

# Usages bénéfiques et production des isotopes



# Usages bénéfiques et production des isotopes

## AVANT-PROPOS

Les isotopes radioactifs et stables sont utilisés à travers le monde dans de nombreux secteurs, en médecine, dans l'industrie, l'agriculture et la recherche. Les isotopes sont irremplaçables dans bon nombre de leurs applications et s'avèrent généralement plus efficaces et moins chers que d'autres techniques ou procédés.

Alors que quelque cinquante pays possèdent des installations de taille importante pour la production d'isotopes ou leur séparation et que nombreux sont les pays où des installations de taille plus modeste sont en service, il n'existe paradoxalement pas étude générale sur l'utilisation et la production d'isotopes couvrant l'analyse des tendances et l'équilibre offre/demande dans le secteur. C'est pourquoi le Comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible a décidé en 1996 d'entreprendre une telle étude en collaboration avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Les objectifs de cette étude sont : de recueillir des données sur les usages et la production d'isotopes ; d'analyser la situation et les tendances dans le secteur ; et d'identifier, à l'attention de pouvoirs publics, les questions clés relatives à la sécurité d'approvisionnement des isotopes à usages bénéfiques.

Ce rapport est le résultat d'un travail collectif d'experts dans le domaine et ne représente pas nécessairement les points de vue des pays ou des organisations internationales qui y ont participé. Les données et les analyses présentées sont représentatives de la situation dans le monde mais ne sont pas exhaustives. Le rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

## SYNTHÈSE

Le 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) a approuvé cette étude sur la production et les usages bénéfiques des isotopes dans le cadre du programme de travail de 1997-1998. Les principaux objectifs de ce travail sont de fournir aux pays Membres de l'AEN un examen approfondi et actuel des moyens de production et des applications des isotopes dans le monde et d'analyser l'évolution de la demande et de l'offre d'isotopes afin de mettre en évidence les questions présentant de l'intérêt pour les pouvoirs publics. Les problèmes se rapportant à la réglementation ne sont pas abordés dans la mesure où ils sont traités dans un certain nombre de publications de l'AIEA, de l'ISO et de la CIPR. De même, la production d'isotopes servant à la fabrication de combustibles pour les centrales nucléaires est laissée de côté. L'étude a été réalisée par le Secrétariat de l'AEN avec l'aide d'un consultant en collaboration avec le Secrétariat de l'AIEA. Le Secrétariat a rassemblé et analysé des informations sur ce thème en suivant les orientations et sous le contrôle des experts des pays Membres de l'AEN.

Les applications des isotopes sont multiples dans pour ainsi dire tous les secteurs de l'économie et dans la plupart des pays du monde. Même s'il existe un grand nombre d'ouvrages consacrés à ces applications dans différents secteurs, aucune enquête approfondie à l'échelle mondiale n'a été consacrée à la demande d'isotopes couvrant l'ensemble des utilisations.

De nombreux isotopes sont produits par les réacteurs de recherche et d'autres par les accélérateurs. Bien que l'on dispose de données sur les réacteurs de recherche et les accélérateurs en service dans le monde, par exemple dans les publications de l'AIEA, il est difficile de connaître leurs véritables activités de production d'isotopes. Dans les réacteurs de recherche, les isotopes sont des sous-produits et, à l'heure actuelle, les producteurs sont souvent indépendants des exploitants de réacteurs. De même, les accélérateurs, particulièrement ceux de haute énergie, sont consacrés à la recherche scientifique, la production d'isotopes n'étant qu'une activité secondaire sur laquelle il est difficile de se procurer des informations approfondies.

Les organismes publics possèdent et exploitent pour ainsi dire tous les réacteurs de recherche, les grands accélérateurs et les installations de séparation chimique utilisées pour la production d'isotopes ainsi que des installations employant les isotopes à des fins médicales et scientifiques diverses. Les gouvernements financent les infrastructures requises pour la production et les usages bénéfiques des isotopes dans ces installations et assurent la formation du personnel spécialisé dont on a besoin dans ce domaine. Un certain nombre de cyclotrons de taille moyenne qui produisent les principaux isotopes pour les applications médicales appartiennent à des entreprises privées qui les exploitent pour leur seul usage. Dans ces installations, le rôle des gouvernements se borne à assurer et contrôler le respect de la réglementation de sûreté.

Pour certains isotopes, en particulier à vie courte ou à caractéristique particulière, l'offre et la demande s'ajustent au niveau régional. Les isotopes à vie très courte, comme ceux employés pour la tomographie à émission de positons doivent être produits sur le site même où ils sont utilisés. Pour

d'autres, en revanche, qui peuvent être transportés sur de longues distances et ne peuvent être produits que dans des installations hautement spécialisées, l'approvisionnement ne peut être assuré qu'au niveau mondial. Dans la plupart des pays, les besoins nationaux sont en partie satisfaits par des importations. Certains isotopes sont fournis par quelques producteurs à un certain nombre d'utilisateurs répartis dans le monde entier ; de surcroît, de nombreux producteurs d'isotopes ont besoin des services d'irradiation de cibles fournis par des réacteurs exploités dans les pays étrangers.

À l'heure actuelle, la plupart des installations de production d'isotopes sont exploitées dans les pays Membres de l'OCDE qui en sont aussi les principaux utilisateurs. La demande croît dans les pays non membres de l'OCDE où elle risque de croître plus rapidement que leurs moyens de production. Pour faire face à la demande d'isotopes, des échanges sont indispensables, en particulier entre les pays Membres et non membres de l'OCDE ; c'est pourquoi, il est important de disposer d'informations complètes sur les moyens de production existants et prévus dans le monde. Comme il est nécessaire de transporter des cibles irradiées et des isotopes entre les pays, une harmonisation internationale de la réglementation des autorisations ainsi que des contrôles de la production, des transports et des usages des isotopes est souhaitable.

La demande d'isotopes évolue, certaines nouvelles applications voyant le jour tandis que d'autres sont progressivement abandonnées. La construction et la mise en service de la plupart des installations de production requièrent plusieurs années, de sorte qu'il est essentiel de suivre les prévisions de la demande et les capacités de production planifiés à l'échelle mondiale pour écarter le risque d'un problème d'approvisionnement dans l'avenir. La demande d'isotopes stables augmente du fait qu'ils sont essentiels pour certaines applications. La production de grandes quantités d'isotopes stables dans des conditions rentables devrait être assurée aussi longtemps que les installations d'enrichissement industriel faisant appel à la technologie de la centrifugation gazeuse continueront d'être exploitées. Il est, toutefois, nécessaire de continuer de mettre au point de nouvelles techniques ou installations de séparation des isotopes stables ne pouvant être obtenus par centrifugation.

Une offre insuffisante des principaux isotopes produits par les réacteurs, comme le molybdène-99 et l'iridium-192 serait dommageable pour les secteurs médicaux et industriels. Bien que leur production soit une activité commerciale, il importe que les gouvernements continuent à s'intéresser au suivi de l'offre de ces importants isotopes. Il est indispensable de promouvoir la recherche fondamentale en médecine, physique et sciences de la vie qui utilise de petites quantités d'isotopes divers. Certains isotopes à usage thérapeutique sont produits par des réacteurs à haut flux neutroniques et/ou par des installations de traitement spécial dont le nombre dans le monde à l'heure actuelle est très limité. Les gouvernements, par leurs politiques, sont les principaux artisans du maintien de moyens suffisants pour la production des isotopes employés dans ces domaines.

Compte tenu du grand intérêt des isotopes pour la médecine, l'industrie et la recherche scientifique, les gouvernements devraient réfléchir à des mesures permettant d'assurer une offre répondant aux demandes actuelle et prévisible. Des organisations internationales, comme l'AEN, peuvent aider les gouvernements en collectant des données pertinentes sur la demande et l'offre d'isotopes et en réalisant des analyses de tendance dans ce secteur.

Les politiques des pouvoirs publics dans le domaine de production et des usages des isotopes seront probablement révisées dans le cadre de la déréglementation économique et de la privatisation des secteurs industriels qui, jusqu'ici, étaient sous contrôle de l'État. Il serait peut-être opportun, dans ce contexte, d'étudier si l'évolution des politiques risque d'avoir un impact sur l'offre et la compétitivité des isotopes et, de ce fait, la poursuite du développement de nouvelles applications

des isotopes. Dans certains domaines et les secteurs où la demande régulière et relativement importante justifie le maintien d'installations dédiées par exemple à la production d'isotopes médicaux, les mécanismes du marché sont déjà en place et se sont révélés efficaces. Dans de nombreux autres cas, cependant, les installations de production d'isotopes sont en partie financées par les pouvoirs publics dans le cadre des politiques générales de développement scientifique et social. L'application du principe de récupération complète des coûts à des installations où les isotopes sont des sous-produits risque de mettre en péril le développement d'un certain nombre d'applications bénéfiques des isotopes en particulier en science et en médecine, ce qui pourrait compromettre la contribution de la technologie unique des isotopes aux progrès de l'humanité.

## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	3
SYNTHÈSE.....	5
1. INTRODUCTION.....	11
1.1 Contexte .....	11
1.2 Objectifs et champ d’investigation .....	11
1.3 Méthode de travail .....	12
2. APPLICATIONS DES ISOTOPES .....	13
2.1 Médecine et recherche biologique .....	13
2.1.1 Imagerie nucléaire .....	13
2.1.1.1 Imagerie gamma.....	13
2.1.1.2 Imagerie par émission de positons : tomographie par émission de positons (TEP) .....	14
2.1.1.3 Mesure de la densité osseuse .....	15
2.1.2 Dosages radioimmunologiques .....	15
2.1.3 Radiothérapie à l’aide de radiopharmaceutiques .....	15
2.1.4 Radiothérapie avec des sources scellées .....	16
2.1.4.1 Télécobaltothérapie .....	16
2.1.4.2 Brachythérapie .....	16
2.1.5 Irradiation du sang pour transfusion.....	16
2.1.6 Radiothérapie endovasculaire.....	17
2.1.7 Isotopes stables .....	17
2.2 Secteurs industriels .....	18
2.2.1 Instrumentation nucléonique .....	19
2.2.1.1 Systèmes de contrôle en ligne.....	19
2.2.1.2 Matériel de laboratoire ou équipements portatifs .....	20
2.2.1.3 Les détecteurs de fumées .....	20
2.2.2 Irradiation et traitement par les rayonnements .....	21
2.2.3 Traceurs radioactifs .....	22
2.2.4 Contrôle non destructif .....	22
2.2.5 Autres applications industrielles des isotopes radioactifs .....	23
2.2.6 Isotopes stables .....	23
2.3 Applications scientifiques.....	24
2.3.1 Recherche biomédicale.....	24
2.3.2 Recherche sur les matériaux .....	26

3.	PRODUCTION D'ISOTOPES .....	27
3.1	Réacteurs.....	28
3.1.1	Réacteurs de recherche .....	29
3.1.2	Centrales nucléaires.....	31
3.2	Accélérateurs .....	31
3.2.1	Accélérateurs dédiés.....	31
3.2.1.1	Cyclotrons produisant des isotopes pour les applications médicales .....	31
3.2.1.2	Cyclotrons utilisés pour la tomographie par émission de positons (TEP) .....	32
3.2.2	Accélérateurs polyvalents.....	33
3.2.2.1	Les accélérateurs de haute énergie.....	33
3.2.2.2	Accélérateurs d'énergie moyenne.....	33
3.3	Séparation des radio-isotopes .....	34
3.3.1	Séparation des isotopes à partir des produits de fission .....	34
3.3.2	Séparation des transuraniens et des émetteurs alpha.....	34
3.4	Production d'isotopes stables .....	35
3.4.1	Isotopes stables lourds.....	35
3.4.2	Isotopes stables légers .....	35
4.	ÉVOLUTION DES APPLICATIONS ET DE LA PRODUCTION DES ISOTOPES.....	37
4.1	Évolution de l'utilisation des isotopes .....	37
4.2	Évolution de la production d'isotopes .....	37
5.	ENSEIGNEMENTS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	39
5.1	Enseignements .....	39
5.1.1	Applications des isotopes .....	39
5.1.2	Production d'isotopes .....	39
5.1.3	Rôle des gouvernements.....	40
5.1.4	Rôle des échanges internationaux .....	40
5.1.5	Coûts et prix .....	41
5.2	Conclusions.....	41
5.3	Recommandations.....	42
Annexe 1	Bibliographie .....	45
Annexe 2	Collaborateurs.....	47
Annexe 3	Principaux radio-isotopes produits par des réacteurs et accélérateurs .....	49
Annexe 4	Production d'isotopes dans les pays de l'OCDE.....	51
Annexe 5	Pays et régions .....	53
Annexe 6	Distribution géographique des réacteurs des recherche produisant des isotopes .....	55
Annexe 7	Distribution géographique détaillé des accélérateurs produisant des isotopes .....	59



## **1. INTRODUCTION**

### **1.1 Contexte**

Ce rapport est l'aboutissement d'une étude réalisée par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) en collaboration avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette étude a été approuvée par le Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible dans le cadre du programme de travail de 1997-1998 de l'AEN. Le Comité a estimé qu'il était justifié que l'AEN entreprenne une analyse de la production et des usages bénéfiques des isotopes compte tenu de l'importance que ce sujet revêtait pour un grand nombre, voire l'ensemble des pays Membres de l'AEN ainsi que pour les États membres de l'AIEA et compte tenu, également, du rôle que pourraient jouer les gouvernements pour préserver l'approvisionnement en isotopes indispensables pour un certain nombre d'usages bénéfiques. À cet égard, il convient de noter que si les isotopes sont produits pour une large part dans un nombre relativement restreint d'installations, leurs applications sont extrêmement nombreuses et ne cessent de se multiplier avec l'apparition de nouvelles utilisations.

### **1.2 Objectifs et champ d'investigation**

L'étude a pour principal objectif de fournir aux pays Membres une analyse approfondie et actuelle des moyens de production et des usages des isotopes dans le monde et d'analyser l'évolution de la demande et de l'offre afin d'en tirer des enseignements et des conclusions utiles aux pouvoirs publics.

L'étude a essentiellement porté sur des points qui présentent un intérêt pour les pouvoirs publics, comme le rôle du secteur public dans la production et l'utilisation des isotopes. Les problèmes de réglementation n'ont pas été abordés car ils sont traités en détail dans un certain nombre de publications de l'AIEA, de l'ISO et de la CIPR. De même, la production des isotopes employés pour fabriquer le combustible des centrales nucléaires n'est pas non plus abordée dans cette étude.

Le rapport comprend une enquête sur les principales utilisations des isotopes dans différents secteurs de l'économie et des données sur les moyens de production des isotopes dans le monde par type d'installation et par région. Bien que des efforts aient été faits pour obtenir des informations complètes et récentes pour le monde entier, les données et les analyses présentées concernent une cinquantaine de pays parmi les plus développés dans ce domaine. L'évolution de ce secteur ainsi que l'offre et la demande y sont examinés. Enfin, le rapport présente quelques enseignements, conclusions et recommandations sur les moyens et les manières d'utiliser les organisations internationales (comme l'AIEA et l'AEN) pour développer les échanges internationaux d'information et la coopération, afin que les pouvoirs publics puissent y réfléchir.

