur	Essais non destructifs (radiographie gamma)
$^{85}\text{Kr}$	14,7 heures	Réacteur	Instrumentation nucléonique
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	28,8 a/64 h	Réacteur	Instrumentation nucléonique
$^{109}\text{Cd}$	462 jours	Réacteur	Instrumentation nucléonique (imagerie industrielle)
$^{137}\text{Cs}$	30 ans	Réacteur	Stérilisation, instrumentation nucléonique
$^{147}\text{Pm}$	2,6 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique
$^{169}\text{Yb}$	32 jours	Réacteur	Essais non destructifs (radiographie gamma)
$^{192}\text{Ir}$	73,8 jours	Réacteur	Essais non destructifs (radiographie gamma)
$^{204}\text{Tl}$	3,78 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique
$^{210}\text{Po}$	138,4 jours	Réacteur	Élimination de l'électricité statique
$^{238}\text{Pu}$	87,7 ans	Réacteur	Source d'énergie pour engins spatiaux
$^{241}\text{Am}$	432,2 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique (e.g. détecteurs de fumée)
$^{252}\text{Cf}$	2,65 ans	Réacteur	Instrumentation nucléonique (e.g. détecteurs d'explosifs), neutronographie

Entrent dans la catégorie de l'instrumentation nucléonique, les appareils d'analyse, de mesure et contrôle faisant appel à des sources radioactives scellées (intégrées à l'instrumentation) ainsi que le matériel de contrôle non destructif (appareils de gammagraphie). Les sources utilisées peuvent être des émetteurs de particules alpha ou bêta, de neutrons ou de rayons X ou encore de photons gamma. Ces techniques emploient un nombre relativement important d'isotopes et constituent d'ailleurs la principale application mondiale de ces éléments par le nombre de secteurs industriels concernés, d'appareils en service et d'entreprises industrielles fabriquant ces matériels.

On utilise pour les radio-traitements des sources scellées de forte intensité, émettrices de photons gamma, par exemple du  $^{60}\text{Co}$ , dans des irradiateurs industriels. Généralement, l'activité de ces sources est très élevée, avoisinant les 50 PBq. Il s'agit là de la principale application mondiale des isotopes en termes d'activité totale, mais le nombre d'utilisateurs et de fabricants en cause est limité.

Les traceurs radioactifs (essentiellement des émetteurs bêta ou gamma) sont utilisés sous diverses formes physiques et chimiques comme sources non scellées pour étudier, entre autres, des réactions chimiques et des processus industriels. Ces traceurs sont très répandus dans une multitude de secteurs, dont l'agronomie, l'hydrologie, la construction hydraulique et l'aménagement du littoral, ainsi que les industries pétrolières et gazières. Ils sont également utilisés dans des laboratoires de recherche et de développement travaillant dans des domaines nucléaires ou autres. Cependant, ce type d'application a un poids économique moindre que l'instrumentation nucléonique et les radio-traitements.

### *Instrumentation nucléonique*

L'instrumentation nucléonique est intégrée à l'instrumentation associée (sous forme de capteurs), dans les systèmes de contrôle de procédés. Les principaux domaines d'application sont les jauges de mesure physique, l'instrumentation analytique en ligne, les instruments de mesure de la pollution et l'instrumentation de sécurité.

Les jauges de densité, de niveau et de pesage par absorptiométrie gamma sont employées dans la plupart des industries pour réaliser en ligne des mesures non destructives et sans contact. Elles contiennent des sources scellées de  $^{60}\text{Co}$ , de  $^{137}\text{Cs}$ , ou de  $^{241}\text{Am}$ . Pour ces applications, les isotopes sont en concurrence avec des technologies non ionisantes comme le radar, et leur part de marché tend à diminuer. Cependant, on voit poindre de nouvelles applications dont des jauges destinées à la détermination simultanée de la concentration de plusieurs fluides pour la prospection pétrolière.

Les jauges mesurant l'épaisseur et la masse par unité de surface, par absorptiométrie des particules bêta ou des photons gamma, sont employées essentiellement pour la fabrication de tôles d'acier ou d'autres métaux ainsi que dans les industries du papier, du plastique et du caoutchouc. Elles utilisent des isotopes tels que le  $^{85}\text{Kr}$ , le  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{147}\text{Pm}$  et le  $^{241}\text{Am}$ . Dans ces applications, les isotopes sont en concurrence avec des technologies faisant appel à des générateurs de rayons X.

Les jauges utilisées pour mesurer l'épaisseur de revêtements fins, par rétrodiffusion des particules bêta, et qui contiennent des sources scellées de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ , ou  $^{204}\text{Tl}$ , sont essentiellement employées pour pratiquer des mesures sur les circuits imprimés électroniques, les revêtements de métaux précieux dans la bijouterie ou les contacts électriques dans l'industrie électromécanique.

Différentes sources scellées équipent divers types d'instruments d'analyse en ligne. Des analyseurs de soufre équipés de sources de  $^{241}\text{Am}$  sont employés dans les raffineries de pétrole, les centrales électriques, et les usines pétrochimiques afin de mesurer la teneur en soufre des produits pétroliers. Par ailleurs, des systèmes munis de sources de  $^{252}\text{Cf}$  sont incorporés à l'instrumentation destinée à l'analyse en ligne de divers minéraux essentiellement fondée sur les réactions neutron-gamma. Ces systèmes s'appliquent à une variété de minerais, au charbon, aux minéraux bruts et au ciment en vrac. Les fabricants sont très rares. Certains produits chimiques, comme les polluants, les pesticides et les PCB peuvent être détectés par chromatographie en phase gazeuse, associée à des détecteurs à capture d'électrons équipés de sources de  $^{63}\text{Ni}$  émettant des rayonnements bêta.

Dans le domaine des instruments de mesure de la pollution, on peut citer l'application des particules bêta à l'absorptiométrie des particules de poussière accumulées sur les filtres à air afin de mesurer la concentration de particules dans l'air. Les isotopes concernés sont le  $^{14}\text{C}$  et le  $^{147}\text{Pm}$ .

L'instrumentation de sécurité, généralement fondée sur des réactions neutron-gamma, utilise des sources de  $^{252}\text{Cf}$  pour détecter des explosifs et/ou des stupéfiants, essentiellement dans les aéroports, les ports et les gares de chemins de fer. Ces systèmes sont très fiables, et la demande des services de la

sécurité publique est en augmentation. Quelques entreprises seulement développent ces systèmes. Par ailleurs, le tritium ( $^3\text{H}$ ) est employé dans la fabrication de peintures luminescentes utilisées pour signaler les sorties de secours.

Les matériels de laboratoires ou les équipements portatifs, y compris les appareils d'analyse par fluorescence X, les capteurs et les outils de radiocarottage représentent une demande stable de divers isotopes. Les appareils d'analyse par fluorescence X sont utilisés dans les mines et les usines pour analyser les minerais, déterminer la nature des alliages et inspecter ou récupérer des métaux (ils servent, par exemple, à détecter des traces de métaux lourds dans d'anciennes peintures). Les isotopes concernés sont le  $^{55}\text{Fe}$ , le  $^{57}\text{Co}$ , le  $^{109}\text{Cd}$ , et le  $^{241}\text{Am}$ . Les humidimètres et densitomètres sont utilisés en agronomie et en génie civil pour des mesures sur le terrain. Les aciéries se servent aussi d'humidimètres. Ces capteurs, qui utilisent la diffusion des neutrons, parfois couplée à la diffusion gamma, peuvent être équipés de sources de  $^{241}\text{Am-Be}$  (voire de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{252}\text{Cf}$ ). Les outils de radiocarottage dont se servent les sociétés de prospection pétrolière et gazière, par exemple, jouent un rôle très important dans ce secteur d'activité. Des sources telles que le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{241}\text{Am-Be}$ , et le  $^{252}\text{Cf}$ , sont utilisées pour mesurer des paramètres comme la densité, la porosité ainsi que la saturation en eau ou en pétrole des roches entourant les forages de prospection.

Les détecteurs de fumées équipés de sources de  $^{241}\text{Am}$  se trouvent dans de nombreux lieux publics, hôpitaux, aéroports, musées, salles de conférence, salles de concert, cinémas et avions, mais aussi dans des habitations privées. Ils sont si répandus qu'ils arrivent en tête, par leur nombre, des dispositifs à isotopes utilisés dans le monde.

### ***Irradiation et traitement par les rayonnements***

L'une des principales applications des isotopes, qui exige des niveaux d'activité élevés, en particulier de  $^{60}\text{Co}$ , est l'irradiation et le traitement par les rayonnements. Les traitements par les rayonnements comprennent trois grands types d'applications :

- la *stérilisation* du matériel médical et les procédés apparentés, tels que la stérilisation des emballages de produits pharmaceutiques ou de produits alimentaires. Il s'agit là de l'utilisation de loin la plus importante des irradiateurs au  $^{60}\text{Co}$ , qu'ils soient dédiés ou polyvalents. Face aux préoccupations de sécurité, la stérilisation massive du courrier est en augmentation ;
- *l'irradiation des aliments*, essentiellement pour en améliorer la qualité hygiénique. À l'heure actuelle, la plupart des aliments irradiés sont vendus sous forme déshydratée (épices, légumes secs, par exemple) et surgelée (viande, poisson, etc.) ;
- la *vulcanisation des matériaux*, essentiellement des matières plastiques.

Il existe quelques autres traitements ou activités s'apparentant au radiotraitement. Il s'agit de l'irradiation réalisée pour l'étude du dommage lié aux rayonnements ionisants, ou l'irradiation des boues. Leur importance économique est assez limitée. Quelque 180 irradiateurs gamma sont en service dans le monde. Certains d'entre eux sont dédiés à la radiostérilisation tandis que d'autres sont polyvalents et, dans ce cas, servent essentiellement à la radiostérilisation et accessoirement à l'irradiation des aliments ou des matières plastiques.

Bien que l'utilisation du  $^{137}\text{Cs}$  ne soit pas exclue, dans la pratique, le  $^{60}\text{Co}$  de faible activité spécifique et d'intensité élevée est le seul isotope employé pour le radiotraitement. En général, les sources de  $^{60}\text{Co}$  destinées aux applications industrielles ont une faible activité spécifique, de l'ordre de 1 à 4 TBq/g, pour des activités totales très élevées, avoisinant 50 PBq. Elles se distinguent sur ce plan des sources de  $^{60}\text{Co}$  employées en radiothérapie qui ont des activités spécifiques élevées, proches de 10 TBq/g.

Les irradiateurs gamma au  $^{60}\text{Co}$  présentent des avantages pour les applications industrielles en raison de la simplicité de leur fonctionnement et de leur capacité de traiter de gros volumes unitaires (conditionnements allant jusqu'à la palette). Ces irradiateurs gamma sont en concurrence avec des accélérateurs d'électrons où le faisceau d'électrons est utilisé directement ou par l'intermédiaire d'une cible de conversion, dans laquelle le rayonnement de freinage est constitué de rayons X. À l'heure actuelle, les irradiateurs équipés de sources de  $^{60}\text{Co}$  représentent la principale technologie de stérilisation et d'irradiation des aliments. En revanche, la vulcanisation des matières plastiques, exigeant le traitement de grosses quantités de produits et des puissances élevées, est réalisée en majeure partie à l'aide d'accélérateurs.

