



# Usages bénéfiques et production des isotopes

Mise à jour 2000



**Développement de l'énergie nucléaire**

# **Usages bénéfiques et production des isotopes**

**Mise à jour 2000**

## **ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES**

En vertu de l'article 1<sup>er</sup> de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

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

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1<sup>er</sup> février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays Membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 27 pays Membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

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

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

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

#### **© OCDE 2000**

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

## AVANT-PROPOS

Les isotopes radioactifs et stables sont utilisés largement dans de nombreux secteurs d'activité incluant la médecine, l'industrie et la recherche. Pratiquement tous les pays du monde utilisent des isotopes d'une manière ou d'une autre. Dans beaucoup de cas, les isotopes sont irremplaçables, et généralement plus efficaces et moins chers que leurs substituts. La production d'isotopes est moins répandue, mais plus de cinquante pays disposent d'installations pour la production ou la séparation d'isotopes destinés à l'approvisionnement national et parfois aux marchés internationaux.

En dépit de l'importance des isotopes en termes économiques et sociaux, il n'existe généralement pas de données statistiques sur les volumes de production et d'utilisation des isotopes, ni sur les aspects économiques de ce secteur. Cette absence d'informations a conduit l'AEN à inclure le sujet dans son programme de travail. L'étude menée par l'AEN, en coopération avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), vise à recueillir des données sur différents aspects de la production et de l'utilisation des isotopes, et à les analyser afin de mettre en évidence des questions clés et d'en tirer des enseignements et des recommandations à l'attention notamment des organismes gouvernementaux impliqués dans le secteur.

Le rapport présente des données recueillies en 1999, revues et analysées par un groupe d'experts nommés par les pays Membres. Les experts et les Secrétariats de l'AEN et de l'AIEA ont cherché à proposer au lecteur des informations fiables et complètes sur les utilisations et la production d'isotopes dans le monde. Néanmoins, les données et les analyses présentées ne sont pas totalement exhaustives. Les points de vue exprimés dans le rapport sont ceux des experts qui ont contribué à sa rédaction et ne reflètent pas nécessairement ceux des pays concernés. Ce rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.



## NOTE DE SYNTHÈSE

Le présent rapport s'appuie sur une étude entreprise sous la houlette du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et du cycle du combustible (NDC) de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) dans le cadre de son programme de travail de 1999-2000. Cette étude a été réalisée conjointement par l'AEN et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), avec l'assistance d'experts nommés par les pays Membres de l'AEN. Le rapport, qu'il s'agisse du corps du texte ou des annexes, est, pour l'essentiel, une mise à jour de la publication de l'OCDE intitulée *Usages bénéfiques et production des isotopes* qui est parue en 1998. Il présente des statistiques et des analyses des principaux problèmes que pose l'équilibre de l'offre et de la demande d'isotopes.

Cette étude vise à offrir aux pays Membres un panorama complet et à jour des utilisations et de la capacité de production des isotopes dans le monde, à analyser les tendances de l'offre et de la demande et à en tirer des conclusions et recommandations à l'intention des gouvernants intéressés. Bien que le groupe soit conscient de son importance, il a été décidé d'écarter de l'étude la question de la réglementation qui a fait l'objet de plusieurs publications de l'AIEA, de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). La production des isotopes utilisés pour fabriquer les combustibles de centrales nucléaires a été également exclue, car elle fait partie intégrante de l'industrie électronucléaire et est analysée en tant que telle dans de nombreuses études spécifiques. Pour réaliser l'étude, les Secrétariats de l'AEN et de l'AIEA ont recueilli les informations relatives à la production des isotopes. Des données sur leur utilisation, fournies par les membres du groupe d'experts, sont venues compléter ces informations. Ensuite, avec l'aide d'un consultant auprès de l'AEN, le groupe a procédé à la revue et à l'analyse des informations.

Les isotopes ont de multiples applications dans divers secteurs de l'économie, et cela dans presque tous les pays. Voilà plusieurs dizaines d'années que l'on utilise couramment les isotopes en médecine, un secteur où les techniques évoluent en permanence, donnant à leur tour naissance à de nouveaux procédés pour lesquels on a besoin de nouveaux isotopes. Dans l'ensemble, les actes médicaux faisant appel à des isotopes sont toujours plus nombreux et utilisent un éventail toujours plus vaste d'isotopes. Quant aux applications industrielles des isotopes, elles sont très diverses et leur importance relative varie suivant les secteurs. En général, elles occupent des créneaux sur lesquels elles n'ont pas de concurrent ou sont plus efficaces que les autres solutions en lice. Vu la taille de son marché potentiel, l'irradiation des aliments mérite une attention particulière, malgré les obstacles réglementaires qu'il faudra surmonter dans de nombreux pays pour qu'elle puisse être exploitée à grande échelle. Dans la recherche et le développement, les applications multiples des isotopes sont à la base du progrès scientifique, notamment en biotechnologie, médecine, protection de l'environnement et recherche sur les matériaux.

L'étude de 1998, comme celle d'aujourd'hui, montre que l'utilisation des isotopes à des fins bénéfiques reste une pratique courante dans de nombreux secteurs d'activité économique. L'étude actuelle confirme l'absence de sources d'informations exhaustives, à la fois qualitatives et quantitatives et de portée mondiale, sur l'utilisation des isotopes dans les différents secteurs.

Il manque, en particulier, une évaluation fiable du poids économique global des usages bénéfiques des isotopes. Le panorama des applications des isotopes présenté dans ce rapport repose pour l'essentiel sur des données qualitatives. Bien que le groupe d'experts soit conscient de l'intérêt d'une étude quantitative complète des utilisations des isotopes, il s'est avéré que la collecte de données fiables soulevait une série de problèmes à la fois méthodologiques et de fond, liés notamment à la cohérence entre secteurs et pays et à la confidentialité des informations commerciales.

Plus de 60 pays, dont 25 pays Membres de l'OCDE, produisent des isotopes destinés aux marchés intérieurs et/ou internationaux. Les isotopes radioactifs sont produits essentiellement dans des réacteurs de recherche, des accélérateurs et des installations de séparation. Les pays Membres de l'OCDE exploitent aujourd'hui la majorité des installations de production des isotopes en service, à l'exception des réacteurs de recherche. Tandis que pour la majeure partie de ces réacteurs la production d'isotopes est une activité secondaire, les accélérateurs, eux, servent d'ordinaire uniquement à la production des isotopes. Aujourd'hui, les réacteurs de recherche vieillissent, notamment dans les pays de l'OCDE où près de la moitié ont plus de 20 ans. Cependant, des pays comme l'Australie, le Canada et la France ont entrepris, ou envisagent, de construire plusieurs réacteurs. Les accélérateurs qui produisent des isotopes sont en augmentation régulière et, en général, récents.

Les installations de production d'isotopes appartiennent à diverses entités. Les organismes publics possèdent et exploitent la quasi-totalité des réacteurs de recherche, des grands accélérateurs et des installations de séparation chimique utilisées pour la production d'isotopes. Avec ses installations, l'État offre des infrastructures destinées à la production d'isotopes et assure simultanément la formation de la main-d'œuvre qualifiée nécessaire dans ce domaine. On note toutefois une tendance à la privatisation, dont témoigne par exemple la construction, au Canada, de deux réacteurs par le secteur privé. Plusieurs cyclotrons de taille moyenne produisant les principaux isotopes utilisés dans les applications médicales appartiennent à des entreprises privées qui les exploitent à leur usage exclusif. Le rôle des pouvoirs publics se limite, dans ce cas, à assurer et à contrôler le respect de la réglementation sur la sûreté.

S'agissant des utilisations des isotopes, les tendances varient d'un secteur à l'autre, mais, dans l'ensemble, la demande est en hausse pour de nombreux isotopes. Certaines applications nouvelles prennent de l'importance et, avec elles, la demande d'isotopes. Des applications plus avancées font leur apparition, exigeant la production de « nouveaux » isotopes, c'est-à-dire d'isotopes qui, auparavant, n'avaient pas d'application bénéfique notable. Bien que les utilisateurs, en particulier dans la sphère médicale, mais aussi dans bien des secteurs industriels, soient persuadés des bienfaits de l'emploi de ces isotopes, les craintes du public à l'égard de la radioactivité incitent à chercher d'autres solutions. Comme l'analyse des tendances passées le montre, les isotopes ne sont pas la solution préférée dès lors qu'il existe des solutions de rechange. Par conséquent, pour conserver, et *a fortiori* augmenter, leur part de marché, les isotopes doivent être nettement plus efficaces et/ou meilleur marché que leurs concurrents, quelle que soit leur application.

Les tendances de la production d'isotopes varient en fonction du type d'installation et de la région. En particulier, elles diffèrent selon que les installations servent exclusivement à la production d'isotopes, comme les cyclotrons dédiés aux applications médicales, ou qu'elles produisent accessoirement des isotopes, ce qui est le cas de la plupart des réacteurs de recherche. L'augmentation récente des capacités de production dans plusieurs régions révèle l'apparition de producteurs privés pour répondre à une demande croissante et à une menace de pénurie de certains isotopes majeurs comme le <sup>99</sup>Mo. Aujourd'hui, l'approvisionnement des principaux isotopes utilisés en médecine et dans l'industrie ne semble pas poser de problème à court et moyen terme. Pourtant, il importe de prévoir un système de secours qui permette de fournir, dans chaque pays, les utilisateurs de radio-

isotopes critiques à courte période, comme le  $^{99}\text{Mo}$ , quels que soient les problèmes techniques (défaillance d'une installation) ou sociaux (grève) que pourraient rencontrer les producteurs..

La présente étude confirme le rôle majeur de l'État et des organismes publics dans ce domaine. Les politiques nationales, en matière de recherche et développement et de santé, par exemple, restent un catalyseur essentiel de la demande d'isotopes et, bien que dans une moindre mesure, de la production. Cependant, on note une participation accrue des entreprises privées ainsi que l'adoption de modes de gestion plus commerciaux dans les activités liées à la production et aux utilisations des isotopes. Avec la déréglementation et la privatisation de secteurs industriels traditionnellement sous la tutelle de l'État, on devrait assister à une réévaluation des politiques publiques dans le domaine de la production et de l'utilisation des isotopes. Il serait probablement bon d'étudier si ces changements de politique peuvent se répercuter sur la disponibilité et la compétitivité des isotopes et, par conséquent, sur le développement ultérieur de certaines applications de ces isotopes.





## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	3
NOTE DE 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 Applications médicales.....	13
2.1.1 Imagerie diagnostique.....	13
2.1.1.1 Imagerie gamma.....	14
2.1.1.2 Tomographie par émission de positrons (TEP).....	15
2.1.1.3 Mesure de la densité osseuse.....	15
2.1.1.4 Détection des ulcères gastriques.....	16
2.1.2 Dosages radio-immunologiques.....	16
2.1.3 Radiothérapie à l’aide de radiopharmaceutiques.....	16
2.1.3.1 Applications thérapeutiques.....	16
2.1.3.2 Soins palliatifs.....	17
2.1.4 Radiothérapie avec des sources scellées.....	17
2.1.4.1 Télécobaltothérapie.....	17
2.1.4.2 Brachythérapie.....	17
2.1.5 Irradiation du sang pour transfusion.....	18
2.2 Applications industrielles.....	18
2.2.1 Instrumentation radiométrique.....	19
2.2.2 Irradiation et traitement par les rayonnements.....	21
2.2.3 Traceurs radioactifs.....	22
2.2.4 Contrôles non destructifs.....	22
2.2.5 Autres applications industrielles des isotopes radioactifs.....	23
2.3 Applications scientifiques.....	23
2.3.1 Recherches sur les matériaux.....	24
2.3.2 Recherches sur les procédés industriels.....	24
2.3.3 Recherches dans le domaine de la protection de l’environnement.....	24
2.3.4 Recherche médicale.....	25
2.3.5 Biotechnologies.....	25
2.4 Isotopes stables.....	26
2.4.1 Applications médicales.....	26
2.4.2 Applications industrielles.....	28
2.4.3 Applications scientifiques.....	29

3.	PRODUCTION D'ISOTOPES .....	31
3.1	Réacteurs.....	33
3.1.1	Réacteurs de recherche .....	33
3.1.2	Centrales nucléaires.....	36
3.2	Accélérateurs.....	36
3.2.1	Accélérateurs dédiés à la production de radio-isotopes à usage médical .....	36
3.2.1.1	Cyclotrons produisant des isotopes pour des applications médicales (essentiellement la TEMP).....	37
3.2.1.2	Cyclotrons destinés à des applications spéciales.....	38
3.2.1.3	Cyclotrons produisant des isotopes destinés à la TEP .....	38
3.2.2	Accélérateurs non dédiés à la production d'isotopes médicaux .....	39
3.3	Séparation des radio-isotopes.....	40
3.3.1	Séparation des isotopes des produits de fission.....	40
3.3.2	Séparation des transuraniens et des émetteurs alpha .....	40
3.4	Production d'isotopes stables.....	41
3.4.1	Isotopes stables lourds .....	41
3.4.2	Isotopes stables légers .....	42
4.	ÉVOLUTION DES APPLICATIONS ET DE LA PRODUCTION DES ISOTOPES.....	43
4.1	Évolution de l'utilisation des isotopes .....	43
4.2	Évolution de la production d'isotopes .....	45
5.	ENSEIGNEMENTS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	49
5.1	Enseignements .....	49
5.1.1	Applications des isotopes .....	49
5.1.2	Production d'isotopes .....	50
5.1.3	Rôle de l'État.....	50
5.1.4	Rôle des échanges internationaux.....	51
5.1.5	Coûts et prix.....	51
5.2	Conclusions.....	52
5.3	Recommandations.....	53
Annex 1	Bibliographie.....	55
Annex 2	Liste des membres du groupe d'experts.....	57
Annex 3	Principaux radio-isotopes produits par des réacteurs et des accélérateurs.....	59
Annex 4	Pays et régions .....	61
Annex 5	Réacteurs de recherche et accélérateurs produisant des radio-isotopes dans les pays OCDE.....	63
Annex 6	Répartition géographique des réacteurs de recherche produisant des isotopes.....	65
Annex 7	Répartition géographique des accélérateurs produisant des isotopes.....	69
Annex 8	Questionnaires.....	77

# 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 1999-2000 de l'AEN. Ce Comité a jugé utile de procéder, avec l'AIEA, à une mise à jour de la première étude publiée par l'OCDE en 1998 sur les usages bénéfiques et la production des isotopes. L'objectif était d'aller au-delà de la simple actualisation des informations statistiques et de mettre l'accent sur l'analyse des principaux problèmes rencontrés dans ce domaine afin d'en tirer des résultats et conclusions destinés aux organismes publics et à toute autre partie intéressée.

## 1.2 Objectifs et champ d'investigation

Les principaux objectifs de ce rapport sont les suivants :

- proposer aux pays Membres un panorama complet et à jour des usages et moyens de production d'isotopes dans le monde ;
- analyser les tendances de l'offre et de la demande d'isotopes ;
- tirer des enseignements susceptibles d'intéresser les pouvoirs publics et toute autre personne concernée par le sujet.

Cette étude s'appuie sur des données et informations factuelles. Bien que les aspects techniques et statistiques y soient prépondérants, on y trouvera quelques conclusions et enseignements tirés de l'analyse des données et des tendances. L'étude concerne toutes les applications pacifiques des isotopes radioactifs ou stables dans les divers secteurs économiques. Cependant, la production d'isotopes utilisés pour la fabrication du combustible des centrales nucléaires, une activité très spécifique, étroitement liée à l'industrie électronucléaire, et qui a fait l'objet d'analyses approfondies par ailleurs, n'a pas été abordée dans le présent document.

Les aspects commerciaux qui ne relèvent pas de la responsabilité (et ne sont pas inscrits dans les mandats) d'organisations intergouvernementales telles que l'AEN et l'AIEA, ne sont pas traités non plus dans cette étude. En outre, tout ce qui concerne la réglementation, dont la radioprotection et le stockage des déchets, a été exclu du champ de l'analyse car ces sujets ont été abondamment traités dans plusieurs publications de l'AIEA, de l'ISO ou de la CIPR.

Ce rapport contient une étude des principales utilisations des isotopes dans différents secteurs économiques ainsi que des données sur les moyens de production dans le monde par type d'installation et par région. Les données et analyses que l'on trouvera ici correspondent aux

informations dont disposent les membres du Groupe et le Secrétariat. Ces derniers se sont efforcés d'obtenir des informations exhaustives et à jour sur toutes les régions géopolitiques du monde. Cependant, ces données varient par leur fiabilité et leur niveau de détail d'une région à l'autre, voire même d'un pays à l'autre, dans la même région.

Le lecteur trouvera ici une présentation des problèmes que soulève l'évolution de ce secteur ainsi que quelques éléments d'analyse concernant l'équilibre entre l'offre et la demande. Le rapport propose également quelques enseignements, conclusions et recommandations, ainsi qu'une réflexion sur les moyens d'exploiter les possibilités d'organisations internationales, telles que l'AEN et l'AIEA, pour améliorer les échanges d'informations entre pays et régions et favoriser une collaboration internationale plus efficace dans le domaine de la production et de l'utilisation des isotopes.

### **1.3 Méthode de travail**

L'étude a été réalisée par un groupe d'experts des pays Membres de l'AEN. Le Secrétariat de l'AEN, en collaboration avec celui de l'AIEA et assisté d'un consultant auprès de l'AEN, a assuré la coordination des travaux, dont la compilation des informations et l'harmonisation des matériaux préparés par les membres du Groupe.

Les données sur la production de radio-isotopes dans les réacteurs de recherche et sur celles des isotopes stables ont été recueillies à l'aide de questionnaires établis par le Secrétariat sur la conduite du Groupe d'experts. Trois questionnaires, traitant respectivement de la production des radio-isotopes dans les réacteurs de recherche, des installations de traitement des isotopes et de la production d'isotopes stables (voir annexe 9, Questionnaires sur la production d'isotopes) ont été communiqués aux établissements concernés par le Secrétariat de l'AEN, pour les pays Membres de l'OCDE, et par le Secrétariat de l'AIEA, pour les pays non-membres.

Les informations relatives à la production d'isotopes dans les accélérateurs sont pour l'essentiel tirées du précédent rapport de l'AEN ainsi que du document de l'AIEA consacré aux cyclotrons pour la production d'isotopes (TECDOC-1007). Des informations complémentaires ont été obtenues de plusieurs fabricants et opérateurs d'accélérateurs.

Les informations sur les utilisations des isotopes ont été essentiellement fournies par les membres du Groupe et compilées par le Secrétariat. Le Secrétariat, avec l'aide d'un consultant, a regroupé, harmonisé et analysé ces informations. Ces dernières ont été revues et complétées, chaque fois que nécessaire, par le Groupe d'experts. Les résultats ont été examinés et approuvés dans le cadre de la préparation de cette publication. On trouvera à l'annexe 2 la liste des membres du Groupe.