### **1.3 Méthode de travail**

L'étude a été réalisée par le Secrétariat de l'AEN en collaboration avec le Secrétariat de l'AIEA avec l'aide d'un consultant de l'AEN. Un questionnaire élaboré par le Secrétariat, avec les conseils des experts d'un certain nombre de pays Membres, a permis de rassembler les informations sur la production d'isotopes. Les réponses au questionnaire ont permis d'inventorier les principales installations de production en service dans le monde. Ces données ont été complétées par des informations tirées de la littérature spécialisée et des renseignements obtenus auprès de spécialistes par le consultant. On trouvera à l'annexe 1 une liste non exhaustive des références bibliographiques. Pour les usages des isotopes, le consultant a rassemblé des informations tirées de publications et recueillies auprès de quelques utilisateurs. Le rapport rédigé par le consultant et le Secrétariat de l'AEN a été révisé et approuvé par un groupe d'experts (voir annexe 2, liste des personnes ayant contribué au rapport).

## 2. APPLICATIONS DES ISOTOPES

Les isotopes sont utilisés dans le monde entier dans de nombreux secteurs, dont la médecine, l'industrie, l'agro-alimentaire et la science. Le chapitre qui suit ne prétend pas dresser une liste exhaustive des applications des isotopes mais plutôt illustrer par un certain nombre d'exemples quelques-unes de leurs principales utilisations dans les différents secteurs. Comme nous l'avons déjà dit plus haut, les isotopes utilisés pour la fabrication de combustibles de réacteurs nucléaires (à savoir, l'uranium et le plutonium) ne sont pas mentionnés dans cette étude.

### 2.1 Médecine et recherche biologique

Les isotopes sont employés en médecine depuis de longues années, et le nombre de leurs applications ne fait que croître à mesure que de nouvelles technologies et procédés sont développés et mis en œuvre. Plus de 30 millions d'actes médicaux comportant l'utilisation d'isotopes sont accomplis chaque année. Les radiopharmaceutiques sont la principale application des radio-isotopes dans le domaine médical. Dans l'imagerie nucléaire utilisée comme outil de diagnostic, les rayons gamma émis par des radio-isotopes sont détectés à l'aide de gamma caméras ou de caméras à positons (caméras TEP). Le marché des produits radiopharmaceutiques se caractérise dans son ensemble par une fusion progressive des entreprises qui en font partie. Les cinq premières entreprises mondiales représentent 80 pour cent environ de la production.

#### 2.1.1 Imagerie nucléaire

##### 2.2.1.1 Imagerie gamma

L'imagerie gamma représente un chiffre d'affaires d'environ 1 milliard de dollars des États-Unis dans le monde. Les principaux radio-isotopes utilisés sont le  $^{99m}\text{Tc}$  (60 pour cent du marché), le  $^{201}\text{Tl}$  (20 pour cent du marché) et dans une moindre mesure l' $^{123}\text{I}$ , le  $^{133}\text{Xe}$ , l' $^{111}\text{In}$  et le  $^{67}\text{Ga}$ . Quelque 8 200 services de médecine nucléaire dans le monde utilisent les gamma caméras pour diagnostiquer les affections de divers organes dont le cœur, les os, les poumons et la thyroïde. Six isotopes couvrent la plupart des besoins. Trois d'entre eux sont produits par des accélérateurs ( $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{123}\text{I}$  et  $^{67}\text{Ga}$ ) et trois autres par des réacteurs ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^{133}\text{Xe}$ ). Les principales applications des gamma caméras sont énumérées dans le tableau 1.

Un total de quelque 17 000 gamma caméras sont actuellement en service. La demande d'isotopes dans ce secteur croît d'environ 5 pour cent par an. Une douzaine d'entreprises privées et quelques organismes publics assurent le gros de la production.

De nouvelles applications voient le jour à l'heure actuelle. Dans le domaine de l'immuno-diagnostic, après une période de transition durant laquelle les problèmes liés à certaines

caractéristiques spécifiques ont été traités, des combinaisons de radio-isotopes (surtout du  $^{99m}\text{Tc}$ ) et d'anticorps monoclonaux ou de peptides (7 produits déjà mis sur le marché et 17 en phase de développement) sont utilisés en oncologie, essentiellement aux États-Unis.

En outre, un certain nombre d'entreprises mettent au point des sondes pour contrôler la disparition des cellules cancéreuses après une intervention chirurgicale. Ces sondes sont employées pour contrôler les marqueurs isotopiques liés à ces anticorps spécifiques.

Tableau 1. **Isotopes utilisés en diagnostic**

Organes	Isotopes utilisés	Maladies recherchées
Poumons	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{133}\text{Xe}$ , $^{81}\text{Kr}$	Embolies, affections respiratoires
Os	$^{99m}\text{Tc}$	Tumeurs, infections
Thyroïde	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{123}\text{I}$	Hyper/hypo-thyroïdie
Rein	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{131}\text{I}$	Calculs rénaux
Cerveau	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{133}\text{Xe}$	Embolies, circulation, tumeurs
Foie, pancréas	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{51}\text{Cr}$	Cirrhose, nécrose
Abdomen	$^{67}\text{Ga}$ , $^{99m}\text{Tc}$	Tumeurs
Sang	$^{111}\text{In}$ , $^{99m}\text{Tc}$	Leucocytes
Cœur	$^{201}\text{Tl}$ , $^{99m}\text{Tc}$	Infarctus du myocarde
Tous	$^{99m}\text{Tc}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{111}\text{In}$	

L'adjonction de sources gamma scellées dont les pics d'énergie sont éloignés de ceux des radiopharmaceutiques permet de compenser l'atténuation du signal dans le corps humain. Depuis 1995, la Food and Drug Administration (FDA) aux États-Unis et les autorités réglementaires dans quelques autres pays ont autorisé des systèmes comportant une ou deux de ces sources dans les gamma caméras. Les radio-isotopes utilisés sont le  $^{153}\text{Gd}$ , le  $^{57}\text{Co}$  et l' $^{241}\text{Am}$ .

Les services de médecine nucléaire utilisent aussi d'autres radio-isotopes, dont le  $^{57}\text{Co}$ , pour l'étalonnage des caméras ainsi que le  $^{57}\text{Co}$ , le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{133}\text{Ba}$  comme sources habituelles pour les activimètres et les autres instruments (stylos marqueurs, règles rigides ou souples de radioactivité).

### 2.1.1.2 Imagerie par émission de positons : tomographie par émission de positons (TEP)

Les principaux radio-isotopes utilisés sont le  $^{18}\text{F}$  (90 pour cent du marché) et dans une moindre mesure, le  $^{11}\text{C}$ , le  $^{13}\text{N}$  et le  $^{15}\text{O}$ . Il existe environ 150 centres de TEP dans le monde qui utilisent au total 200 caméras à positons. Le chiffre d'affaires annuel de ce secteur, soit quelque 75 millions de \$US, croît rapidement d'une quinzaine de pour cent par an. Approximativement 70 pour cent de ces sites produisent leurs propres radio-isotopes. Trente pour cent seulement des centres de TEP font venir leurs radio-isotopes d'autres sites : trois en Allemagne (les centres nucléaires), dix aux États-Unis et tous ceux équipés de cyclotrons polyvalents.

Les caméras TEP emploient d'autres isotopes, dont le  $^{68}\text{Ga}$ , comme source d'étalonnage, et, de même que les gamma caméras, du  $^{57}\text{Co}$ , du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{133}\text{Ba}$  pour étalonner les activimètres. En outre, les systèmes utilisant des sources de  $^{68}\text{Ge}$ - $^{68}\text{Ga}$  peuvent être adjoints aux caméras TEP pour corriger l'atténuation du signal.

### 2.1.1.3 *Mesure de la densité osseuse*

On utilise dans les centres de radiologie des appareils pour mesurer la densité osseuse. Un total de quelque 500 unités employant des sources d'  $^{125}\text{I}$ , de  $^{153}\text{Gd}$  ou  $^{241}\text{Am}$  sont en service. Toutefois, la demande diminue car les dispositifs à rayons X ont tendance à remplacer les systèmes à isotopes et seules les machines actuellement en service sont encore utilisées. Les sources sont produites par trois entreprises privées dont deux sociétés européennes.

### 2.1.2 *Dosages radioimmunologiques*

Les dosages radioimmunologiques sont des méthodes de diagnostic in vitro faisant intervenir cinq technologies : la microbiologie, l'hématologie, la biochimie, la biologie moléculaire et l'immunologie. Dans cette dernière catégorie, la très grande spécificité des réactifs d'immuno-analyse est obtenue grâce à l'utilisation d'immunoprotéines, appelées anticorps. La forte sensibilité de ces produits provient de la possibilité de mesurer de très basses concentrations de marqueurs radioactifs et de l'instrumentation de pointe employée pour mesurer la présence de ces marqueurs. Les techniques radioimmunologiques emploient les immunoprotéines avec des marqueurs radioisotopiques comme l'  $^{125}\text{I}$ , le  $^{57}\text{Co}$ , le tritium ( $^3\text{H}$ ) et le  $^{59}\text{Fe}$  au Japon.

Les dosages radioimmunologiques sont essentiellement utilisés dans les laboratoires d'analyses médicales, surtout pour les marqueurs de tumeurs ou les hormones. Pour cette application qui représente un chiffre d'affaires annuel de quelque 85 millions de \$US, les isotopes sont progressivement remplacés par d'autres technologies comme les méthodes faisant appel à la luminescence, la fluorescence ou aux enzymes. Dans ce domaine, le principal radio-isotope est l'  $^{125}\text{I}$  (qui sert aussi de sources d'étalonnage). L'  $^3\text{H}$  (stéroïdes) et le  $^{57}\text{Co}$  (facteurs de croissance) sont également employés dans une moindre mesure. Ce marché est constitué d'une centaine d'entreprises privées.

Le  $^{14}\text{C}$  est utilisé pour marquer l'urée afin de détecter l'hélicobacter pylori qui est responsable des ulcères gastriques. Cette technique est concurrencée par le marquage à l'isotope stable  $^{13}\text{C}$ . Ce type de produit est actuellement mis au point par une société américaine. Les technologies non radioactives sont de gros concurrents dans ce secteur.

### 2.1.3 *Radiothérapie à l'aide de radiopharmaceutiques*

Les centres de médecine nucléaire utilisent la radiothérapie essentiellement pour traiter l'hyperthyroïdie, la synovite et les cancers. Dans ce domaine, les radio-isotopes employés sont l'  $^{131}\text{I}$  (représentant 30 pour cent du marché) pour traiter l'hyperthyroïdie, le  $^{32}\text{P}$ , le  $^{186}\text{Re}$  et l'  $^{169}\text{Er}$ . La demande croît à un rythme prévu de 10 pour cent par an dans ce secteur contrôlé par une dizaine d'entreprises.

L'utilisation de  $^{89}\text{Sr}$ , de  $^{186}\text{Re}$  et de  $^{153}\text{Sm}$  pour le traitement palliatif des cancers est une nouvelle technique qui représente déjà un chiffre d'affaires annuel de quelque 28 millions de \$US. On envisage également d'utiliser le  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ , le  $^{166}\text{Ho}$  et le  $^{188}\text{Re}$ .

Seules un petit nombre de sociétés mettent au point des radiopharmaceutiques pour la radiothérapie, mais plusieurs laboratoires de recherche sont intéressés. Des tests cliniques sont réalisés avec des produits qui associent des radio-isotopes (surtout l'  $^{131}\text{I}$ , le  $^{153}\text{Sm}$ , l'  $^{90}\text{Y}$  et le  $^{213}\text{Bi}$ ) à des anticorps monoclonaux ou des peptides.

## **2.1.4 Radiothérapie avec des sources scellées**

### **2.1.4.1 Télécobaltothérapie**

Cette application représente un chiffre d'affaires annuel (en termes de valeurs des sources de cobalt) d'environ 35 millions de \$US, mais la demande diminue car le  $^{60}\text{Co}$  est remplacé par des accélérateurs d'électrons. Quelque 1 500 unités utilisant des sources de  $^{60}\text{Co}$  fonctionnent dans le monde dans 1 300 centres de radiothérapie environ pratiquant la télécobaltothérapie pour détruire les cellules cancéreuses. Quelque 70 nouvelles machines sont installées chaque année, notamment pour remplacer des unités ayant été arrêtées. Près de 85 « Gamma-knife » (dispositifs multisources utilisés pour les interventions sur les tumeurs du cerveau) sont en service. Neuf fournisseurs, dont trois sociétés en Amérique du Nord, sont présents sur ce marché.

### **2.1.4.2 Brachythérapie**

La brachythérapie est une technique de radiothérapie médicale consistant à traiter la maladie par irradiation locale réalisée au moyen de sources radioactives scellées. Elle est essentiellement employée dans des centres d'oncologie spécialisés, au nombre de 3 000 dans le monde, qui réalisent au total 50 000 actes chaque année. Le chiffre d'affaires annuel dans ce secteur avoisine 35 millions de \$US, la demande croissant régulièrement à un rythme de 10 pour cent par an.

Les radio-isotopes utilisés ici sont l' $^{192}\text{Ir}$ , le  $^{137}\text{Cs}$ , l' $^{125}\text{I}$ , l' $^{198}\text{Au}$ , le  $^{106}\text{Ru}$  et le  $^{103}\text{Pd}$ . Récemment, l'implantation permanente de sources de brachythérapie a donné des résultats extrêmement satisfaisants dans les premiers stades du traitement du cancer de la prostate avec de l' $^{125}\text{I}$  et du  $^{103}\text{Pd}$ . Aux États-Unis, une société privée a annoncé la construction de 14 cyclotrons dédiés à la production de  $^{103}\text{Pd}$ . En ophtalmologie, le  $^{106}\text{Ru}$  est employé pour les rétinoblastomes. Les techniques de chargement différé utilisant l' $^{192}\text{Ir}$  sont souvent employées pour traiter toute une série de maladies.

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

Un millier d'irradiateurs sont employés dans les laboratoires de transfusion sanguine. L'irradiation à très faible dose de poches de sang est employée pour éviter les éventuelles réactions immunologiques après des transfusions sanguines réalisées sur des patients immunodéprimés après une transplantation d'organe. Elle est effectuée dans des irradiateurs autoprotégés, utilisant de 1 à 3 sources de  $^{137}\text{Cs}$  de quelques dizaines de TBq chacune. Des doses de 25 à 75 Gy sont délivrées à un débit de dose de 5 à 40 Gy par minute. Chaque année, la demande de nouvelles unités avoisine 70. Celles-ci utilisent des sources de  $^{60}\text{Co}$  et de  $^{137}\text{Cs}$ . Il s'agit là d'un marché stable contrôlé par trois grandes sociétés industrielles qui fournissent les machines et les sources directement à leurs clients. Le volume d'activité de ce secteur se situe aux alentours de 25 millions de \$US.

### 2.1.6 Radiothérapie endovasculaire

Cette application est en plein développement. Un nombre croissant de sociétés privées et d'équipes universitaires procèdent à des tests cliniques dans le but de parvenir au développement commercial de stents radioactifs (pièces insérées à l'intérieur des vaisseaux sanguins pour éviter leur resténose) ou de sources pour prévenir les resténoses récidivantes des vaisseaux sanguins après une angioplastie par ballonnet. Les radio-isotopes testés incluent l'<sup>192</sup>Ir, le <sup>32</sup>P et le <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y et le <sup>118</sup>W/<sup>188</sup>Re.

### 2.1.7 Isotopes stables

Les isotopes stables sont utilisés comme sources pour la production de radio-isotopes dans les cyclotrons ou les réacteurs. La demande croît dans ce secteur où les niveaux d'enrichissement doivent être très élevés. Le tableau 2 illustre par quelques exemples l'utilisation des isotopes stables pour la production de radio-isotopes dans les réacteurs ou les accélérateurs.