La radiostérilisation se développe lentement mais régulièrement. La difficulté technique que présente le contrôle du procédé concurrent (stérilisation par l'oxyde d'éthylène) ainsi que la toxicité du gaz utilisé sont autant de raisons d'adopter la radiostérilisation. Par contre, le coût de cette dernière (investissement et validation) freine son développement.

### *Irradiation des denrées alimentaires*

Il existe un vaste marché potentiel pour l'irradiation des aliments, qui concerne une large variété et d'importantes quantités de produits. L'irradiation des denrées alimentaires est une technique reconnue pour améliorer la sécurité et la qualité nutritionnelle des aliments, dans la mesure où elle diminue les niveaux de contamination bactérienne et la dégradation des aliments. Elle a été approuvée par plusieurs organisations intergouvernementales comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), ainsi que par diverses organisations nationales comme, aux États-Unis, l'Administration fédérale pour l'alimentation et les produits pharmaceutiques.

Les industries alimentaires qui envisagent sérieusement d'irradier des aliments sont de plus en plus nombreuses dans le monde, de même que les pays qui autorisent cette technique (voir tableau 2.4). Néanmoins, la croissance de la demande de  $^{60}\text{Co}$  devrait être relativement lente à court terme, et l'on ne prévoit pas de véritable percée sur le marché avant quelques années.

À l'avenir, la concurrence des accélérateurs devrait se renforcer à mesure qu'ils progresseront sur les plans technique et économique. En outre, comme ces installations (et les produits ainsi traités) ne font pas intervenir la radioactivité, elles sont mieux acceptées par le public que les isotopes et les produits irradiés.

### *Traceurs radioactifs*

Un traceur est une substance détectable, marquée par exemple par un émetteur bêta ou gamma et qui a le même comportement dans un procédé (réacteur chimique, broyeur de minerai, station d'épuration, entre autres) que la substance dont on veut décrire l'évolution qualitative ou quantitative.

Les traceurs sont essentiellement utilisés pour étudier :

- la nature et l'efficacité des réactions chimiques (laboratoires de recherche sur la synthèse chimique) ;
- les transferts de matières dans les installations industrielles (par exemple, dans la chimie, le pétrole et le gaz, pour la transformation des minerais, en métallurgie, dans l'industrie des pâtes et papiers, pour le traitement des eaux et celui des déchets) ;
- le comportement des polluants (en solution ou en suspension) dans les rivières, les estuaires, sur le littoral, dans les aquifères, les décharges, les gisements pétroliers, gazeux et géothermiques.

Tableau 2.4 Installations au cobalt 60 destinées à l'irradiation des denrées alimentaires

Pays	Nombre d'installations (à la fin de 2002)	Groupe consultatif international sur l'irradiation des denrées alimentaires de l'AIEA
Afrique de Sud	5	✓
Argentine	2	✓
Australie	2	
Bangladesh	1	✓
Belgique	1	✓
Brésil	3	✓
Bulgarie	1	✓
Canada	1	✓
Chili	3	
Chine	15	✓
Corée, République de	1	
Cuba	1	✓
Danemark	2	✓
Égypte	1	✓
Espagne	1	✓
États-Unis	20	✓
Fédération de Russie	3	✓
France	4	
Hongrie	1	✓
Inde	2	
Indonésie	1	✓
Iran, République islamique de	1	✓
Israël	1	✓
Japon	1	
Mexique	1	✓
Norvège	1	✓
Pakistan	1	✓
Pays-Bas	1	✓
République tchèque	1	✓
Royaume-Uni	1	✓
Syrie	1	✓
Thaïlande	2	✓
Turquie	2	
Ukraine	1	✓
Yougoslavie	1	✓
OCDE	41	
<b>Total</b>	<b>87</b>	

Un grand nombre d'isotopes produits dans des réacteurs et des accélérateurs sous des formes physiques et chimiques diverses sont indispensables pour ces applications et études qui servent à vérifier des performances, optimiser des processus, étalonner des modèles ou tester des installations pilotes, prototypes ou rénovées. Ces traceurs sont également de plus en plus employés pour l'exploration et l'exploitation pétrolière.

### ***Contrôles non destructifs***

La radiographie gamma est utilisée pour réaliser des contrôles non destructifs dans un large éventail de secteurs, notamment l'industrie pétrolière et gazière, la grosse chaudronnerie, la fonderie, le génie civil, l'aéronautique et l'industrie automobile. Ce type d'essais non destructifs permet surtout de vérifier la sûreté et la sécurité de structures vitales, par exemple, l'intégrité d'une ailette de réacteur dans l'aéronautique ou la qualité d'une soudure dans une canalisation. La plupart des systèmes utilisent des sources de  $^{192}\text{Ir}$ . Les autres isotopes utilisés sont le  $^{60}\text{Co}$ , le  $^{75}\text{Se}$  et le  $^{169}\text{Yb}$ . La neutronographie au  $^{252}\text{Cf}$  est aussi employée.

### ***Autres applications industrielles des isotopes radioactifs***

Le démarrage des réacteurs nucléaires pour la production d'électricité, la recherche et la propulsion des navires nécessitent l'utilisation de sources émettrices de neutrons comme le  $^{252}\text{Cf}$ .

Les sources d'énergie électrique radioisotopiques, appelées générateurs thermoélectriques radioisotopiques, sont utilisées pour alimenter en électricité les missions spatiales de longue durée. Ces systèmes, dont le fonctionnement repose sur la conversion thermoélectrique, utilisent des sources scellées de  $^{238}\text{Pu}$  de haute activité. La Russie et les États-Unis sont actuellement les seuls à produire ces sources.

Des sources d'étalonnage sont nécessaires pour l'instrumentation nucléaire, notamment l'ensemble de l'instrumentation utilisée en radioprotection, les détecteurs nucléaires et l'électronique associée ainsi que l'instrumentation employée en médecine nucléaire. Un grand nombre d'isotopes de faible activité, adaptés aux différentes conditions de mesure, est utilisé à cette fin. Les utilisateurs de ces sources sont les fabricants d'instrumentation nucléaire, les services de médecine nucléaire et de radiothérapie des hôpitaux, les centres de recherche nucléaire, les installations du cycle du combustible et les exploitants de réacteurs de puissance.

Les producteurs de papier, de matières plastiques, de bandes magnétiques et de peintures, mais aussi les industries graphiques sont les principaux utilisateurs de systèmes faisant appel au  $^{210}\text{Po}$  pour décharger l'électricité statique qui s'accumule au cours des procédés.

### **Applications scientifiques et/ou pour la recherche**

L'utilisation des isotopes dans la recherche exploite trois de leurs spécificités :

- Les isotopes émettent une gamme de particules présentant des caractéristiques variables (types d'interaction, de pénétration, de flux, etc.). La façon dont ils interagissent avec la matière renseigne sur cette dernière. Cela signifie que l'on peut utiliser divers instruments radiométriques qui permettent d'améliorer l'observation des phénomènes.
- Les isotopes, qu'ils soient radioactifs ou stables, ont exactement les mêmes propriétés chimiques et physiques que les éléments naturels auxquels ils correspondent. Dans le cas des radioisotopes, la détection est possible en l'absence de tout contact ainsi qu'à des concentrations extrêmement faibles, ce qui en fait des traceurs sans pareils.
- Les particules émises par les isotopes permettent de déposer de manière extrêmement précise de l'énergie dans la matière et de provoquer des altérations chimiques et biologiques irréalisables par toute autre méthode.

Un rapide survol des travaux de recherche réalisés récemment ou aujourd'hui avec des isotopes ou des résultats que seul l'utilisation d'isotopes a permis d'obtenir, révèlent l'immense variété des isotopes employés ainsi que la frontière floue et toujours mouvante entre les travaux de recherche et de développement et les applications, notamment dans le domaine médical.

Étant donné leur extrême diversité, il est difficile de regrouper les isotopes utilisés en catégories générales homogènes. De plus, il existe des cas isolés d'isotopes utilisés pour une seule application, par exemple le  $^{51}\text{Cr}$  qui sert de source de référence pour l'émission de neutrinos. Quant au passage entre les travaux de recherche et de développement et les applications, la tomographie par émission de positrons, utilisée couramment dans certains hôpitaux pour des soins, et qui reste néanmoins un outil de recherche en neurologie et en psychiatrie, en est un bon exemple.

### ***Recherche médicale***

La recherche médicale revêt une importance économique et sociale stratégique. D'elle dépendent les performances à long terme des systèmes nationaux de santé, et notamment la qualité et l'espérance de vie, ainsi que l'efficacité et les coûts des soins. Les résultats de la recherche médicale peuvent en effet avoir des conséquences économiques considérables dans le secteur médical (fabrication d'équipements et de produits). Dans ce domaine, les isotopes radioactifs et stables jouent un rôle spécifique et sont souvent irremplaçables.

Dans le domaine médical, la frontière entre recherche et application évolue très vite, de même que les besoins en isotopes. Il convient de souligner cependant qu'il existe des différences considérables entre les pays à cet égard.

Les recherches actuelles dans ce domaine relèvent en gros des catégories suivantes dont l'objectif essentiel est d'améliorer les actes médicaux déjà pratiqués :

- la radiothérapie, qui consiste à associer un isotope à un anticorps ou à une molécule biologique ayant une affinité spécifique pour les cellules cancéreuses à détruire ;
- la radiothérapie métabolique, caractérisée par l'injection d'un radiopharmaceutique qui se fixe sélectivement sur le tissu visé et l'irradie sur place ;
- le traitement de la douleur provoqué par les cancers ;
- la brachythérapie appliquée au traitement des cancers de la prostate et de l'oeil, à l'aide de  $^{103}\text{Pd}$  et de  $^{125}\text{I}$  ;
- l'imagerie fonctionnelle à l'aide de molécules marquées au  $^{18}\text{F}$ , par exemple de fluorodésoxyglucose, de fluorothymidine, etc.

Enfin, la radiothérapie endovasculaire promet de traiter très efficacement de façon préventive la resténose de l'artère coronaire. Cette application fait l'objet aujourd'hui de développements cliniques. Un grand nombre d'entreprises privées et d'équipes universitaires mettent actuellement au point des stents radioactifs (pièces insérées à l'intérieur des vaisseaux sanguins pour éviter la resténose) destinés à une implantation permanente, ou des sources radioactives destinées à de brèves irradiations afin de prévenir les resténoses des vaisseaux après une angioplastie coronaire transluminale percutanée (ACTP), couramment connue sous l'appellation d'angioplastie par ballonnet. Les isotopes étudiés comprennent le  $^{32}\text{P}$ , le  $^{90}\text{Y}$ , le  $^{188}\text{Re}$  et le  $^{192}\text{Ir}$ . Cependant, les stents enrobés de médicaments capables de prévenir la resténose sont en train de devenir la solution préférentielle.

### ***Recherches sur les procédés industriels***

Les traceurs radioactifs restent un outil puissant de développement et de perfectionnement en ingénierie des procédés. Ils sont utilisés pour suivre de près le comportement des phases solide, liquide et gazeuse *in situ*, ce qui permet d'optimiser le fonctionnement et de valider les modèles opérationnels d'un large éventail d'équipements. On se souviendra qu'un modèle n'est qu'une hypothèse de travail tant qu'il n'est pas validé.

En génie mécanique, les techniques radioactives sont le moyen le plus efficace et le plus précis de mesurer les phénomènes d'usure *in situ* sans avoir besoin de démonter le matériel contrôlé. Ils servent aussi à déterminer quelles sont les solutions techniques les mieux adaptées pour s'assurer qu'un matériel est conforme aux spécifications. Dans la plupart des cas, la source est obtenue par irradiation des parties du composant à étudier dans un cyclotron.