## 2. APPLICATIONS DES ISOTOPES

Les isotopes sont utilisés dans de nombreux secteurs, dont la médecine, l'industrie, l'agriculture, l'agroalimentaire, la recherche et le développement. Le chapitre qui suit ne prétend pas dresser une liste exhaustive des applications des isotopes, mais plutôt illustrer par des exemples, quelques utilisations essentielles des isotopes dans différents secteurs. Les isotopes utilisés pour la fabrication des combustibles des réacteurs nucléaires (l'uranium et le plutonium) ou pour des applications non civiles, ne sont pas traités dans la présente étude.

### 2.1 Applications médicales

Voilà plus de 30 ans que les isotopes sont utilisés couramment en médecine. Ils trouvent, en outre, de nouvelles applications chaque fois que de nouvelles technologies et procédés voient le jour ou sont mis en œuvre. Aujourd'hui, on compte plus de 30 millions d'actes médicaux faisant appel aux isotopes chaque année.

Les radiopharmaceutiques sont la principale application des radio-isotopes dans le domaine médical. Dans l'imagerie nucléaire, utilisée pour diagnostiquer des maladies courantes, comme les maladies du cœur et le cancer, les rayons gamma émis par les radio-isotopes sont détectés à l'aide de gamma-caméras. La technique récente de la tomographie par émission de positons (TEP) permet de détecter deux émissions gamma provoquées par l'annihilation d'un positon.

#### 2.1.1 Imagerie diagnostique

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

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

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

### 2.1.1.1 Imagerie gamma

Il existe dans le monde près de 8 500 services de médecine nucléaire qui utilisent des gamma-caméras pour diagnostiquer les affections de divers organes, dont le cœur, le cerveau, les os, les poumons et la thyroïde. Au total, près de 20 000 gamma-caméras sont utilisées dans ce cadre. L'imagerie gamma représente un chiffre d'affaires supérieur à 1 milliard d'USD, et la croissance de la demande d'isotopes de ce secteur dépasse 5 % par an. Plus de 70 % des diagnostics par imagerie gamma utilisent du  $^{99m}\text{Tc}$ . Les autres applications ont essentiellement recours aux  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{81m}\text{Kr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  et au  $^{201}\text{Tl}$ . Ces radio-isotopes sont produits soit dans des accélérateurs ( $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{81m}\text{Kr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$  et  $^{201}\text{Tl}$ ) ou dans des réacteurs ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^{133}\text{Xe}$ ). Une douzaine d'entreprises privées et quelques organismes publics assurent le gros de la production.

On trouvera énumérées sur le tableau 1 ci-dessous les principales applications de l'imagerie diagnostique à l'aide de gamma-caméras.

Tableau 1. Principaux isotopes utilisés pour le diagnostic

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

Plusieurs radio-isotopes destinés à l'immuno-diagnostic ont atteint divers stades de développement. Des combinaisons de radio-isotopes (surtout du  $^{99m}\text{Tc}$ ) et d'anticorps monoclonaux ou de peptides (une dizaine de produits déjà mis sur le marché et beaucoup d'autres en phase de développement) sont à l'heure actuelle développés pour des utilisations en oncologie, pour l'imagerie des maladies infectieuses et des troubles moteurs et pour la détection de phlébothrombose. Par ailleurs, des entreprises mettent actuellement au point des sondes afin de détecter les marqueurs isotopiques liés à des anticorps spécifiques ou à d'autres biomolécules, ce qui permet de contrôler la disparition des cellules cancéreuses après un acte chirurgical.

L'étalonnage des instruments d'imagerie nucléaire s'effectue au moyen de sources gamma scellées dont les pics d'énergie sont proches de ceux des radiopharmaceutiques. Ces sources

comprennent les sources étendues de grande surface, des sources ponctuelles et des fantômes anthropomorphiques.

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

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

### 2.1.1.2 Tomographie par émission de positons (TEP)

Il existe aujourd'hui près de 180 centres TEP dans le monde où fonctionnent, au total, environ 250 caméras TEP. Ces tomographes sont utilisés essentiellement pour le diagnostic et la détermination des stades d'évolution du cancer. Le chiffre d'affaires annuel de ce secteur, de quelque 100 millions d'USD, croît à un rythme supérieur à 15 % par an, traduisant en cela la reconnaissance par la communauté médicale des avantages cliniques de cette technique.

Le radiopharmaceutique le plus couramment utilisé dans les applications cliniques de la TEP est le fluorodésoxyglucose (FDG) marqué au  $^{18}\text{F}$  qui se comporte dans le corps de la même manière que le glucose ordinaire. Quatre-vingt dix pour cent environ des TEP réalisées font appel au FDG, cette application connaissant une popularité croissante notamment pour la détection du métabolisme des cellules cancéreuses. Le marquage radioactif de médicaments ou de molécules biologiquement actives par des isotopes tels que le  $^{11}\text{C}$ , le  $^{13}\text{N}$  et l' $^{15}\text{O}$  est moins courant.

L'imagerie par émission de positons se caractérise à l'heure actuelle par la très courte période des isotopes mis en jeu, ce qui exige de les utiliser à proximité du lieu où ils sont produits. La période maximale entre production et utilisation est de l'ordre de deux heures. Environ 70 % des sites produisent leurs propres radio-isotopes, 30 % seulement des centres TEP les font venir d'ailleurs. En outre, devant l'explosion récente des utilisations cliniques de ces isotopes, l'Australie, les États-Unis, l'Europe et le Japon ont augmenté l'offre commerciale d'isotopes produits dans des cyclotrons dédiés.

Les caméras TEP emploient des isotopes tels que le  $^{68}\text{Ga}$  comme source d'étalonnage. Des systèmes utilisant des sources de  $^{57}\text{Co}$ , de  $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ , de  $^{133}\text{Ba}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  peuvent être ajoutés aux caméras TEP pour corriger l'atténuation du signal.

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

### 2.1.1.3 Mesure de la densité osseuse

On utilise, dans les centres de radiologie, des appareils qui mesurent la densité osseuse. Au total, environ 500 unités employant des sources d' $^{125}\text{I}$ , de  $^{153}\text{Gd}$  ou d' $^{241}\text{Am}$  sont en service. Toutefois, la demande diminue car la tendance est à la construction de dispositifs à rayons X pour remplacer les systèmes à isotopes, de sorte que seules les machines actuellement en service sont encore exploitées. Trois entreprises privées, dont deux en Europe, fournissent ces sources.



#### 2.1.1.4 Détection des ulcères gastriques

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

#### 2.1.2 Dosages radio-immunologiques

Les dosages radio-immunologiques sont une technique, employée en immunologie, en médecine et en biochimie, qui sert à doser de très petites quantités de substances biologiques telles que les enzymes, les hormones, les stéroïdes et les vitamines dans le sang, les urines, la salive ou d'autres fluides biologiques. Les dosages radio-immunologiques sont couramment pratiqués dans les hôpitaux pour diagnostiquer des affections comme le diabète, les dysfonctionnements de la thyroïde, l'hypertension, les problèmes de procréation.

Pour ces dosages radio-immunologiques, on se sert de radio-isotopes incorporés à un échantillon marqué de la substance à mesurer ainsi que d'un anticorps de cette substance. La très grande spécificité de ces dosages vient de l'utilisation d'immunoprotéines. Cette sensibilité ainsi que le recours à une instrumentation de pointe, permettent de doser de très faibles concentrations de ces produits. Le plus souvent, ces dosages utilisent des immunoprotéines marquées avec des radio-isotopes tels que le tritium ( $^3\text{H}$ ), le  $^{57}\text{Co}$  et l' $^{125}\text{I}$ .

Au niveau mondial, les dosages radio-immunologiques in vitro représentent un chiffre d'affaires annuel de 350 millions d'USD. Cependant, ce marché ne se développe pas car ces radio-isotopes sont progressivement remplacés par d'autres technologies, notamment des méthodes faisant appel à la chimioluminescence, à la fluorescence ou aux enzymes.

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

En médecine nucléaire, la radiothérapie sert essentiellement à traiter l'hyperthyroïdie, la synovite et les cancers. Le traitement palliatif de la douleur liée aux cancers secondaires en est une autre application.

##### 2.1.3.1 Applications thérapeutiques

L' $^{131}\text{I}$  est privilégié pour l'ablation du tissu thyroïdien dans les cas d'hyperthyroïdie ou de cancer de la thyroïde, car il est supérieur à toutes les techniques chirurgicales existantes. D'autres isotopes, le  $^{32}\text{P}$ , l' $^{90}\text{Y}$  et l' $^{169}\text{Er}$  sont utilisés pour traiter la synovite et les pathologies arthritiques. On estime que la demande devrait progresser à un rythme de 10 % par an.

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

### 2.1.3.2 Soins palliatifs

Parmi les évolutions récentes dans le domaine du traitement de la douleur produite par des métastases secondaires liées à la propagation des cancers du sein, de la prostate et du poumon, on peut citer l'utilisation du  $^{32}\text{P}$ , du  $^{89}\text{Sr}$ , du  $^{153}\text{Sm}$  et du  $^{186}\text{Re}$ . L'usage de ces techniques se répand en raison de la qualité de vie qu'elles apportent aux patients. D'autres agents à base de  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ , de  $^{166}\text{Ho}$  et de  $^{188}\text{Re}$  sont à l'étude. Les applications actuelles des radio-isotopes dans les soins palliatifs représentent un chiffre d'affaires annuel d'environ 40 millions d'USD.

### 2.1.4 Radiothérapie avec des sources scellées

#### 2.1.4.1 Télécobaltothérapie

Dans le monde entier, on compte aujourd'hui quelque 1 500 unités utilisant des sources de  $^{60}\text{Co}$  exploitées dans 1 300 centres de radiothérapie pratiquant la télécobaltothérapie pour détruire les cellules cancéreuses. Quelque 70 nouvelles machines sont installées chaque année, notamment pour remplacer les unités obsolètes. Cette application représente un chiffre d'affaires annuel (calculé en fonction de la valeur des sources de cobalt) d'environ 35 millions d'USD, mais la demande diminue car le  $^{60}\text{Co}$  est remplacé par les accélérateurs d'électrons.

Le « Gamma-Knife » est une évolution relativement récente de la cobaltothérapie. Il est utilisé pour intervenir sur les tumeurs cérébrales bénignes et malignes, oblitérer des malformations artérioveineuses et soulager les névralgies. Cette nouvelle technique de radiochirurgie se développe rapidement, et il existe aujourd'hui 140 systèmes Gamma-Knife en service pour le traitement des tumeurs cérébrales. Neuf fournisseurs, dont trois sociétés d'Amérique du Nord, sont présentes sur ce marché.

#### 2.1.4.2 Brachythérapie

La brachythérapie est une technique de radiothérapie interne utilisant des sources radioactives scellées et qui consiste à implanter directement la substance radioactive à l'intérieur ou à proximité de la tumeur. Dans le monde entier, elle est utilisée dans près de 3 000 centres d'oncologie spécialisés qui réalisent plusieurs centaines de milliers d'actes par an. La demande croît régulièrement à un rythme supérieur à 10 % par an.

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

Les implants de brachythérapie peuvent avoir un débit de dose faible ou un élevé. Les implants à haut débit de dose sont normalement retirés après quelques minutes tandis que les implants à bas débit de dose sont laissés dans l'organisme du patient au moins plusieurs jours et dans certains sites cancéreux définitivement. Les implants à haut débit de dose peuvent être classés dans les techniques de brachythérapie à distance à chargement différé, étant donné que la source radioactive est envoyée par un ordinateur à travers un tube jusque dans un cathéter placé à proximité de la tumeur. Le mérite de cette dernière technique est qu'il ne reste aucune substance radioactive dans l'organisme à la fin du

traitement. Elle a été utilisée pour traiter des cancers du col de l'utérus, de l'utérus, du sein, du poumon, du pancréas, de la prostate et de l'œsophage.

Depuis peu, l'implantation permanente de grains à faible débit de dose ( $^{125}\text{I}$  et  $^{103}\text{Pd}$ ) donne des résultats extrêmement satisfaisants pour le traitement du cancer de la prostate à un stade précoce. La demande de ces radio-isotopes s'est rapidement accrue. Des entreprises privées, dont une aux États-Unis, ont annoncé la mise en service de plusieurs cyclotrons supplémentaires (environ 15) destinés à la production de  $^{103}\text{Pd}$  et prévoient de construire une installation dédiée à la production de  $^{103}\text{Pd}$  dans un réacteur. Rien qu'aux États-Unis, près de 57 000 patients ont été traités pour un cancer de la prostate à l'aide de grains à bas débit de dose en 1999. Cette application, à elle seule, représente un chiffre d'affaires annuel supérieur à 140 millions d'USD.

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

Un millier d'irradiateurs sont employés dans les laboratoires de transfusion sanguine. L'irradiation du sang est connue comme le moyen le plus efficace de réduire le risque d'une réaction immunologique consécutive à la transfusion sanguine, qui porte le nom de réaction du greffon contre l'hôte. L'irradiation à très faible dose des poches de sang est employée pour les patients immunodéprimés, qui ont subi une transplantation d'organe ou une chimiothérapie lourde, par exemple. Elle s'effectue dans des irradiateurs autoprotégés, équipés, par exemple, d'une à trois sources de  $^{137}\text{Cs}$  de près de  $10 \text{ TBq}^1$  chacune, délivrant des doses de 25 à 50 Gy. Cette dose de rayonnement suffit à inactiver les lymphocytes du donneur. Les autres méthodes actuellement utilisées dans les banques du sang pour éliminer les lymphocytes par lavage et filtration n'assurent pas une protection efficace contre la réaction du greffon contre l'hôte.

Ce marché est stable. La demande de nouvelles unités, qui avoisine 70 par an, est assurée par quatre entreprises industrielles. Le chiffre d'affaires annuel du secteur s'élève à près de 25 millions d'USD. Cependant, plusieurs entreprises mettent actuellement au point des irradiateurs utilisant une source de rayons X au lieu d'une source isotopique. Ces unités devraient concurrencer les irradiateurs à isotopes.

## **2.2 Applications industrielles**

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

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

---

1.  $1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$ . Le becquerel (Bq) est l'unité de radioactivité égale à une désintégration par seconde.  
 $1 \text{ Bq} = 27 \text{ picuries (pCi)} = 27 \times 10^{-12} \text{ Ci}$ .

Entrent dans la catégorie de l'instrumentation radiométrique, les appareils d'analyse, de mesure et contrôle faisant appel à des sources radioactives scellées (intégrées à l'instrumentation) ainsi que le matériel de contrôle non destructif (appareils de gammagraphie). Les sources utilisées peuvent être des émetteurs de particules alpha ou bêta, de neutrons ou de rayons X ou encore de photons gamma. Le plus souvent, l'activité de ces sources varie de 10 MBq à 1 TBq. Ces techniques emploient un nombre relativement important de radio-isotopes et constituent d'ailleurs la principale application mondiale de ces éléments par le nombre de secteurs industriels concernés, d'appareils en services et d'entreprises industrielles fabriquant ces matériels.

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

Un des problèmes majeurs qui se pose dans le cas de l'instrumentation radiométrique et des radio-traitements tient au petit nombre d'entreprises qui fabriquent les sources scellées, en particulier les sources émettrices de neutrons ou de particules alpha (comme l' $^{241}\text{Am}$  ou le  $^{252}\text{Cf}$ ) ou de produits de fission (le  $^{137}\text{Cs}$  ou le  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  notamment).

Les traceurs radioactifs (essentiellement des émetteurs bêta ou gamma) sont utilisés sous diverses formes physiques et chimiques comme sources non scellées pour étudier, entre autres, des réactions chimiques et des processus industriels. En général, leur activité se situe entre 50 Bq et 50 MBq. Ces traceurs sont très répandus dans une multitude de secteurs, dont l'agronomie, l'hydrologie, la construction hydraulique et l'aménagement du littoral, ainsi que les industries pétrolières et gazières. Ils sont également utilisés dans des laboratoires de recherche et de développement travaillant pour des domaines nucléaires ou autres. Cependant, ce type d'application a un poids économique moindre que l'instrumentation radiométrique et les radio-traitements.

### ***2.2.1 Instrumentation radiométrique***

L'instrumentation radiométrique est intégrée à l'instrumentation associée (sous forme de capteurs), dans les systèmes de contrôle de procédés. Les principales applications sont les jauges, l'instrumentation analytique en ligne, les instruments de mesure de la pollution et l'instrumentation de sécurité.

Les jauges de densité, de niveau et de pesage par 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  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , 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 diminuer. Cependant, on voit poindre de nouvelles applications dont des jauges destinées à la détermination simultanée de la concentration de plusieurs fluides pour l'exploitation pétrolière.

Les jauges mesurant l'épaisseur et la masse par unité de surface, par absorptiométrie des particules bêta ou des photons gamma, sont employées essentiellement pour la fabrication de tôles d'acier ou d'autres métaux ainsi que dans les industries du papier, du plastique et du caoutchouc. Elles utilisent des radio-isotopes tels que le  $^{85}\text{Kr}$ , le  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{147}\text{Pm}$  et l' $^{241}\text{Am}$ . La demande de 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, et qui contiennent des sources scellées de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ , ou  $^{204}\text{Tl}$ , sont essentiellement employées pour pratiquer des mesures sur les circuits imprimés électroniques, les revêtements en métal précieux dans la bijouterie ou les contacts électriques dans l'industrie électromécanique. Dans ce secteur d'activité, la demande est stable.

Différentes sources scellées équipent divers types d'instruments d'analyse en ligne. Des analyseurs de soufre équipés de sources d' $^{241}\text{Am}$  sont employés dans les raffineries de pétrole, les centrales électriques, et les usines pétrochimiques afin de mesurer la teneur en soufre des produits pétroliers. La demande de ce type d'appareil est stable. Par ailleurs, des systèmes munis de sources de  $^{252}\text{Cf}$  sont incorporés à l'instrumentation destinées à l'analyse en ligne de divers minéraux essentiellement fondée sur les réactions neutron-gamma. Ces systèmes s'appliquent à une variété de minerais, au charbon, aux minéraux bruts et au ciment en vrac. La demande d'isotopes pour ces applications est relativement limitée, mais en progression. Les fabricants sont très rares. Certains 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 rayonnements bêta.

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

L'instrumentation de sécurité, généralement fondée sur des réactions neutron-gamma, utilise des sources de  $^{252}\text{Cf}$  pour détecter des explosifs et/ou des stupéfiants, essentiellement dans les aéroports, les ports et les gares de chemins de fer. Ces systèmes sont très fiables, et la demande des services de la sécurité publique est en augmentation. Quelques entreprises seulement développent ces systèmes. Par ailleurs, le tritium ( $^3\text{H}$ ) est employé dans la fabrication de la peinture luminescente utilisée pour signaler les sorties de secours.