Tableau 2. Isotopes stables enrichis et radio-isotopes dérivés

Isotopes stables cibles	Radio-isotope produits	
	dans les réacteurs	dans les accélérateurs
Cadmium-112		Indium-111
Carbone-13		Azote-13
Chrome-50	Chrome-51	
Gadolinium-152	Gadolinium-153	
Germanium-76	Arsenic-77	
Lutéti-um-176	Lutéti-um-177	
Nickel-58	Cobalt-58	Cobalt-57
Azote-15		Oxygène-15
Oxygène-18		Fluor-18
Palladium-102	Palladium-103	
Platine-198	Or-199	
Rhénium-185	Rhénium-186	
Samarium-152	Samarium-153	
Strontium-88	Strontium-89	
Thallium-203		Thallium-201
Tungstène-186	Tungstène-188	Rhénium-186
Soufre-33	Phosphore-33	
Xénon-124	Iode-125	Iode-123
Yterbium-168	Yterbium-169	
Zinc-68		Gallium-67, Cuivre-67

On trouvera dans le tableau 3 une liste plus détaillée des isotopes stables utilisés pour les applications médicales et notamment ceux qui sont utilisés directement, comme le bore-10 pour la boroneurothérapie en oncologie, ainsi que l'hélium-3 et le xénon-129 polarisés en imagerie médicale par résonance magnétique.

## 2.2 Secteurs industriels

Les radio-isotopes sont employés dans l'industrie dans un large éventail d'applications diverses faisant appel à de nombreux radionucléides différents, habituellement sous forme de sources de rayonnement scellées. Beaucoup de ces applications n'utilisent que de faibles quantités de radioactivité et correspondent à des créneaux spécialisés. Néanmoins, certains grands segments du marché consomment d'importantes quantités de radioactivité, comme les radiotraitements et la radiographie industrielle. Les isotopes stables sont utilisés en particulier en électronucléaire et dans l'industrie du laser.

Les radio-isotopes sont employés dans l'industrie dans trois grandes catégories de technologies : instrumentation radiométrique ; irradiation et traitement par les rayonnements, et technologies utilisant les traceurs radioactifs.

Entrent dans la première catégorie de technologies les analyses, les mesures et les contrôles faisant appel à des sources radioactives scellées intégrées à l'instrumentation (appelées instrumentation nucléonique) ainsi que le matériel de contrôle non destructif (appareils de gammagraphie). Les sources utilisées peuvent être des émetteurs de particules alpha ou bêta, des neutrons ou des photons gamma ou X. En général, elles ont des activités variant entre une dizaine de MBq et 1 TBq (1 mCi à 100 Ci). Un nombre relativement important de radio-isotopes est employé pour ces techniques. L'instrumentation nucléonique est la principale application dans le monde par le nombre de secteurs industriels concernés, le nombre d'appareils en service et le nombre d'entreprises industrielles fabriquant ces matériels.

On utilise pour les radiotraitements des sources scellées de forte intensité émettant des photons gamma (essentiellement du  $^{60}\text{Co}$  dans les irradiateurs industriels). Généralement, les activités de ces sources avoisinent les 50 PBq (1 MCi). Il s'agit là de la principale application dans le monde en termes d'activité globale des radio-isotopes, mais le nombre d'utilisateurs et de fabricants est limité.

Les traceurs radioactifs (essentiellement des émetteurs bêta ou gamma) sont utilisés sous diverses formes chimiques et physiques comme sources non scellées pour étudier, entre autres, les réactions chimiques, les procédés industriels dans différentes installations industrielles, le transfert de matière en agronomie, hydrologie, construction hydraulique, aménagement du littoral, dans les réservoirs de pétrole et de gaz, et les zones de stockage des déchets. Dans l'ensemble, l'activité de ces traceurs se situe entre 50 Bq et 50 MBq (1 nCi à 1 mCi). Cette catégorie de techniques est très répandue dans un grand nombre de secteurs, dont les laboratoires de recherche et développement d'établissements ou d'industries, nucléaires ou non, mais a un poids économique moindre que les deux autres catégories.

Un problème important qui se pose pour les deux premières catégories est le nombre limité d'entreprises qui proposent tout un éventail de sources scellées, en particulier pour les émetteurs de neutrons ou d'alpha (comme l' $^{241}\text{Am}$  ou le  $^{252}\text{Cf}$ ) ou les produits de fission (comme le  $^{137}\text{Cs}$  ou le  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ). En outre, on peut juger préoccupant que certaines installations de production ne suivent pas les normes de sécurité fondamentales décidées au niveau international.



## 2.2.1 Instrumentation nucléaire

### 2.2.1.1 Systèmes de contrôle en ligne

Les radiométriques ou jauges nucléaires sont intégrés comme capteurs et instrumentation associée dans les systèmes de contrôle des procédés. Les principaux domaines d'application sont les jauges, l'instrumentation analytique en ligne, les instruments de mesure de la pollution et l'instrumentation de sécurité.

#### *Jauges nucléaires*

Les jauges de densité, de niveau et de pesage par gamma absorptiométrie sont employées dans la plupart des industries pour réaliser en ligne des mesures non destructives et sans contact. Elles contiennent des sources scellées de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  ou d' $^{241}\text{Am}$ . Pour ces applications, les isotopes sont en concurrence avec des technologies non ionisantes comme le radar, et leur part de marché tend à baisser.

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 les radio-isotopes suivants :  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  et  $^{137}\text{Cs}$ . La demande dans ce secteur reste stable mais 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, contenant des sources scellées de  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  ou de  $^{14}\text{C}$ , sont essentiellement employées pour pratiquer des mesures sur les circuits imprimés électroniques, les revêtements en métal précieux dans la bijouterie ou les contacts électroniques dans l'industrie électromécanique. La demande est stable dans ce secteur d'activité.

#### *Instrumentation analytique en ligne*

Les analyseurs de soufre sont employés dans les raffineries de pétrole, les centrales et les usines pétrochimiques pour mesurer la teneur en soufre des produits pétroliers. Ils utilisent entre autres les sources d' $^{241}\text{Am}$ . La demande est stable.

L'instrumentation d'analyse en ligne de matières premières minérales, qui est essentiellement basée sur les réactions neutrons-gamma, est utilisée pour divers minerais, le charbon, les minéraux bruts, le ciment en vrac et d'autres produits. Ces applications sont de plus en plus demandées quoique relativement limitées. L'instrumentation en question emploie des sources de  $^{252}\text{Cf}$ . Le nombre de fabricants reste très limité.

Quelques produits chimiques, comme les polluants, les pesticides et les PCB, peuvent être détectés par la chromatographie en phase gazeuse, associée à des détecteurs à capture d'électrons équipés de sources de  $^{63}\text{Ni}$  émettant des bêta.

### *Instruments de mesure de la pollution*

Cette technologie est fondée sur l'absorptiométrie des particules bêta par les particules de poussière recueillies sur des filtres à air et permet de mesurer la teneur en particules de poussière de l'air. Sont utilisés le  $^{14}\text{C}$  et le  $^{147}\text{Pm}$ .

### *Instrumentation de sécurité*

Des appareils, basés en général sur les réactions neutron-gamma et équipés de sources  $^{252}\text{Cf}$ , sont employés pour détecter les explosifs et/ou les stupéfiants essentiellement dans les aéroports, les ports et les gares de chemins de fer. Ces systèmes sont très fiables et la demande des pouvoirs publics augmente de plus en plus. Seules quelques entreprises les produisent. D'autre part, la peinture luminescente à base de tritium est utilisée pour signaler les sorties de secours.

#### *2.2.1.2 Matériel de laboratoire ou équipements portatifs*

Il existe trois principales catégories d'applications dans ce domaine, et la demande dans les secteurs concernés reste stable.

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 les métaux. Les radio-isotopes utilisés ici sont le  $^{55}\text{Fe}$ , le  $^{109}\text{Cd}$ , l' $^{241}\text{Am}$  et le  $^{57}\text{Co}$ .

Les appareils d'humidimétrie et de densimétrie utilisables sur le terrain sont employés en agronomie et en génie civil. Les humidimètres sont aussi utilisés dans la fabrication de l'acier. Ces capteurs, basés sur la diffusion neutronique, parfois couplée à la diffusion gamma, utilisent des sources comme l' $^{241}\text{Am-Be}$  (et parfois le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{252}\text{Cf}$ ).

Les outils de radiocarottage surtout employés par les sociétés de prospection pétrolière sont très importants pour la recherche de pétrole et de gaz. Ils permettent de déterminer des paramètres comme la densité, la porosité, la saturation en eau et en pétrole des roches entourant les forages de prospection. Les sources utilisées sont l' $^{241}\text{Am-Be}$ , le  $^{252}\text{Cf}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ .

#### *2.2.1.3 Les détecteurs de fumées*

Les détecteurs de fumées, sont essentiellement employés dans les lieux publics, comme les hôpitaux, les aéroports, les musées, les salles de conférences, les salles de concert, les cinémas et les avions. Ils sont tellement répandus qu'ils viennent en tête, par leur nombre, des dispositifs à radio-isotopes utilisés dans le monde ; dans chaque pays industrialisé, plusieurs millions de détecteurs de fumée sont installés. La demande est stable. Le principal radio-isotope employé pour cette application est l' $^{241}\text{Am}$ .

### 2.2.2 Irradiation et traitement par les rayonnements

Une des principales applications des radio-isotopes est l'irradiation et le traitement par les rayonnements qui requièrent de hauts niveaux d'activité particulièrement du  $^{60}\text{Co}$ .

Le traitement par les rayonnements comprend trois grands types d'applications :

- la radiostérilisation du matériel médical et les procédés apparentés comme 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  $^{60}\text{Co}$  dédiés et polyvalents ;
- l'ionisation des aliments en grande partie pour améliorer leur qualité hygiénique. À l'heure actuelle, la plupart des aliments ionisés se présentent sous forme sèche (par exemple, épices, légumes secs) ou sous forme surgelée (par exemple, viande, poissons) ; et
- le durcissement des plastiques essentiellement pour la réticulation.

Il y a peu d'autres traitements ou activités s'apparentant au radiotraitement, comme l'irradiation pour l'étude des dommages provoqués par les rayonnements ou l'irradiation des boues. Ils ont moins d'importance sur le plan économique que les autres.

Quelque 180 irradiateurs gamma sont en service dans le monde. Certains d'entre eux sont dédiés à la radio-stérilisation alors que d'autres sont polyvalents, leur activité principale étant la radio-stérilisation et leur activité secondaire l'irradiation des produits alimentaires ou des plastiques.

Bien que l'utilisation du  $^{137}\text{Cs}$  ne soit pas exclue, le  $^{60}\text{Co}$  de faible activité spécifique est le seul radio-isotope employé dans la pratique pour le traitement par les rayonnements. Les activités de ces sources industrielles sont très élevées atteignant quelque 50 PBq (1 MCi) ; ces sources emploient le  $^{60}\text{Co}$  à faible activité spécifique (s'échelonnant entre 1 et 4 TBq/g ou 30 à 100 Ci/g) contrairement aux sources employées en radiothérapie (activité spécifique avoisinant 10 TBq/g ou 300 Ci/g). Les irradiateurs gamma utilisant le  $^{60}\text{Co}$  présentent des avantages pour les applications industrielles car leur fonctionnement est techniquement simple et qu'ils sont capables de traiter de gros volumes unitaires (conditionnement allant jusqu'à la palette).

Ces irradiateurs gamma sont en concurrence avec les accélérateurs d'électrons qui utilisent le faisceau d'électrons directement ou par l'intermédiaire d'une cible de conversion utilisant les rayons X comme rayonnement de freinage. 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, le durcissement de plastiques où de grosses quantités de produits doivent être traitées et qui exige des puissances élevées, est réalisé en majeure partie avec des accélérateurs.

La radio-stérilisation se développe lentement mais régulièrement. Les gros problèmes soulevés par le contrôle du procédé concurrent (stérilisation par l'oxyde d'éthylène) ainsi que la toxicité du gaz utilisée sont autant de raisons d'adopter la radio-stérilisation. Par contre, le coût de celle-ci (investissement et validation) freine son développement.

L'irradiation des produits alimentaires dispose d'un très large marché potentiel couvrant une énorme variété de produits et de grandes quantités. À l'heure actuelle, les quantités traitées chaque

année s'élèvent à près de 0.5 million de tonnes. Une véritable percée de cette technologie pourrait se traduire par une demande dépassant les capacités actuelles d'approvisionnement en  $^{60}\text{Co}$ . L'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'AIEA ont déclaré que ce procédé n'était pas dangereux pour les consommateurs, et un certain nombre de pays ont autorisé son utilisation. Néanmoins, les consommateurs ne semblent pas suivre la réglementation. C'est pourquoi, la demande risque de croître relativement lentement à court terme, et il faudra encore attendre quelques années avant d'assister à un véritable décollage.

Les accélérateurs deviendront de plus en plus compétitifs à mesure qu'ils progresseront sur les plans technique et économique. Par ailleurs, comme les accélérateurs (et les produits ainsi traités) ne font pas intervenir la radioactivité, ils sont mieux acceptés par le public que les isotopes et les produits irradiés.

### **2.2.3 Traceurs radioactifs**

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

Les principaux domaines d'utilisation sont :

- les composants marqués pour étudier le mode et l'efficacité des réactions chimiques (laboratoires de recherche sur la synthèse chimique) ;
- les études de transfert de matière dans les installations industrielles (par exemple, chimie, pétrole et gaz, transformation du minerai, métallurgie, pâtes et papiers, traitement des eaux, traitement des déchets) ; et
- comportement des polluants (en solution ou en suspension) dans les rivières, les estuaires, sur le littoral, dans les décharges, les gisements pétroliers, gazeux ou géothermiques.

Un grand nombre de radio-isotopes sous des formes chimiques ou physiques diverses sont indispensables pour réaliser ces études.

Ces études sont des applications de R-D destinées à contrôler les performances, optimiser les procédés, étalonner les modèles ou tester des installations pilotes, prototypes ou rénovés.

### **2.2.4 Contrôle non destructif**

La gammagraphie est utilisée pour les contrôles non destructifs dans toute une série de domaines dont l'industrie du pétrole et du gaz, la grosse chaudronnerie, la fonderie, le génie civil, l'aéronautique et l'industrie de l'automobile. Plus de 90 pour cent des systèmes utilisent des sources d' $^{192}\text{Ir}$ . Les autres radio-isotopes concernés sont le  $^{60}\text{Co}$ , le  $^{75}\text{Se}$  et l' $^{169}\text{Yb}$ . La demande est stable.

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

Le démarrage des réacteurs nucléaires pour la production d'électricité, la recherche ou la propulsion de navires nécessite l'utilisation de sources émettrices de neutrons comme le  $^{252}\text{Cf}$ . La demande actuelle est conditionnée par le nombre de réacteurs en construction, à savoir plus de 50 tranches. Cinq fournisseurs produisent ces sources.

Les sources d'énergie électrique radio-isotopiques, appelées générateurs thermoélectriques radio-isotopiques ou systèmes d'énergie nucléaire auxiliaire ne sont plus utilisées que pour alimenter en électricité les missions spatiales de longue durée et à grande distance. Leur fonctionnement repose sur la conversion thermoélectrique, et elles utilisent des sources scellées de  $^{238}\text{Pu}$  de haute activité. La Russie et les États-Unis sont les deux seuls pays présents dans ce domaine.

Les sources d'étalonnage sont nécessaires pour l'instrumentation nucléaire et 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 mesures sont utilisés à cette fin. Parmi les différents utilisateurs de ces sources, citons les fabricants d'instruments nucléaires, les services de médecine nucléaire et de radiothérapie des hôpitaux, les centres de recherche nucléaire, les installations du cycle du combustible nucléaire et les exploitants de réacteurs de puissance.