La recherche sur les matériaux a recours à la spectroscopie Mössbauer, qui utilise le  $^{57}\text{Co}$ , le  $^{119\text{m}}\text{Sn}$ , le  $^{125\text{m}}\text{Te}$  et le  $^{151}\text{Sm}$ . Le  $^{22}\text{Na}$  est employé comme source pour les études en science des matériaux dans une technique appelée spectroscopie d'annihilation des positrons.

### ***Recherches dans le domaine de la protection de l'environnement***

Certaines propriétés des isotopes en font des traceurs extrêmement efficaces pour l'étude de l'environnement. D'une part, le temps pendant lequel l'isotope peut être détecté, dépend de sa période, et, d'autre part, le choix de l'isotope peut être adapté au problème spécifique étudié. Il existe un large éventail d'éléments et de composés parmi lesquels choisir l'isotope ainsi que sa forme chimique. Par ailleurs, ces isotopes peuvent être détectés à de très faibles concentrations.

Les isotopes sont donc des outils parfaits pour toute une série d'études environnementales notamment :

- l'hydrologie souterraine et de surface : mesure de la vitesse et de la perméabilité relative, mesure de la migration des polluants, identification des limites de protection dans un bassin versant et localisation des fuites dans les barrages ;
- la sédimentologie dynamique : transfert de sédiments dans l'environnement marin, études des bassins versants.

Les isotopes les plus couramment utilisés pour ces applications sont le  $^{46}\text{Sc}$ , le  $^{51}\text{Cr}$ , le  $^{113}\text{In}$ , le  $^{147}\text{Nd}$ , le  $^{182}\text{Ta}$ , le  $^{192}\text{Ir}$  et le  $^{198}\text{Au}$ .

Cependant, la société acceptant de moins en moins bien l'emploi d'isotopes dans l'environnement, on a tendance aujourd'hui à en limiter l'usage aux applications pour lesquelles il n'existe pour ainsi dire pas d'autre solution. L'hydrologie et la sédimentologie fluviales utilisent presque exclusivement des traceurs chimiques ou fluorescents, voire des traceurs qui peuvent être activés, à l'exclusion de ceux existant à l'état naturel.

### ***Biotechnologies***

Les isotopes demeurent un outil de référence pour la recherche dans un large éventail de travaux en biologie et biotechnologie, depuis les recherches les plus fondamentales jusqu'à des développements que l'on pourrait pour ainsi dire classer dans la recherche industrielle. Il s'agit par exemple, de la biologie végétale, de la recherche sur la photosynthèse, de l'agronomie (étude des engrais azotés) et de la biochimie. Les principaux radio-isotopes employés sont le  $^3\text{H}$ , le  $^{14}\text{C}$ , le  $^{32}\text{P}$  et le  $^{35}\text{S}$ .

### III. QUESTIONS SOULEVÉES PAR LA PRODUCTION ET L'USAGE DES ISOTOPES

#### Transport

De récents événements ont suscité des préoccupations concernant l'aptitude à transporter des isotopes de par le monde. Dans le cas de certains isotopes, les producteurs sont relativement peu nombreux alors que leurs applications sont mondiales : il s'agit notamment du <sup>99</sup>Mo qui, en raison de sa période relativement brève, nécessite un transport aérien. Cependant, tel qu'il est actuellement structuré et réglementé, le transport des isotopes est grevé par un certain nombre d'inefficacités qui peuvent causer des retards ou l'entraver.

Le nouveau *Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives* (Code de conduite)<sup>6</sup> de l'AIEA peut offrir aux autorités réglementaires compétentes et à l'industrie un bon outil afin d'harmoniser les activités visant la sûreté et la sécurité des sources radioactives. Il convient de se pencher sur l'élaboration d'une démarche internationale commune à l'égard de la réglementation et de la gestion de ces sources. On devrait songer à utiliser de façon plus efficace les données classiques des fabricants de sources radioactives, notamment sur le suivi, le type d'emballage et la certification de la conformité à la réglementation.

La réglementation et la pratique pourraient aussi être modifiées afin de permettre le transport dans le monde entier des sources radioactives, dès lors que le producteur a fait la preuve du respect de toute la réglementation pertinente en matière d'étiquetage et d'emballage, évitant ainsi les inspections de conformité à chaque étape du déroulement du transport. Cela pourrait inclure des autorisations générales d'importation-exportation visant des sources radioactives provenant de fournisseurs agréés dans des pays dotés d'autorités réglementaires officielles chargées de veiller au respect de la réglementation applicable aux matières radioactives. Les pratiques actuelles, qui permettent aux commandants de bord de refuser des expéditions d'isotopes qui respectent les prescriptions réglementaires, devront peut-être aussi être reconsidérées.

L'amélioration de la formation du personnel "non nucléaire" participant au transport d'isotopes peut être considérée comme un moyen de réduire les retards et les obstacles grâce à une meilleure compréhension des prescriptions et des risques en jeu.

#### Gestion des sources scellées

On s'accorde à reconnaître que la sécurité constitue une nouvelle question de grande importance qui se pose à propos du transport et de la distribution des isotopes. Étant donné que des efforts notables sont déployés sur ce point, on n'a pas inclut dans la présente étude de commentaires visant ces préoccupations. Cependant, un aspect, à savoir le contrôle et la gestion des sources radioactives mérite d'être évoqué.

---

6. AIEA (2003), *Mesures pour renforcer la coopération internationale dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la sûreté radiologique, de la sûreté du transport et de la gestion des déchets. Révision du Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives*. Vienne, Autriche. Voir <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC47/Documents/gc47-9.pdf>

Sur les millions de sources radioactives autorisées existant de par le monde, en grande majorité elles ne sont guère la source de risques pour la sûreté ou la sécurité en cas de perte, de vol ou d'usage abusif. Cependant, certains types de sources radioactives pourraient présenter des risques inacceptables, si elles étaient impliquées dans un accident. Parmi ces types de sources figurent celles qui renferment de grandes quantités de radioactivité, sont portables, contiennent de la radioactivité aisément dispersable, et/ou renferment des isotopes à longue période. En particulier les sources qui contiennent des isotopes produits en réacteur, à savoir du  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  et  $^{252}\text{Cf}$  sont les plus préoccupantes.

Les pays membres devraient être à même de recenser et de localiser toutes les sources radioactives notables en usage sur leur territoire. En conséquence, ils devraient, lorsqu'il y a lieu, disposer d'un ensemble de mesures en vue de définir les types de sources radioactives qu'il convient de surveiller et les procédures permettant de recenser ces sources et de les suivre à la trace.

Il conviendrait également que les politiques et réglementations définissent les responsabilités, notamment financières, afférentes à la gestion des sources radioactives tout au long de leur durée de vie utile et, au terme de celle-ci, à leur évacuation. Autant que possible, ces politiques, normes et réglementations devraient être normalisées entre les pays membres afin de faciliter les échanges et le transport tout en maintenant une sûreté et sécurité appropriées. Au minimum, ces mesures de contrôle devraient s'appliquer à toutes les nouvelles sources radioactives. On devrait aussi s'attacher de surcroît à reprendre la maîtrise des sources radioactives perdues, abandonnées ou qui ont été mises au rebut de façon inappropriée.

Souvent la récupération d'anciennes sources peut soulever des difficultés techniques, s'agissant de la manipulation, du transport et de l'élimination, de même que des difficultés administratives et juridiques liées à la détermination de la responsabilité et des obligations qui en découlent. Chaque pays membre devrait disposer ou se donner les moyens d'accéder à des capacités techniques permettant de manipuler, traiter et stocker ou éliminer chaque type de source qui a été utilisé ou est en usage dans ce pays.

Lorsqu'ils traitent les questions évoquées ci-dessus, les décideurs devraient faire référence au Code de conduite révisé de l'AIEA.

### **Maintien du rôle des pouvoirs publics**

Les organismes publics possèdent et exploitent la quasi-totalité des réacteurs de recherche, des grands accélérateurs et des installations de séparation chimique utilisées pour la production d'isotopes mais aussi des installations nécessaires aux diverses applications des isotopes en médecine et en science. Les pouvoirs publics financent l'infrastructure indispensable à la production efficace d'isotopes et à leurs utilisations bénéfiques. En particulier, de nombreux isotopes utilisés dans la R-D ne sont pas produits en quantités suffisantes ou sur un nombre suffisant de sites de production pour garantir leur disponibilité, si leur usage s'avère probant dans des applications futures. Ainsi, il revient aux pouvoirs publics de jouer un rôle important en garantissant la disponibilité, à un coût raisonnable, des nouveaux isotopes dont ont besoin les chercheurs et que ne peuvent ou ne veulent fournir les producteurs commerciaux. Ce sont eux également qui offrent des possibilités de formation théorique et pratique du personnel spécialisé indispensable pour ces activités. Ainsi, il est essentiel d'aborder ces questions pour lesquelles les pouvoirs publics s'efforcent, soit directement, soit par l'intermédiaire de programmes bénéficiant de leur soutien :

- *d'assurer une gestion et une direction vigoureuse.* Seuls les pouvoirs publics peuvent assurer efficacement la gestion et la coordination des activités menées par divers organismes à

l'intérieur d'un pays. Cette direction s'attacherait aussi à suivre de près les universités et la production commerciale d'isotopes afin de pousser ces organismes à agir dans l'intérêt commun et à mobiliser les appuis requis dans un large éventail de domaines ;

- *de faciliter la collaboration entre toutes les parties intéressées.* Un programme performant en matière d'isotopes n'est possible que si tous les organismes intervenant dans la production et l'utilisation des isotopes communiquent régulièrement en vue de formuler la ligne de conduite à suivre. Les entités publiques doivent dialoguer avec les divers organismes représentant les groupes d'utilisateurs commerciaux et de la recherche et les divers programmes universitaires ;
- *de mettre à disposition des ressources suffisantes pour la production d'isotopes destinés à la R-D.* Les isotopes utilisés dans la recherche ne sont pas habituellement disponibles auprès des fournisseurs commerciaux, car ils génèrent des recettes insuffisantes et sont d'ordinaire très chers en raison du coût unitaire élevé lié à de faibles quantités. Des aides publiques (soit directes, soit indirectes) sont nécessaires pour faire en sorte que les chercheurs puissent en disposer. Cela peut exiger d'apporter un soutien direct à la construction de nouvelles installations ou à l'agrandissement des installations existantes afin de garantir une offre satisfaisante ;
- *de suivre en permanence l'évolution des besoins des chercheurs et des cliniciens.* Les organismes des pouvoirs publics devraient veiller à ce que tous les réacteurs, accélérateurs et autres ressources soient utilisés de façon optimale de manière à répondre aux besoins des chercheurs et des cliniciens. À court terme, cela nécessite de coordonner les activités des personnels des pouvoirs publics. À long terme, il faudra peut-être construire à cet effet des réacteurs ou des accélérateurs. Il conviendrait également que les pouvoirs publics veillent à ce que l'infrastructure requise soit entretenue pour les installations de production des isotopes ;
- *de faciliter le transfert au secteur privé des programmes commercialement viables en matière d'isotopes.* Normalement, les pouvoirs publics n'ont pas intervenir dans la fourniture commerciale d'isotopes. Cependant, il peut exister des obstacles notables à la commercialisation de la production d'isotopes, en particulier les charges financières élevées afférentes aux installations de production, et le soutien des pouvoirs publics peut être nécessaire afin de surmonter ces obstacles ;
- *de s'attaquer à la dépendance à l'égard des fournisseurs étrangers lorsque les répercussions des ruptures d'approvisionnement sont inacceptables.* La mondialisation et la généralisation durables de l'offre d'isotopes pourraient entraîner des accidents lorsque l'approvisionnement en certains isotopes est susceptible d'être interrompu par des situations échappant au contrôle de tout gouvernement. Les pouvoirs publics devraient appréhender la nature de l'offre d'isotopes vitaux dans leur pays et instaurer des mécanismes permettant de faire face le cas échéant à des pénuries ou à des perturbations.