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

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

### 2.2.2 Irradiation et traitement par les rayonnements

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

- la radiostérilisation du matériel médical et les procédés apparentés, tels que la stérilisation des emballages de produits pharmaceutiques ou de produits alimentaires. Il s'agit là de l'utilisation de loin la plus importante des irradiateurs au  $^{60}\text{Co}$ , qu'ils soient dédiés ou polyvalents ;
- l'irradiation des aliments, essentiellement pour en améliorer la qualité hygiénique. À l'heure actuelle, la plupart des aliments irradiés sont vendus sous forme déshydratée (épices, légumes secs, par exemple) et surgelée (viande, poisson, etc.) ;
- le durcissement des matériaux, essentiellement des plastiques par réticulation ;
- la lutte contre les parasites (technique de l'insecte stérile/TIS).

Il existe quelques autres traitements ou activités s'apparentant au radiotraitement. Il s'agit de l'irradiation réalisée pour l'étude du dommage lié aux rayonnements ionisants, ou l'irradiation des boues. Leur importance économique est assez limitée. Quelque 180 irradiateurs gamma sont en service dans le monde. Certains d'entre eux sont dédiés à la radiostérilisation tandis que d'autres sont polyvalents et, dans ce cas, servent essentiellement à la radiostérilisation et accessoirement à l'irradiation des aliments ou des 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 pour les traitements. En général, les sources de  $^{60}\text{Co}$  destinées aux applications industrielles ont une faible activité spécifique, de l'ordre de 1 à 4 TBq/g, pour des activités totales très élevées, avoisinant 50 PBq. Elles se distinguent sur ce plan des sources de  $^{60}\text{Co}$  employées en radiothérapie qui ont des activités spécifiques élevées, proches de 10 TBq/g.

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

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

Il existe un vaste marché potentiel pour l'irradiation des aliments qui concerne une large variété et d'importantes quantités de produits. Aujourd'hui, on traite ainsi chaque année près de 0,5 million de tonnes d'aliments. Si cette technologie devait percer, la demande pourrait dépasser les capacités actuelles de fourniture de  $^{60}\text{Co}$ . L'irradiation est une technique reconnue pour améliorer la sécurité et la qualité nutritionnelle des aliments dans la mesure où elle diminue les niveaux de contamination

bactérienne et les pertes. Elle a été approuvée par plusieurs organisations gouvernementales internationales comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), ainsi que par diverses organisations nationales comme, aux États-Unis, la *Food and Drug Administration*.

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

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

### **2.2.3 Traceurs radioactifs**

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

Les traceurs sont essentiellement utilisés pour étudier :

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

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

### **2.2.4 Contrôles non destructifs**

La gammagraphie est utilisée pour réaliser des contrôles non destructifs dans un large éventail de secteurs et notamment l'industrie pétrolière et gazière, la grosse chaudronnerie, la fonderie, le génie civil, l'aéronautique et l'industrie automobile. Ce type d'essais non destructifs permet surtout de vérifier la sûreté et la sécurité de structures vitales, par exemple, l'intégrité d'une ailette de réacteur dans l'aéronautique. Le chiffre d'affaires mondial de cette activité tourne autour de 20 millions d'USD par an et reste en gros stable. Plus de 90 % des systèmes utilisent des sources d' $^{192}\text{Ir}$ , et le reste du  $^{60}\text{Co}$ , du  $^{75}\text{Se}$  et du  $^{169}\text{Yb}$ . La neutronographie au  $^{252}\text{Cf}$  est aussi employée.

### 2.2.5 Autres applications industrielles des isotopes radioactifs

Le démarrage des réacteurs nucléaires pour la production d'électricité, la recherche et la propulsion des navires nécessite l'utilisation de sources émettrices de neutrons comme le  $^{252}\text{Cf}$ . La demande est conditionnée par le nombre de réacteurs en construction, qu'il s'agisse de réacteurs commerciaux, de réacteurs de recherche ou d'unités embarquées. Cinq fournisseurs produisent ces sources.

Les sources d'énergie électrique radio-isotopiques, appelées générateurs thermoélectriques radio-isotopiques, ne sont plus aujourd'hui utilisées que pour alimenter en électricité les missions spatiales de longue durée et à grande distance. Ces systèmes, dont le fonctionnement repose sur la conversion thermoélectrique, utilisent des sources scellées de  $^{238}\text{Pu}$  de haute activité. La Russie et les États-Unis sont actuellement les deux seuls producteurs sur ce marché.

Des 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 mesure sont utilisés à cette fin. Les utilisateurs de ces sources sont les fabricants d'instrumentation nucléaire, les services de médecine nucléaire et de radiothérapie des hôpitaux, les centres de recherche nucléaire, les installations du cycle du combustible et les exploitants de réacteurs de puissance.

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

## 2.3 Applications scientifiques

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

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

Un rapide survol des travaux de recherche réalisés récemment ou aujourd'hui avec des isotopes et l'examen des résultats que l'on n'aurait pu obtenir sans ces éléments révèlent l'immense variété d'isotopes employés ainsi que la frontière floue et toujours mouvante entre les travaux de recherche et de développement et les applications, notamment dans le domaine médical.

Étant donné leur extrême diversité, il est difficile de regrouper les isotopes utilisés en catégories générales homogènes. De plus, il existe des cas isolés d'isotopes utilisés pour une seule application,



par exemple le  $^{51}\text{Cr}$  qui sert de source de référence pour l'émission de neutrinos. Quant au passage entre les travaux de recherche et de développement et les applications, la tomographie par émission de positons, utilisée couramment dans les hôpitaux pour des soins, et qui reste néanmoins un outil de recherche en neurologie et en psychiatrie, en est un bon exemple.

### ***2.3.1 Recherches 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 est faible et stable, et il n'existe que quelques fournisseurs privés à côté des organismes publics concernés. Le  $^{22}\text{Na}$  est utilisé comme source de positons en sciences des matériaux.

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

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

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

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

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

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

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

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

Cependant, la société acceptant de moins en moins bien l'emploi de radio-isotopes dans l'environnement, on a tendance aujourd'hui à en limiter l'usage aux applications pour lesquelles il n'existe pour ainsi dire pas d'autre solution. L'hydrologie et la sédimentologie fluviales utilisent

presque exclusivement des traceurs chimiques ou fluorescents, voire des traceurs radioactifs (qui peuvent être activés), à l'exclusion de tout traceur existant à l'état naturel.

### **2.3.4 Recherche médicale**

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

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

Les recherches actuelles dans ce domaine se subdivisent en gros en quatre catégories dont l'objectif essentiel est d'améliorer les actes médicaux (voir section 2.1 ci-dessus) déjà pratiqués :

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

Enfin, la brachythérapie endovasculaire promet de traiter très efficacement de façon préventive la resténose de l'artère coronaire. Cette application fait l'objet aujourd'hui de développements cliniques. Un grand nombre d'entreprises privées et d'équipes universitaires mettent actuellement au point des stents radioactifs (pièces insérées à l'intérieur des vaisseaux sanguins pour éviter la resténose) ou des systèmes à source radioactive destinés à prévenir les resténoses des vaisseaux après une angioplastie par ballonnet. Les radio-isotopes étudiés comprennent le  $^{32}\text{P}$ , l' $^{90}\text{Y}$ , le  $^{188}\text{Re}$  et l' $^{192}\text{Ir}$ . On pourrait traiter avec cette méthode plus de 150 000 personnes, et le chiffre d'affaires de cette activité est estimé à quelque 350 millions d'USD par an.

### **2.3.5 Biotechnologies**

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

## 2.4 Isotopes stables

Les isotopes stables sont souvent utilisés comme source pour la production de radio-isotopes dans des cyclotrons et des réacteurs. La demande croît dans ce secteur où les niveaux d'enrichissement doivent être très élevés. Le tableau 2 contient quelques exemples d'utilisations des isotopes stables pour la production de radio-isotopes dans les réacteurs ou accélérateurs.

Tableau 2. **Isotopes stables enrichis et radio-isotopes dérivés**

Isotopes stables cibles	Radio-isotopes produits	
	Dans les réacteurs	Dans les accélérateurs
$^{13}\text{C}$		$^{13}\text{N}$
$^{15}\text{N}$		$^{15}\text{O}$
$^{18}\text{O}$		$^{18}\text{F}$
$^{33}\text{S}$	$^{33}\text{P}$	
$^{50}\text{Cr}$	$^{51}\text{Cr}$	
$^{58}\text{Ni}$	$^{58}\text{Co}$	$^{57}\text{Co}$
$^{76}\text{Ge}$	$^{77}\text{As}$	
$^{68}\text{Zn}$		$^{67}\text{Ga}, ^{67}\text{Cu}$
$^{88}\text{Sr}$	$^{89}\text{Sr}$	
$^{102}\text{Pd}$	$^{103}\text{Pd}$	
$^{112}\text{Cd}$		$^{111}\text{In}$
$^{124}\text{Xe}$	$^{125}\text{I}$	$^{123}\text{I}$
$^{152}\text{Gd}$	$^{153}\text{Gd}$	
$^{152}\text{Sm}$	$^{153}\text{Sm}$	
$^{168}\text{Yb}$	$^{169}\text{Yb}$	
$^{176}\text{Lu}$	$^{177}\text{Lu}$	
$^{185}\text{Re}$	$^{186}\text{Re}$	
$^{186}\text{W}$	$^{188}\text{W}$	$^{186}\text{Re}$
$^{198}\text{Pt}$	$^{199}\text{Au}$	
$^{203}\text{Tl}$		$^{201}\text{Tl}$

### 2.4.1 Applications médicales

On trouvera sur le tableau 3 une liste détaillée des isotopes stables employés en médecine, notamment ceux qui sont utilisés directement, comme le  $^{10}\text{B}$ , pour la boroneurothérapie en oncologie, ainsi que l' $^3\text{He}$  et le  $^{129}\text{Xe}$  hyperpolarisés en imagerie médicale par résonance magnétique. Ne figurent pas sur ce tableau les isotopes stables qui servent à la production des radio-isotopes employés en médecine.

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

Isotopes stables	Applications
$^{10}\text{B}$	<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>
$^{42}\text{Ca}$ , $^{46}\text{Ca}$ , $^{48}\text{Ca}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Métabolisme, biodisponibilité et paramètres d'absorption du calcium au repos et pendant les vols spatiaux</li> <li>* Recherche de l'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>
$^{13}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Recherche sur les réactions fondamentales en chimie organique</li> <li>* Études des 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 les diagnostics</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>
$^{35}\text{Cl}$ , $^{37}\text{Cl}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études de la toxicité des polluants dans l'environnement</li> </ul>
$^{53}\text{Cr}$ , $^{54}\text{Cr}$	<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>
$^{63}\text{Cu}$ , $^{65}\text{Cu}$	<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 du rôle de la préservation de l'intégrité de tissus comme le myocarde</li> </ul>
$^3\text{He}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études par résonance magnétique in vivo</li> </ul>
$^2\text{H}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Recherche sur les vitamines</li> <li>* Mécanismes des réactions chimiques</li> </ul>
$^{54}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Fe}$ , $^{58}\text{Fe}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Études du métabolisme et des dépenses énergétiques</li> <li>* Conditions de l'absorption et de l'excrétion efficaces du fer</li> <li>* Recherche de méthodes de lutte efficaces contre l'anémie</li> <li>* Études des traceurs métaboliques pour déterminer le contrôle génétique du fer</li> </ul>
$^{78}\text{Kr}$ , $^{80}\text{Kr}$ , $^{82}\text{Kr}$ , $^{84}\text{Kr}$ , $^{86}\text{Kr}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Diagnostic des maladies pulmonaires</li> </ul>

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

Isotopes stables	Applications
<sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb	* Dilution isotopique pour mesurer les niveaux de plomb dans le sang
<sup>6</sup> Li	* Sodium et physiologie rénale * Transport membranaire * Maladies psychiatriques
<sup>25</sup> Mg, <sup>26</sup> Mg	* Études non invasives des besoins de l'homme, du métabolisme et de l'absorption du magnésium * Études cinétiques des maladies cardio-vasculaires
<sup>94</sup> Mo, <sup>96</sup> Mo, <sup>97</sup> Mo, <sup>100</sup> Mo	* Marquage des produits alimentaires afin de déterminer les besoins nutritionnels de l'homme
<sup>58</sup> Ni, <sup>60</sup> Ni, <sup>61</sup> Ni, <sup>64</sup> Ni	* Mesures non invasives de la consommation et de l'absorption chez l'homme
<sup>15</sup> N	* Études à grande échelle du prélèvement de l'azote par les plantes * Turnover, synthèse et catabolisme des protéines dans l'organisme * Turnover et taille du réservoir d'acides aminés * Métabolisme des protéines tissulaires et individuelles
<sup>17</sup> O	* Études de biologie structurale, recherches sur la cataracte
<sup>18</sup> O	* Mesures non invasives, précises et prolongées des dépenses énergétiques pendant l'activité quotidienne de l'homme * Mesure de la masse corporelle maigre * Recherches sur l'obésité * Études du métabolisme énergétique en zoologie comparée
<sup>85</sup> Rb, <sup>87</sup> Rb	* Traceurs pour le métabolisme du potassium * Recherches sur les maladies mentales
<sup>74</sup> Se, <sup>76</sup> Se, <sup>77</sup> Se, <sup>78</sup> Se, <sup>80</sup> Se, <sup>82</sup> Se	* Biodisponibilité du sélénium, un nutriment essentiel
<sup>33</sup> S, <sup>34</sup> S	* Recherches sur le génome humain et études moléculaires * Études de séquençage des nucléotides
<sup>51</sup> V	* Diabète, biodisponibilité et métabolisme du vanadium * Études du métabolisme cérébral
<sup>129</sup> Xe	* Imagerie par résonance magnétique nucléaire
<sup>64</sup> Zn, <sup>67</sup> Zn, <sup>68</sup> Zn, <sup>70</sup> Zn	* Techniques non invasives de détermination des besoins en zinc de l'homme * Maladies métaboliques, maladies du foie et alcoolisme * Études des besoins nutritionnels et de l'utilisation du zinc

### 2.4.2 Applications industrielles

Les applications industrielles des isotopes stables représentent un chiffre d'affaires annuel d'environ 30 millions d'USD par an. Par rapport aux applications biomédicales, elles nécessitent en général de plus grosses quantités et des niveaux d'enrichissement moindres et, de plus, sont moins coûteuses. C'est pourquoi, le plus souvent, la méthode par centrifugation gazeuse est privilégiée pour produire les isotopes les plus lourds, tandis que la distillation est réservée aux isotopes légers. Certains isotopes stables utilisés dans l'industrie sont également produits par séparation électromagnétique.

L'industrie électronucléaire et les producteurs de lasers sont les principaux secteurs industriels à utiliser des isotopes stables.

L'industrie électronucléaire utilise des isotopes tels que le  $^{10}\text{B}$  pour l'absorption neutronique et du  $^{64}\text{Zn}$  appauvri comme additif dans l'eau de refroidissement de centrales nucléaires afin d'abaisser le niveau de rayonnement produit par des isotopes radioactifs indésirables tels que le cobalt ( $^{60}\text{Co}$ ) et le zinc ( $^{65}\text{Zn}$ ), ce qui permet d'atténuer la fissuration par corrosion sous contrainte. Il s'agit d'applications à grande échelle consommant plusieurs tonnes d'isotopes par an.

Dans l'industrie du laser, les isotopes pairs du cadmium sont utilisés pour accroître les performances des lasers hélium-cadmium. Les quantités nécessaires sont de l'ordre de quelques kilogrammes par an, bien que cette application soit en perte de vitesse avec le remplacement des lasers hélium-cadmium par des lasers solides.

À l'heure actuelle, d'autres industries étudient aussi plusieurs applications des isotopes stables. Ces isotopes pourraient servir à améliorer la conductivité thermique ou l'implantation des ions dans les semi-conducteurs, ainsi qu'à augmenter l'efficacité de l'éclairage et trouver des applications comme marqueurs (pour détecter des explosifs, par exemple) ou dans des horloges de haute précision.

### **2.4.3 Applications scientifiques**

Bien que, par les quantités physiques et le volume monétaire qu'elles représentent, les utilisations des isotopes stables en médecine et dans l'industrie arrivent en tête, il n'en reste pas moins que les applications dans la recherche sont les plus nombreuses. C'est ainsi que bien des applications médicales des isotopes stables énumérées sur le tableau 3 peuvent également être classées dans la catégorie des recherches biomédicales ou médicales.

Tous les isotopes stables d'un élément donné ont les mêmes propriétés physiques ou chimiques (à quelques exceptions près) que cet élément et sont, par conséquent, d'excellents traceurs et outils de marquage de composés. L'analyse de la teneur en isotopes stables et de leur abondance relative constitue le fondement d'une multitude de recherches dans les domaines de l'écologie et de la protection de l'environnement. Les variations de la teneur isotopique des isotopes stables servent à étudier une diversité de phénomènes se produisant dans la biosphère ou en sciences du vivant. Nombreuses sont les études en cours qui donnent déjà des résultats prometteurs. Certaines d'entre elles reposent sur l'exploitation des différences naturelles de l'abondance relative de divers isotopes stables, d'autres utilisent des isotopes séparés ou enrichis comme traceurs.

Certains isotopes stables peuvent être utilisés pour réaliser une diversité d'expériences de physique des hautes énergies comme le bombardement à l'aide de  $^{48}\text{Ca}$  pour créer des éléments superlourds.

Les composés marqués avec des isotopes stables, comme le  $^2\text{H}$ , le  $^{13}\text{C}$ , le  $^{15}\text{N}$  et divers isotopes du calcium, peuvent être intégrés à des cycles biologiques pour réaliser un éventail de recherches par exemple : sur les procédés d'assimilation des végétaux, l'utilisation des engrais et les techniques d'irrigation, la dynamique structurale des protéines à l'aide de la spectrométrie par résonance magnétique nucléaire, les processus biotechnologiques (par exemple, la fermentation) à l'aide de substrats enrichis de  $^{13}\text{C}$  ; le métabolisme du calcium, la recherche sur l'ostéoporose et les études de bilans énergétiques.

### 3. PRODUCTION D'ISOTOPES

Ce chapitre sera consacré aux installations de production d'isotopes sur lesquelles on dispose d'informations grâce aux réponses fournies par leurs exploitants au questionnaire envoyé par l'AEN et l'AIEA. Sauf mention contraire, les données présentées ici concernent la situation au 1er janvier 1999. Les sections 3.1, 3.2 et 3.3 décrivent les installations de production les plus courantes, à savoir les réacteurs, les accélérateurs et les installations de séparation des radio-isotopes. La production d'isotopes stables fait l'objet de la section 3.4. Il arrive que, sur le site de réacteurs et d'accélérateurs produisant des isotopes, on trouve des installations, notamment des cellules chaudes, où les isotopes subissent un premier traitement et conditionnement. Mais il existe aussi des installations de traitement indépendantes des réacteurs ou accélérateurs où sont produits les isotopes.