Les industries du papier, du plastique, des bandes magnétiques et de peinture sont les principaux utilisateurs de systèmes faisant appel au  $^{210}\text{Po}$  pour décharger l'électricité statique.

### 2.2.6 *Isotopes stables*

Les applications industrielles des isotopes stables représentent un chiffre d'affaires annuel d'environ 30 millions de dollars des États-Unis par an. En général, elles nécessitent de plus grosses quantités, des niveaux d'enrichissement moindres et sont moins coûteuses que les applications biomédicales. De ce fait, la production par centrifugation gazeuse est souvent la méthode choisie pour produire les isotopes les plus lourds, la distillation étant de préférence réservée aux isotopes plus légers. Parmi les industries utilisatrices d'isotopes stables, citons l'industrie électronucléaire et du laser.

L'industrie nucléaire utilise des isotopes comme le  $^{10}\text{B}$  et le  $^7\text{Li}$  pour l'absorption neutronique et du  $^{64}\text{Zn}$  appauvri comme additif dans l'eau de refroidissement des centrales nucléaires pour réduire les niveaux de rayonnement produits par des isotopes radioactifs non désirés comme le cobalt ou le zinc ( $^{67}\text{Co}$  et  $^{65}\text{Zn}$ ). Il s'agit là d'applications à grande échelle consommant plusieurs tonnes d'isotopes par an.

Dans l'industrie du laser, des isotopes pairs du cadmium sont utilisés pour accroître les performances des lasers à hélium et cadmium. Les quantités nécessaires ici sont de l'ordre de quelques kilogrammes par an.

À l'heure actuelle, d'autres industries étudient aussi plusieurs applications des isotopes stables. Ainsi, ils pourraient servir à accroître la conductivité thermique dans des applications des semi-conducteurs, pour augmenter l'efficacité de l'éclairage, et pour les marqueurs permettant de détecter des explosifs.

## 2.3 Applications scientifiques

### 2.3.1 Recherche biomédicale

La détection chromatographique d'acides nucléiques et de protéines marquées par autoradiographie est de moins en moins utilisée du fait du développement des technologies scintigraphiques. Les radio-isotopes utilisés sont le  $^{32}\text{P}$  (progressivement remplacés par le  $^{33}\text{P}$ ), le  $^{35}\text{S}$  (pour les acides nucléiques), l' $^{125}\text{I}$ , le  $^{14}\text{C}$  et l' $^3\text{H}$  (pour les aminoacides). Une dizaine d'entreprises sont actives dans ce secteur.

L' $^{125}\text{I}$  est utilisé dans les kits de diagnostic en recherche biologique.

Le  $^{14}\text{C}$  et le  $^3\text{H}$  servent en biologie moléculaire et pour les examens toxicologiques dans les industries pharmaceutiques ainsi que pour les expériences de transferts en écologie agrochimique (pesticides).

Les isotopes stables seront de plus en plus employés en recherche biomédicale où la demande croît. On trouvera dans le tableau 3 des exemples d'application des isotopes stables en recherche biomédicale.

Tableau 3. Exemples d'applications des isotopes stables en recherche biomédicale

Isotopes Stables	Applications
Bore-10	<ul style="list-style-type: none"><li>* Marqueur alimentaire pour déterminer le métabolisme du bore</li><li>* Boroneurothérapie pour le traitement du cancer</li></ul>
Calcium-42, 46, 48	<ul style="list-style-type: none"><li>* Métabolisme du calcium ; biodisponibilité et paramètres d'absorption au repos et pendant les vols spatiaux</li><li>* Recherche d'ostéoporose et études du renouvellement osseux</li><li>* Rôle du calcium nutritionnel pendant la grossesse, la croissance et la lactation</li><li>* Transformation osseuse associée à certaines maladies comme le diabète et la mucoviscidose</li></ul>
Carbone-13	<ul style="list-style-type: none"><li>* Recherche sur les réactions fondamentales en chimie organique</li><li>* Études de structures moléculaires</li><li>* Recherche sur les voies métaboliques fondamentales, dont les anomalies congénitales du métabolisme</li><li>* Marquage des produits alimentaires</li><li>* Tests respiratoires non invasifs pour les recherches métaboliques et le diagnostic</li><li>* Oxydation et renouvellement du substrat biologique</li><li>* Recherche des voies métaboliques dans les troubles congénitaux du métabolisme</li><li>* Cinétique des acides aminés</li><li>* Métabolisme des acides gras</li><li>* Effets de la pollution atmosphérique et du changement climatique mondial sur la composition des plantes</li></ul>
Chlore-35, 37	<ul style="list-style-type: none"><li>* Études de toxicité des polluants dans l'environnement</li></ul>

Tableau 3. Exemples d'applications des isotopes stables en recherche biomédicale (suite)

Chrome-53, 54	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études non-invasives du métabolisme du chrome et des besoins de l'homme</li> <li>* Mécanisme d'apparition du diabète de la maturité</li> </ul>
Cuivre-63, 65	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études non-invasives du métabolisme du cuivre</li> <li>* Études des troubles congénitaux et de la cinétique corporelle dans les maladies gastro-intestinales</li> <li>* Étude de son rôle dans la préservation de l'intégrité des tissus comme le myocarde</li> </ul>
Hélium-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études par résonance magnétique in vivo</li> </ul>
Hydrogène-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Recherche sur les vitamines</li> <li>* Mécanismes des réactions chimiques</li> </ul>
Fer-54, 57, 58	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Étude du métabolisme, des dépenses énergétiques</li> <li>* Condition d'une absorption et excrétion efficace du fer</li> <li>* Recherche de méthodes de lutte efficace contre l'anémie</li> <li>* Études des traceurs métaboliques pour déterminer le contrôle génétique du fer</li> </ul>
Krypton-78, 80, 82, 84, 86	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Diagnostic des maladies pulmonaires</li> </ul>
Plomb-204, 206, 207	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Dilution isotopique pour mesurer les niveaux de plomb dans le sang</li> </ul>
Lithium-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Sodium et physiologie rénale</li> <li>* Transport membranaire</li> <li>* Maladies psychiatriques</li> </ul>
Magnésium-25, 26	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études non-invasives des besoins de l'homme, du métabolisme et de l'absorption</li> <li>* Études cinétiques des maladies cardio-vasculaires</li> </ul>
Molybdène-94, 96, 97, 100	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Marquage des produits alimentaires afin de déterminer les besoins nutritionnels de l'homme</li> </ul>
Nickel-58, 60, 61, 64	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mesures non-invasives de sa consommation et de son absorption chez l'homme</li> </ul>
Azote-15	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études à grande échelle de la consommation chez les plantes</li> <li>* Turnover, synthèse et catabolisme des protéines dans l'organisme</li> <li>* Turnover et taille du réservoir d'acides aminés</li> <li>* Métabolisme des protéines tissulaires et individuelles</li> </ul>
Oxygène-17	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études de biologie structurale ; recherche sur la cataracte</li> </ul>
Oxygène-18	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Mesures non-invasives, précises et prolongées des dépenses énergétiques pendant l'activité quotidienne de l'homme</li> <li>* Mesure de la masse corporelle maigre</li> <li>* Recherche sur l'obésité</li> <li>* Études du métabolisme énergétique en zoologie comparative</li> </ul>
Rubidium-85, 87	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Traceur pour le métabolisme du potassium</li> <li>* Recherche sur les maladies mentales</li> </ul>
Sélénium-74, 76, 77, 78, 80, 82	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Biodisponibilité du sélénium comme nutriment essentiel</li> </ul>
Soufre-33, 34	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Recherches génétiques et études moléculaires</li> <li>* Études de séquençage des nucléotides</li> </ul>
Vanadium-51	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Diabète, biodisponibilité et métabolisme</li> <li>* Études du métabolisme cérébral</li> </ul>
Xénon-129	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Imagerie par résonance magnétique nucléaire</li> </ul>
Zinc-64, 67, 68, 70	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Technique non invasive des besoins de l'homme en zinc</li> <li>* Maladies métaboliques, maladies du foie et alcoolisme</li> <li>* Besoins nutritionnels et études de l'utilisation du zinc.</li> </ul>

### 2.3.2 *Recherche sur les matériaux*

On utilise pour la spectroscopie Mössbauer du  $^{57}\text{Co}$ , du  $^{119\text{m}}\text{Sn}$ , du  $^{125\text{m}}\text{Te}$  et du  $^{151}\text{Sm}$ . La demande en est faible et stable et il n'existe que quelques fournisseurs privés à côté des organisations gouvernementales concernées. Le  $^{22}\text{Na}$  est utilisé comme source de positons pour les études de sciences des matériaux.



### 3. PRODUCTION D'ISOTOPES

Le processus de production des radio-isotopes comporte un certain nombre d'étapes aboutissant à un produit prêt pour ses utilisations finales (voir figure 1). En général, l'ensemble du processus n'est pas réalisé dans une seule installation mais dans plusieurs différentes comme le montre la figure 1. Le rapport s'intéresse essentiellement à la partie nucléaire du processus, à savoir la production de l'isotope voulu. C'est pourquoi, nous ne citons ci-dessous dans les installations de production de radio-isotopes que les réacteurs, accélérateurs et installations de séparation. En effet, nous ne décrivons dans le rapport ni les diverses opérations en aval, à savoir la sélection et la préparation du matériau cible, ni les opérations en amont, à savoir le traitement chimique, l'emballage et le contrôle des isotopes, indispensables avant qu'un produit commercial ne soit prêt pour ses utilisations finales.

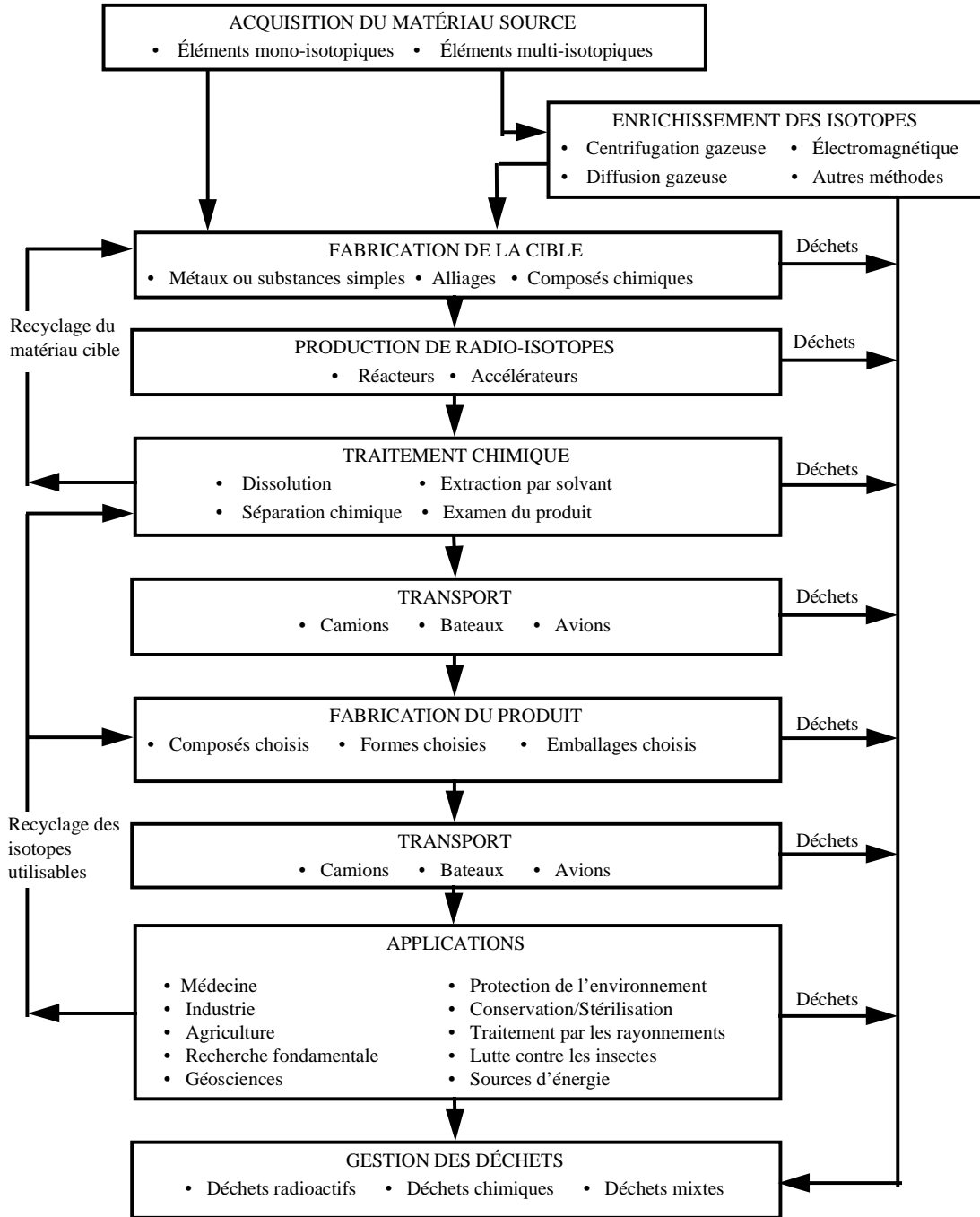
Les installations de production de radio-isotopes les plus communes, à savoir les réacteurs, les accélérateurs et les installations de séparation radio-isotopique sont décrites dans les sections 3.1, 3.2 et 3.3 respectivement ; la production d'isotopes stables est présentée dans la section 3.4.

Le tableau 4 ci-après indique les principales installations de production de radio-isotopes mentionnées dans cette étude et leur répartition géographique. L'annexe 4 donne un aperçu général des installations de production d'isotopes dans les pays Membres de l'OCDE.

Tableau 4. Principales installations de production d'isotopes

Type d'installation	Nombre	
<b>Réacteurs</b>		
Réacteurs de recherche	75	
<i>dont réacteurs à haut flux</i>		6
Réacteurs à neutrons rapides	2	
Centrales nucléaires (pour le <sup>60</sup> Co)	<10	
<b>Accélérateurs</b>	188	
<i>Cyclotrons dédiés aux isotopes médicaux</i>		48
<i>Cyclotrons pour la TEP</i>		130
<i>Accélérateurs polyvalents</i>		10
<b>Installations de séparation</b>	21	
<b>Installations de production d'isotopes stables lourds</b>	9	
<b>Nombres de pays producteurs</b>	50	
<i>Europe occidentale</i>		17
<i>Europe orientale</i>		8
<i>Amérique du Nord</i>		3
<i>Asie et Moyen-Orient</i>		12
<i>Reste du monde</i>		10

Figure 1. **Production, fabrication, applications des radio-isotopes et gestion des déchets**



### 3.1 Réacteurs

Les réacteurs sont généralement utilisés pour produire des noyaux riches en neutrons par irradiation neutronique. La plupart des réacteurs utilisés pour produire des isotopes sont des réacteurs de recherche, bien que certains radio-isotopes soient produits dans des réacteurs de puissance (centrales nucléaires). On trouvera à l'annexe 3 une liste des principaux isotopes produits par les réacteurs.