### **Problèmes de responsabilité civile**

Étant donné que l'on trouve partout des sources de rayonnements ionisants, qui sont très mobiles et situées dans des milieux beaucoup moins sûrs que des installations nucléaires, il existe un risque d'exposition imputable à un accident ou à un acte de malveillance. La responsabilité de dommages provoquant des décès ou des dommages corporels pour des individus et la population, de même que des dommages à l'environnement, est la source de préoccupations pour les décideurs, l'industrie et les assureurs. Parmi ces préoccupations figure la détermination des parties responsables auxquelles il incombe d'indemniser les parties sinistrées, lorsque la source radioactive ayant causé le dommage est une source orpheline. Une autre préoccupation est de savoir si les fabricants, fournisseurs ou

utilisateurs susceptibles d'être tenus responsables à l'égard de tierces parties disposent des moyens d'indemniser les victimes. Les usages en matière d'assurance ou d'autres formes de garantie financière applicables à ce type de responsabilité varient dans l'ensemble des pays de l'OCDE.

Le Code de conduite révisé de l'AIEA vise à renforcer la protection du public grâce à des recommandations relatives à la gestion et à la maîtrise de certaines sources de rayonnements ionisants. Bien qu'il n'ait pas force obligatoire, le Code vise à obtenir des États Membres de l'AIEA l'engagement d'en appliquer les dispositions sans nécessairement créer une obligation juridique de le faire. Cependant il ne renferme aucune prescription spécifique concernant la responsabilité du (ou des) dommage(s) causé(s) par l'exposition aux sources radioactives relevant de son champ d'application, pas plus qu'il ne recommande de souscrire une couverture d'assurance ou une autre garantie financière pour un tel (ou de tels) dommage(s). En outre, le (ou les) dommage(s) causé(s) par des sources radioactives, telles qu'elles sont définies par le Code, n'entrent dans le champ d'application ni de la Convention de Paris, ni de celle de Vienne, dans la mesure où le (ou les) dommage(s) est (ou sont) survenu(s) à l'extérieur d'une installation nucléaire.

À la demande du Comité du droit nucléaire de l'AEN, l'Agence étudie les règles d'assurance applicables et les pratiques en matière de couverture d'assurance dans les pays de l'OCDE en cas de dommage(s) résultant de l'exposition à des sources radioactives. Les résultats des enquêtes préliminaires seront examinés par le Comité du droit nucléaire, qui décidera alors s'il y a lieu de charger un groupe d'experts techniques et juridiques d'entreprendre une étude portant sur les points suivants :

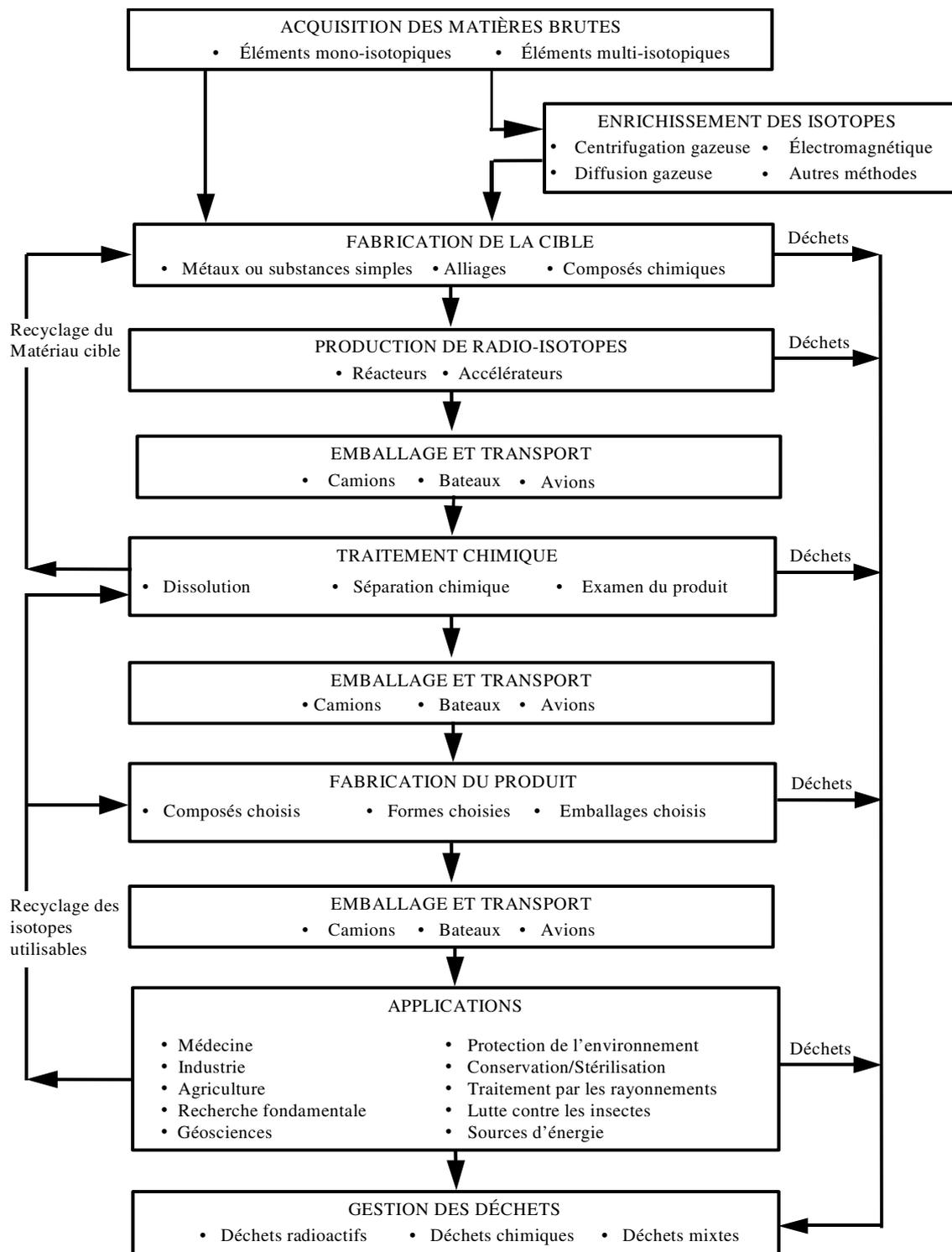
- nature des risques que présentent les sources radioactives de même que dommage(s) susceptible(s) d'être causé(s) par de telles sources ;
- recensement des parties susceptibles d'être responsables de tel(s) dommage(s) (fabricants, grossistes, distributeurs, utilisateurs, récupérateurs, etc.) ;
- conditions afférentes à l'offre d'une couverture d'assurance relative au(x) dommage(s) causé(s) par des sources radioactives, critères appliqués pour évaluer le risque et possibilité de rationaliser et/ou d'harmoniser ces pratiques ;
- pratiques visant la prise en charge des coûts de récupération et d'élimination des sources radioactives au terme de leur vie utile, notamment récupération des sources orpheline.

### **Observations finales**

Les isotopes sont largement utilisés et revêtent de l'importance pour l'économie et le bien-être des pays membres de l'AEN. Le rôle des pouvoirs publics est primordial pour la sûreté et la sécurité des approvisionnements en isotopes. Étant donné la nature dynamique de la production et des applications des isotopes, leur importance dans de nombreux secteurs de l'économie des États Membres et la recherche du bien-être, il est bon que l'OCDE et l'AIEA continuent d'étudier ce domaine de façon suivie sur une base régulière.

Annexe 1

**Schéma fonctionnel de la production, de la fabrication et des applications des isotopes ainsi que de la gestion des déchets**





Annexe 2. Réacteurs de recherche produisant des isotopes

Pays	Nom du réacteur	Emplacement	Date de démarrage	Arrêt prévu d'ici à 2008	Puissance (MW)	Flux thermique maximal (n/cm <sup>2</sup> s)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes prévus pour 2003-2005
Afrique du Sud	SAFARI-1	Pretoria	1965	NC	20	2.4x10 <sup>14</sup>	<sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I	NC
Allemagne*	FRJ-2	Jülich	1962	NC	23	2.5x10 <sup>14</sup>	<sup>99</sup> Mo	NC
Australie	HIFAR	Menai	1958	Oui <sup>1</sup>	10	1.4x10 <sup>14</sup>	<sup>51</sup> Cr, <sup>60</sup> Co, <sup>90</sup> Y, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>192</sup> Ir, <sup>192</sup> Yb	<sup>177</sup> Lu
Bangladesh*	TRIGA Mk II	Savar	1986	NC	3	5.6x10 <sup>13</sup>	NC	NC
Belgique	BR2	Mol	1961	Non	100	1x10 <sup>15</sup>	<sup>99</sup> Mo, <sup>125</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>133</sup> Xe, <sup>153</sup> Sm, <sup>177</sup> Lu, <sup>186</sup> Re, <sup>192</sup> Ir, <sup>203</sup> Hg	NC
Brésil	IEA-R1	Sao Paulo	1957	Non	5	1.2x10 <sup>14</sup>	<sup>35</sup> S, <sup>51</sup> Cr, <sup>60</sup> Co, <sup>82</sup> Br, <sup>155</sup> Sm, <sup>192</sup> Ir, <sup>203</sup> Hg	<sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I
Canada*	NRU	Chalk River	1957	NC	135	4x10 <sup>14</sup>	<sup>14</sup> C, <sup>60</sup> Co, <sup>99</sup> Mo, <sup>125</sup> I	NC
Chili	RECH-1	Santiago	1974	Non	5	7x10 <sup>13</sup>	<sup>82</sup> Br, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm, <sup>192</sup> Ir	NC
Chine*	HFETR MJTR	Chengdu Chengdu	1979 1991	NC NC	125 5	6.2x10 <sup>14</sup> 8x10 <sup>13</sup>	<sup>60</sup> Co, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm, <sup>192</sup> Ir	NC
Corée, Rép. de	HANARO	Daejeon	1995	Non	30	4.5x10 <sup>14</sup>	<sup>7</sup> Li, <sup>32</sup> P, <sup>41</sup> Ar, <sup>60</sup> Co, <sup>79</sup> Kr, <sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc, <sup>131</sup> I, <sup>166</sup> Ho, <sup>192</sup> Ir	<sup>33</sup> P, <sup>75</sup> Se, <sup>89</sup> Sr, <sup>125</sup> I, <sup>125</sup> Sb, <sup>152</sup> Eu, <sup>169</sup> Yb
Égypte	ETRR-1 ETRR-2	Le Caire Le Caire	1962 2003	Oui Non	2 22	1.5x10 <sup>13</sup> 2.8x10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>131</sup> I	<sup>153</sup> Sm, <sup>188</sup> Re, <sup>188</sup> W
États-Unis	ATR	Idaho Falls, ID	1967	No	250	8.5x10 <sup>14</sup>	<sup>24</sup> Na, <sup>41</sup> Ar, <sup>46</sup> Sc, <sup>55</sup> Fe, <sup>60</sup> Co, <sup>77</sup> As, <sup>82</sup> Br, <sup>125</sup> I, <sup>188</sup> W, <sup>192</sup> Ir, <sup>194</sup> Sb, <sup>196</sup> Au, <sup>252</sup> Cf	<sup>63</sup> Ni, <sup>75</sup> Se, <sup>177</sup> Lu
	HFIR	Oak Ridge, TN	1965	No	85	2.1x10 <sup>15</sup>		
	MNRC	McClellan AFB, CA	1990	No	2	4x10 <sup>13</sup>		
	MURR	Columbia, MO	1966	NC	10	6x10 <sup>14</sup>		
	NSCR	College Station, TX	1962	No	1.0	2x10 <sup>13</sup>		
	OSTR	Corvallis, OR	1967	No	1.1	1x10 <sup>13</sup>		
	TRIGA II	Austin, TX	1992	No	1.1	2.7x10 <sup>13</sup>		
	WSUR	Pullman, WA	1961	No	1.0	7x10 <sup>12</sup>		
	BOR-60	Dimitrograd	1969	NC	60	2x10 <sup>14</sup>		
	IR-8	Moscou	1981	NC	8	2.5x10 <sup>14</sup>		
Fédération de Russie*	MIR-M1	Dimitrograd	1966	NC	100	5x10 <sup>14</sup>	<sup>33</sup> P, <sup>99m</sup> Tc, <sup>131</sup> I, <sup>182</sup> Ta, <sup>192</sup> Ir, <sup>197</sup> Hg, <sup>198</sup> Au	NC
	RBT-10/2	Dimitrograd	1984	NC	7	7.4x10 <sup>13</sup>		
	SM-3	Dimitrograd	1961	NC	100	5x10 <sup>15</sup>		
	WWR-M	Gatchina	1959	NC	18	4x10 <sup>14</sup>		