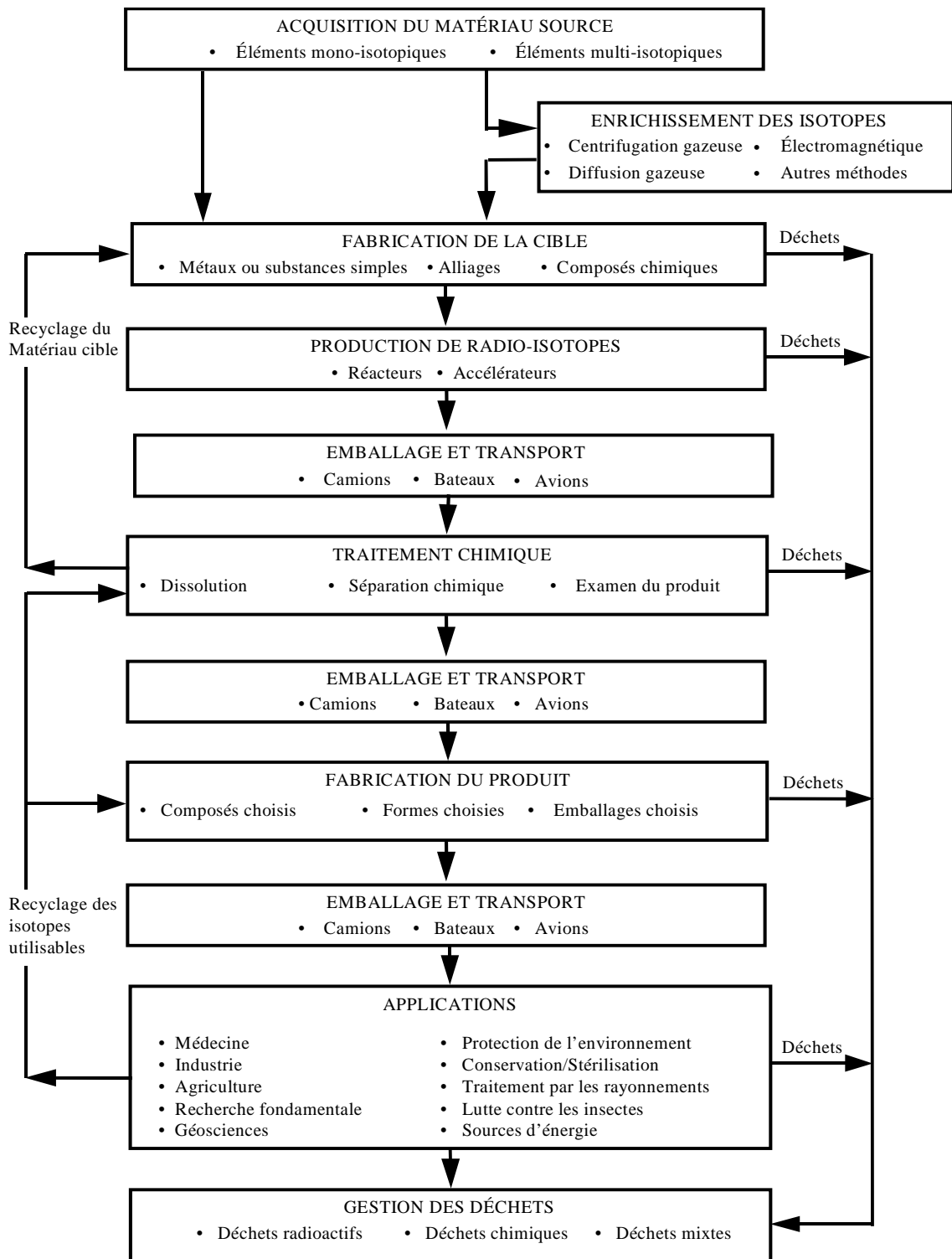
La production des radio-isotopes comporte plusieurs étapes conduisant au produit prêt pour son utilisation finale (voir figure 1). En général, le processus ne se déroule pas dans une seule installation, mais dans plusieurs, comme le montre la figure 1. Ce rapport s'intéresse essentiellement à la partie nucléaire du processus, à savoir la production de l'isotope recherché. C'est pourquoi seuls les réacteurs, accélérateurs et installations de séparation figurent dans la description des installations de production des isotopes que l'on trouvera ci-dessous. Ne sont abordées ni la partie amont du processus, c'est-à-dire la sélection et la préparation du matériau cible, ni les opérations aval, à savoir le traitement chimique, le conditionnement et le contrôle des isotopes, opérations indispensables pour que le produit commercial soit prêt à l'usage.

Le tableau 4 ci-après récapitule les principales installations de production de radio-isotopes étudiées dans le présent rapport ainsi que leur répartition géographique. Pour les besoins du rapport, les pays ont été groupés en six régions (voir annexe 4). D'après notre étude, une soixantaine de pays, dont 25 pays Membres de l'OCDE, produisent aujourd'hui des isotopes stables ou radioactifs. Cependant, un bon nombre d'entre eux les destinent essentiellement à leur propre usage.

Tableau 4. Principales installations de production d'isotopes

Type d'installation	Nombre dans le monde (dans les pays Membres de l'OCDE)
<b>Réacteurs de recherche</b> <i>dont réacteurs à haut flux</i>	73 (30) 6 (3)
<b>Accélérateurs</b> <i>cyclotrons dédiés aux isotopes médicaux</i> <i>cyclotrons pour la TEP</i> <i>accélérateurs polyvalents</i>	255 (219) 59 (47) 167 (151) 29 (21)
<b>Installations de production d'isotopes stables lourds</b>	11 (6)

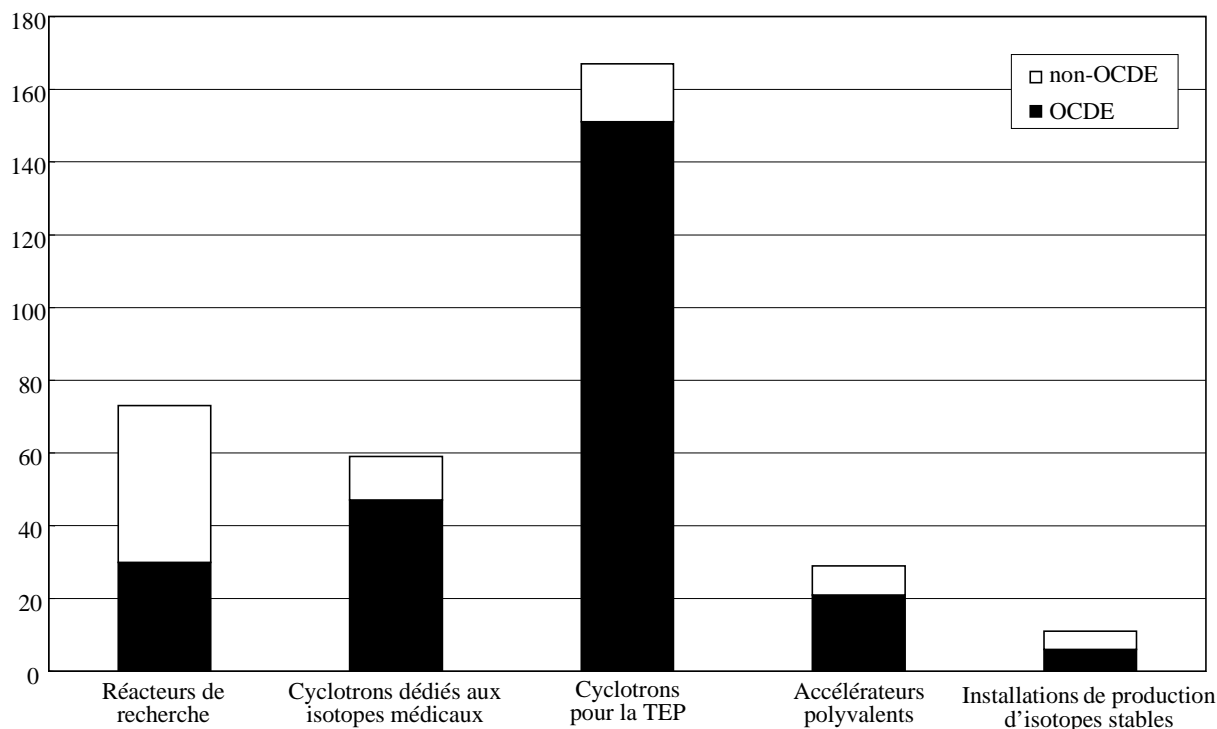
Figure 1. **Production, fabrication, applications des radio-isotopes et gestion des déchets**





On trouvera sur la figure 2 le nombre et le type des principales installations de production d'isotopes en service dans le monde au mois de janvier 1999, tels qu'établis par la présente étude. Cette figure montre que, à l'exception des réacteurs de recherche, ces installations se trouvent en majorité dans les pays Membres de l'OCDE.

Figure 2. Nombre d'installations de production d'isotopes dans le monde



### 3.1 Réacteurs

Les réacteurs sont généralement utilisés pour produire des noyaux riches en neutrons par irradiation neutronique. L'annexe 3 contient la liste des principaux isotopes produits dans les réacteurs. La plupart des réacteurs qui servent à produire des isotopes sont des réacteurs de recherche. Certains radio-isotopes cependant (essentiellement le  $^{60}\text{Co}$ ) sont obtenus dans des réacteurs de puissance. Aujourd'hui, le Canada met en service un réacteur dédié à la production d'isotopes et est sur le point d'en construire un autre.

#### 3.1.1 Réacteurs de recherche

Cette étude ne concerne que les réacteurs qui produisent une quantité importante d'isotopes et y consacrent au moins 5 % de leur capacité. Pour les besoins de l'étude, on ne considère pas l'analyse par activation neutronique comme un mode de production d'isotopes. En général, les réacteurs où l'on produit des isotopes ont une puissance supérieure à 1 MW. D'après cette définition, sur un total de près de 300 réacteurs en service dans le monde<sup>1</sup>, 75 environ produisent des isotopes. Le tableau 5 présente la répartition, par niveau de puissance et par région, des réacteurs de recherche mentionnés

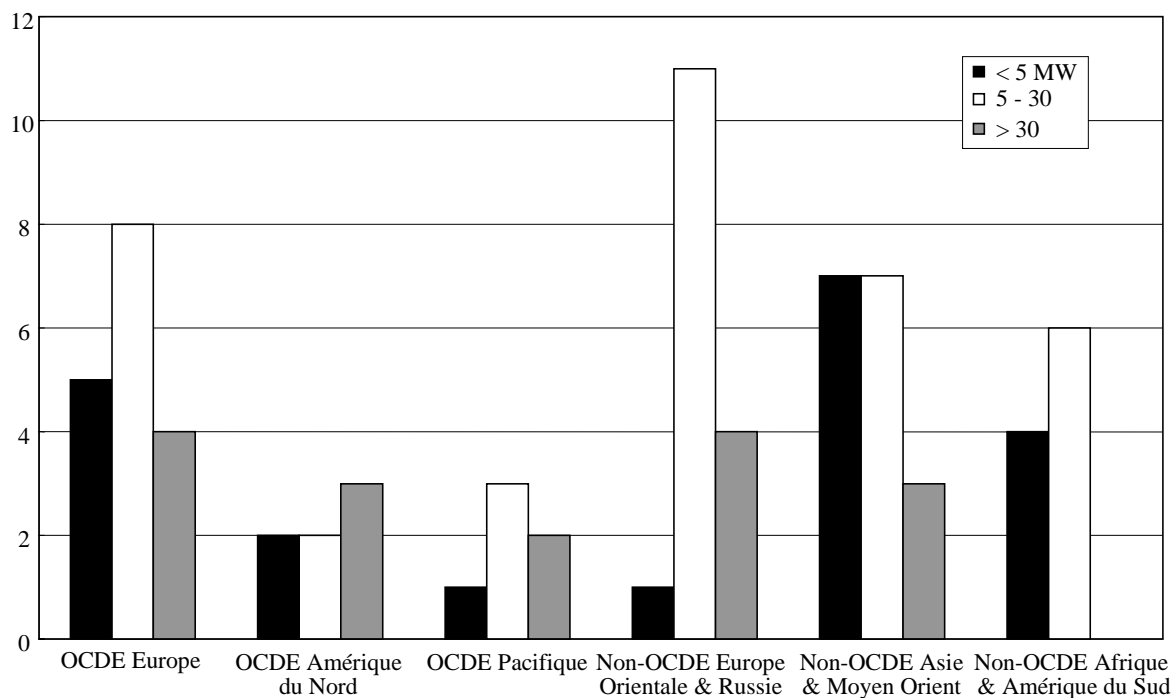
1. Source: AIEA, RDS n° 3, Nuclear Research Reactors in the World, Édition de décembre 1996, Vienne (1996) et mise à jour sur le site Internet de l'AIEA.

dans la présente étude. On trouvera à l'annexe 6 la répartition géographique détaillée par pays des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes. En plus des réacteurs qui figurent au tableau 5 et à l'annexe 6, il existe en Russie deux réacteurs à flux neutronique particulièrement élevé qui pourraient servir à produire du  $^{89}\text{Sr}$ .

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
OCDE – Europe	5	8	4	17
OCDE – Amérique du Nord	2	2	3	7
OCDE – Pacifique	1	4	1	6
Non-OCDE – Europe orientale et Russie	1	11	4	16
Non-OCDE – Asie & Moyen-Orient	7	7	3	17
Non-OCDE – Afrique & Amérique du Sud	4	6	0	10
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>38</b>	<b>15</b>	<b>73</b>

Figure 3. Répartition géographique des réacteurs de recherche produisant des isotopes (nombre)



Le tableau 5 et la figure 3 révèlent que les réacteurs de recherche produisant des isotopes sont aujourd'hui assez uniformément répartis dans le monde, et entre les pays Membres de l'OCDE et les non-membres, bien que la puissance de ces réacteurs en Afrique et l'Amérique du Sud ne dépasse pas 30 MW. Trois régions, les pays européens Membres de l'OCDE, les pays non-membres d'Europe

orientale et l'ex-Union soviétique ainsi que les pays non-membres d'Asie et du Moyen-Orient, se répartissent équitablement les trois quarts des réacteurs de production d'isotopes, contre environ de 10 % pour chacune des autres régions.

Environ un tiers des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes ont une puissance de 1 à 5 MW, plus de la moitié de 5 à 30 MW et le reste (20 % seulement) dépassent 30 MW.

Le flux neutronique est un paramètre déterminant de la capacité de production d'isotopes d'un réacteur. La presque totalité des réacteurs de recherche où l'on produit des isotopes possèdent un flux de neutrons thermiques supérieur à  $1.10^{13}$  neutron/cm<sup>2</sup> par seconde (n/cm<sup>2</sup>.s). Près d'un tiers des réacteurs sur lesquels nous possédons des informations se caractérise par un flux thermique inférieur à  $9 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>.s. Il s'agit principalement de machines appartenant à des universités et des centres de recherche qui s'en servent d'abord pour la recherche scientifique et produisent accessoirement des isotopes à usage interne ou national. Plus de la moitié des réacteurs sur lesquels nous avons obtenu des informations ont des flux thermiques de l'ordre de 1 à  $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>.s. Ces machines polyvalentes sont affectées à des travaux de recherche et développement à l'appui des programmes électronucléaires et produisent des isotopes destinés, pour l'essentiel, aux marchés locaux et régionaux.

Les réacteurs à haut flux neutronique (à savoir, ceux qui ont un flux thermique supérieur à  $5 \times 10^{14}$  neutrons par cm<sup>2</sup> par seconde) sont indispensables pour produire certains radio-isotopes d'activité massique suffisante comme le <sup>60</sup>Co (de forte activité massique), le <sup>75</sup>Se, le <sup>188</sup>W et le <sup>252</sup>Cf. Cinq de ces réacteurs, inclus dans les totaux figurant sur le tableau 5, sont en service en Belgique, en Chine, en Russie et aux États-Unis, comme le montre le tableau 6.

Tableau 6. Répartition géographique des réacteurs à haut flux (5 au total)

Pays	Nombre	Nom (site)
Belgique	1	BR2 (Mol)
Russie	2	SM3 (Dimitrovgrad) MIR-M1 (Dimitrovgrad)
États-Unis	1	HFIR (Oak Ridge)
Chine	1	HFETR (Chengdu)

L'âge et le calendrier de fermeture des réacteurs de recherche qui produisent des isotopes sont des éléments déterminants si l'on cherche à évaluer la sécurité d'approvisionnement futur. D'après les réponses qui nous ont été communiquées, près de la moitié des réacteurs de recherche producteurs d'isotopes a atteint 30 à 40 ans et rares sont ceux qui ont moins de dix ans. Dans les pays Membres de l'OCDE, la proportion de réacteurs âgés (de plus de 20 ans) dépasse 50 %. Une forte proportion d'entre eux dépasse 30 MW. Près d'un tiers des exploitants viennent de procéder à une remise à niveau ou envisagent des travaux de modernisation d'ici cinq ans. Pendant la fermeture des réacteurs pour travaux (normalement d'une durée de six mois à un an), la capacité de production d'isotopes diminuera, mais ces opérations de modernisation contribueront à renforcer la sécurité d'approvisionnement à long terme. Il est prévu de fermer définitivement trois réacteurs avant 2002. Ces réacteurs devraient être remplacés par des nouvelles machines, en général plus puissantes. En juillet 2000, l'Australie a signé un contrat prévoyant la construction d'un réacteur de remplacement avec un flux thermique supérieur à  $3 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>.s. La France envisage également de remplacer un ancien réacteur par une nouvelle machine entre 2005 et 2010.

L'importance de la production d'isotopes par rapport à l'utilisation globale des réacteurs de recherche varie considérablement. Dans la mesure où l'on peut se fier à l'image donnée par les réponses au questionnaire, il apparaît que la part de la production d'isotopes, mesurée en temps de fonctionnement et en revenu, est inférieure dans les pays Membres de l'OCDE à ce qu'elle est dans les pays non-membres. En général, cette production est moins importante dans les réacteurs de grande puissance que dans les machines de faible et moyenne puissance.

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

La majorité des réacteurs de recherche qui produisent des isotopes sont équipés d'installations de stockage, de conditionnement et/ou de prétraitement de l'isotope brut sortant du réacteur, avant son transport et sa livraison à une installation de traitement ou au client final. Une grande majorité de ces réacteurs possèdent des capacités de stockage des radio-isotopes sur le site même du réacteur ou à proximité, ainsi que des cellules chaudes. Dans près de la moitié d'entre eux, il existe des possibilités de chargement/déchargement pendant le fonctionnement.

### **3.1.2 Centrales nucléaires**

Les centrales nucléaires sont utilisées pour produire des radio-isotopes dans certain pays, comme l'Argentine, le Canada, la Hongrie, l'Inde et la Russie. Le seul isotope important qui y est produit est le  $^{60}\text{Co}$ . En outre, au Canada, on récupère le tritium ( $^3\text{H}$ ) contenu dans l'eau lourde qui sert de caloporteur des réacteurs de puissance.