### 3.1.1 Réacteurs de recherche

Nous ne tenons compte dans cette étude que des réacteurs de recherche qui produisent une quantité importante d'isotopes, à savoir qui, dans la plupart des cas, consacrent au moins 5 pour cent de leur capacité à la production de radio-isotopes. En règle générale, ces réacteurs ont une puissance supérieure à 1 MW. Pour les besoins de cette étude, on ne considère pas que l'analyse par activation est une production d'isotopes. Conformément à cette définition, sur un total de près de 300 réacteurs de recherche en service dans le monde<sup>1</sup>, 75 environ produisent des radio-isotopes. Le tableau 5 donne la répartition géographique<sup>2</sup> des réacteurs de recherche mentionnés dans cette étude, classés en fonction de leur puissance. L'annexe 6 contient la répartition géographique détaillée par pays des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes.

Tableau 5. Répartition géographique des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes

Région (pays)	Nombre de réacteurs			
	< 5 MW	5 à 30 MW	> 30 MW	Total
Europe occidentale	5	6	4	15
Europe orientale et ex-URSS <i>dont Russie</i>	1 0	13 7	5 5	19 12
Amérique du Nord <i>dont États-Unis</i>	2 1	3 2	3 2	8 5
Asie et Moyen-Orient <i>dont Japon</i>	10 1	10 2	4 1	24 4
Reste du monde	4	5	0	9
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	<b>16</b>	<b>75</b>

Le tableau 5 et la figure 2 révèlent qu'à présent les réacteurs de recherche produisant des isotopes sont assez uniformément répartis entre l'Asie, l'Europe de l'Est et de l'Ouest et l'Amérique du Nord bien que les réacteurs d'une puissance inférieure à 5 MW soient plus nombreux en Asie. Néanmoins, l'importance relative de l'Asie augmentera vraisemblablement puisque de nouveaux réacteurs sont régulièrement construits dans cette région, alors qu'en Europe occidentale et en Amérique du Nord, on constate une tendance à arrêter les réacteurs anciens et à ne pas les remplacer.

Les réacteurs à haut flux neutronique (à savoir qui ont un flux thermique supérieur à  $5 \times 10^{14}$  neutrons par  $\text{cm}^2/\text{seconde}$ ) sont indispensables pour produire certains radio-isotopes à haute activité massique dont le  $^{60}\text{Co}$ , le  $^{252}\text{Cf}$ , l' $^{192}\text{Ir}$  et le  $^{188}\text{W}$ . Six de ces réacteurs à haut flux font partie des nombres totaux donnés sur le tableau 5 ; on peut voir leur répartition géographique dans le tableau 6.

1. Source : AIEA, RDS n.° 3, Nuclear Research Reactors in the World, Vienne (1996).

2. On trouvera à l'Annexe 5 une liste des pays appartenant à chaque région.

Figure 2. Répartition géographique des réacteurs de recherche produisant des isotopes (nombre)

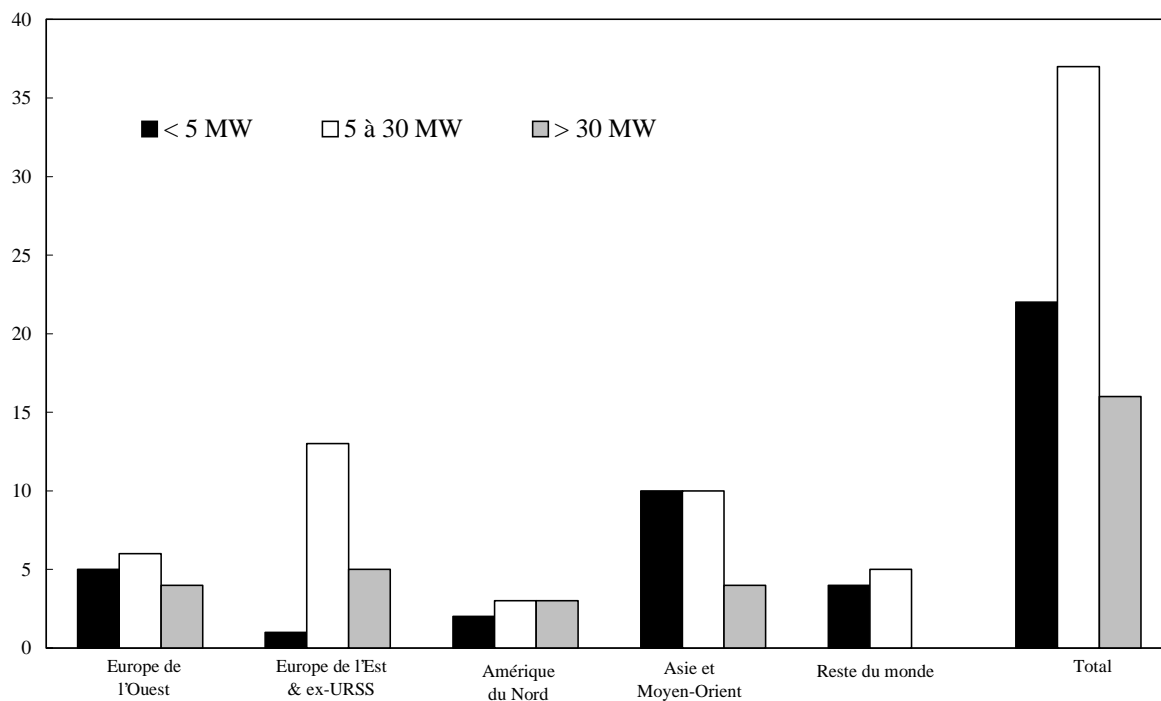


Tableau 6. Répartition géographique des réacteurs à haut flux

Région (pays)	Nombre	Nom (site)
Europe occidentale	1	BR2 (Mol)
Europe orientale (Russie)	2	SM3 (Dimitrovgrad) MIR-M1 (Dimitrovgrad)
Amérique du Nord (États-Unis)	2	ATR (Idaho Falls) HFIR (Oak Ridge)
Asie et Moyen-Orient	1	HFETR (Chengdu)
<b>Total</b>	<b>6</b>	

Indépendamment des réacteurs de recherche figurant dans le tableau ci-dessus, deux réacteurs à neutrons rapides qui sont exploités en Russie peuvent produire du  $^{89}\text{Sr}$ .

Tous les réacteurs de recherche produisant des isotopes appartiennent à des entités publiques qui les exploitent à l'exception d'un en Suède, qui appartient à une entreprise privée. Au Canada, deux réacteurs actuellement en construction qui seront affectés à la production d'isotopes appartiennent à une entreprise privée, mais seront exploités par une entreprise publique.

### 3.1.2 Centrales nucléaires

Les centrales nucléaires sont utilisées pour produire des radio-isotopes dans certains pays comme l'Argentine, le Canada, la Hongrie et la Russie notamment. Le principal isotope qui y est produit est le  $^{60}\text{Co}$ . En outre, au Canada, on produit du tritium à partir de l'eau lourde utilisée comme fluide caloporteur dans les réacteurs à eau lourde.

## 3.2 Accélérateurs

Généralement, les accélérateurs sont utilisés pour obtenir des noyaux pauvres en neutrons par bombardement protonique et produire essentiellement des isotopes émetteurs de positons. Certains accélérateurs, notamment les machines de haute énergie, servent essentiellement à la recherche et ne produisent des isotopes qu'avec la partie excédentaire ou résiduelle du faisceau. D'autres accélérateurs sont réservés (dédiés) à la production d'isotopes. On trouvera à l'Annexe 7 des détails sur les principaux accélérateurs producteurs d'isotopes en service dans le monde, regroupés par catégorie et par pays.

### 3.2.1 Accélérateurs dédiés

Certains accélérateurs (en particulier les cyclotrons) sont construits et exploités exclusivement pour la production de radio-isotopes destinés aux applications médicales. En particulier, certains cyclotrons sont dédiés à la production d'isotopes pour les caméras à positons et exploités en liaison avec les centres de TEP.

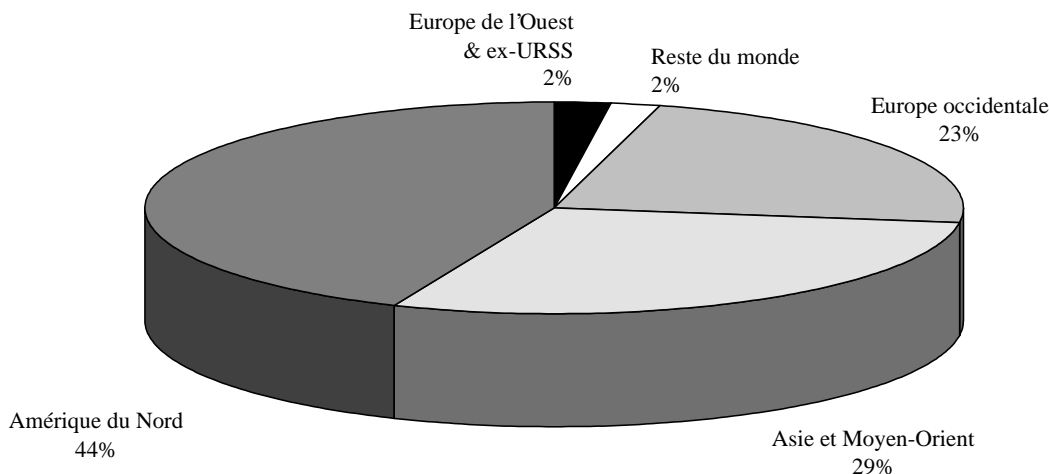
#### 3.2.1.1 Cyclotrons produisant des isotopes pour les applications médicales

Une cinquantaine de cyclotrons sont dédiés à la production de radio-isotopes destinés aux applications médicales. Ces machines fonctionnent essentiellement en Amérique du Nord, en Asie et en Europe occidentale (voir tableau 7 et figure 3). Certains pays ont décidé de construire et d'exploiter ces cyclotrons en raison de l'ampleur de leur demande nationale et/ou parce qu'ils sont éloignés des fournisseurs étrangers des radio-isotopes dont ils ont besoin dans le secteur médical. Le principal isotope produit dans ces cyclotrons est le  $^{201}\text{Tl}$ , auquel viennent s'ajouter l' $^{123}\text{I}$ , le  $^{67}\text{Ga}$ , l' $^{111}\text{In}$ , le  $^{57}\text{Co}$  et le  $^{103}\text{Pd}$ , entre autres.

Tableau 7. Répartition géographique des cyclotrons dédiés à la production d'isotopes médicaux

Région (pays)	Nombre		
	Total	Privé	Public
Europe occidentale	11	10	1
Europe orientale et ex-URSS (Russie)	1	0	1
Amérique du Nord <i>dont États-Unis</i>	21 <i>19</i>	21 <i>19</i>	0 <i>0</i>
Asie et Moyen-Orient <i>dont Japon</i>	14 <i>6</i>	6 <i>6</i>	8 <i>0</i>
Reste du monde	1	0	1
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>37</b>	<b>11</b>

Figure 3. Répartition géographique des cyclotrons dédiés à la production d'isotopes médicaux



Pratiquement, tous les cyclotrons produisant des isotopes pour les applications médicales sont construits par un seul fabricant. Environ 75 pour cent de ces machines sont exploitées par des entreprises privées, cinq d'entre elles représentant la moitié de ce total. Néanmoins, dans neuf pays, les cyclotrons appartiennent à des entreprises publiques.

La demande de cyclotrons classiques est parvenu à un palier. Néanmoins, les machines anciennes doivent être remplacées, de sorte que, selon les estimations, de 1 à 3 cyclotrons classiques sont construits chaque année. La demande de cyclotrons dédiés à la production de  $^{103}\text{Pd}$  augmente.

### 3.2.1.2 Cyclotrons utilisés pour la tomographie par émission de positons (TEP)

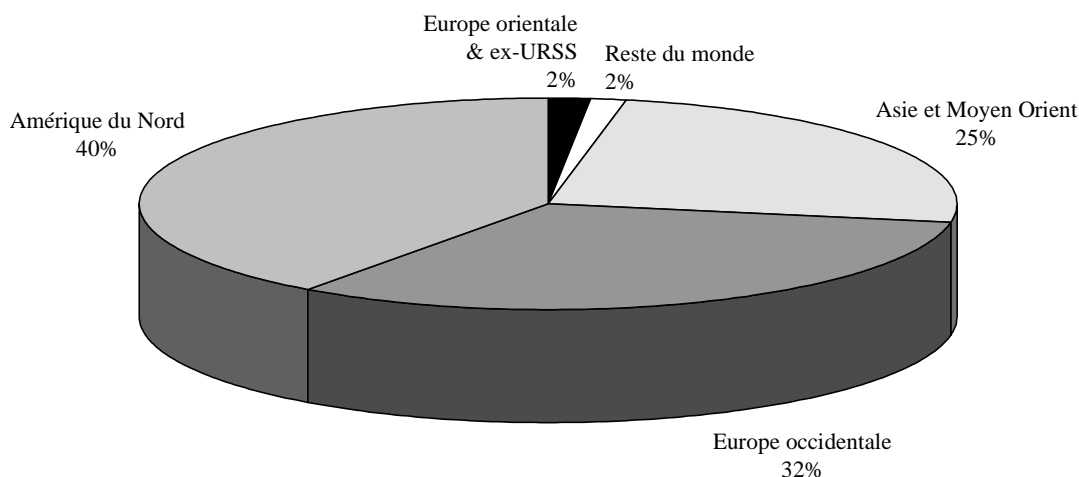
Les cyclotrons produisant des isotopes pour la tomographie par émission de positons sont construits et exploités en liaison avec des centres de TEP. Ils doivent être proches des installations TEP du fait de la courte période radioactive des isotopes utilisés par les caméras à émissions de positons. Les principaux radio-isotopes produits par ces cyclotrons sont ceux indispensables pour faire fonctionner les caméras à positons, à savoir le  $^{11}\text{C}$ , le  $^{13}\text{N}$ , le  $^{15}\text{O}$  et le  $^{18}\text{F}$ .

Quelque 130 machines de ce type sont en service dans le monde ; on peut voir leur répartition géographique sur le tableau 8 et la figure 4.

Tableau 8. Répartition géographique des cyclotrons pour TEP

Région (pays)	Nombre
Europe occidentale	42
Europe orientale et ex-URSS (Russie)	2
Amérique du Nord	52
<i>dont États-Unis</i>	47
Asie et Moyen-Orient	32
<i>dont Japon</i>	25
Reste du monde	2
<b>Total</b>	<b>130</b>

Figure 4. Répartition géographique des cyclotrons pour TEP



De même que les centres de TEP auxquels ils sont associés, les cyclotrons produisant des isotopes pour les caméras à positons appartiennent pour la plupart à des entités publiques qui les exploitent. Néanmoins, les obstacles techniques, financiers et institutionnels à la mise en place de ces machines sont relativement mineurs et, donc, le rôle des gouvernements n'est pas essentiel. On construit de 10 à 15 de ces cyclotrons chaque année dans le monde. Toutefois, la demande de ce type de machines devrait augmenter sensiblement dans les prochaines années.

### 3.2.2 Accélérateurs polyvalents

#### 3.2.2.1 Accélérateurs de haute énergie

Il existe quatre accélérateurs de haute énergie fonctionnant à des énergies variant entre 180 et 800 MeV et essentiellement utilisés pour produire du  $^{67}\text{Cu}$ , du  $^{64}\text{Cu}$  et du  $^{82}\text{Sr}$  car ils constituent le moyen le plus efficace de produire ces isotopes. Deux de ces machines sont en service aux États-Unis, une au Canada et une autre en Suisse. On trouvera à l'annexe 3 une liste des principaux isotopes produits par des accélérateurs de haute énergie.