Annexe 2. Réacteurs de recherche produisant des isotopes (suite)

Pays	Nom du réacteur	Emplacement	Date de démarrage	Arrêt prévu d'ici à 2008	Puissance (MW)	Flux thermique maximal (n/cm <sup>2</sup> s)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes prévus pour 2003-2005
France	ORPHEE	Saclay	1980	Non	14	3×10 <sup>14</sup>	<sup>90</sup> Y, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>133</sup> Xe, <sup>140</sup> La, <sup>153</sup> Sm, <sup>169</sup> Er, <sup>186</sup> Re	NC
	OSIRIS	Saclay	1966	Non	70	2.7×10 <sup>14</sup>		
Hongrie*	BRR	Budapest	1959	NC	10	2.5×10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>125</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm*	NC
Inde	DRHUVA	Trombay	1985	Non	100	1.8×10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>46</sup> Sc, <sup>51</sup> Cr, <sup>60</sup> Co, <sup>82</sup> Br, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>153</sup> Sm, <sup>192</sup> Ir, <sup>203</sup> Hg	<sup>125</sup> I, <sup>177</sup> Lu
Indonésie	TRIGA Mk II	Bandung	1964	NC	2	5.1×10 <sup>13</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>35</sup> S, <sup>51</sup> Cr, <sup>65</sup> Zn, <sup>82</sup> Br, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>192</sup> Ir	<sup>166</sup> Ho
Iran	Centre de recherche nucléaire	Téhéran	1967	Non	5	3×10 <sup>13</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I, <sup>192</sup> Ir	NC
Italie*	TRIGA RC-1	Santa Maria di Galeria	1960	NC	1	2.7×10 <sup>13</sup>	<sup>166</sup> Ho	NC
Japon	JMTR	Ibaraki-ken	1968	Non	50	4×10 <sup>14</sup>	<sup>60</sup> Co, <sup>169</sup> Yb, <sup>192</sup> Ir, <sup>198</sup> Au	Non
	JRR-3M	Ibaraki-ken	1990	Non	20	2.7×10 <sup>14</sup>		
	JRR-4	Ibaraki-ken	1965	Non	3.5	7×10 <sup>13</sup>		
	KUR	Osaka-fu	1964	Non	5	8.15×10 <sup>13</sup>		
Libye*	IRT-1	Tajoura	1981	NC	10	2×10 <sup>14</sup>	NC	NC
Malaisie*	Triga Puspati	Bangi	1982	NC	1	2×10 <sup>13</sup>	NC	NC
Norvège*	JEEP II	Kjeller	1966	NC	2	2×10 <sup>13</sup>	<sup>60</sup> Co, <sup>82</sup> Br, <sup>153</sup> Sm	NC
Ouzbékistan*	WWR-CM	Tachkent	1959	NC	10	2.3×10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>33</sup> P, <sup>99m</sup> Tc, <sup>125</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>198</sup> Au	NC
Pakistan	PARR-1	Islamabad	1965	Non	10	1.7×10 <sup>14</sup>	<sup>24</sup> Na, <sup>32</sup> P, <sup>59</sup> Fe, <sup>99</sup> Mo, <sup>111</sup> Au, <sup>131</sup> I, <sup>153</sup> Sm	<sup>166</sup> Ho, <sup>177</sup> Lu
Pays-Bas <sup>2</sup>	HFR	Petten	1961	NC	45	2.7×10 <sup>14</sup>	<sup>89</sup> St, <sup>90</sup> Y, <sup>99</sup> Mo, <sup>125</sup> I, <sup>131</sup> I, <sup>166</sup> Ho, <sup>177</sup> Lu, <sup>192</sup> Ir	NC

Annexe 2. Réacteurs de recherche produisant des isotopes (suite)

Pays	Nom du réacteur	Emplacement	Date de démarrage	Arrêt prévu d'ici à 2008	Puissance (MW)	Flux thermique maximal (n/cm <sup>2</sup> s)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes prévus pour 2003-2005
Pérou*	RP-10	Lima	1988	NC	10	1.2x10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I	NC
Pologne*	MARIA	Swierk	1974	NC	30	4.5x10 <sup>14</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>35</sup> S, <sup>131</sup> I	NC
Portugal*	RPI	Sacavem	1961	NC	1	3.6x10 <sup>13</sup>	NC	NC
République tchèque	LWR-15	Rez	1957	Non	10	1.5x10 <sup>14</sup>	<sup>90</sup> Y, <sup>153</sup> Sm, <sup>166</sup> Ho, <sup>192</sup> Ir, <sup>203</sup> Hg	NC
Roumanie*	TRIGA Mk II	Pitesti	1979	NC	14	3.3x10 <sup>14</sup>	<sup>131</sup> I	NC
Suède*	R-2	Nyköping	1960	NC	50	4x10 <sup>14</sup>	NC	NC
Taipei chinois*	THOR	Hsinchu	1961	NC	2	3.6x10 <sup>13</sup>	<sup>131</sup> I	NC
Thaïlande*	TRR-1/MI	Bangkok	1977	NC	2	3.1x10 <sup>13</sup>	<sup>131</sup> I	NC
Ukraine*	WWR-M	Kiev	1960	NC	10	1.6x10 <sup>14</sup>	NC	NC
Vietnam*	DRR	Dalat	1963	NC	0.5	2.1x10 <sup>13</sup>	<sup>32</sup> P, <sup>99</sup> Mo, <sup>131</sup> I	NC

Source : Base de données sur les réacteurs de recherche de l'AIEA et les réponses au questionnaire.

\* Mentionné dans la Base de données sur les réacteurs de recherche de l'AIEA.

1. Un réacteur de remplacement est en construction et devrait devenir opérationnel en 2006.
2. Source : Groupe de recherche et de conseil nucléaires [*Nuclear Research and consultancy Group*], Rapport annuel 2002, Petten, Pays-Bas ([www.nrg-nl.com](http://www.nrg-nl.com)).

NC Non communiqué.

Les cases ombrées indiquent que le réacteur est un réacteur à haut flux ayant un flux maximal de neutrons thermiques > 5x10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup>sec.



**Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Emplacement</b>	<b>Type de faisceau</b>	<b>Energie du faisceau (MeV)</b>	<b>Isotopes produits en 2002</b>	<b>Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005</b>
Afrique du Sud (1)	Centre de l'accélérateur national (NAC)	Faure	<sup>1</sup> H	200	<sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>123</sup> I	NC
	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Zentralklinik Bad Berka GmbH	Aix-la-Chapelle Bad Berka	<sup>1</sup> H	11		
	Herz und Diabeteszentrum	Bad Oynhausen	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Rudolf Virchow Krankenhaus	Berlin	<sup>2</sup> H	3,5		
	EUROPET Cyclotron	Berlin	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16,5, 8,4		
	Charité	Berlin	<sup>1</sup> H	11		
	Westdeutsche Cyclotron GmbH	Bonn	<sup>1</sup> H	11		
	Forschungszentrum Rossendorf	Dresde	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Forschungszentrum Rossendorf	Dresde	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> He	7, 14, 28		
	PET-NET	Erlangen	<sup>1</sup> H	11		
	Institut de physique des rayonnements à usage médical	Essen	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	24, 14, 36, 28		
	Universitätsklinikum Essen	Essen	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Institut de radiologie et de médecine nucléaire	Francfort-sur-le-Main	<sup>1</sup> H	11		
	Euro-PET GmbH	Fribourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16,5, 8,4		<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>64</sup> Cu, <sup>86</sup> Y, <sup>94m</sup> Tc, <sup>123</sup> I, <sup>124</sup> I, <sup>211</sup> At
	Centre allemand de recherche sur le cancer	Heidelberg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	32, 16		
	Forschungszentrum Jülich GmbH	Jülich	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16,5, 8,4		
	Forschungszentrum Jülich GmbH	Jülich	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 10		
	Forschungszentrum Jülich GmbH	Jülich	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	22, 14, 36, 28		
	Forschungszentrum Karlsruhe	Karlsruhe	<sup>1</sup> H	42		
	Forschungszentrum Karlsruhe	Karlsruhe	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> He	26, 52, 104		
Universitätsklinikum Hamburg	Hambourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	30, 16, 42, 36			
Medizinische Hochschule	Hanovre	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	35, 18, 47, 35			
Max Planck Institut	Cologne	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	17,2, 8,3, 12,4, 16,5			
Universitätsklinikum Leipzig	Leipzig	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16, 8,4			
Technische Universität	Munich	<sup>1</sup> H	11			
Westfälische Wilhelms Universität	Münster	<sup>1</sup> H	11			
Universitätsklinikum Regensburg	Regensburg	<sup>1</sup> H	11			
Universität Eberhard Karls	Tübingen	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16,5, 8,4			
Universitätsklinikum Ulm	Ulm	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16,5, 8,4			
Arabie Saoudite (1)	Hôpital spécialisé et centre de recherche du Roi Faysal	Riad	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	28,5, 15, 38, 30	<sup>15</sup> N, <sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>111</sup> In, <sup>123</sup> I, <sup>124</sup> I, <sup>201</sup> Tl, <sup>203</sup> Pb	NC