## **3.2 Accélérateurs**

En règle générale, les accélérateurs sont utilisés pour obtenir des isotopes pauvres en neutrons par bombardement protonique. 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 machines sont dédiées à la production des isotopes médicaux utilisés pour la tomographie d'émission monophotonique (TEMP) ou la tomographie par émission de positons (TEP). Pour les besoins de cette étude, nous avons divisé en trois catégories les accélérateurs produisant des isotopes : les accélérateurs dédiés à la production de radio-isotopes à usage médical (essentiellement le TEMP), les cyclotrons utilisés pour la TEP, et les accélérateurs polyvalents. On trouvera à l'annexe 7 des détails sur les principaux accélérateurs producteurs d'isotopes regroupés par catégorie et par pays.

### **3.2.1 Accélérateurs dédiés à la production de radio-isotopes à usage médical**

Il existe aujourd'hui plus de 200 accélérateurs (cyclotrons) consacrés exclusivement à la production de radio-isotopes destinés à des applications essentiellement médicales. Sur ce total, 170 cyclotrons produisent les isotopes nécessaires aux tomographes et sont associés à des centres TEP.

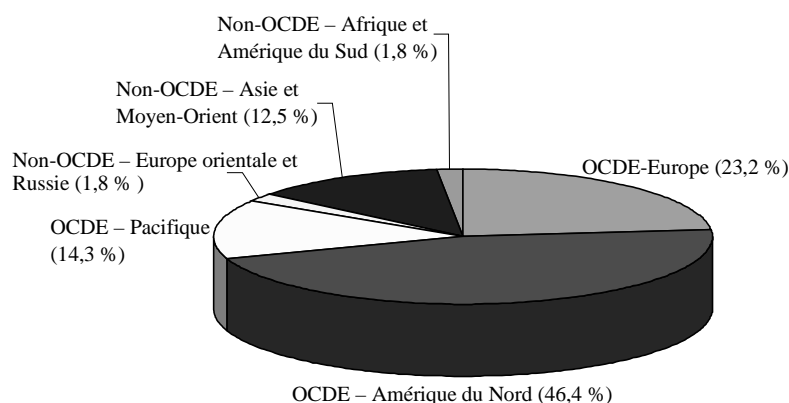
### 3.2.1.1 Cyclotrons produisant des isotopes pour des applications médicales (essentiellement la TEMP)

Il existe une soixantaine de cyclotrons dédiés à la production de radio-isotopes à usage médical dans 20 pays, dont 11 sont Membres de l'OCDE. Les trois quarts de ces machines se trouvent dans des pays Membres de l'OCDE, soit la moitié en Amérique du Nord et près d'un quart en Europe, contre 10 machines dans les pays non-membres (voir tableau 7 et figure 4). L'équipement de certains pays s'explique par la taille de la demande nationale et/ou par l'insuffisance des sources étrangères qui leur fournissent les radio-isotopes dont a besoin leur secteur médical. Les principaux isotopes produits par ces cyclotrons sont le  $^{67}\text{Ga}$ , l' $^{111}\text{In}$ , l' $^{123}\text{I}$  et le  $^{201}\text{Tl}$ . Dans la plupart des cas, ces machines sont également capables de produire les isotopes utilisés par la TEP.

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

Région (pays)	Nombre		
	Total	Privé	Public
OCDE – Europe	13	12	1
OCDE – Amérique du Nord	26	26	0
OCDE – Pacifique	8	6	2
Non-OCDE – Europe orientale et Russie	1	0	1
Non-OCDE – Asie et Moyen-Orient	8	0	8
Non-OCDE – Afrique et Amérique du Sud	3	0	3
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>44</b>	<b>15</b>

Figure 4. Répartition géographique des cyclotrons dédiés à la production d'isotopes médicaux



Dans la pratique, tous les cyclotrons produisant des isotopes à des fins médicales sont construits par un petit nombre d'entreprises commerciales. Les entreprises privées exploitent environ 75 % de ces machines, et cinq entreprises contrôlent la moitié du total. Cependant, des machines appartenant au secteur public sont également en service dans certains pays.

La demande des cyclotrons classiques actuels, de la 3<sup>ème</sup> génération, c'est-à-dire à ions négatifs, est parvenue à un palier. Néanmoins, comme les machines anciennes doivent être remplacées, de 1 à 3 cyclotrons de ce type sont construits chaque année d'après les estimations.

### 3.2.1.2 Cyclotrons destinés à des applications spéciales

On note une augmentation de la demande de cyclotrons consacrés exclusivement à la production d'isotopes particuliers, comme le <sup>103</sup>Pd. Cette demande s'explique par les caractéristiques techniques de la production de certains isotopes, qui nécessite soit un faisceau de très grande intensité, soit une combinaison de facteurs telle qu'il reviendrait trop cher de fabriquer et d'exploiter une machine polyvalente (adaptée à la production de plusieurs isotopes). Les machines de ce type qui étaient déjà en service à la fin de l'année 1999 ont été prises en compte dans le tableau 7.

### 3.2.1.3 Cyclotrons produisant des isotopes destinés à la TEP

Il est fréquent que les cyclotrons produisant des isotopes pour la tomographie par émission de positons soient construits et exploités à proximité de centres TEP. Cette proximité est exigée par la courte période radioactive des isotopes utilisés par les caméras TEP. Les principaux radio-isotopes produits par ces cyclotrons sont ceux qui sont indispensables pour faire fonctionner les caméras à émission de positons, à savoir le <sup>11</sup>C, le <sup>13</sup>N, l'<sup>15</sup>O et le <sup>18</sup>F.

Vingt-trois pays dans le monde, dont 18 Membres de l'OCDE exploitent aujourd'hui près de 170 machines de ce type, dont on peut voir la répartition géographique sur le tableau 8 et la figure 5. Environ 90 % des cyclotrons dédiés à la TEP se trouvent donc dans des pays Membres de l'OCDE. Le petit nombre de centres TEP dans les pays non-membres s'explique essentiellement par la lente adaptation des systèmes de santé de ces pays aux technologies avancées.

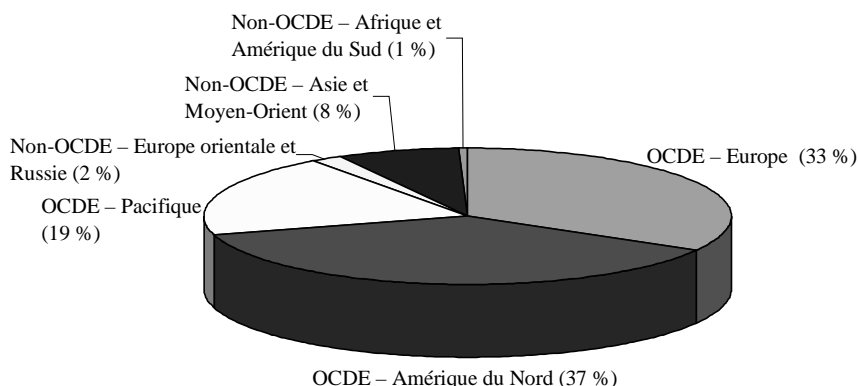
Tableau 8. **Distribution géographique des cyclotrons pour la TEP**

Région (pays)	Nombre
OCDE – Europe	56
OCDE – Amérique du Nord	62
OCDE – Pacifique	33
Non-OCDE – Europe orientale et Russie	3
Non-OCDE – Asie et Moyen-Orient	12
Non-OCDE – Afrique et Amérique du Sud	1
<b>Total</b>	<b>167</b>

Une forte proportion des cyclotrons utilisés pour la TEP est exploitée par des entreprises publiques dans des centres TEP qui sont eux-mêmes publics. Cependant, on note une tendance à la privatisation de ce type d'équipements et, d'une manière générale, de l'infrastructure et des services médicaux. Aujourd'hui, la technologie de la tomographie par émission de positons est bien implantée, et il n'existe pas d'obstacles financiers ou institutionnels importants à la mise en place de centres TEP. Bien que l'État reste un acteur essentiel des systèmes de santé et le premier responsable de la réglementation, le secteur privé investit de plus en plus ce domaine à mesure qu'augmente la demande

de services fournis par les centres TEP, du moins dans certains pays. On estime que 10 à 15 cyclotrons destinés à la TEP sont construits chaque année dans le monde. La demande de ce type de machines devrait augmenter sensiblement dans les prochaines années.

Figure 5. Répartition géographique des cyclotrons pour la TEP



### 3.2.2 Accélérateurs non dédiés à la production d'isotopes médicaux

Parmi les accélérateurs qui produisent des isotopes tout en n'étant pas exclusivement consacrés à cette activité, on distingue les accélérateurs de haute énergie (entre 180 et 800 MeV) et les accélérateurs d'énergie moyenne (entre 25 et 130 MeV). Les accélérateurs de haute énergie sont utilisés essentiellement pour produire du  $^{64}\text{Cu}$ , du  $^{67}\text{Cu}$ , du  $^{82}\text{Sr}$  et du  $^{127}\text{Xe}$ , isotopes pour lesquels ils sont les plus efficaces. Deux de ces machines sont en service aux États-Unis, ainsi qu'une au Canada et une autre en Suisse. On trouvera à l'annexe 3 la liste des principaux isotopes produits dans ces accélérateurs de haute énergie.

Bien qu'ils servent essentiellement à des activités de recherche, certains cyclotrons de 25 à 130 MeV produisent également des isotopes (se reporter à l'annexe 3 pour en trouver la liste). Le tableau 9 présente la répartition géographique de ces cyclotrons.

Tableau 9. Répartition géographique des accélérateurs non dédiés à la production d'isotopes

Région	Nombre
OCDE – Europe	15
OCDE – Amérique du Nord	4
OCDE – Pacifique	2
Non-OCDE (Afrique du Sud, Brésil, Inde, Kazakhstan, Russie)	8
<b>Total</b>	<b>29</b>

### 3.3 Séparation des radio-isotopes

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

Le principal isotope produit par cette méthode est le  $^{99}\text{Mo}$ , isotope utilisé comme parent dans les générateurs de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , largement employés en médecine nucléaire. Étant donné que les utilisateurs ont besoin aujourd'hui de  $^{99}\text{Mo}$  de haute activité massique, cet isotope est essentiellement produit par séparation des produits de fission résultant de l'irradiation de cibles d' $^{235}\text{U}$  dans des réacteurs. L'Afrique du Sud, la Belgique, le Canada et les Pays-Bas notamment possèdent des installations où l'on produit de grandes quantités de  $^{99}\text{Mo}$  par séparation des produits de fission. Il existe d'autres producteurs, de taille moyenne, en Australie et dans les pays européens n'appartenant pas à l'OCDE. Certaines de ces installations produisent également d'autres isotopes comme l' $^{131}\text{I}$  et le  $^{133}\text{Xe}$ . Les États-Unis ont construit une nouvelle installation de production de  $^{99}\text{Mo}$ , actuellement sous cocon sans avoir été mise en service.

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

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

Ces usines produisent un certain nombre de radio-isotopes lourds destinés à diverses applications. La technologie mise en œuvre est relativement complexe, et les volumes produits assez faibles par rapport au stock traité. On trouvera sur 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
OCDE – Europe (Allemagne, Royaume-Uni)	2	$^{213}\text{Bi}$ , $^{225}\text{Ac}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , $^{243}\text{Am}$
OCDE – Amérique du Nord (États-Unis)	3	$^{225}\text{Ac}$ , $^{229}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{242}\text{Pu}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{249}\text{Bk}$ , $^{252}\text{Cf}$
Non-OCDE – Europe (Russie)	4	$^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , $^{252}\text{Cf}$
<b>Total</b>	<b>9</b>	

Suivant les progrès et la pénétration sur le marché de nouvelles applications prometteuses, la demande d'isotopes émetteurs alpha, en particulier des systèmes  $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$  et  $^{212}\text{Bi}$ , pourrait augmenter. Aujourd'hui la production de ces isotopes n'est pas limitée par la disponibilité des réacteurs de recherche, mais par celle des matériaux sources indispensables. Dans le cas de l' $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ , c'est l'offre du matériau source, à savoir le  $^{229}\text{Th}$ , dérivé de l' $^{233}\text{U}$  ou produit par irradiation du  $^{226}\text{Ra}$ , qui est le facteur limitatif. Pour le système  $^{212}\text{Bi}$ , l'offre de l'isotope parent, le  $^{228}\text{Th}$  (dérivé de l' $^{232}\text{U}$ ), conditionne la disponibilité de l'isotope voulu. Pour ces deux systèmes, on



dispose à l'heure actuelle de quantités limitées de matériaux sources, mais il en faudra davantage si l'on veut assurer la sécurité d'approvisionnement à l'avenir.

### 3.4 Production d'isotopes stables

Plusieurs techniques de séparation servent à produire approximativement 300 isotopes stables différents de quelque 60 éléments. En général, ces isotopes stables se distinguent selon qu'ils sont lourds (soufre et numéros atomiques supérieurs) ou légers. Les techniques de séparation mais aussi les obstacles financiers et institutionnels varient considérablement selon que les isotopes appartiennent à l'un ou à l'autre de ces groupes. Les techniques de séparation applicables aux isotopes stables lourds peuvent être utilisées, et l'on a, pour séparer des matières fissiles et sont, de ce fait, soumises à des contrôles internationaux très sévères. En revanche, les technologies utilisées pour séparer les isotopes stables légers sont plus faciles à mettre en œuvre et moins « sensibles ».

#### 3.4.1 Isotopes stables lourds

Les isotopes stables lourds sont aujourd'hui produits par deux techniques : le procédé de séparation électromagnétique ancien et très adaptable, faisant appel à des spectromètres de masse dédiés, appelés 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. Les deux techniques étant très complexes, tout producteur qui voudrait s'installer sur ce marché devrait franchir des obstacles pour ainsi dire insurmontables. Les producteurs d'isotopes stables lourds sont donc très peu nombreux. Les installations appartiennent en général au secteur public, à l'exception d'une usine d'enrichissement aux Pays-Bas, dont en fait les pouvoirs publics détiennent un petit pourcentage. On trouvera sur le tableau 11 la répartition géographique des installations de production d'isotopes lourds.

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

Région (pays)	Exploitant	Technologie
<i>OCDE – Europe</i> Pays-Bas	Urenco	Centrifugation
<i>OCDE – Amérique du Nord</i> États-Unis	Isotec Inc. Oak Ridge Nat. Lab./DOE	Thermodiffusion en phase liquide Séparation électromagnétique
<i>Non – OCDE</i> Chine Russie	CIAE Centrotech ECP, St. Petersburg ECP Jelenogorsk, Krasnoïarsk Institut Kourchatov, Moscou SCC Groupe sibérien, Tomsk EKPC, Sverdlovsk OKB GAZ, Nijni Novgorod VNIIEF, Nijni Novgorod	Séparation électromagnétique Centrifugation Centrifugation Sép. électromagnétique, Centrifugation Centrifugation Séparation électromagnétique Centrifugation Centrifugation

Les producteurs d'isotopes faisant appel au procédé de séparation électromagnétique utilisent des installations relativement anciennes, coûteuses à exploiter, avec les risques que cela comporte pour la

sécurité d'approvisionnement. En revanche, les producteurs qui ont recours à la méthode de centrifugation, ont l'avantage d'exploiter un matériel plus moderne et moins onéreux. Toutefois, cette technique est moins polyvalente et ne permet pas de produire une large gamme d'isotopes stables. Par ailleurs, l'importance des producteurs russes sur le marché mondial est une source de préoccupation supplémentaire. Sachant les problèmes financiers et organisationnels que connaît ce pays, il y a lieu de s'interroger sur l'aptitude de ces producteurs à assurer une fourniture suffisante.

D'autres technologies de production d'isotopes stables lourds ont été, et sont encore, étudiées, dont la technologie laser, une diversité de procédés de séparation dans un plasma ainsi que quelques systèmes de séparation chimique.

### ***3.4.2 Isotopes stables légers***

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

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

La présente étude et celle réalisée en 1998 nous ont permis de dégager des dominantes dans l'évolution générale des applications bénéfiques et de la production des isotopes. Il convient de souligner néanmoins que ni l'étude de 1998 ni celle d'aujourd'hui n'étaient exhaustives et que certains aspects n'ont probablement pas été examinés en détail, notamment au niveau régional.

Pour ce qui est des applications des isotopes; les tendances varient d'un secteur à l'autre mais l'on constate, dans l'ensemble, une augmentation de la demande de nombreux isotopes. Plusieurs applications récentes se développent, et avec elles la demande d'isotopes, et des innovations voient le jour qui exigent la production de « nouveaux » isotopes, c'est-à-dire d'isotopes qui jusque là n'avaient pas d'application importante.

Côté production, l'évolution est assez lente en raison des délais nécessaires à la mise en service, la modification et la rénovation de la plupart des grandes installations de production. Par exemple, il faut plusieurs années pour construire des réacteurs de recherche ou des usines de production d'isotopes stables lourds, obtenir les autorisations nécessaires et mettre en service les installations. Les cyclotrons dédiés à la production de radio-isotopes médicaux peuvent, certes, être mis en route plus rapidement mais, dans l'ensemble, l'adaptation des capacités de production d'isotopes demande du temps.

### 4.1 Évolution de l'utilisation des isotopes

Échappant à toute généralisation, l'évolution des utilisations des isotopes varie d'un secteur à l'autre ainsi que d'une région à l'autre.

Globalement, dans le domaine médical, les isotopes sont de plus en plus utilisés pour des applications très diverses. Les isotopes radioactifs et stables sont un outil essentiel d'une multiplicité d'actes médicaux, diagnostiques comme thérapeutiques. Par rapport à leurs concurrents ils possèdent des propriétés originales et, avec le temps, se sont imposés dans les systèmes de santé en tant que moyens efficaces et rentables de détecter et/ou de soigner un grand nombre d'affections. Cependant, les tendances varient pour chaque application spécifique, allant d'un déclin progressif, par exemple dans le cas de la cobalthérapie, à une nette progression, dans celui de la brachythérapie. Le développement de nouvelles applications, comme les soins palliatifs, vient grossir la demande des isotopes auparavant utilisés ainsi que celle des nouveaux isotopes.

Dans la sphère thérapeutique, on retiendra, parmi les nouvelles évolutions, une croissance de la demande d'implants de brachythérapie et une plus large utilisation des radio-isotopes pour les soins palliatifs. De même, l'usage de plusieurs isotopes traditionnellement employés en médecine, comme  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  et  $^{192}\text{Ir}$ , se répand. On a vu apparaître une demande pour de nouveaux isotopes, comme le  $^{103}\text{Pd}$ , le  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  ou le  $^{166}\text{Ho}$ . L'offre d'isotopes employés à des fins thérapeutiques n'a pourtant rien de préoccupant, étant donné que les capacités de production actuelles sont suffisantes et facilement adaptables. Les coûts de production ne posent pas non plus un problème majeur dans ce

domaine, étant donné l'importance limitée du coût de la matière première dans le prix total de l'acte médical. Ces prix devraient néanmoins déterminer la répartition des parts de marché entre les différents producteurs.