#### 3.2.2.2 Accélérateurs d'énergie moyenne

Un certain nombre de cyclotrons de 25 à 130 MeV produisent des isotopes (se reporter à l'annexe 3 pour en trouver la liste) bien qu'ils soient essentiellement affectés à des activités de recherche. Le tableau 9 donne la répartition géographique de ces cyclotrons. Le cyclotron en service en Afrique du Sud produit essentiellement des isotopes à usage médical.

Tableau 9. Répartition géographique des accélérateurs de moyenne énergie producteurs d'isotopes

Région (pays)	Nombre
Europe de l'Ouest (Allemagne, Belgique, Finlande, Italie, Norvège, Pays-Bas)	6
Europe de l'est et ex-URSS (Russie, Kazakhstan)	2
Asie (Inde)	2
Reste du monde (Afrique du Sud)	1
<b>Total</b>	<b>10</b>

### 3.3 Séparation des radio-isotopes

#### 3.3.1 Séparation des isotopes à partir des produits de fission

Le principal isotope produit par cette méthode est de loin le  $^{99}\text{Mo}$  qui sert à la fabrication des générateurs au  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  utilisés dans 80 pour cent des quelques 30 millions d'interventions de médecine nucléaire réalisées chaque année dans le monde. Etant donné que pour la technologie actuelle, il faut employer du  $^{99}\text{Mo}$  de haute activité massique, la seule technique de production qui peut être employée est la séparation à partir de produits de fission par irradiation de petites cibles d' $^{235}\text{U}$  dans des réacteurs de recherche. Il existe cinq installations en service dans le monde qui produisent du  $^{99}\text{Mo}$  en grande quantité à partir des produits de fission : une en Belgique, une au Canada, une en Indonésie, une aux Pays-Bas et une en Afrique du Sud. Ces installations produisent également d'autres isotopes comme le  $^{133}\text{Xe}$  et l' $^{131}\text{I}$ . Une nouvelle grande installation de production de  $^{99}\text{Mo}$  est actuellement testée aux États-Unis, elle devrait entrer en service à la fin de 1999.

Il existe une douzaine de petites usines de conversion, dont deux en Russie et une en Argentine, une en Australie et une en Norvège, qui produisent des isotopes à partir de produits de fission. En outre, sept installations, notamment des cellules chaudes, produisent du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{85}\text{Kr}$  à partir du combustible usé des centrales nucléaires. Cinq de ces installations sont en service en Russie, l'une en Inde et l'autre aux États-Unis. En outre, la production d' $^{90}\text{Y}$  (dérivé du  $^{90}\text{Sr}$  contenu dans les produits de fission) fait l'objet d'un intérêt croissant aux États-Unis.

Les installations de séparation des isotopes à partir des produits de fission sont détenues et exploitées principalement par des sociétés d'État.

#### 3.3.2 Séparation des transuraniens et des émetteurs alpha

Ces usines produisent un certain nombre de radio-isotopes lourds pour diverses applications. La technologie à cet effet est relativement complexe et les volumes de produits relativement faibles par rapport aux stocks traités. On trouvera dans le tableau 10 la répartition géographique de ces installations.

Tableau 10. Répartition géographique des usines produisant des transuraniens et des émetteurs  $\alpha$

Région (pays)	Nombre	Principaux isotopes produits
Europe de l'Ouest (Allemagne, Royaume-Uni)	2	$^{244}\text{Cm}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{213}\text{Bi}$ , $^{225}\text{Ac}$
Europe de l'est et ex-URSS (Russie)	4	$^{241}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{252}\text{Cf}$
Amérique du Nord (États-Unis)	3	$^{225}\text{Ac}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{249}\text{Bk}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{252}\text{Cf}$
<b>Total</b>	<b>10</b>	

La demande d'isotopes émetteurs alpha, en particulier les systèmes  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{213}\text{Bi}$  et  $^{212}\text{Bi}$ , devrait croître car ils pourraient être employés dans un certain nombre d'applications prometteuses. Leur production n'est pas limitée à l'heure actuelle par la disponibilité de réacteurs de recherche existants, mais par celle des matériaux source indispensables. Dans le cas de l' $^{225}\text{Ac}$ , du  $^{213}\text{Bi}$ , c'est l'offre de  $^{229}\text{Th}$ , dérivé du  $^{233}\text{U}$  ou produit par irradiation du  $^{226}\text{Ra}$ , qui est un facteur limitatif. Pour le système  $^{212}\text{Bi}$ , l'offre du  $^{228}\text{Th}$  parent (dérivé de l' $^{232}\text{U}$ ) conditionne la disponibilité de l'isotope voulu. Des quantités limitées de matériau source existent à l'heure actuelle pour ces deux systèmes, mais il en faudra plus pour assurer la sécurité future d'approvisionnement.



### 3.4 Production d'isotopes stables

#### 3.4.1 Isotopes stables lourds

Il existe à l'heure actuelle deux techniques de production des isotopes stables lourds : le procédé de séparation électromagnétique ancien faisant appel à des spectromètres de masse dédiés, appelés des calutrons, et un procédé plus moderne et plus efficace, la centrifugation gazeuse. Ce dernier procédé ne peut être utilisé que pour des éléments qui forment des composés gazeux adéquats. Ces deux techniques sont très complexes, et les éventuels nouveaux producteurs devront franchir des obstacles importants pour accéder aux marchés.

Le nombre de producteurs d'isotopes stables lourds est très limité comme on peut le voir dans le tableau 11 ; il s'agit de sociétés publiques sauf en ce qui concerne l'usine d'enrichissement des Pays-Bas.

Tableau 11. Répartition géographique des installations de production d'isotopes lourds

Pays	Séparation électromagnétique	Centrifugation gazeuse	Total
États-Unis	1		1
Pays-Bas		1	1
Russie	2	5	7

Les producteurs d'isotopes stables faisant appel au procédé de séparation électromagnétique utilisent des installations relativement anciennes, coûteuses à exploiter, avec le risque de problème de sécurité d'approvisionnement qui y est associé. En revanche, les producteurs ayant recours à la méthode de centrifugation jouissent de 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. En outre, l'importance des producteurs russes sur le marché mondial est une source de préoccupation supplémentaire car les problèmes financiers et organisationnels que connaît ce pays font douter de leur aptitude à assurer un niveau satisfaisant de production.

#### 3.4.2 Isotopes stables légers

Un certain nombre d'isotopes légers (situés en-dessous du sodium dans le tableau de classification périodique) ont de multiples applications en médecine et en recherche. Divers isotopes de l'oxygène, de l'azote, du carbone, entre autres, sont couramment utilisés. On peut faire appel à des technologies diverses pour séparer les isotopes stables. La séparation électromagnétique qui a été employée dans le passé pour un certain nombre de ces éléments est plutôt inefficace et tend à être remplacée par des méthodes plus performantes au nombre desquelles 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 à leur production sont minimes.

Les principaux producteurs d'isotopes stables légers sont des sociétés essentiellement privées des États-Unis, de la Russie et d'Israël.

## **4. ÉVOLUTION DES APPLICATIONS ET DE LA PRODUCTION DES ISOTOPES**

### **4.1 Évolution de l'utilisation des isotopes**

La demande d'isotopes et son évolution varient d'un secteur à l'autre. Dans le domaine médical, l'utilisation des isotopes a plutôt tendance à se développer. La mise au point de nouvelles applications pourrait faire augmenter la demande d'isotopes actuellement utilisés et nécessiter de nouveaux isotopes. L'imagerie nucléaire, en particulier la tomographie par émission de positons, ainsi que la radiothérapie sont les secteurs où la demande devrait enregistrer la croissance la plus forte. Toutefois, la demande future pour les applications médicales dépendra des politiques gouvernementales à l'égard de la sécurité sociale, à savoir de la prise en charge par l'État des dépenses de soins de santé. Dans l'industrie dans son ensemble, la demande d'isotopes reste relativement stable. Pour la conservation des aliments, elle pourrait bien augmenter considérablement si les réglementations nationales permettaient la distribution et la consommation de produits alimentaires irradiés dans un nombre plus grand de pays. La demande pour d'autres applications industrielles restera vraisemblablement stable en raison des restrictions réglementaires et de la concurrence d'autres techniques, comme les rayons X, les ultrasons, le laser et le radar. En ce qui concerne les applications scientifiques, la demande est liée aux programmes de recherche. Ce secteur se caractérise par la diversité et la modification fréquente du type d'isotopes recherchés ainsi que par les faibles volumes nécessaires ; de ce fait, il est difficile de prévoir la demande future. Là encore, la participation du secteur public (des gouvernements) est très importante. La demande d'isotopes stables enrichis pour les applications biomédicales, industrielles et scientifiques croît et pourrait se développer encore pour les applications qui existent déjà ou de nouvelles applications naissantes ou encore inexploitées.

### **4.2 Évolution de la production d'isotopes**

L'évolution de la production d'isotopes diffère en fonction du type d'installation de production et d'une région à l'autre. En particulier, elle n'est pas la même pour les installations dédiées à la production d'isotopes, comme les cyclotrons qui produisent des isotopes pour les applications médicales et pour les installations, comme les réacteurs de recherche, dont la production d'isotopes n'est qu'une activité secondaire. En ce qui concerne les réacteurs de recherche, dans la mesure où ils sont généralement exploités à des fins scientifiques et où les isotopes ne sont qu'une activité connexe, l'évolution dépend principalement des politiques adoptées à l'égard de la recherche nucléaire. Enfin, les tendances observées diffèrent selon la part prise par les gouvernements dans la construction et l'exploitation des diverses installations de production d'isotopes.

Certains radio-isotopes ne peuvent être produits que dans des installations spécifiques qui existent dans un nombre limité de pays dont la production, indispensable pour assurer l'approvisionnement mondial, dépend essentiellement des politiques suivies par ces pays. Il en va ainsi du <sup>252</sup>Cf et du <sup>60</sup>Co à haute activité massique utilisés pour les applications médicales et produits

uniquement dans les réacteurs à haut flux neutronique. En outre, le  $^{67}\text{Cu}$  et le  $^{64}\text{Cu}$  peuvent être obtenus dans certains cyclotrons ou accélérateurs linéaires. Les deux pays producteurs sont les États-Unis et la Russie mais d'autres pays, comme le Canada, la Chine et la Suisse pourraient devenir des fournisseurs aussi. Le programme de production de tritium des États-Unis assure la sécurité d'approvisionnement à court terme en isotopes produits par des accélérateurs linéaires si l'on décide de choisir cette technique. De même, le tritium peut être produit en grandes quantités dans une installation canadienne traitant l'eau lourde utilisée comme caloporteur dans les réacteurs Candu. D'un autre côté, la production du  $^{60}\text{Co}$  à haute activité massique pour les applications médicales pourrait soulever des problèmes car les trois installations de production en service en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord devraient être arrêtées bientôt (dans les trois années à venir).

En ce qui concerne les isotopes riches en neutrons produits dans les réacteurs, l'évolution et les problèmes rencontrés se situent à l'échelle régionale. Certaines régions, comme l'Afrique, utilisent pour la plupart des installations de production dédiées. En Asie, où la demande augmente, de nouveaux réacteurs sont construits et mis en service. Toutefois, ces réacteurs sont des installations polyvalentes de sorte que l'on ne peut en attendre une production massive et permanente. De ce fait, ils ne permettront vraisemblablement de satisfaire que les besoins du pays où ils sont exploités ou au mieux de la région. En Amérique du Nord, même si l'on arrête certains réacteurs anciens, de nouvelles unités sont actuellement construites pour produire du  $^{99}\text{Mo}$ , et un réacteur anciens est en cours de rénovation. Ces unités permettront de faire face à la demande dans l'avenir. En revanche, en Europe de l'Ouest, trois réacteurs (Astra en Autriche, Osiris en France et FRM en Allemagne) doivent être arrêtés dans les dix prochaines années et l'on ne sait pas pour l'instant s'ils seront remplacés. En règle générale, dans les pays de l'OCDE, les nouveaux réacteurs de recherche sont essentiellement destinés aux recherches scientifiques et/ou aux recherches techniques sur les composants et le combustible des futures centrales nucléaires. C'est pourquoi, ils sont mal adaptés à la production d'isotopes. Il est difficile de déterminer l'évolution future dans les pays d'Europe de l'Est et de l'ex-Union soviétique. En Russie, un tiers des réacteurs qui produisent des isotopes seront, dans l'état actuel des choses, vraisemblablement arrêtés d'ici 2005, et il n'est pas sûr que l'on investira dans de nouvelles installations pour produire des isotopes dans la région.

En ce qui concerne les isotopes médicaux produits par les cyclotrons, le volume de la demande nationale est un élément déterminant pour ceux qui investiront dans les installations de production. Cette demande, à son tour, dépend du système de santé en place dans chaque pays (la couverture de la sécurité sociale). Dans de nombreux pays industrialisés où l'imagerie nucléaire est remboursée par l'assurance-maladie, la demande augmente régulièrement et la production augmente dans les mêmes proportions puisque les cyclotrons peuvent être exploités sur une base commerciale par des entreprises privées. Dans d'autres pays, la construction de cyclotrons dépendra essentiellement de la mise en place de programmes de santé couvrant les actes médicaux faisant appel à des radiopharmaceutiques. Dans le domaine de la TEP, la production suit la croissance de la demande qui, elle-même, dépend essentiellement des politiques suivies par les gouvernements dans le domaine de la recherche médicale et de la sécurité sociale. Il faudra réaliser des progrès avant de pouvoir aller au-delà de la recherche actuelle et du niveau du prototype et avant que la tomographie par émission de positons ne devienne une pratique médicale courante.

La production de certains isotopes, comme le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{90}\text{Sr}$ , qui sont obtenus par séparation à partir des produits de fission, soulève des inquiétudes en ce qui concerne l'accès aux matériaux de base, c'est-à-dire aux ateliers de séparation de déchets de haute activité dans les usines de retraitement du combustible usé.

## 5. ENSEIGNEMENTS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Enseignements

Cette étude a permis de mettre en lumière certains problèmes relatifs aux applications et à la production des isotopes. En particulier, les enquêtes et le dépouillement de la littérature spécialisée qui ont été réalisés pour préparer ce rapport ont montré l'absence d'informations complètes, harmonisées et fiables sur tous les aspects des usages bénéfiques des isotopes. En outre, l'étude a révélé que les gouvernements, les politiques nationales et la coopération internationale jouent des rôles primordiaux dans ce domaine. Il en ressort, donc, que les organisations gouvernementales internationales pourraient contribuer à assurer une bonne circulation des informations et un renforcement de la coopération internationale. Des cibles irradiées et des isotopes séparés sont transportés de façon régulière à travers le monde. Les réglementations et les contrôles applicables au transport des matières radioactives peuvent différer d'un pays à l'autre.

#### 5.1.1 *Applications des isotopes*

Il existe un grand nombre d'applications dans divers secteurs d'activité économique. L'enquête réalisée a démontré que les isotopes continuent d'être régulièrement utilisés car ils font partie des meilleures technologies existantes et restent économiquement séduisants dans bien des cas. Bien que les documents consacrés à l'utilisation des isotopes dans différents secteurs soient nombreux, il n'existe aucune étude complète à l'échelle mondiale sur la demande d'isotopes couvrant l'ensemble des usages ; seul le Japon publie une analyse nationale. Il est donc difficile de pouvoir évaluer avec précision l'importance économique globale des usages bénéfiques des isotopes.

Les applications des isotopes ne cessent d'évoluer. Certaines perdent petit à petit du terrain parce que les isotopes sont remplacés par d'autres techniques qui se révèlent plus efficaces et/ou moins coûteuses. D'un autre côté, de nouvelles applications voient le jour à mesure que la science et la technologie progressent. L'évolution varie d'un secteur à l'autre et doit être analysée au cas par cas.