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
Argentine (2)	CNEA	Buenos Aires	<sup>1</sup> H	42	<sup>18</sup> F, <sup>201</sup> Tl	<sup>11</sup> C, <sup>15</sup> O, <sup>123</sup> I
	Fundacion Escuela de Medicina Nuclear	Mendoza	<sup>1</sup> H	11		
	Global Medical System (Synacor)	Brisbane	<sup>1</sup> H	10		
Australie (7)	Cyclotek	Bundoora	<sup>1</sup> H	16		
	Peter MacCallum Cancer Institute	East Melbourne	<sup>1</sup> H	12	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>64</sup> Cu, <sup>67</sup> Ga, <sup>76</sup> Br, <sup>123</sup> I, <sup>124</sup> I, <sup>201</sup> Tl	NC
	Austin and Repatriation Medical Centre	Heidelberg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	10, 5		
	ANSTO NMC	Sydney	<sup>1</sup> H	30		
	Royal Prince Alfred Hospital	Sydney	<sup>1</sup> H	16		
	Sir Charles Gairdner Hospital	Perth	<sup>1</sup> H	18		
	ARGOS Zyklotron	Klagenfurt	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5		
Autriche (4)	ARGOS Zyklotron	Linz	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5		
	ACRS Seibersdorf	Seibersdorf	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>18</sup> F	NC
	Universitätsklinik NEUBAU AKH	Vienne	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5		
	Hôpital Erasme	Bruxelles	<sup>1</sup> H	30		
Belgique (11)	Vrije Universiteit Brussel	Bruxelles	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	42, 22, 50, 43		
	IBA Isotopes	Fleurus	<sup>1</sup> H	14		
	MDS Nordion	Fleurus	<sup>1</sup> H	30		
	Université de Gand	Gand	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	24, 14.5, 32, 29		
	Université de Louvain	Louvain	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	10, 5	<sup>11</sup> C, <sup>18</sup> F, <sup>103</sup> Pd	NC
	Université de Liège	Liège	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Université catholique de Louvain	Louvain-la-Neuve	<sup>1</sup> H	30		
	Université catholique de Louvain	Louvain-la-Neuve	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	85, 55, 145, 110		
	IBT	Nivelles	<sup>1</sup> H	14		
	IBT	Nivelles	<sup>1</sup> H	14		
	IEN	Rio de Janeiro	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	24, 14, 36, 28		
Brésil (3)	IPEN/CNEN-SP (CV-28)	Sao Paulo	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	24, 14, 36, 28	<sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>123</sup> I	<sup>201</sup> Tl
	IPEN/CNEN-SP (Cyclone 30)	Sao Paulo	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	15, 30		
	Cross Cancer Centre	Edmonton	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	19, 9		
Canada (9)	Hamilton Health Sciences Corp.	Hamilton	<sup>1</sup> H	10		
	Institut Neurologique de Montréal	Montréal	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Université d'Ottawa	Ottawa	<sup>1</sup> H	11		
	Institut de psychiatrie Clark	Toronto	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>94m</sup> Tc, <sup>103</sup> Pd, <sup>111</sup> In, <sup>123</sup> I, <sup>124</sup> I, <sup>201</sup> Tl	NC
	TRIUMF (520 MeV)	Vancouver	<sup>1</sup> H	500		
	TRIUMF (CP42)	Vancouver	<sup>1</sup> H	42		
	TRIUMF (TR30)	Vancouver	<sup>1</sup> H	30		
	Programme TEP UBC/TRIUMF	Vancouver	<sup>1</sup> H	13		

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
Chili (1)	Comision Chilena de Energia Nuclear	Santiago	NC	NC	NC	$^{67}\text{Ga}$ , $^{18}\text{F}$
	Institut de l'énergie atomique de Chine	Beijing	$^1\text{H}$	30		
	Institut de Chimie appliquée (CS22)	Beijing	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$	22, 11, 29		
	Institut de Chimie appliquée (CS30)	Beijing	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	26, 15, 30		
Chine (9)	Peking Union Medical College	Beijing	$^1\text{H}$	11		
	Hôpital général de PLA	Beijing	$^1\text{H}$	11		
	Hôpital populaire de la Province de Guangdong	Guangzhou	$^1\text{H}$	11		
	Sanatorium & Hôpital de Hong Kong	Hong Kong	$^1\text{H}$	11		
	Hôpital Zibo Wanjie	Shangdong	$^1\text{H}$	16.5		
	Institut de recherche nucléaire de Shanghai	Shanghai	$^1\text{H}$	30		
	Institut de recherche nucléaire	Rez	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Centre commun de recherche de la CE	Ispra	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	40, 20, 40, 40		
Corée, République de (6)	Centre médical Asan	Séoul	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Institut coréen des sciences radiologiques et médicales (Cyclone 30)	Séoul	NC	NC		
	Institut coréen des sciences radiologiques et médicales (KIRAMS-13)	Séoul	$^1\text{H}$	13		
	Institut coréen des sciences radiologiques et médicales (MC-50)	Séoul	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	50, 25, 50.5		
	Centre médical Samsung	Séoul	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16.5, 8.4		
	Hôpital universitaire national de Séoul	Séoul	$^1\text{H}$	13		
	Hôpital universitaire de Copenhague	Copenhague	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	32, 16, 32		
	Hôpital universitaire d'Aarhus	Aarhus	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 8		
	Autorité de l'énergie atomique	Le Caire	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	18, 10, 24, 20		
	Barnatron (CADISA)	Barcelone	$^1\text{H}$	16.4		
Danemark (2)	Centro PET Complutense	Madrid	$^1\text{H}$	12		
	Clinica Lopez Ibor	Madrid	$^1\text{H}$	9.6		
	Clinica Universitaria de Navarra	Pampelune	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Centro Andaluz de Diagnostico	Séville	$^1\text{H}$	16.5		
Égypte (1)						
Espagne (5)						
Commission européenne (1)						

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
États-Unis (74)	74 accélérateurs producteurs d'isotopes	Divers	Divers	Variable jusqu'à 800 MeV	<sup>7</sup> Be, <sup>22</sup> Na, <sup>44</sup> Ti, <sup>49</sup> V, <sup>60</sup> Cu, <sup>64</sup> Cu, <sup>65</sup> Zn, <sup>67</sup> Cu, <sup>68</sup> Ge, <sup>73</sup> As, <sup>76</sup> Br, <sup>77</sup> Br, <sup>82</sup> Sr, <sup>85</sup> Sr, <sup>86</sup> Y, <sup>88</sup> Y, <sup>88</sup> Zr, <sup>94m</sup> Tc, <sup>95m</sup> Tc, <sup>109</sup> Cd, <sup>124</sup> I, <sup>194</sup> Hg, <sup>207</sup> Pb	NC
Fédération de Russie (9)	Institut central de recherche sur les rayons X et la radiologie	Saint-Petersbourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	18, 10, 28, 20		
	Centre scientifique Bakoulev de chirurgie cardiovasculaire	Moscou	<sup>1</sup> H	11		
	Institut Kourtchatov de l'énergie atomique	Moscou	<sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	32, 30, 70, 60	<sup>11</sup> C, <sup>13</sup> N, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>57</sup> Co, <sup>67</sup> Ga, <sup>68</sup> Ge, <sup>85</sup> Sr, <sup>103</sup> Pd, <sup>109</sup> Cd, <sup>123</sup> I, <sup>124</sup> I, <sup>201</sup> Tl	NC
	Cylotron Co., Ltd.	Obninsk	<sup>1</sup> H	14		
	Cylotron Co., Ltd.	Obninsk	<sup>1</sup> H, <sup>3</sup> He	22, 22		
	Institut du cerveau humain RAS	Saint-Petersbourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	17, 8.5		
	Université technique de Saint-Petersbourg	Saint-Petersbourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	18, 10, 27, 20		
	Institut du radium V.G. Khlopin	Saint-Petersbourg	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	18, 10, 24, 20		
	Université polytechnique de Tomsk	Tomsk	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	15, 14, 30, 28		
	Université de Helsinki	Helsinki	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	10, 5		
Finlande (4)	Université de Jyväskylä	Jyväskylä	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He	70, 65, 168	<sup>11</sup> C, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>24</sup> Na, <sup>41</sup> Ar, <sup>64</sup> Cu, <sup>82</sup> Br, <sup>123</sup> I, <sup>129</sup> Cs, <sup>132</sup> Cs, <sup>136</sup> Cs, <sup>140</sup> La, <sup>153</sup> Sm, <sup>198</sup> Au	NC
	Hôpital universitaire central de Turku	Turku	<sup>2</sup> H	7		
	Hôpital universitaire central de Turku	Turku	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	20, 10.5, 28, 21		
	CERMEP	Lyon	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16, 8		
	CERMEP – Hôpital neurocardiologique	Lyon	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	18, 9		
	Centre Antoine Lacassagne	Nice	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	65, 65, 65, 65	<sup>11</sup> C, <sup>15</sup> O, <sup>18</sup> F, <sup>81m</sup> Kr	NC
	CIS BIO	Saclay	<sup>1</sup> H	40		
	CIS BIO	Saclay	<sup>1</sup> H	30		
	CNRS-CERI	Orléans	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	35, 25, 60, 50		
	Service Hospitalier Frédéric Joliot	Orsay	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	20, 14.5, 30, 29		
Hongrie (1)	Institut de recherche nucléaire	Debrecen	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>3</sup> He, <sup>4</sup> He	20, 10, 26, 20	<sup>18</sup> F, <sup>67</sup> Ga, <sup>123</sup> I	NC
	Centre du cyclotron à énergie variable	Calcutta	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> He	6.3, 12.3, 25.8	<sup>18</sup> F	NC
Inde (2)	Centre de médecine des rayonnements	Trombay	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	16.5, 8.5		
	Autorité nationale de l'énergie atomique	Serpong	<sup>1</sup> H	27	<sup>46</sup> Sc, <sup>99</sup> Mo, <sup>141</sup> Ce, <sup>186</sup> Re	<sup>18</sup> F, <sup>54</sup> Mn, <sup>57</sup> Co, <sup>64</sup> Cu, <sup>103</sup> Pd, <sup>111</sup> Ag, <sup>177</sup> Lu
Iran (1)	Centre de recherche nucléaire pour l'agriculture et la médecine	Karaj	<sup>1</sup> H, <sup>2</sup> H	30, 15	<sup>67</sup> Ga, <sup>81m</sup> Kr, <sup>201</sup> Tl	<sup>11</sup> C, <sup>18</sup> F, <sup>103</sup> Pd, <sup>123</sup> I