Dans le domaine de l'imagerie nucléaire, la demande d'isotopes pour la TEP s'est envolée, tendance qui devrait se poursuivre. La demande du  $^{18}\text{F}$ , le marqueur radioactif du FDG, est en augmentation depuis que cette technique a fait la preuve de son efficacité pour la détection des stades d'évolution de divers cancers. S'agissant de l'imagerie gamma, la demande de  $^{99}\text{Mo}$  (isotope parent du  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) est soutenue. Toutefois, la croissance future de la demande d'isotopes utilisés pour l'imagerie dépendra en grande partie des politiques des pouvoirs publics concernant la prévention médicale, en général, et la médecine nucléaire, en particulier. Les analyses coût-avantages exhaustives démontrent, en général, la supériorité économique de la prévention sur le traitement (par exemple, en termes de productivité de la main-d'œuvre), outre l'avantage social évident que procure une meilleure qualité de vie. Pour le développement de ces actes médicaux, la reconnaissance par la sécurité sociale des techniques d'imagerie nucléaire, en d'autres termes, le remboursement des dépenses correspondantes, constitue une étape majeure. De ce point de vue, les situations varient d'un pays à l'autre et peuvent demeurer contrastées. En particulier, il est probable que la pratique de l'imagerie nucléaire s'implantera plus lentement dans les pays en développement que dans les pays Membres de l'OCDE.

S'agissant de l'ensemble des applications industrielles, la demande d'isotopes est relativement stable. Pourtant, dans de nombreux secteurs industriels, les isotopes sont en concurrence avec d'autres techniques, telles que les rayons X, les ultrasons, le laser et le radar, même pour les usages où ils sont bien établis. Certaines applications spécifiques, comme certains types de jauges radiométriques, marquent le pas, tandis que d'autres trouvent de nouveaux créneaux sur les marchés.

Le secteur de l'irradiation des aliments mérite qu'on s'y attarde, étant donné que l'évolution de la demande pourrait bien changer du tout au tout dans quelques années. La conservation des aliments représente une énorme demande potentielle dans le monde entier. Il suffirait en effet que les autorités responsables de la protection sanitaire l'autorisent et que les consommateurs l'acceptent, pour que cette technologie assez bon marché et facile à utiliser trouve un marché considérable. Dans ce domaine, le recours aux isotopes se heurte aux réglementations nationales qui, dans de nombreux pays, n'autorisent pas la distribution et la consommation de produits alimentaires irradiés. Les mesures prises récemment pour alléger les restrictions en vigueur, aux États-Unis en particulier, pourraient faciliter la pénétration des irradiateurs d'aliments sur le marché et créer une nouvelle demande représentant d'importantes quantités de sources de  $^{60}\text{Co}$  de faible activité massique.

S'agissant des applications scientifiques, la demande d'isotopes est liée à l'évolution des programmes de recherche fondamentale. Ce secteur se caractérise par sa diversité, par le fait que les types d'isotopes employés changent souvent et par les petits volumes concernés, ce qui rend difficile la prévision de la demande future. L'utilisation des isotopes dans la recherche scientifique dépendra aussi des possibilités pour les laboratoires locaux et régionaux de se procurer un large éventail d'éléments isotopiques.

La demande d'isotopes stables enrichis destinés à des usages biomédicaux, industriels et scientifiques progresse et pourrait augmenter davantage, que ce soit pour des applications anciennes, nouvelles ou en gestation. Les isotopes stables qui servent à produire des radio-isotopes suivent les tendances de la demande des radio-isotopes eux-mêmes. Les isotopes stables utilisés en tant que tels sont de plus en plus employés en médecine ainsi que pour la recherche en biologie et sciences du vivant, notamment. De plus, il existe en puissance de nombreuses possibilités intéressantes de développer les applications des isotopes stables lorsque la fourniture pourra être assurée à des prix raisonnables.

Si les utilisateurs, notamment dans le domaine médical, mais aussi dans de nombreux secteurs industriels, sont parfaitement conscients des avantages des isotopes, les craintes du public concernant la radioactivité incitent indubitablement à chercher d'autres solutions. En témoignent les tendances passées qui montrent que les isotopes ne sont pas privilégiés lorsqu'il existe d'autres solutions. C'est pourquoi, pour conserver, voire augmenter leur part du marché, quelle que soit l'application concernée, les isotopes doivent rester nettement plus efficaces et/ou meilleur marché que leurs concurrents. Il faut reconnaître, par ailleurs, que l'emploi de sources radioactives scellées et/ou d'irradiateurs exige la mise en place d'un système strict de sûreté et de radioprotection pour garantir une protection adéquate de l'homme et de l'environnement. Les incidents répétés ainsi que les quelques rares accidents, très médiatisés, qui se sont produits, tant dans les pays de l'OCDE que dans les pays non-membres, accentuent probablement la réticence que manifeste le public à l'égard des applications bénéfiques des isotopes.

Par ailleurs, le transport et la distribution des isotopes, aux niveaux local et international, soulèvent quelques problèmes juridiques et commerciaux susceptibles de nuire à la fiabilité et à la sécurité de l'approvisionnement en isotopes. Les réglementations concernant les conteneurs et les transports, bien que fondées sur des principes communs, ne sont pas reconnues partout dans le monde quand elles ne varient pas d'un pays à l'autre. Des efforts supplémentaires au niveau législatif permettraient d'atténuer le risque de rupture de la fourniture internationale d'isotopes que pourrait entraîner cette absence d'harmonisation des normes et règles. Étant donné la complexité et les coûts du transport international, notamment de radio-isotopes à périodes relativement courtes (par exemple, de moins de trois jours), la qualité de la distribution ainsi qu'une bonne répartition mondiale des installations de fabrication deviennent des facteurs vitaux pour la continuité de la fourniture.

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

Les tendances de la production d'isotopes varient en fonction du type de l'installation de production et de la région. En particulier, l'évolution ne sera pas la même s'il s'agit d'installations dédiées à la production d'isotopes, comme des cyclotrons utilisés pour fabriquer des isotopes médicaux, ou d'installations qui produisent accessoirement des isotopes, comme la plupart des réacteurs de recherche. L'évolution diffère également suivant la participation de l'État à la construction et à l'exploitation des diverses installations de production. Pour ce qui est des réacteurs de recherche, qui sont en général exploités à des fins scientifiques et où les isotopes représentent une activité connexe, les tendances seront le fruit des politiques de recherche nucléaire.

Certains radio-isotopes ne peuvent être produits que dans des installations spécifiques en service dans un nombre limité de pays dont la production, indispensable pour assurer l'approvisionnement mondial, dépend essentiellement des politiques suivies par les pays en question. Il en va ainsi du  $^{252}\text{Cf}$  et du  $^{60}\text{Co}$  de haute activité massique utilisés pour les applications médicales et produits exclusivement dans les réacteurs à haut flux neutronique.

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. Dans les pays européens de l'OCDE, trois réacteurs (Astra en Autriche, Osiris en France et le FRM en Allemagne) seront fermés dans les dix prochaines années et remplacés par des machines plus puissantes, mais qui ne sont pas conçues spécifiquement pour produire des isotopes.

En Asie, où la demande augmente, de nouveaux réacteurs sont construits et mis en service. Toutefois, ces réacteurs sont des installations polyvalentes dont on ne peut 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 concernée.

En Amérique du Nord, les réacteurs de recherche vieillissent, et il n'est pas toujours prévu de les remplacer. Toutefois, les deux nouveaux réacteurs de 10 MW dédiés à la production d'isotopes qui doivent entrer en service au Canada en 2000 pourraient contribuer à la sécurité d'approvisionnement. Ces unités, qui appartiennent au secteur privé, peuvent produire chacune d'importantes quantités de  $^{99}\text{Mo}$  (c'est-à-dire plusieurs fois la demande mondiale actuelle d'après le propriétaire de l'installation), mais aussi de l' $^{125}\text{I}$ , de l' $^{131}\text{I}$  et du  $^{133}\text{Xe}$ .

Il est difficile de prévoir l'évolution dans les pays européens non-membres de l'OCDE, en particulier en Russie, étant donné que peu de pays de la région ont répondu au questionnaire qui leur avait été communiqué et que les données publiées sur la production et/ou les capacités actuelles ou futures de la région sont rares. En Russie, un tiers des réacteurs qui produisent aujourd'hui des isotopes devraient être fermés d'ici 2005 car ils seront trop vieux ou trop chers à exploiter. De plus, il n'est pas certain que l'on investira dans de nouvelles installations pour produire des isotopes dans la région.

Le petit nombre de réacteurs à haut flux neutronique en service aujourd'hui permet de s'interroger sur leur capacité de fournir des isotopes que d'autres réacteurs ne peuvent pas produire et qui revêtent une importance vitale pour certaines applications non commerciales.

S'agissant des isotopes pauvres en neutrons produits dans les accélérateurs, il est plus facile d'adapter la capacité de production à la demande car l'on peut construire et mettre en service des accélérateurs plus vite que des réacteurs. Pour répondre à une hausse de la demande, il suffit de deux ans pour commander et mettre en service des cyclotrons produisant des isotopes à des fins médicales. Les investisseurs sont attirés sur ce secteur par la perspective de la croissance du marché des usages médicaux faisant appel aux radiopharmaceutiques. Toutefois, la demande dépendra du système de santé qui existe dans le pays (la couverture sociale). Dans de nombreux pays industrialisés, où l'imagerie nucléaire est remboursée par l'assurance maladie, la demande progresse régulièrement et la production augmente dans les mêmes proportions puisque les cyclotrons peuvent être exploités selon des principes commerciaux par des entreprises privées. Ailleurs, la construction de cyclotrons sera essentiellement conditionnée par la mise en place de systèmes de santé assurant la couverture des actes médicaux faisant appel à des radiopharmaceutiques.

Dans le domaine de la TEP, la production suit l'envol de la demande. La généralisation de la TEP dans un pays dépend essentiellement des politiques publiques en matière de recherche médicale ainsi que du remboursement de ces actes médicaux par la sécurité sociale. Pour dépasser le stade actuel de la recherche et de la construction de prototypes et faire de la tomographie par émission de positons une pratique courante, utilisée de façon uniforme dans tous les pays, de nouveaux progrès sont nécessaires.

Grâce au programme de production de tritium des États-Unis, la sécurité d'approvisionnement à court terme de cet isotope produit par les accélérateurs linéaires sera assurée, si c'est cette technique qui est adoptée. Le tritium peut être également obtenu en grandes quantités d'une installation canadienne de traitement de l'eau lourde utilisée comme caloporteur dans les réacteurs Candu.

La production de  $^{60}\text{Co}$  de haute activité massique destiné à des applications médicales pourrait devenir problématique, car les trois usines de production exploitées en Europe occidentale et en Amérique du Nord devraient être fermées sous peu (dans les trois prochaines années).

La production de certains isotopes, comme le  $^{90}\text{Sr}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ , qui sont obtenus par séparation 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 des déchets de haute activité dans les usines de retraitement du combustible usé. Cependant, à court et à moyen terme, il n'existe pas de problème d'approvisionnement majeur.

Les isotopes stables légers sont produits dans une multitude d'installations dans divers pays. Il est tout à fait possible d'augmenter rapidement la capacité si besoin est. En revanche, la production d'isotopes stables lourds repose sur un très petit nombre d'installations et de pays. De plus, une bonne proportion de la demande de ces isotopes stables lourds est assurée par des prélèvements sur les stocks plutôt que par une séparation réelle. On peut donc s'interroger sur la disponibilité à moyen terme des isotopes stables lourds essentiels.

L'apparition de producteurs privés constitue l'évolution la plus marquante du secteur de la production d'isotopes. L'augmentation récente des capacités de production d'isotopes dans plusieurs régions démontre que le secteur commercial a réagi à la hausse de la demande ainsi qu'aux risques de pénurie de certains isotopes majeurs tels que le  $^{99}\text{Mo}$ . Aujourd'hui, la sécurité d'approvisionnement des principaux isotopes utilisés dans le domaine médical et industriel ne semble plus poser de problème à court et à moyen terme. Toutefois, il importe de prévoir un mécanisme de sécurité assurant, dans chaque pays, l'approvisionnement des utilisateurs de radio-isotopes à vie courte essentiels tels que le  $^{99}\text{Mo}$ , quels que soient les problèmes techniques (défaillance d'une installation) ou sociaux (grève) que pourraient rencontrer les producteurs.

## 5. ENSEIGNEMENTS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 5.1 Enseignements

Pour la présente étude nous avons centré les enquêtes et analyses sur les principaux problèmes identifiés lors de la première étude, publiée en 1998, concernant les utilisations et la production des isotopes. Nous nous sommes plus précisément efforcés de mettre à jour et de compléter les informations factuelles et de dégager des tendances propres aux diverses applications des isotopes et au secteur de la production. Les réponses au questionnaire ont montré l'intérêt des producteurs pour une telle enquête internationale mais aussi leur réticence à fournir des informations détaillées sur la production réelle. Les experts et les organisations qui ont participé à l'étude sont convenus de l'utilité de revoir périodiquement les usages et la production des isotopes. Étant donné le rythme auquel évolue ce secteur, une mise à jour tous les trois ou quatre ans semblerait justifiée.

La présente étude confirme le rôle majeur de l'État et des organismes publics dans ce domaine. Les politiques nationales, en matière de recherche et de développement et de santé, par exemple, restent un catalyseur essentiel de la demande d'isotopes et, bien que dans une moindre mesure, de la production. Cependant, on note une participation accrue des entreprises privées ainsi que l'adoption de modes de gestion plus commerciaux dans les activités liées à la production et aux utilisations des isotopes.

La collaboration internationale s'impose comme une voie essentielle pour optimiser l'utilisation des capacités de production et assurer la sécurité d'approvisionnement. Les organisations gouvernementales internationales peuvent contribuer à assurer une bonne circulation des informations et à renforcer la collaboration internationale dans ce domaine. Vu l'importance des échanges internationaux pour la fourniture des diverses régions de la planète, il serait peut être bon d'harmoniser à l'échelle mondiale les normes et la réglementation applicables au transport des cibles irradiées et des produits isotopiques séparés.

#### 5.1.1 Applications des isotopes

Les deux études successives ont montré que les isotopes continuent d'être couramment utilisés dans de nombreux secteurs d'activité. La présente étude confirme l'absence d'informations complètes, notamment de données qualitatives et quantitatives sur les utilisations des isotopes dans les différents secteurs, et cela pour le monde entier. En particulier, il manque une évaluation fiable de l'importance économique globale des usages bénéfiques des isotopes.

Alors que les utilisations des isotopes évoluent en permanence, les diverses parties intéressées ont peu d'occasions d'évoquer les tendances de leurs secteurs respectifs, et cela vaut pour la plupart des applications, à l'exception notable du secteur médical. Dans une majorité de secteurs industriels, les applications des isotopes occupent des créneaux spécialisés et représentent de petits volumes d'activité même si elles sont essentielles à certains processus. Certaines applications marquent le pas, lorsque les isotopes sont remplacés par d'autres technologies plus efficaces et moins coûteuses, tandis



que des nouvelles voient le jour avec les progrès de la science et de la technologie. De ce fait, le recueil systématique et l'harmonisation, au niveau international, des données et indicateurs sur les utilisations des isotopes faciliteraient l'analyse des tendances mondiales ainsi que l'évaluation de la viabilité d'applications particulières.

### **5.1.2 Production d'isotopes**

Bien que les isotopes soient produits dans une multitude d'installations et d'ateliers de par le monde, il s'est avéré relativement facile d'établir une liste complète des installations de production. Par contre, la collecte de données quantitatives sur la production d'isotopes s'est révélée difficile lors des deux enquêtes réalisées en 1997 et 1999 par l'AEN et l'AIEA.

L'AIEA tient à jour une base de données des réacteurs de recherche en service dans le monde, qui constitue une bonne base pour les enquêtes sur la production d'isotopes. Cependant, comme ces isotopes sont souvent des sous-produits de l'exploitation des réacteurs de recherche, il n'a pas toujours été possible d'identifier les personnes responsables de la production d'isotopes dans ces réacteurs et *a fortiori* de les interroger. Le producteur d'isotopes est en effet souvent indépendant de l'exploitant du réacteur et peut d'ailleurs s'adresser à différents réacteurs pour obtenir les services dont il a besoin (irradiation d'une cible pour produire les isotopes voulus). De plus, les réponses au questionnaire qui nous sont parvenues étaient souvent incomplètes et ne couvraient pas, tant s'en faut, la totalité des informations demandées. C'est pourquoi, s'il a été facile de recueillir des informations sur les réacteurs de recherche produisant des isotopes, l'évaluation de la production réelle d'isotopes de ces réacteurs s'est révélée moins simple à réaliser.

Cette étude n'aborde pas la production du  $^{60}\text{Co}$  de faible activité massique destiné à la gammathérapie, effectuée à grande échelle dans les centrales nucléaires, en particulier dans les réacteurs à eau lourde, ni les détails de la production d'isotopes stables légers qui ne pose pas de problème d'approvisionnement majeur.

Les accélérateurs de haute énergie étant essentiellement utilisés pour la recherche, il est en général difficile d'obtenir des informations sur leur production d'isotopes, qui n'est qu'une activité secondaire. Les accélérateurs de faible et moyenne énergie, pour la plupart des cyclotrons, sont, en revanche, affectés exclusivement à la production d'isotopes. Toutefois, comme ils sont exploités à des fins essentiellement commerciales, les données sur leur production ne sont pas aisément accessibles en raison de leur caractère confidentiel.

Certains pays publient chaque année des statistiques sur leur production d'isotopes. Ces publications pourraient servir de point de départ pour lancer une enquête internationale et compiler les résultats afin d'obtenir des statistiques de portée mondiale.

La collaboration internationale pourrait être considérée comme un moyen efficace d'assurer une offre suffisante de certains isotopes, en particulier ceux destinés aux applications scientifiques qui ne représentent pas un marché commercial intéressant.

### **5.1.3 Rôle de l'État**

Les informations analysées dans cette étude mettent en lumière le rôle primordial du secteur public dans la production d'isotopes et, dans une moindre mesure, leur utilisation. Sans compter que,

dans tous les pays, c'est à l'administration qu'il incombe d'établir la réglementation et les normes applicables à la production, au transport et aux usages des isotopes.

Des organismes publics détiennent et exploitent la quasi-totalité des réacteurs de recherche, des grands accélérateurs et des grandes usines de séparation chimiques produisant des isotopes, mais aussi des installations nécessaires aux diverses applications des isotopes en médecine et en science. Les pouvoirs publics financent l'infrastructure indispensable à la production efficace et aux utilisations des isotopes. En particulier, il leur revient de garantir la disponibilité, à un coût raisonnable, des nouveaux isotopes dont ont besoin les chercheurs et que ne peuvent fournir les producteurs commerciaux. Ce sont eux également qui assurent la formation du personnel spécialisé indispensable pour ces activités.