#### 5.1.2 *Production d'isotopes*

Il existe des informations sur les activités des réacteurs de recherche en particulier dans les bases de données et les publications de l'AIEA. Néanmoins, il est difficile d'évaluer leur véritable production d'isotopes dans la mesure où ceux-ci ne sont qu'un sous-produit de leur activité. En outre, le producteur d'isotopes est souvent indépendant de l'exploitant du réacteur et obtient les services qu'il recherche, à savoir l'irradiation de cibles pour la production d'isotopes, auprès de différents réacteurs. C'est pourquoi, alors qu'il a été relativement facile de rassembler des informations sur les réacteurs de recherche produisant des isotopes, il n'est pas aussi évident de chiffrer leur production.

De même, les accélérateurs de haute énergie sont essentiellement utilisés pour la recherche, et leur production d'isotopes n'étant qu'une activité secondaire, il est difficile d'y avoir accès. En revanche, les accélérateurs de faible et moyenne énergie, pour la plupart des cyclotrons, sont affectés exclusivement à la production d'isotopes. Toutefois, comme ils sont exploités à des fins essentiellement commerciales, il est difficile de se procurer des données sur leur production en raison de leur caractère confidentiel.

Des données sont publiées par certains pays chaque année sur la production nationale d'isotopes. Ces publications pourraient servir de cadre de base pour recueillir des données similaires pour l'ensemble du monde en procédant à une enquête internationale et en compilant ensuite les résultats.

### **5.1.3 *Rôle des gouvernements***

L'information analysée dans l'étude fait ressortir le rôle important joué par le secteur public dans la production d'isotopes ainsi que, dans une moindre mesure, dans l'utilisation des isotopes. Dans tous les pays, les gouvernements sont responsables de l'élaboration de la réglementation et des normes applicables à la production, au transport et aux usages des isotopes.

Des entités publiques détiennent et exploitent pour ainsi dire tous les réacteurs de recherche, les gros accélérateurs et les grandes installations de séparation chimique produisant des isotopes ainsi que des installations pour les divers usages des isotopes dans les domaines médicaux et scientifiques. Les gouvernements financent l'infrastructure indispensable à la production efficace et à l'utilisation des isotopes, et généralement assurent la formation du personnel spécialisé indispensable pour ces activités.

Pour la production des principaux isotopes utilisés dans les applications médicales, un certain nombre de cyclotrons de taille moyenne appartiennent à des entreprises privées qui les exploitent pour leur propre usage. Le rôle des gouvernements dans ce cas se borne à vérifier que la réglementation sur la sûreté est respectée.

### **5.1.4 *Rôle des échanges internationaux***

Pour ainsi dire tous les pays sont dépendants des importations du moins pour certains isotopes qu'ils ne produisent pas, bien que la durée de vie et les caractéristiques de certains isotopes en limite le transport. De nombreux producteurs d'isotopes font appel à des services d'irradiation des cibles fournis par des réacteurs exploités dans des pays étrangers. Certains isotopes ne sont produits que par un petit nombre de fournisseurs ayant une vaste clientèle étrangère. C'est pourquoi les échanges internationaux sont essentiels pour assurer un bon approvisionnement, ainsi que l'accès à des informations détaillées sur les capacités de production existantes et prévues.

À l'heure actuelle, la plupart des installations de production d'isotopes sont en service dans les pays de l'OCDE qui sont aussi les principaux utilisateurs. La demande croît dans les pays non membres de l'OCDE dont les capacités de production risquent de ne pas se développer aussi vite que la demande.

### 5.1.5 Coûts et prix

Les installations spécialisées dans la production d'isotopes, comme les cyclotrons produisant des isotopes pour les applications médicales, sont exploitées commercialement, de sorte que leur prix implique une récupération complète des coûts. Pour les réacteurs de recherche et les accélérateurs de haute énergie qui ne sont pas spécialisés dans la production d'isotopes, le prix ne reflète que le surcoût marginal de la production. Dans ce cas, les coûts globaux de l'installation, à savoir notamment les investissements, la sûreté, la maintenance, le combustible, la gestion des déchets et le déclassement, sont à la charge des principaux utilisateurs, à savoir les programmes de recherche.

Étant donné que les conditions économiques sont différentes d'une région à l'autre, les coûts et les prix des isotopes produits avec la même technologie peuvent varier selon le pays où ils sont produits. Les utilisateurs se sont donc approvisionnés de préférence dans certaines régions où les prix étaient bas. Depuis peu, l'Europe de l'Est et la Chine remplacent progressivement l'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest comme fournisseurs d'isotopes utilisés en tant que matières premières car les coûts et les prix y sont peu élevés.

## 5.2 Conclusions

Ce rapport donne un aperçu général de la production et des applications des isotopes dans le monde. Il constitue la première compilation et analyse internationales de données sur ce sujet. Néanmoins, il convient de souligner que les informations qui y sont rassemblées ne sont pas exhaustives et que l'évolution rapide de ce secteur nécessite des mises à jour régulières. Faute de données détaillées actualisées sur la production et les usages des isotopes, on risque d'être confronté à des ruptures d'approvisionnement et à une surcapacité de production pour certains isotopes.

La collecte de données fiables sur la demande d'isotopes dans l'ensemble des secteurs et des pays concernés peut se révéler une tâche difficile. Néanmoins, les dispositifs réglementaires mis en place dans chaque pays pour l'autorisation d'utiliser des isotopes peuvent permettre d'accéder à l'information. En ce qui concerne l'offre, les bases de données existantes sur les réacteurs de recherche et les accélérateurs en service représentent une part importante des informations nécessaires. Il n'en reste pas moins que des données et des évaluations complémentaires sont nécessaires pour avoir une vision d'ensemble complète des capacités de production.

Pour certains isotopes, en particulier ceux à vie courte ou à caractéristiques particulières, l'offre et la demande s'équilibrent au niveau régional. La répartition géographique de la demande et de la capacité de production doivent coïncider pour des isotopes à vie très courte, comme ceux utilisés pour la TEP qui doivent être produits sur le site même où ils sont utilisés. Pour d'autres isotopes, en revanche, qui peuvent être transportés sur de longues distances et qui doivent être produits dans des machines et/ou des installations hautement spécialisées, des installations peu nombreuses situées dans un petit nombre de pays peuvent satisfaire la demande mondiale. Une coopération et des échanges internationaux sont essentiels pour parvenir à une sécurité d'approvisionnement adéquate. Tous les pays font appel, du moins en partie, aux importations pour satisfaire leur demande. En particulier, l'équilibre de l'offre et de la demande à l'échelle nationale requiert des échanges entre les pays Membres de l'OCDE et les pays non membres.

La demande de radio-isotopes évolue du fait de l'apparition de nouvelles applications d'une part et de la disparition progressive de certains usages d'autre part. Les délais d'ajustement de la

capacité de production à la demande sont relativement longs. Il faut en effet compter plusieurs années pour construire et mettre en service la plupart des installations de production (par exemple, en gros trois années pour des cyclotrons dédiés et huit ans pour les réacteurs de recherche). Un suivi des prévisions de la demande et des capacités de production programmées est donc indispensable au niveau mondial pour réduire le risque de problèmes d'approvisionnement dans l'avenir. La demande d'isotopes stables augmente car ils sont indispensables pour certaines applications. Tant que les usines d'enrichissement industrielles faisant appel à la technologie de la centrifugation gazeuse continueront de fonctionner, la production de grandes quantités d'isotopes stables à des prix raisonnables devrait pouvoir être assurée. Néanmoins, la poursuite de la production d'isotopes stables qui ne peuvent être obtenus par la technique de la centrifugation gazeuse et de ceux utilisés pour des applications scientifiques (R-D) peut soulever des problèmes.

L'étude a montré que les usages bénéfiques des isotopes sont importants pour le bien-être économique et social dans le monde. Ses enseignements et conclusions soulignent le rôle important joué par les gouvernements dans ce domaine, ainsi que la nécessité d'un renforcement des échanges d'informations et de la coopération internationale pour garantir la disponibilité de tous les isotopes indispensables aux divers secteurs. Des organisations internationales, comme l'AEN et l'AIEA pourraient aider à renforcer les échanges internationaux d'informations et à intensifier la coopération.

### **5.3 Recommandations**

Compte tenu de l'importance des isotopes pour les applications médicales, industrielles et scientifiques et le rôle bénéfique qu'ils jouent actuellement et qu'ils pourraient jouer dans l'avenir dans le monde entier, il est recommandé que les gouvernements poursuivent ou mettent en place des politiques favorisant une production d'isotopes à la mesure des besoins actuels et futurs prévisibles. Les organisations intergouvernementales, comme l'AEN et l'AIEA, pourraient participer à cette action en rassemblant et compilant dans une base de données les informations pertinentes sur la demande et l'offre d'isotopes et en fournissant des analyses de la situation et des tendances relatives aux divers aspects de l'offre et de la demande.

Étant donné que les usages des isotopes et la répartition géographique de la capacité de production changent, il serait bon d'analyser l'évolution régionale afin d'estimer si l'offre sera suffisante à court, moyen et long termes. En particulier, l'analyse permettrait de déterminer les mesures et actions spécifiques que les gouvernants pourraient envisager d'adopter pour faciliter l'échange international d'isotopes entre les pays Membres et non membres de l'OCDE et optimiser les capacités de production au niveau mondial.

La création, la mise à jour régulière et la diffusion des bases de données sur les usages et la production des isotopes seraient un moyen approprié de rendre l'information largement accessible. C'est pourquoi, il est recommandé d'entreprendre la collecte systématique des données sur la production des isotopes pays par pays, en utilisant un questionnaire annuel. Ce questionnaire, mis au point par des experts du domaine, serait diffusé aux producteurs par des organisations internationales comme l'AEN et l'AIEA. Les résultats seraient réunis dans une publication annuelle et/ou dans une base de données électronique consultable sur Internet. En outre, on pourrait envisager de procéder à un examen régulier des usages des isotopes qui pourrait commencer par l'analyse des fichiers déjà établis par les organes réglementaires chargés de délivrer des autorisations pour différentes applications des isotopes, en se concentrant au début sur quelques pays choisis du fait de leur importance dans ce domaine. Comme ce qui concerne les données sur la production, l'enquête

pourrait être entreprise sous les auspices d'organisations internationales, comme l'AEN et l'AIEA, avec l'aide d'experts nationaux compétents dans ce domaine, et les résultats feraient l'objet de publications régulièrement mises à jour.

Il est recommandé que les gouvernements réfléchissent à des mesures adéquates pour garantir la continuité de l'approvisionnement en isotopes essentiels pour les applications médicales et industrielles, comme le molybdène-99 et l'iridium-192. Bien que la production de ces isotopes soit généralement assurée par le secteur privé, toute pénurie pourrait avoir des conséquences dramatiques méritant l'attention des gouvernements.

Pour obtenir certains isotopes particulièrement utiles pour les soins médicaux, il faut disposer de réacteurs à haut flux neutronique et/ou d'installations spéciales. Il existe des réacteurs en service et en projet. Il est recommandé de maintenir en service ces réacteurs et installations et de planifier leur remplacement à la fin de leur durée de vie.

Les recherches fondamentales en sciences médicales, physiques et de la vie qui sont capitales pour le progrès nécessitent de petites quantités d'isotopes divers. Il est important que ces isotopes soient disponibles dans chaque région afin d'assurer des soins médicaux appropriés.

La demande d'isotopes stables croît, du fait qu'ils sont indispensables pour certaines applications. La production de la plupart des isotopes stables devrait pouvoir être assurée aussi longtemps que les usines d'enrichissement industrielles faisant appel à la technique de la centrifugation gazeuse resteront en service. Il est recommandé que les pays, en particulier ceux de l'OCDE, continuent à mettre au point de nouvelles technologies ou usines de séparation des isotopes stables ne pouvant être obtenus par centrifugation.

Compte tenu de l'importance des échanges internationaux pour assurer l'approvisionnement approprié en isotopes dans le monde, il est recommandé que les gouvernements s'efforcent d'harmoniser les réglementations et les normes de production, de transport et d'utilisation des isotopes afin de faciliter ces échanges.

Les politiques des pouvoirs publics dans le domaine de la production et des usages des isotopes seront vraisemblablement réaménagées dans le contexte de la déréglementation et de la privatisation des secteurs industriels traditionnellement sous contrôle de l'État. Il pourrait être utile d'étudier si ces changements de politique risquent d'avoir une incidence sur la disponibilité et la compétitivité des isotopes et, de ce fait, sur la poursuite du développement de certaines applications des isotopes. Dans quelques domaines et secteurs où la demande est suffisamment régulière et importante pour conserver des installations dédiées, pour produire par exemple certains isotopes médicaux, les mécanismes du marché sont déjà bien en place et se sont révélés efficaces. Dans de nombreux autres cas, en revanche, les installations de production des isotopes sont en partie subventionnées par les pouvoirs publics dans le cadre de politiques scientifiques et de développement social globales. Cela a été indispensable pour mettre l'exceptionnelle technologie des isotopes au service de l'humanité. Même s'il est justifié d'envisager des politiques des prix qui reflètent les coûts marginaux de la production d'isotopes, le principe de la récupération totale des coûts dans les installations produisant des isotopes comme sous-produits pourrait compromettre la mise au point d'un certain nombre d'applications bénéfiques des isotopes en particulier dans les domaines scientifiques et médicaux.



*Annexe I*

**BIBLIOGRAPHIE**

1. US Department of Energy (1994), *National Isotope Strategy*, Prepared by the Isotope Production Program, Washington DC, USA.
2. Management Information Services, Inc. (1994), *Economic and employment benefits of the use of radioactive materials*, Washington DC, USA.
3. *Nuclear Engineering International* (1997), vol. 2, n.° 515, n.° 516, n.° 517.
4. Nuclear Engineering International (1995), *World Nuclear Industry Handbook*.
5. *Nuclear News Buyers Guide* (1998), American Nuclear Society, vol. 41.
6. *Nuclear Physics News International* (1996) – NuPECC, vol. 5, n.° 4, vol. 6, n.° 1 and 4, vol. 7, n.° 1.
7. *Applied Radiation and Isotopes* (1996), vol. 46, n.° 1.
8. Institute of Medicine (1995), *Isotopes for Medicine and the Life Sciences*, National Academy Press, Washington DC, USA.
9. Umezawa, H. (1997), *Radio-isotope Production and Quality Control, Nuclear Technology*, Japan.
10. Umezawa, H. (1997), *The Use of Radio-isotopes and Radiation : Today and Future*, Annals of Nuclear Medicine and Sciences, vol. 10, n.° 2, Taipei Chinois.
11. International Atomic Energy Agency (1998), *Directory of cyclotrons used for radionuclide production in Member States*, IAEA-TECDOC-1007, Vienne, Autriche.
12. Taylor, G.M. (1998), *Henkin : An overview of nuclear medicine in the United States*, Nuclear News, vol. 41, n.° 2, pp. 30-34.

13. Lennox, A. J. (1998), *Medical applications of accelerators*, Nuclear News, vol. 41, n.° 2, pp. 38-41.
14. Hladik III, W. B. (1998), *New radiopharmaceuticals used in medicine*, Nuclear News, vol. 41, n.° 2, p. 44.
15. Ripon, S. (1998), *Neutron therapy at Germany's oldest and newest reactors*, Nuclear News, vol. 41, n. ° 2, pp. 50-52.
16. Sauerwein, W., et al. (1998), *European clinical trials of boron neutron capture therapy for glioblastoma*, Nuclear News, vol. 41, n. ° 2, pp. 54-56.
17. Garnett, H. (1998), *Radiopharmaceutical usage - Asia/Pacific trends*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.
18. Malkoske, G. (1998), *MDS-Nordion - A Canadian radio-isotope success story, science advancing health*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.
19. Banditsing, C. (1998), *Irradiation of food and industrial products*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.