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
Israël (2)	Organisation médicale de Hadassah	Jérusalem	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$	NC
	Soreq NRC	Yavne	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	10, 5		
Italie (9)	Azienda Ospedaliera di Bologna	Bologne	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16,5, 8	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{94\text{m}}\text{Tc}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{124}\text{I}$	NC
	Ospedale Civile	Castelfranco Veneto	$^1\text{H}$	10		
	Ospedale Maggiore	Milan	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16,5, 8,4		
	Ospedale San Raffaele	Milan	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Istituto Nazionale per lo Studio e la Cura dei Tumori	Milan	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 8,5		
	Istituto Scientifico H. San Raffaele	Milan	$^1\text{H}$	11		
	CNR Institut Pascale	Naples	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 8,5		
	CNR Institut de physiologie clinique	Pise	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16,7, 8,4		
	Azienda Ospedaliera 5 Maria Nuova	Reggio Emilia	$^1\text{H}$	9,6		
Japon (38)	Institut de recherche sur le cerveau et les vaisseaux sanguins	Akita City	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16, 8	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{48}\text{V}$ , $^{52}\text{Mn}$ , $^{55}\text{Fe}$ , $^{62}\text{Cu}$ , $^{64}\text{Cu}$ , $^{62}\text{Zn}$ , $^{67}\text{Cu}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{76}\text{Br}$ , $^{77}\text{Br}$ , $^{81}\text{Rb}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{201}\text{Tl}$	NC
	Laboratoire de radioisotopes Daichi	Chiba	$^1\text{H}$	30		
	Laboratoire de radioisotopes Daichi	Chiba	$^1\text{H}$	30		
	Université médicale de Fukui	Fukui	$^1\text{H}$	12		
	Université de Kyushu	Fukuoka	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 10		
	JAERI	Gunma	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	90, 50, 100		
	École de médecine de l'Université de Gunma	Gunma-ken	$^1\text{H}$	18		
	Nikko Memorial Hospital	Hokkaido	$^1\text{H}$	11		
	Institut pour le vieillissement du cerveau et les troubles cognitifs de Hyogo	Hyogo	$^1\text{H}$	12		
	Institut national de recherche sur les métaux	Ibaraki	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	17, 10, 26, 20		
	Institut national des sciences radiologiques	Inage-ku	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10		
	Institut national des sciences radiologiques	Inage-ku	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	20, 10		
	Institut national des sciences radiologiques	Inage-ku	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	90, 55, 145, 110		
	Nishina Memorial Cyclotron Centre	Iwate	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 8		
	Hôpital cardiovasculaire de Kanazawa	Ishikawa	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	NC		
Hôpital universitaire de Kyoto	Kyoto	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16, 8			
Hôpital Nishijin	Kyoto	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 10			
Centre d'imagerie HIMEIC	Minamitsuru-gun	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
Centre de rééducation et des sports de Nagoya City	Nagoya	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005	
Japon (38) (suite)	École médicale de l'Université de Nagoya	Nagoya City	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	22, 11			
	Institut national des sciences de la longévité	Obu	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
	Institut de recherche biofonctionnelle	Osaka	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
	Centre cardiovasculaire national	Osaka	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
	École de médecine de l'Université d'Osaka City	Osaka	$^1\text{H}$	12			
	Nihon Medi-Physics Co., Ltd.	Sanda City	$^1\text{H}$	30			
	Nihon Medi-Physics Co., Ltd.	Sanda City	$^1\text{H}$	30			
	Université de Hokkaido	Sapporo	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
	Université de Tohoku	Sendai	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	40, 25, 65, 50			
	Centre médical international du Japon	Shinjaku-ku	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	20, 1			
	Nihon Medi-Physics Co., Ltd.	Sodegaura	$^1\text{H}$	30			
	Nihon Medi-Physics Co., Ltd.	Sodegaura	$^1\text{H}$	28			
	Centre national de neurologie et de psychiatrie	Tokyo	$^1\text{H}$	12			
	Clinique Nishidai	Tokyo	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
	Institut métropolitain de gérontologie de Tokyo	Tokyo	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	18, 10, 24, 18			
	Université de Tokyo	Tokyo	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 10			
Kazakhstan (1)	Institut de physique nucléaire	Almaty	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	30, 25, 62, 50	$^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{201}\text{Tl}$	$^{57}\text{Co}$ , $^{88}\text{Sr}$ , $^{88}\text{Y}$ , $^{109}\text{Cd}$	
Mexique (1)	Universidad Nacional Autonoma de Mexico	Ceidad Universitaria	$^1\text{H}$	11	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$	NC	
Norvège (1)	Université d'Oslo	Oslo	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	35, 17, 47, 35	$^{18}\text{F}$	NC	
Pays-Bas (8)	Vrije Universiteit	Amsterdam	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9			
	Vrije Universiteit	Amsterdam	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	28, 16, 45, 32			
	Université de technologie Accrec B.V. Eindhoven	Eindhoven	$^1\text{H}$	30			
	Université de technologie Accrec B.V. Eindhoven	Eindhoven	$^1\text{H}$	3		$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{201}\text{Tl}$	NC
	Université de technologie Accrec B.V. Eindhoven	Eindhoven	$^1\text{H}$ , $^4\text{He}$	30, 20			
	Hôpital universitaire de Groningen	Groningen	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 8,5			
	Mallinckrodt Medical	Petten	$^1\text{H}$	30			
	Mallinckrodt Medical	Petten	$^1\text{H}$	30			
Philippines (1)	Centre médical St. Luc	Quezón City	$^1\text{H}$	9.6	$^{18}\text{F}$	NC	
Pologne (3)	Institut de physique Henryk Niewodniczanski	Cracovie	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	60, 30, 60			
	Institut de physique Henryk Niewodniczanski	Cracovie	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	60, 30, 60	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{211}\text{At}$	NC	
	Université de Varsovie	Varsovie	$^1\text{H}$	NC			

Annexe 3. Accélérateurs produisant des isotopes (suite)

Pays	Opérateur	Emplacement	Type de faisceau	Energie du faisceau (MeV)	Isotopes produits en 2002	Nouveaux isotopes dont la production est prévue en 2003-2005
République slovaque (1)	Bureau slovaque des normes, de la métrologie et des essais	Bratislava	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$	NC
Rép. tchèque (2)	Institut de physique nucléaire	Rez	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	38, 20, 53, 40	$^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{201}\text{Tl}$	NC
	Institut de physique nucléaire	Rez	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9	$^{211}\text{At}$	NC
Roumanie (1)	National Institute for Physics and Nuclear Engineering	Bucarest	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^4\text{He}$	15, 13, 27	$^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{123}\text{I}$	NC
Royaume-Uni (6)	John Mallard Scottish PET Centre	Aberdeen	$^1\text{H}$	11		
	Université de Cambridge	Cambridge	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16, 8, 5		
	Imaging Research Solutions Ltd	Londres	$^2\text{H}$	3, 8		
	Imaging Research Solutions Ltd	Londres	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$	40, 20, 53, 40	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{124}\text{I}$	NC
	St. Thomas Hospital	Londres	$^1\text{H}$	11, 5		
Suède (1)	Douglas Cyclotron Unit Clatterbridge for Oncology	Wirral	$^1\text{H}$	62		
	Uppsala Universitet	Uppsala	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	17, 17	$^{11}\text{C}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$	NC
Suisse (5)	Hôpital universitaire de Genève	Genève	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Hôpital universitaire de Genève	Genève	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	18, 9		
	Institut Paul Scherrer	Villigen	$^1\text{H}$	72	$^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Cu}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{201}\text{Tl}$	$^{64}\text{Cu}$ , $^{86}\text{Y}$
	Institut Paul Scherrer	Villigen	$^1\text{H}$	590		
	Hôpital universitaire de Zürich	Zürich	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$	16, 5, 8, 5		
Syrie (1)	Commission de l'énergie atomique de Syrie	Damas	$^1\text{H}$	30	$^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{201}\text{Tl}$	$^{15}\text{O}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{123}\text{I}$
Turquie (1)	Services des Isotopes Monrol	Gebze Kocaeli	$^1\text{H}$	11	$^{18}\text{F}$	NC

Source : IAEA Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States, (Répertoire AIEA des cyclotrons utilisés pour la production d'isotopes dans les États Membres) Octobre 2002.

NC

Non communiqué.



*Annexe 4*

**Pays ayant répondu au questionnaire\***

Afrique du Sud	Allemagne
Australie	Autriche
Belarus	Belgique
Brésil	Chili
Corée, République de	Égypte
Espagne	États-Unis
Finlande	France
Inde	Indonésie
Iran, République islamique d'	Pakistan
Japon	République tchèque
République slovaque	Syrie
Suisse	Ukraine
Turquie	

\* Le Centre de recherche de la Commission européenne à Ispra, Italie, a aussi répondu au questionnaire.



Annexe 5

Isotopes médicaux courants produits dans des réacteurs et leurs applications

Isotope	Période	Voie de production	Type d'usage*	Applications
H-3	12,3 a	Li-6(n, alpha)H-3	D	Traceur pour la recherche en biochimie Dosages radio-immunologiques
C-14	5730 a	N-14(n,p)C-14	D	Détection des ulcères gastriques
Na-24	14,9 h	Na-23(n, gamma)Na-24	R	Recherche sur l'hypertension
P-32	14,3 j	S-32(n,p)P-32	T	Thérapie du cancer des os, de l'arthrite et de la synovite
S-35	87,2 j	Cl-35(n, p)S-35	R	Composés biomédicaux radiomarqués, Recherche biochimique et biomédicale
Ca-45	162,7 j	Ca-44(n, gamma)Ca-45	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Sc-46	83,8 j	Sc-45(n, gamma)Sc-46	R	Traceur pour la recherche en biochimie et traceur d'écoulement liquide
Ca-47	4,5 j	Ca-46(n, gamma)Ca-47	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Sc-47	3,3 j	Sc-45(n, gamma)Sc-46(n, gamma)Sc-47	T	Radioimmunothérapie
Cr-51	27,7 j	Cr-50(n, gamma)Cr-51	D	Diagnostic du volume de cellules sanguines, traceur pour la recherche en biochimie
Fe-55	2,7 a	Fe-54(n, gamma)Fe-55	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Fe-59	44,5 j	Fe-58(n, gamma)Fe-59	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Co-60	5,3 a	Co-59(n, gamma)Co-60	T	Traitement du cancer
Cu-64	12,7 h	Cu-63(n, gamma)Cu-64	D/T	Diagnostic et traitement du cancer
Zn-65	243,8 j	Zn-64(n, gamma)Zn-65	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Cu-67	2,6 j	Zn-67(n, p)Cu-67	T	Traitement du cancer, traceur pour la recherche en biochimie
Se-75	119,8 j	Se-74(n, gamma)Se-75	R	Gammagraphie, traceur pour la recherche en biochimie
Sr-85	64,8 j	Sr-84(n, gamma)Sr-85	R	Traceur biomédical
Rb-86	18,6 j	Rb-85(n, gamma)Rb-86	R	Traceur pour la recherche en biochimie
Sr-89	50,5 j	Sr-88(n, gamma)Sr-89 ou Y-89(n, p)Sr-89	T	Thérapie du cancer des os
Sr-90	28,8 a	Produit de fission de U-235	T	Traitement du cancer
Y-90	64 h	Y-89(n, gamma)Y-90 ou Sr-90 (bêta moins)Y-90	T	Traitement du cancer, de l'arthrite et de la synovite
Tc-99m	6,01 h	Mo-99(bêta moins)Tc-99m <sup>1</sup>	D	Diagnostic
Pd-103	17 j	Pd-102(n, gamma)Pd-103	T	Traitement du cancer de la prostate
Ru-103	39,3 j	Produit de fission de U-235	T	Traitement du cancer de la prostate
Ru-106	1 a	Produit de fission de U-235	T	Brachythérapie
Cd-109	462 j	Cd-108(n, gamma)Cd-109	T	Traitement du cancer
Pd-109	13,5 h	Pd-108(n, gamma)Pd-109	T	Traitement du cancer
Sn-117m	13,6 j	Sn-116(n, gamma)Sn-117m ou Sn-117(n,n)Sn-117m	T	Thérapie du cancer des os
Cd-115	44,6 j	Cd-114(n, gamma)Cd-115	T	Thérapie de l'arthrite
Te-123m	119,7 j	Te-122(n, gamma)Te-123m	R	Recherche sur le poumon, le cœur
I-125	59,4 j	Xe-124(n, gamma)Xe-125(bêta moins)I-125	D/T	Brachythérapie, traitement du cancer, densitométrie osseuse, dosages radio-immunologiques
I-131	8 j	Te-130(n, gamma)Te-131(bêta moins)I-131 ou produit de fission de U-235	D/T	Imagerie gamma, thérapie de la thyroïde, traitement du cancer
Xe-133	5,2 j	Produit de fission de U-235	D	Imagerie gamma des fonctions pulmonaires
Cs-137	30 a	Produit de fission de U-235	T	Brachythérapie
Sm-145	340 j	Sm-144(n, gamma)Sm-145	T	Traitement du cancer
Sm-153	1,9 j	Sm-152(n, gamma)Sm-153	T	Thérapie du cancer des os
Gd-153	241,6 j	Gd-152(n, gamma)Gd-153	D	Diagnostic de l'ostéoporose
Dy-165	2,3 h	Dy-164(n, gamma)Dy-165	T	Thérapie de l'arthrite
Dy-166	3,4 j	Dy-164(n, gamma)Dy-165(n, gamma)Dy-166	T	Traitement du cancer
Ho-166	1,1 j	Ho-165(n, gamma)Ho-166	T	Traitement du cancer, soins palliatifs
Er-169	9,4 j	Er-168(n, gamma)Er-169	T	Thérapie de l'arthrite et de la synovite
Yb-169	32 j	Yb-168(n, gamma)Yb-169	T	Soins palliatifs
Tm-170	128,6 j	Tm-169(n, gamma)Tm-170	T	Traitement de la leucémie
Yb-175	4,2 j	Yb-174(n, gamma)Yb-175	T	Traitement du cancer
Lu-177	6,7 j	Lu-176(n, gamma)Lu-177	T	Traitement du cancer
Re-186	3,8 j	Re-185(n, gamma)Re-186	T	Thérapie du cancer des os
Re-188	16,9 h	W-186(n, gamma)W-187(n, gamma) W-188(bêta moins)Re-188 ou Re-187(n, gamma)Re-188	T	Traitement du cancer, soins palliatifs, antiresténose
Ir-192	73,8 j	Ir-192(n, gamma)Ir-192	T	Traitement du cancer, brachythérapie, antiresténose
Pt-195m	4 j	Pt-195(n, gamma)Pt-195m	D/T	Diagnostic et traitement du cancer
Au-198	2,7 j	Au-197(n, gamma)Au-198	T	Traitement du cancer, brachythérapie
Au-199	3,1 j	Pt-198(n, gamma)Pt-199(bêta moins)Au-199	T	Traitement du cancer
Bi-213	45,6 m	Provenant de la désintégration de U-233	T	Traitement du cancer par émission alpha
Am-241	432,2 a	Absorptions multiples de neutrons à partir de U-238	T	Densitométrie osseuse
Cf-252	1,65 a	Absorptions multiples de neutrons à partir de U-238	T	Traitement du cancer du col de l'utérus