Plusieurs entreprises privées détiennent et exploitent à leur usage exclusif quelques cyclotrons de taille moyenne produisant les principaux isotopes utilisés dans les applications médicales. Dans ce cas, le rôle des pouvoirs publics se borne à vérifier que la réglementation sur la sûreté est respectée.

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

Tous les pays ou presque sont tenus d'importer au moins les quelques isotopes qu'il ne produisent pas eux-mêmes, bien que la période radioactive de certains d'entre eux en limite le transport. De nombreux producteurs d'isotopes comptent sur des réacteurs exploités à l'étranger pour irradier les cibles. Certains isotopes ne sont produits que par un petit nombre de fournisseurs desservant une vaste clientèle étrangère. C'est pourquoi la collaboration internationale est importante pour assurer un bon approvisionnement en isotopes ainsi que l'accès à des informations complètes sur les capacités de production actuelles et futures.

À l'heure actuelle, la plupart des installations de production d'isotopes sont en service dans les pays de l'OCDE, qui en sont aussi les principaux utilisateurs. Les pays non-membres voient leur demande augmenter, mais leurs capacités de production risquent de ne pas se développer au même rythme que la demande.

#### **5.1.5 Coûts et prix**

Les installations spécialisées dans la production d'isotopes, comme les cyclotrons produisant des isotopes à des fins médicales, sont gérées selon des principes commerciaux, de sorte que les prix pratiqués intègrent la totalité des coûts. Dans le cas des réacteurs de recherche et des accélérateurs de haute énergie, qui ne se consacrent pas exclusivement à la production d'isotopes, le prix des isotopes ne reflète que le surcoût marginal de cette production. Les coûts globaux de l'installation, correspondant notamment aux investissements, à la sûreté, à la maintenance, au combustible, à la gestion des déchets et au démantèlement, sont à la charge des principaux utilisateurs, à savoir les programmes de recherche. Toutefois, il arrive que des réacteurs et accélérateurs non dédiés à la production d'isotopes soient exploités davantage comme des entreprises commerciales.

Étant donné que les conditions économiques diffèrent d'une région à l'autre, les coûts des isotopes produits avec la même technologie peuvent varier selon le pays producteur, ce qui incite les utilisateurs à s'approvisionner de préférence dans les régions où les prix sont les plus bas. Depuis peu, l'Europe de l'Est et, dans une moindre mesure, la Chine, remplacent progressivement l'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest pour la fourniture des isotopes utilisés comme matières premières, car ces

pays peuvent proposer des prix plus avantageux en raison des coûts peu élevés et/ou des subventions dont les producteurs bénéficient.

## 5.2 Conclusions

Le présent rapport est la deuxième édition d'une enquête générale sur les applications et la production d'isotopes dans le monde, réalisée conjointement par l'AEN et l'AIEA. Les informations qui y sont présentées se veulent, pour l'expert et le responsable des politiques concernées, une source de données factuelles qui puisse les aider à détecter d'éventuelles lacunes de l'offre d'isotopes destinés à une application donnée ou, au contraire, une surcapacité de production.

De nouveaux travaux pourraient éventuellement être entrepris au niveau national et international afin de recueillir des données fiables sur la demande d'isotopes dans tous les secteurs et pays concernés. Le cadre réglementaire mis en place dans chaque pays pour autoriser les utilisations des isotopes peut servir de source d'informations. Du côté de l'offre, les bases de données relatives aux réacteurs de recherche et accélérateurs en service contiennent une bonne partie des informations nécessaires. Il n'en reste pas moins que des données et évaluations supplémentaires sont nécessaires pour avoir une vision d'ensemble des capacités de production.

Pour certains isotopes, notamment ceux à vie courte ou possédant des caractéristiques particulières, l'équilibre de l'offre et de la demande doit s'effectuer au niveau régional. Dans le cas des isotopes à vie très courte, les capacités de production doivent coïncider avec la demande de la région. Cela vaut pour les isotopes employés pour la TEP qui doivent, en général, être produits à proximité du lieu où ils seront utilisés. S'agissant des autres isotopes, qui peuvent être transportés sur de longues distances et sont produits dans des machines et/ou des installations hautement spécialisées, il suffit de quelques installations dans un petit nombre de pays pour satisfaire la demande mondiale. La coopération et les échanges internationaux sont alors essentiels pour garantir une sécurité d'approvisionnement suffisante. Tous les pays font appel, du moins en partie, aux importations pour satisfaire leur propre demande. En particulier, l'équilibre de l'offre et de la demande à l'échelle nationale repose sur des échanges entre pays Membres de l'OCDE et pays non-membres.

La demande de radio-isotopes évolue au gré de l'apparition de nouvelles applications et de la disparition de certains usages. 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 (de l'ordre de deux ans pour des cyclotrons dédiés et de huit ans pour des réacteurs de recherche). Un suivi des prévisions de la demande et des capacités de production programmées s'impose donc au niveau mondial si l'on veut réduire le risque de rupture d'approvisionnement à l'avenir.

La demande d'isotopes stables, indispensables à certaines applications anciennes et nouvelles, est en augmentation. Tant que des usines d'enrichissement industrielles faisant appel à la technologie de centrifugation gazeuse continueront de fonctionner, la production de grandes quantités d'isotopes stables à des prix raisonnables devrait être assurée. Néanmoins, la poursuite de la production des isotopes stables qui ne peuvent être obtenus par la technique de la centrifugation gazeuse ainsi que des isotopes utilisés pour des applications scientifiques (R&D) peut soulever des problèmes.

L'étude a démontré l'importance pour le bien-être économique et social de la planète de l'utilisation des isotopes en médecine, dans l'industrie et dans la recherche. Ses enseignements et conclusions soulignent le rôle de l'État dans ce domaine ainsi que la nécessité d'intensifier les échanges d'informations et la coopération internationale pour garantir la disponibilité de tous les

isotopes indispensables aux divers secteurs. Des organisations internationales, comme l'AEN et l'AIEA, peuvent contribuer à renforcer ces échanges et cette collaboration.

### 5.3 Recommandations

Compte tenu de l'importance des isotopes en médecine, en science et dans l'industrie, et de leur impact actuel et futur sur le bien-être de la planète, il serait bon que les gouvernements poursuivent ou mettent en place des politiques favorisant une production d'isotopes à la mesure des besoins actuels et futurs prévisibles. L'intervention de l'État dans ce domaine peut venir compléter les mécanismes du marché, notamment pour la production des isotopes nécessaires à la recherche scientifique ou à des applications très avancées. Des organisations intergouvernementales, comme l'AEN et l'AIEA, peuvent apporter leur contribution en rassemblant et en compilant dans une base de données des informations pertinentes sur l'offre et la demande 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 des capacités de production évoluent en permanence, il paraît judicieux que des organisations intergouvernementales analysent les tendances mondiales et régionales à intervalles réguliers, par exemple tous les trois ou quatre ans. Ces analyses permettraient d'évaluer les possibilités d'assurer la fourniture d'isotopes à court, à moyen et à long terme mais aussi de mettre en évidence les actions et mesures spécifiques que les gouvernements pourraient envisager pour faciliter les échanges internationaux d'isotopes entre pays Membres et non-membres de l'OCDE et pour optimiser au niveau mondial les capacités de production.

Certains isotopes, comme le  $^{99}\text{Mo}$  et l' $^{192}\text{Ir}$ , ont des applications médicales ou industrielles vitales. Bien que le secteur privé et d'importantes organisations publiques en assurent généralement la production, toute pénurie pourrait avoir des conséquences dramatiques méritant l'attention des gouvernements. Il est donc préconisé que les gouvernements réfléchissent à des mesures adéquates pour garantir la continuité de l'approvisionnement en isotopes essentiels dans les domaines médical et/ou industriel, au cas où les mécanismes du marché ne suffiraient pas.

La production de certains isotopes particulièrement utiles pour les soins médicaux exige des réacteurs à haut flux neutronique et/ou des installations spéciales. La situation actuelle n'a pas lieu d'inquiéter étant donné qu'il existe suffisamment de réacteurs à haut flux en exploitation ou qui devraient être mis en service à court ou à moyen terme. Cependant, il serait bon de veiller à la continuité de la fourniture à long terme de ces isotopes en maintenant en exploitation les réacteurs et installations actuels qui peuvent être utilisés à cette fin et en planifiant en temps utile leur remplacement à la fin de leur durée de vie.

La recherche fondamentale en médecine, physique et sciences du vivant, sur laquelle reposent les progrès scientifiques, techniques et sociaux, a besoin de quantités suffisantes, généralement limitées, d'isotopes divers. Sachant qu'il est peu probable que la production de ces isotopes devienne une activité rentable, les pouvoirs publics auraient intérêt à prendre en charge l'infrastructure, l'équipement et le personnel nécessaires pour assurer la continuité de la fourniture de ces isotopes au niveau national et/ou régional.

La fourniture d'isotopes stables, qui sont de plus en plus utilisés pour des applications classiques mais aussi nouvelles, ne pose pas de problèmes à court terme étant donné que les usines d'enrichissement industrielles exploitant la technologie de centrifugation gazeuse devraient continuer à produire l'uranium enrichi dont a besoin le secteur électrique. Il est toutefois préconisé que les pays,

et en particulier ceux de l'OCDE, continuent de développer de nouvelles technologies et de construire des installations pour séparer les isotopes stables qui ne peuvent être obtenus par cette technique de centrifugation et pour, un jour, remplacer les usines de diffusion gazeuse.

Compte tenu de l'importance des échanges internationaux pour satisfaire les besoins en isotopes de la planète, il est recommandé d'harmoniser les réglementations et normes de production, de transport et d'utilisation des isotopes, ce qui facilitera ces échanges.

Avec la déréglementation et la privatisation de secteurs industriels traditionnellement sous la tutelle de l'État, la politique des pouvoirs publics concernant la production et les usages des isotopes évolue. Comme dans d'autres secteurs, on attend de la déréglementation économique des gains d'efficacité et des baisses des coûts. Il faudra donc intégrer au cadre de décision la dimension sociale du développement, particulièrement pertinente dans le cas de certaines applications des isotopes à la recherche, conformément aux objectifs nationaux d'ensemble.

Dans le passé, les usines de production d'isotopes, en partie financées par l'État dans le cadre de politiques globales de développement scientifique et social, ont contribué à l'avènement de la technologie, unique en son genre, des isotopes et à la mettre au service de l'humanité. C'est dans ce contexte qu'il convient d'évaluer le rôle des pouvoirs publics. S'il paraît justifié d'envisager des politiques de prix fondées sur le coût marginal de la production d'isotopes, essayer de récupérer la totalité des coûts, pour ce qui concerne les installations produisant accessoirement des isotopes, risque de compromettre la mise au point de divers usages bénéfiques des isotopes, en particulier en médecine et en science.

En revanche, dans de nombreux domaines et secteurs, notamment la production des isotopes médicaux, la demande est régulière et suffisamment importante pour justifier le fonctionnement d'installations dédiées et en garantir l'efficacité. Les mécanismes du marché sont déjà bien en place dans ces secteurs et ont montré qu'ils étaient capables d'assurer la production à des prix compétitifs.

Le panorama des utilisations des isotopes que nous avons présenté dans ce rapport contient essentiellement des informations qualitatives. Bien que le groupe d'experts soit conscient de l'intérêt d'une étude quantitative complète des utilisations des isotopes, il s'est avéré que la collecte de données fiables soulevait une série de problèmes à la fois méthodologiques et de fond, liés notamment à la cohérence entre secteurs et pays et à la confidentialité des informations commerciales.

C'est pourquoi, il serait souhaitable de procéder à un examen régulier des usages des isotopes, à travers le dépouillement de la littérature spécialisée, et de favoriser les échanges d'informations sur ce sujet lors de réunions ad hoc, de séminaires et de conférences consacrés, dans la mesure du possible, à un large éventail d'applications ainsi qu'aux moyens et installations de production.

*Annexe 1*

**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. Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (1998), *Usages Bénéfiques et Production des Isotopes*, OCDE, Paris, France.
13. Taylor, G.M. (1998), *Henkin: An Overview of Nuclear Medicine in the United States*, Nuclear News, vol. 41, n° 2, pp.30-34.
14. Lennox, A.J. (1998), *Medical Applications of Accelerators*, Nuclear News, vol. 41, n° 2, pp. 38-41.
15. Hladik III, W.B. (1998), *New Radiopharmaceuticals Used in Medicine*, Nuclear News, vol. 41, n° 2, p. 44.
16. Ripon, S. (1998), *Neutron Therapy at Germany's Oldest and Newest Reactors*, Nuclear News, vol. 41, n° 2, pp. 50-52.

17. Sauerwein, W., *et al.* (1998), *European Clinical Trials of Boron Neutron Capture Therapy for Glioblastoma*, Nuclear News, vol. 41, n° 2, pp. 54-56.
18. Garnett, H. (1998), *Radiopharmaceutical Usage – Asia/Pacific Trends*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.
19. Malkoske, G. (1998), *MDS-Nordion – A Canadian Radio-isotope Success Story*, *Science Advancing Health*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.
20. Banditsing, C. (1998), *Irradiation of Food and Industrial Products*, Proceedings of PNBC'98, Banff, Canada.
21. Diehl, J.F. (2000), *Achievements in Food Irradiation During the 20<sup>th</sup> Century*, Nuclear News, vol. 43, n° 5, pp. 28-30.

*Annexe 2*

**LISTE DES MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS**

***AUSTRALIE***

M. Stuart CARR ANSTO

***AUTRICHE***

M. Konrad MUCK ASTRA-Reaktor

***BELGIQUE***

M. David W. CLARK Ion Beam Applications (I.B.A.)  
M. Laurent MERLI I.R.E.  
M. Bernard PONSARD CEN/SCK-BR2 Reactor

***CANADA***

Mme Teresa S. BARICH MDS Nordion  
M. Phil LARABIE MDS Nordion

***ÉTATS-UNIS***

M. Jerry A. KLEIN (co-Président) Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

***FINLANDE***

M. Ari VIRTANEN Department of Physics

***FRANCE***

M. Alain ALBERMAN CEA/Saclay  
M. Jean-Louis BOUTAINE Laboratoire de recherche des musées de France  
M. Francois BRENIAUX CEA/Grenoble  
M. Jacques LAIZIER CEA/Saclay

***HONGRIE***

M. Akos PETO Hungarian Atomic Energy Authority

***ITALIE***

M. Geraldo CAPANNESI ENEA  
M. Mario PAGANINI FIORATTI Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente



**JAPON**

M. Hirokazu UMEZAWA (Président)

Office for Nuclear Safety Commission

**PAYS-BAS**

M. Kevin CHARLTON

Nuclear Research and consultancy Group (NRG)

M. Hubert RAKHORST

URENCO Nederland BV

**RÉPUBLIQUE TCHÈQUE**

M. Frantisek MELICHAR

Nuclear Physic Institute Academy of Science of  
Czech Republic

**ROYAUME-UNI**

M. Clive GOODALL

Nycomed Amersham

M. Dewi M. LEWIS

Nycomed Amersham

**SUISSE**

M. Pierre MULTONE

Office fédéral de l'énergie

**TURQUIE**

M. A. Fadil AKGUN

Turkish Atomic Energy Authority

**AIEA**

M. Hernan VERA-RUIZ

Head, Industrial Applications and Chemistry Section

**CE**

M. Joseph KONRAD

EC-Joint Research Centre Petten

**OCDE/AEN**

Mme Evelyne BERTEL (Secrétariat)

Division du développement de l'énergie nucléaire

Annexe 3

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

Radio-isotopes produits par des réacteurs	Radio-isotopes produits par des accélérateurs	Radio-isotopes produits par des accélérateurs de haute énergie
$^3\text{H}$	$^{11}\text{C}$	$^{26}\text{Al}$
$^{14}\text{C}$	$^{13}\text{N}$	$^{28}\text{Mg}$
$^{32}\text{P}$	$^{15}\text{O}$	$^{32}\text{Si}$
$^{33}\text{P}$	$^{18}\text{F}$	$^{67}\text{Cu}$
$^{35}\text{S}$	$^{22}\text{Na}$	$^{82}\text{Sr}$
$^{51}\text{Cr}$	$^{57}\text{Co}$	$^{148}\text{Gd}$
$^{59}\text{Fe}$	$^{67}\text{Ga}$	$^{172}\text{Hf}$
$^{60}\text{Co}$	$^{81}\text{Rb}$	$^{200}\text{Pb}$
$^{64}\text{Cu}$	$^{103}\text{Pd}$	
$^{89}\text{Sr}$	$^{111}\text{In}$	
$^{90}\text{Y}$	$^{123}\text{I}$	
$^{99}\text{Mo}$	$^{201}\text{Tl}$	
$^{125}\text{I}$		
$^{131}\text{I}$		
$^{133}\text{Xe}$		
$^{153}\text{Sm}$		
$^{159}\text{Gd}$		
$^{186}\text{Re}$		
$^{188}\text{W}$		
$^{192}\text{Ir}$		
$^{198}\text{Au}$		
$^{204}\text{Tl}$		
$^{252}\text{Cf}$		



Annexe 4

**PAYS ET RÉGIONS**

OCDE – EUROPE [19 PAYS\*]

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

OCDE – AMÉRIQUE DU NORD [3 PAYS\*]

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

OCDE – PACIFIQUE [3 PAYS\*]

Australie	Japon	République de Corée
-----------	-------	---------------------

PAYS NON-OCDE – EUROPE ORIENTALE ET EX-UNION SOVIÉTIQUE [9 PAYS\*]

Bulgarie	Lettonie	Roumanie
Fédération de Russie	Ouzbékistan	Ukraine
Kazakhstan	Slovénie	Yougoslavie

PAYS NON-OCDE – ASIE ET MOYEN-ORIENT [12 PAYS\*]

Arabie Saoudite	Inde	Malaisie
Bangladesh	Indonesie	Pakistan
Chine	Iran	Taïpei chinois
République populaire démocratique de Corée	Israël	Viêt-nam

PAYS NON-OCDE – AFRIQUE ET AMÉRIQUE DU SUD [9 PAYS\*]

Afrique du Sud	Brésil	Libie
Algérie	Chili	Pérou
Argentine	Égypte	République démocratique du Congo

\* Pays inclus dans l'étude.