*Annexe 2*

**COLLABORATEURS**

***BELGIQUE***

M. Marcel DEBLATON  
M. Bernard PONSARD

IRE  
CEN/SCK

***CANADA***

Mme Teresa S. BARICH

MDS Nordion

***ÉTATS-UNIS***

M. Jerry A. KLEIN

ORNL

***FRANCE***

M. Jean-Louis BOUTAINE  
M. François BRENIAUX  
M. Jacques LAIZIER

CEA  
CEA/DTA  
CEA/DAMRI

***HONGRIE***

M. József SÁFÁR

Hungarian Atomic Energy Authority

***ITALIE***

M. Geraldo CAPANNESI  
M. Mario PAGANINI FIORATTI

ENEA  
Agenzia Nazionale per la Protezione  
dell’Ambiente

***JAPON***

M. H. UMEZAWA (Président)

Japan Radio-isotope Association

***PAYS-BAS***

M. Hubert RAKHORST

URENCO Nederland BV

***ROYAUME-UNI***

M. Dewi M. LEWIS

Nycomed – Amersham

***AIEA***

M. Ranga M. IYER

AIEA

***OCDE/AEN***

Mme Evelyne BERTEL (Secrétariat)

OCDE/AEN

Annexe 3

**PRINCIPAUX RADIO-ISOTOPES PRODUITS  
PAR DES RÉACTEURS ET ACCÉLÉRATEURS**

<b>Radio-isotopes produits par réacteurs</b>	<b>Radio-isotopes produits par accélérateurs</b>	<b>Radio-isotopes produits par accélérateurs de haute énergie</b>
Molybdène-99	Thallium-201	Strontium-82
Cobalt-60	Iode-123	Magnesium-28
Iridium-192	Gallium-67	Cuivre-67
Phosphore-32	Indium-111	Aluminium-26
Phosphore-33	Rubidium-81	Silicium-32
Xénon-133	Sodium-22	Gadolinium-148
Iode-131	Cobalt-57	Hafnium-172
Iode-125	Palladium-103	Plomb-200
Strontium-89	Fluor-18	
Carbone-14	Carbone-11	
Californium-252	Azote-13	
Soufre-35	Oxygène-15	
Or-198		
Chrome-51		
Rhenium-186		
Thallium-204		
Samarium-153		
Gadolinium-159		
Fer-59		
Cuivre-64		
Hydrogène-3		

Annexe 4

**PRODUCTION D' ISOTOPES DANS LES PAYS DE L'OCDE**

<b>Pays</b>	<b>Réacteurs de recherche</b>	<b>Cyclotrons pour applications médicales</b>	<b>Cyclotrons pour TEP</b>	<b>Autres</b>
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>	<b>8</b>	<b>21</b>	<b>52</b>	
Canada	2	2	5	+ 1 cyclotron
États-Unis	5	19	47	transuranium + 2 accélérateurs linéaires
Mexique	1	0	0	–
<b>PACIFIQUE</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>28</b>	
Australie	1	1	1	–
Japon	4	6	25	–
Corée, République de	1	1	2	–
<b>EUROPE</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>42</b>	
Allemagne	1	1	12	transuranium
Autriche	1	0	0	–
Belgique	1	2	5	+ 1 cyclotron
Danemark	1	0	2	–
Espagne	0	0	2	–
Finlande	0	0	1	+ 2 cyclotrons
France	1	2	3	–
Grèce	1	0	0	–
Hongrie	1	0	0	–
Italie	1	0	0	+ 1 cyclotron
Norvège	1	0	0	+ 1 cyclotron
Pays Bas	2	3	2	+ 1 cyclotron
Portugal	1			–
République tchèque	1	1	0	–
Royaume-Uni	0	2	6	transuranium
Suède	1	0	2	–
Suisse	0	0	2	+ 1 cyclotron
Turquie	1	0	0	–

Annexe 5

**PAYS ET RÉGIONS**

EUROPE OCCIDENTALE

Allemagne	France	Portugal
Autriche	Grèce	République tchèque
Belgique	Hongrie	Royaume-Uni
Danemark	Italie	Suède
Espagne	Norvège	Suisse
Finlande	Pays-Bas	Turquie

EUROPE ORIENTALE ET EX-UNION SOVIÉTIQUE

Bulgarie	Pologne	Slovénie
Kazakhstan	Roumanie	Ukraine
Lettonie	Russie	Yougoslavie
Ouzbekistan		

AMÉRIQUE DU NORD

Canada	États-Unis	Mexique
--------	------------	---------

ASIE ET MOYEN-ORIENT

Arabie Saoudite	Inde	Malaisie
Bangladesh	Indonésie	Pakistan
Chine	Iran	Taipei Chinois
Corée, République de	Israël	Viêt Nam
Corée du Nord	Japon	

RESTE DU MONDE

Algérie	Australie	Chili
Afrique du Sud	Brésil	Zaïre
Argentine		

Annexe 6

**DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DES RÉACTEURS DE RECHERCHE  
PRODUISANT DES ISOTOPES**

**Europe occidentale**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
Allemagne	FRM	Garching	4	
Autriche	ASTRA	Seibersdorf	10	
Belgique	BR 2	Mol	100	<b>X</b>
Danemark	DR-3	Roskilde	10	
France	OSIRIS	Saclay	70	<b>X</b>
Grèce	DEMOKRITOS (GRR-1)	Attiki	5	
Hongrie	BRR	Budapest	10	<b>X</b>
Italie	TRIGA RC-1	Santa Maria di Galeria	1	
Norvège	JEEP II	Kjeller	2	
Pays-Bas	HOR	Delft	2	
	HFR	Petten	45	<b>X</b>
Portugal	RPI	Sacavem	1	
Rép. tchèque	LWR-15 REZ	Rez	10	
Suède	R-2	Nyköping	50	<b>X</b>
Turquie	TR-2 TURKISH REACTOR 2	Istanbul	5	

## Europe orientale & ex-Union soviétique

Pays	Nom du réacteur	Site	Puissance (MW)	Producteurs principaux
Bulgarie	IRT	Sofia	2	
Lettonie	IRT	Riga	5	
Ouzbekistan	WWR-CM	Tashkent	10	
Pologne	MARIA	Swierk	30	<b>X</b>
Roumanie	TRIGA II	Pitesti	14	
Russie	SM-3	Dimitrovgrad	100	<b>X</b>
	MIR/M1	Dimitrovgrad	100	<b>X</b>
	RBT-6	Dimitrovgrad	6	
	RBT-10	Dimitrovgrad	10	
	BOR-60	Dimitrovgrad	60	
	WWR-TS	Obninsk	12	
	AM-2	Obninsk	10	
	BR-10	Obninsk	10	
	WWR-M	Gatchina	18	
	IR-8	Moscou	8	<b>X</b>
	Mayak	> 30	<b>X</b>	
	Mayak	> 30	<b>X</b>	
Ukraine	WWR-M	Kiev	10	
Yougoslavie	RA	Belgrade	6.5	

## Amérique du Nord

Pays	Nom du réacteur	Site	Puissance (MW)	Producteurs principaux
Canada	NRU	Chalk River	135	<b>X</b>
	MNR McMaster University	Hamilton	5	<b>X</b>
États-Unis	ATR	Idaho Falls ID	250	<b>X</b>
	HFBR	Upton NY	30	<b>X</b>
	HFIR	Oak Ridge TN	100	<b>X</b>
	ACRR	Albuquerque NM	2	<b>X</b>
	MURR Univ. of Missouri RR	Columbia MO	10	<b>X</b>
Mexique	TRIGA MARK III	Salazar	1	



## Asie & Moyen-Orient

Pays	Nom du réacteur	Site	Puissance (MW)	Producteurs principaux
Bangladesh	TRIGA MARK II	Dhaka	3	
Chine	HWRR-II	Pékin	15	X
	HFETR	Chengdu	125	X
	SPR IAE	Beijing	3.5	
	SPRR-300	Chengdu	3.7	
	MJTR	Chengdu	5	
Corée, Rép. de	HANARO	Taejeon	30	X
Corée du Nord	IRT- DPRK	Pyongyang	5	
Inde	APSARA	Trombay	1	
	CIRUS	Trombay	40	
	DRHUVA	Trombay	100	
Indonésie	TRIGA II	Bandung	1	
	GA SIWABESSY MPR	Serpong	30	X
Iran	TRR	Teheran	5	
Israël	IRR-1	Yavne	5	
Japon	KUR	Osaka	5	
	JRR-3M	Ibaraki-ken	20	X
	JRR-4	Ibaraki-ken	3.5	X
	JMTR	Ibaraki-Ken	50	X
Malaisie	TRIGA PUSPATI (RTP)	Kajang	1	
Pakistan	PARR-1	Islamabad	9	
Philippines	PRR-1	Diliman	3	
Taipei Chinois	THOR	Hsinchu	1	
Thaïlande	TRR-1/M1	Bangkok	2	

## Reste du monde

Pays	Nom du réacteur	Site	Puissance (MW)	Producteurs principaux
Algérie	ES-SALAM	W. Djelfa	15	
Afrique du Sud	SAFARI-1	Pelindaba	20	X
Argentine	RA-3	Buenos Aires	2.8	X
Australie	HIFAR	Menai	10	X
Brésil	IEA-R1	Sao Paulo	2	
Chili	RECH-1	Santiago	5	
Égypte	ETRR-1	Le Caire	2	
Pérou	RP-10	Lima	10	
Zaïre	TRICO II	Kinshasa	1	

Annexe 7

**DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DÉTAILLÉ DES ACCÉLÉRATEURS  
PRODUISANT DES ISOTOPES**

**CYCLOTRONS POUR APPLICATIONS MÉDICALES**

**Europe occidentale (Total 11)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Allemagne	FZK	TCC-CP-42	1
Belgique	Nordion Nordion	CGR 930 S CYCLONE 30	2
France	CIS BIO	CGR 40 MeV CYCLONE 30	2
Pays-Bas	Vrije Amsterdam Univ. Mallinckrodt Mallinckrodt	PHILIPS PHILIPS CYCLONE 30	3
République tchèque	NRI	U-120	1
Royaume-Uni	Amersham Amersham	TCC-CP-42 MC-40	2

**Europe orientale & ex-Union soviétique (Total 1)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Russie	Radium Institute	MGC-20	1

### Amérique du Nord (Total 21)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Canada	Nordion Nordion	TCC-CP-42 TR-30	2
États-Unis	Amersham Amersham Amersham Amersham Dupont Dupont Dupont Dupont Mallinckrodt Mallinckrodt Mallinckrodt Theragenics	CGR 70 MC-40 (2 unités) TCC-CS-22 CYCLONE 30 TCC-CS-22 TCC-CS-30 (3 unités) MC-35 CYCLONE 30 MC-40 Cyclone 30 ? (2 unités) CYCLONE 18 (4 unités)	19

### Asie & Moyen-Orient (Total 14)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Arabie Saoudite	King Faisaal	TCC-CS-30	1
Chine	IAE INR IMP	CYCLONE 30 CYCLONE 30 69 MeV	3
Corée, République de	IRI/KAERI	MC-50	1
Indonésie	Batan	TCC-CS-30	1
Iran	NRC	CYCLONE 30	1
Japon	Daiichi Daiichi Nihon Medi-Physics Nihon Medi-Physics	CYCLONE 30 MC-40 CYCLONE 30 (2 unités) TCC-CS-30 (2 unités)	6
Taipei Chinois	INER	TR 30/15	1

### Reste du monde (Total 1)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Australie	NMC/ANSTO	CYCLONE 30	1

CYLOTRONS POUR PET

**Europe occidentale (Total 42)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Allemagne	FZJ  UKRV Bonn University Tübingen Ulm Humbolt Tech. University Munich Heidelberg Cologne Bad Oyenhausen Hannover	PETTRACE JSW BC 1710 CYCLONE 3 RDS-112 PETTRACE CYCLONE 18/9 RDS-112 RDS-112 PC 2048 MC-17 CYCLONE 18/9 MC-17	12
Belgique	Liège University (Ulg) VUB Erasmus (ULB) Gasthuisberg (KUL) UCL	CGR-520 CGR-520 CYCLONE 30 CYCLONE 10/5 CYCLONE 30	5
Danemark	RIGS Hospital Aarhus Hospital	MC-32N PETTRACE	2
Espagne	Clinic Univ. Navarre Madrid	CYCLONE 18/9 ISOTRACE	2
Finlande	Turku University	CYCLONE 3	1
France	SHFJ CERMEP CYCERON	CGR-30 CYPRIS 325 CYPRIS 325	3
Italie	Istituto S. Raffaele Milano Ospedale Castelfranco Veneto Istituto Naz. Tumori Milano CNR-ICP Pisa Istituto Naz. Tumori Napoli	RDS-112 RDS-112 MC-17F PETTRACE MC-17	5
Pays-Bas	University Hospital Groningen Vrije Amsterdam Univ.	MC-17 CYCLONE 18/9	2
Royaume-Uni	Hammersmith Hammersmith St. Thomas Hospital London Institute of Neurology Cambridge University Aberdeen University	CYCLONE 30 MC-40 RDS-112 CYCLONE 3 PETTRACE TCC-CS-30	6
Suède	Karolinska Institute UN. PET CENTRE	MC-17 MC-17	2
Suisse	HCU Geneva USZ Zurich	CYCLONE 18/9 PETTRACE	2

**Europe orientale & ex-Union soviétique (Total 2)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Russie	Human Brain Institute Bakulev Institute	MC-17 DRS-111	2

**Amérique du Nord (Total 52)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Canada	McMaster Clark Institute McGill University McGill University Heart Institute	RDS-112 MC-17 JSW BC 107 CYCLONE 18/9 RDS-111	5
États-Unis			47

**Asie & Moyen-Orient (Total 32)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Chine	Boshnan Zibo Xuan Wu Hospital INR	PETTRACE RDS-111 8 MeV	3
Corée, République de	Samsung Medical Centre Seoul National University	PETTRACE PETTRACE	2
Israël	Hadassah University	CYCLONE 18/9	1
Japon			25
Taipei Chinois	VET's General Hopital	MC-17	1

**Reste du monde (Total 2)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Argentine	CNEA	RDS-112	1
Australie	Austin Hospital	CYCLONE 10/5	1

## ACCÉLÉRATEURS POLYVALENTS

### Europe occidentale (Total 8)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Belgique	UCL Gent University (RUG)	CYCLONE CGR-520	2
Finlande	Jyvaskyla University ABO. AKAD	K-130 MGC-20	2
Hongrie	ATOMKI	MGC-20E	1
Italie	JRC-AMI	MC-40	1
Norvège	Oslo University	MC-35	1
Suisse	PSI	SIN	1

### Europe orientale & ex-Union soviétique (Total 20)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Russie	CYCLOTRON	U-150-1	1
Kazakhstan	INP	KVEIC	1

### Amérique du Nord (Total 3)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Canada	TRIUMF	TRIUMF	1
États-Unis	LANL/DOE BNL/DOE	LAMPF BLIP	2

### Asie & Moyen-Orient (Total 1)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Inde	VECC	SSC	1

### Reste du monde (Total 1)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Afrique du Sud	NAC-FRD	SSC	1

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIMÉ EN FRANCE  
(66 98 17 2 P) ISBN 92-64-26953-3 – n° 50428 1998