\* D = diagnostique      T = thérapeutique      R = recherche      n = neutron  
j = jour                    m = minute                    h = heure                    a = an

1. Mo-99 est produit en tant que produit de la fission de U-235 ou par la réaction Mo-98(n)Mo-99



Annexe 6

**Isotopes médicaux courants produits dans des accélérateurs et leurs applications**

Isotopes	Période	Voie de production	Type d'usage*	Applications
Be-7	53.3 j	Li-7(p,n)Be-7	R	Études de la béryllose
C-11	20.3 m	B-11(p,n)C-11	D	Diagnostic par tomographie par émission de positrons (TEP)
N-13	10 m	C-13(p,n)N-13	D	Diagnostic par tomographie par émission de positrons (TEP)
O-15	122.3 s	N-15(p,n)O-15	D	Diagnostic par tomographie par émission de positrons (TEP)
F-18	1.8 h	O-18(p,n)F-18	D	Diagnostic par tomographie par émission de positrons (TEP)
Mg-28	21 h	P-31(p,4p)Mg-28	R	Traceur utilisant du magnésium
V-48	16 j	Ti-48(p,n)V-48	R	Études nutritionnelles
Fe-52	8.3 h	Mn-55(p,4n)Fe-52	D/R	Diagnostic par émission de positrons, traceur utilisant du fer
Co-57	271.8 j	Fe-57(p,n)Co-57	D	Dosages radio-immunologiques
Cu-61	3.4 h	Ni-61(p,n)Cu-61 ou Zn-64(p,alpha)Cu-61	D	Diagnostic par émission de positrons
Cu-64	12.7 h	Ni-64(p,n)Cu-64 ou Cu-65(p,pn)Cu-64	D/T	Diagnostic par émission de positrons, radioimmunothérapie
Cu-67	2.6 j	Zn-68(p,2p)Cu-67	T	Radioimmunothérapie
Ga-67	3.3 j	Zn-67(p,n)Ga-67	D	Diagnostics utilisant le rayonnement gamma
As-74	17.8 j	Ge-74(p,n)As-74	D	Analogue du phosphore émettant des positrons
Br-77	2.4 j	Se-77(p,n)Br-77	T	Radioimmunothérapie
Br-80m	4.4 h	Se-80(p,n)Br-80m	T	Radioimmunothérapie
Kr-81m	13.1 s	Br-81(p,n)Kr-81m	D	Diagnostics utilisant le rayonnement gamma
Rb-82m	6.3 h	Sr-82(ce)Rb-82	D	Imagerie cardiaque
Y-88	106.6 j	Sr-88(p,n)Y-88	T	Radioimmunothérapie
Zr-89	3.3 j	Y-89(p,n)Zr-89	D/T	Diagnostic par émission de positrons, radioimmunothérapie
Ru-97	2.9 j	Rh-103(p,alpha3n)Ru-97	D	Fonction hépatobiliaire ; localisation de tumeur et d'inflammation
Pd-103	17.0 j	Rh-103(p,n)Pd-103	T	Traitement du cancer de la prostate
In-111	2.8 j	Cd-111(p,n)In-111	D/T	Radioimmunothérapie, imagerie gamma
I-123	13.2 h	I-127(p,5n)Xe-123(ce)I-123	D	Émetteur TEMP pour imagerie du cerveau
I-124	4.2 j	Te-124(p,n)I-124	D/T	Radioimmunothérapie, émetteur de positrons
Xe-127	36.4 j	I-127(p,n)Xe-127 ou Cs-133(p,2p5n)Xe-127	D/R	Diagnostic pulmonaire et études de ventilation
Tl-201	3.0 j	Tl-203(p,p2n)Tl-201	D	Imagerie cardiaque
Bi-205	15.3 j	Pb-207(p,3n)Bi-205	D/R	Distribution biologique du bismuth
Bi-206	6.2 j	Pb-207(p,2n)Bi-206	D/R	Distribution biologique du bismuth
At-211	7.2 h	Bi-209(alpha,2n)At-211	T	Traitement du cancer par émission alpha

\* D = diagnostique                      T = thérapeutique                      R = recherche

ce = capture d'électron

n = neutron

h = heure

s = seconde

p = proton

j = jour

m = minute



*Annexe 7*

**Liste des organismes non-gouvernementaux concernés  
par la production et l'utilisation des isotopes**

American Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ASTRO)  
12500 Fair Lakes Circle Suite #375, Fairfax, VA 22033-3882, USA  
Website: [www.astro.org](http://www.astro.org)

Council on Radionuclides and Radiopharmaceuticals, Inc. (CORAR)  
3911 Campolindo Drive, Moraga, CA 94556-1551, USA  
Website: [www.corar.org](http://www.corar.org)

Association européenne de médecine nucléaire (EANM)  
EANM Executive Secretariat, Hollandstrasse 14 Mezzanine, A-1020 Vienna, Austria  
Website: [www.eanm.org](http://www.eanm.org)

Société européenne de radiologie thérapeutique et d'oncologie (ESTRO)  
Avenue E. Mounierlaan 83, B-1200 Bruxelles, Belgique  
Website: [www.estro.be](http://www.estro.be)

International Isotope Society (IIS)  
Website: [www.intl-isotope-soc.org](http://www.intl-isotope-soc.org)

Joint Accelerator Conference Website (JACoW)  
Website: [www.JACoW.org](http://www.JACoW.org)

Society of Nuclear Medicine (SNM)  
1850 Samuel Morse Dr. Reston, VA 20190, USA  
Website: [www.snm.org](http://www.snm.org)



*Annexe 8*

**Membres du groupe de travail**

**Australie**

M. N. MORCOS ANSTO

**Belgique**

M. B. LAMBERT Institut national des radioéléments (I.R.E)  
M. B. PONSARD Centre d'étude de l'énergie nucléaire

**Canada**

Mme. T. BARICH MDS Nordion  
M. C. PIRART MDS Nordion

**États-Unis d'Amérique**

M. J. KLEIN (Président) Laboratoire national d'Oak Ridge

**France**

M. A. ALBERMAN CEA – DEN DRSN Saclay  
M. J-L. SZABO CEA – DRT/DIMRI, Dir. de la recherche technologique  
Mme. A. HOORELBEKE IRSN-UES

**Italie**

M. G. CAPANNESI ENEA  
M. M. PAGANINI FIORATI APAT

**République tchèque**

M. F. MELICHAR Institut de physique nucléaire de l'Académie des Sciences

**Turquie**

Mme B. ONAT

**Agence internationale de l'énergie atomique**

M. N. RAMAMOORTHY Directeur, Division des sciences physiques et chimiques  
Département des sciences et applications nucléaires  
M. M. HAJI-SAEID Chef, Section des applications industrielles et de la chimie  
Division des Sciences physiques et chimiques  
M. M.R.A. PILLAI Section des applications industrielles et de la chimie

**Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire**

M. R. PRICE (Secrétaire scientifique) Division du développement de l'énergie nucléaire



Annexe 9

**Regroupement des pays et des zones**

Les pays et les zones géographiques auxquels le présent rapport fait référence, sont énumérés ci-après. Les pays suivis de « \*\* » sont membres de l'OCDE.

- 1. Amérique du Nord**  
États-Unis d'Amérique\*\*      Canada\*\*      Mexique\*\*
- 2. Amérique centrale et du Sud**  
Argentine      Brésil      Chili  
Cuba      Pérou
- 3. Europe occidentale et Scandinavie**  
Allemagne\*\*      Autriche\*\*      Belgique\*\*  
Danemark\*\*      Espagne\*\*      Finlande\*\*  
France\*\*      Italie\*\*      Norvège\*\*  
Pays-Bas\*\*      Portugal\*\*      Royaume-Uni\*\*  
Suède\*\*      Suisse\*\*
- 4. Europe centrale, orientale et du Sud-Est**  
Biélorus      Fédération de Russie      Hongrie\*\*  
Pologne\*\*      République tchèque\*\*      République slovaque\*\*  
Roumanie      Turquie\*\*      Ukraine
- 5. Afrique**  
Afrique du Sud      Égypte      Libye
- 6. Moyen-Orient, Asie centrale et méridionale**  
Arabie Saoudite      Bangladesh      Inde  
Iran, République islamique d'      Israël      Kazakhstan  
Ouzbékistan      Pakistan      Syrie
- 7. Asie du Sud-Est et Zone pacifique**  
Australie\*\*      Indonésie      Malaisie  
Philippines      Thaïlande      Vietnam
- 8. Asie de l'Est**  
Chine      Corée, République de\*\*      Japon\*\*  
Taïpei chinois

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIMÉ EN FRANCE  
(66 2005 04 2 P) – n° 53950 2005