Annexe 5

**RÉACTEURS DE RECHERCHE ET ACCÉLÉRATEURS  
PRODUISANT DES RADIO-ISOTOPES DANS LES PAYS OCDE**

<b>Pays</b>	<b>Réacteurs de recherche</b>	<b>Cyclotrons pour les applications médicales</b>	<b>Cyclotrons pour PET</b>	<b>Accélérateurs polyvalents</b>
<b>EUROPE</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>56</b>	<b>15</b>
Allemagne	1	1	20	3
Autriche	1	0	1	0
Belgique	1	4	5	3
Danemark	1	0	2	0
Espagne	0	0	2	0
Finlande	0	0	2	2
France	2	2	4	0
Grèce	1	0	0	0
Hongrie	1	0	0	1
Italie	1	0	5	1
Norvège	1	0	0	1
Pays-Bas	2	3	3	1
Pologne	1	0	0	0
Portugal	1			0
République tchèque	1	1	1	0
Royaume-Uni	0	2	7	2
Suède	1	0	2	0
Suisse	0	0	2	1
Turquie	1	0	0	0
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>	<b>7</b>	<b>26</b>	<b>62</b>	<b>4</b>
Canada*	2	2	6	1
États-Unis	4	24	56	3
Mexique	1	0	0	0
<b>PACIFIQUE</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>33</b>	<b>2</b>
Australie	1	1	1	0
Japon	4	6	30	2
République de Corée	1	1	2	0

\* Non-inclus les 2 réacteurs Maple qui seront mis en service en 2000.

Annexe 6

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

**OCDE – Europe (17 réacteurs dans 15 pays)**

<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	ORPHEE OSIRIS	Saclay Saclay	14 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 HFR	Delft Petten	2 45	<b>X</b>
Pologne	MARIA	Swierk	30	<b>X</b>
Portugal*	RPI	Sacavem	1	
République tchèque	LWR-15 REZ	Rez	10	<b>X</b>
Suède	R-2	Nyköping	50	<b>X</b>
Turquie	TR-2 TURKISH REACTOR 2	Istanbul	5	

**OCDE – Amérique du Nord (7 réacteurs dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
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>
	HFIR	Oak Ridge TN	100	<b>X</b>
	ACRR	Albuquerque NM	2	
	MURR Univ. of Missouri RR*	Columbia MO	10	<b>X</b>
Mexique	TRIGA MARK III	Salazar	1	

**OCDE – Pacifique (6 réacteurs dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
Australie	HIFAR	Menai	10	<b>X</b>
Japon	KUR	Ibaraki-ken	5	
	JRR-3M	Ibaraki-ken	20	<b>X</b>
	JRR-4	Ibaraki-Ken	3.5	<b>X</b>
	JMTR	Ibaraki-Ken	50	<b>X</b>
République de Corée	HANARO	Taejeon	30	

**Pays non-OCDE – Europe orientale & ex-Union soviétique (16 réacteurs dans 7 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
Bulgarie*	IRT		2	
Fédération de Russie*	SM-3	Dimitrovgrad	100	<b>X</b>
	MIR/M1	Dimitrovgrad	100	<b>X</b>
	RBT-6	Dimitrovgrad	6	
	RBT-10	Dimitrovgrad	10	
	WWR-TS	Obninsk	12	
	AM-2	Obninsk	10	
	WWR-M	Gatchina	18	
	IR-8	Moscow	8	<b>X</b>
		Mayak	>30	<b>X</b>
	Mayak	>30	<b>X</b>	
Kazakhstan*	WWR-K		10	
Ouzbekistan*	WWR-CM		10	<b>X</b>
Roumanie	TRIGA II	Pitesti	14	
Ukraine*	WWR-M		10	
Yougoslavie*	RA		6.5	

**Pays non-OCDE – Asie & Moyen-Orient (17 réacteurs dans 11 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
Bangladesh*	TRIGA MARK II		3	
Chine	HWRR-II*	Chengdu Beijing Chengdu Chengdu	15	<b>X</b>
	HFETR		125	<b>X</b>
	SPR IAE		3.5	
	SPRR-300*		3.7	
	MJTR*	5	<b>X</b>	
Inde	CIRUS*	Trombay	40	
	DRHUVA	Trombay	100	<b>X</b>
Indonésie	TRIGA II	Bandung	1	
	GAS MPR	Serpong	30	<b>X</b>
Iran	TRR	Téhéran	5	
Israël*	IRR-1	Yavne	5	
Malaisie	TRIGA PUSPATI	Bangi	1	
Pakistan*	PARR-1	Islamabad	9	<b>X</b>
République populaire démocratique de Corée*	IRT-DPRK		5	
Tapei chinois*	THOR		1	
Thaïlande	TRR-1/M1	Bangkok	2	

**Pays non-OCDE – Afrique & Amérique du Sud (10 réacteurs dans 9 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Nom du réacteur</b>	<b>Site</b>	<b>Puissance (MW)</b>	<b>Producteurs principaux</b>
Afrique du Sud	SAFARI-1	Prétoira	20	<b>X</b>
Algérie*	ES-SALAM	W. Djelfa	15	
	NUR		1	
Argentine	RA-3	Buenos Aires	5	<b>X</b>
Brésil	IEA-R1	Sao Paulo	10	<b>X</b>
Chili	RECH-1	Santiago	2	
Égypte*	ETRR-1	Cairo	5	
Lybie*	IRT-1		2	
Pérou*	RP-10	Lima	10	
République démocratique du Congo*	TRICO II		1	

\* Informations fournies par les enquêtes précédentes.

\*\* Non-inclus les 2 réacteurs Maple qui seront mis en service en 2000.



Annexe 7

**RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES  
ACCÉLÉRATEURS PRODUISANT DES ISOTOPES**

CYCLOTRONS POUR APPLICATIONS MÉDICALES (59 en total dans 20 pays)

**OCDE – Europe (13 cyclotrons dans 6 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Allemagne	FZK	TCC-CP-42	1
Belgique	IBT MDS Nordion MDS Nordion	CYCLONE 18 (2) CGR 930 S CYCLONE 30	4
France	CIS BIO CIS BIO	CGR 40 MeV CYCLONE 30	2
Pays-Bas	Vrije Amsterdam University Mallinckrodt Mallinckrodt	PHILIPS PHILIPS CYCLONE 30	3
République tchèque	NRI	U-120	1
Royaume-Uni	Nycomed Amersham Nycomed Amersham	TCC-CP-42 MC-40	2

**OCDE – Amérique du Nord (26 cyclotrons dans 2 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Canada	MDS Nordion MDS 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 (2 unités) CYCLONE 30 TCC-CS-22 TCC-CS-30 (3 unités) MC-30 CYCLONE 30 MC-40 Cyclone 30 TCC-30 (2 unités) CYCLONE 18 (8 unités)	24

**OCDE – Pacifique (8 cyclotrons dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Australie	NMC/ANSTO	CYCLONE 30	1
Japon	Daiichi RL Daiichi RL Nihon Medi-Physics Nihon Medi-Physics	CYCLONE 30 MC-40 CYCLONE 30 (2 unités) TCC-CS-30 (2 unités)	6
République de Corée	IRI/KAERI	MC-50	1

**Pays non-OCDE – Europe orientale & ex-Union soviétique (1 cyclotron dans 1 pays)**

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

**Pays non-OCDE – Asie & Moyen-Orient (8 cyclotrons dans 5 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Chine	IAE INR BNU/IAC IMP	CYCLONE 30 CYCLONE 30 TCC CS-30 69 MeV	4
Taipei chinois	INER	TR 30/15	1
Indonésie	Batan	TCC-CS-30	1
Iran	NRC	CYCLONE 30	1
République populaire démocratique de Corée	Nuclear Energy Institute	MGC-20	1

**Pays non-OCDE – Afrique & Amérique du Sud (3 cyclotrons dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Argentine	CNEA	CP-42	1
Brésil	IPEN CNEM	CYCLONE 30	1
Égypte	Nuclear Research Centre	MGC-20	1

CYLOTRONS POUR PET (167 cyclotrons dans 23 pays)

OCDE – Europe (56 cyclotrons dans 13 pays)

Pays	Opérateur	Type	Nombre d'unités
Allemagne	Bonn University DKFZ Essen University Euro-PET FZ Julich FZ Julich FZ Rossendorf Herzzentrum HMI Humbolt MHH MPI Rhoen Clin RWT Tech. University Munich Tübingen University UKRW UKE-Cyclotron Ulm University West. Wilhelms University	RDS-112 MC-32 CYCLONE 18/9 PETTRACE JSW BC1710 PETTRACE CYCLONE 18/9 CYCLONE 18/9 SPC-120 RDS-112 MC-35 MC-17 RDS-111 RDS-111 RDS-112 PETTRACE CYCLONE 3 PHILIPS 140-IV CYCLONE 18/9 RDS-111	20
Autriche	AK Hospital	PETTRACE	1
Belgique	Liege University (Ulg) Liege University (Ulg) Erasmus (ULB) Gasthuisberg (KUL) UCL	CGR-520 CYCLONE 18/9 CYCLONE 30 CYCLONE 10/5 CYCLONE 30	5
Danemark	RIGS Hospital Aarhus Hospital	MC-32 PETTRACE	2
Espagne	Clinic Univ. Navarre Madrid	CYCLONE 18/9 ISOTRACE	2
Finlande	Turku University University Helsinki	CYCLONE 3 CYCLONE 10/5	2
France	SHFJ CERMEP CHU Toulouse CYCERON	CGR-30 CYPRIS 325 CYCLONE 10/5 CYPRIS 325	4
Italie	Istituto S. Raffaele Milano Ospedale Castelfranco Ven. Istituto Naz. Tumori Milano CNR-ICP Pisa Istituto Naz. Tumori Napoli	RDS-112 RDS-112 MC-17F PETTRACE MC-17	5

**OCDE – Europe (56 cyclotrons dans 13 pays) (suite)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Pays-Bas	Univ. Hospital Groningen Vrije Amsterdam Univ. Vrije Amsterdam Univ.	MC-17 CYCLONE 18/9 RDS-111	3
République tchèque	Na Hom Hospital	CYCLONE 18/9	1
Royaume-Uni	Aberdeen University Aberdeen University Cambridge University Hammersmith Hammersmith London Inst. of Neurology St. Thomas Hospital	TCC-CS-30 RDS 111 PETTRACE CYCLONE 3 MC-40 CYCLONE 3 RDS-112	7
Suède	Karolinska Institute UN. PET CENTRE	MC-17 MC-17	2
Suisse	HCU Geneva USZ Zurich	CYCLONE 18/9 PETTRACE	2

**OCDE – Amérique du Nord (62 cyclotrons dans 2 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Canada	CUSE Clark Institute Heart Institute McGill University McMaster Triumf	TR-19 MC-17 RDS-111 CYCLONE 18/9 RDS-112 TR-13	6
États-Unis			56

**OCDE – Pacifique (33 cyclotrons dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Australie	Austin Hospital	CYCLONE 10/5	1
Japon			30
République de Corée	Samsung Medical Centre Seoul National University	PETTRACE TR-13	2

**Pays non-OCDE – Europe orientale & ex-Union soviétique (Total de 3 dans 1 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Fédération de Russie	Bakulev Institute Inst. Human Brain NPO Positron	RDS-111 MC-17 MGC-20	3

**Pays non-OCDE – Asie & Moyen Orient (12 cyclotrons dans 3 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Chine	Boshnan Zibo BNU/IAC Guangdong Prov Hospital Hong Kong Sana Hospital INR Pekin Union Hospital PLA General Hospital Shangai Huashan Hospital Xuanwu Hospital	PETTRACE TCC CS-22 RDS-111 RDS-111 8 MeV RDS-111 RDS-111 RDS-111 RDS-111	9
Israël	Hadassah University	CYCLONE 18/9	1
Taipei chinois	Chung Shan Hospital VET's General Hopital	RDS-111 MC-17	2

**Pays non-OCDE – Afrique & Amérique du Sud (1 cyclotron dans 1 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unité</b>
Argentine	CNEA	RDS-112	1

ACCÉLÉRATEURS POLYVALENTS (29 accélérateurs dans 17 pays)

**OCDE – Europe (15 accélérateurs dans 9 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Belgique	Louvain (UCL) Brussels University (VUB) Gent University (RUG)	CYCLONE AVR-560 CGR-520	3
Finlande	Jyvaskyla University ABO AKADEMY	K-130 MGC-20	2
Allemagne	FZ Jülich FZ Rossendorf IMSS	TCC CV-28 U-120 TCC CV-28	3
Hongrie	ATOMKI	MGC-20E	1
Italie	JRC-AMI	MC-40	1
Pays-Bas	Eindhoven University Tech.	PHILIPS AVF	1
Norvège	Oslo University	MC-35	1
Suisse	PSI	SIN	1
Royaume-Uni	Douglas Cyclotron Unit University Birmingham	MC-62 60" Nuffield	2

**OCDE – Amérique du Nord (4 accélérateurs dans 2 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Canada	TRIUMF	TRIUMF	1
États-Unis	DOE/BNL DOE/LANL University Washington	BLIP LAMPF MC-50	3

**OCDE – Pacifique (2 accélérateurs dans 1 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Japon	NIRS CYRIC	CGR-930 AVF-680	2

**Pays non-OCDE – Europe orientale & ex-Union soviétique (5 accélérateurs dans 2 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Fédération de Russie	Cyclotron Cyclotron KNPI Moscow Biophysics Inst.	U-150-1 RIC-14 PHASOTRON LUE-25	4
Kazakhstan	INP	KVEIC	1

**Pays non-OCDE – Asie & Moyen-Orient (1 accélérateur dans 1 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Inde	VECC	SSC	1

**Pays non-OCDE – Afrique & Amérique du Sud (2 accélérateurs dans 2 pays)**

<b>Pays</b>	<b>Opérateur</b>	<b>Type</b>	<b>Nombre d'unités</b>
Brésil	IEN	CV-28	1
Afrique du Sud	NAC-FRD	SSC	1

## QUESTIONNAIRES

### NOTE EXPLICATIVE

#### INTRODUCTION

Outre la production d'électricité, l'énergie atomique a trouvé de nombreuses applications pacifiques telles que l'utilisation d'isotopes en médecine, dans l'industrie, l'agriculture et la recherche. Néanmoins, il n'existe pas de synthèse sur les activités relatives à la production et à l'utilisation des isotopes dans le monde. Le Comité du développement nucléaire (NDC) a donc inclus dans son programme de travail les applications bénéfiques et la production d'isotopes. Une première étude sur ce sujet, effectuée en coopération avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), a été publiée en 1998.

La création d'un groupe d'experts sur les applications bénéfiques et la production d'isotopes a été approuvée dans le programme de travail de 1999-2000. La liste des membres de ce groupe est donnée en annexe 1. Si vous le souhaitez, vous pouvez contacter le représentant de votre pays au sein de ce groupe pour obtenir des informations plus détaillées sur le cadre, les objectifs et le champ de l'étude. Au cours de sa première réunion qui s'est tenue les 5 et 6 mai le groupe a recommandé que le Secrétariat recueille des informations sur la production d'isotopes dans les pays Membres et non-membres grâce à un questionnaire.

Le présent questionnaire a été préparé par le Secrétariat suivant les recommandations des experts. Les réponses seront analysées par le Secrétariat qui préparera un projet de rapport sur la base des informations recueillies. Le projet sera revu et discuté par le groupe d'experts et le document final sera mis à la disposition des pays Membres et des États Membres de l'AIEA sous forme de publication et de base de données électronique. Il est envisagé de mettre à jour les informations tous les deux ou trois ans.

#### OBJECTIFS ET CHAMP DE L'ÉTUDE

Les principaux objectifs de l'étude sont :

- de fournir une vue d'ensemble de la situation des installations de production d'isotopes dans le monde ;
- d'établir une liste des principaux isotopes produits et utilisés en médecine, dans l'industrie, dans l'agriculture et dans la recherche ;
- de mettre en évidence le rôle des gouvernements dans le secteur de la production d'isotopes ;
- d'attirer l'attention sur les questions clés que les gouvernements devraient examiner afin d'assurer un approvisionnement adéquat en isotopes à usages bénéfiques.



Il faut souligner qu'en vertu des mandats de l'AEN et de l'AIEA, l'objectif général de l'étude est de fournir des informations aussi complètes que possible, utiles aux gouvernements des pays et États Membres. De ce fait, les informations de caractère commercial relatives à la vente des isotopes sont exclues de l'enquête. En particulier, l'étude est centrée sur le secteur de la production d'isotopes dans des installations de production d'isotopes de grande taille (réacteurs et accélérateurs), coûteuses en capital et en exploitation, qui ont été, et dans une large mesure, demeurent sous la responsabilité des gouvernements. Par contre, les aspects relatifs à la préparation et au conditionnement des produits finis commercialisés, le plus souvent sous la responsabilité de compagnies privées, sont exclus de l'étude de même que les informations à caractère commercial comme les coûts et les prix des isotopes.

L'étude a pour but d'identifier : le niveau d'implication des gouvernements dans la production des isotopes à l'heure actuelle ; la faisabilité de privatiser complètement le secteur de la production des isotopes (sur la base de l'expérience acquise par certains pays Membres) ; et le rôle éventuel que les gouvernements devraient continuer à jouer pour maintenir un niveau adéquat d'approvisionnement en isotopes à usages bénéfiques à des coûts acceptables.

En particulier, l'étude couvrira des sujets tels que la nécessité, ou non, pour les gouvernements de maintenir ou d'accroître leur soutien à l'exploitation des installations de production d'isotopes en service et/ou d'investir dans de nouvelles installations destinées par exemple à fournir des isotopes pour la recherche. En outre, l'étude examinera le rôle de la coopération internationale en matière d'optimisation des capacités de production, de réduction des coûts d'exploitation et d'investissements et de renforcement de la sécurité d'approvisionnement.

## 1. PRODUCTION D'ISOTOPES STABLES LOURDS

### DONNÉES DE LA PERSONNE INTERROGÉE

Nom : .....

Fonction : .....

Institut/Organisation : .....

Adresse : .....

Téléphone : .....

Facsimilé : .....

Adresse électronique : .....

Site Internet : .....

### INSTALLATION

- Type
  - Centrifugeuse       Séparation électromagnétique (calutron, etc. ...)
  - Autres [*prière de préciser*]

- Liste des isotopes pouvant être produits

Tous les éléments  Nombre limité  [*prière de fournir une liste*]

- Liste des isotopes disponibles à la vente [*prière de compléter le tableau suivant et/ou fournir un catalogue*]

Isotope	Niveau d'enrichissement

- Principaux isotopes vendus en 1998

[*prière de fournir une liste des 5 isotopes les plus vendus, en termes de valeur*]

- Prévision de production (1-3 ans)

[*prière de fournir une liste des isotopes dont la production est prévue*]

- État de l'installation:

En service	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Sous cocon	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Développement planifié (1-5 ans)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Mise hors service planifiée (1-5 ans)	<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non

Installations de conversion chimique et/ou physique associées

Non       Oui (spécifier)

## 2. RÉACTEUR DE RECHERCHE

### DONNÉES DE LA PERSONNE INTERROGÉE

Nom : .....

Fonction : .....

Institut/Organisation : .....

Adresse : .....

Téléphone : .....

Facsimilé : .....

Adresse électronique : .....

Site Internet : .....

### CARACTÉRISTIQUES DU RÉACTEUR

Nom du réacteur : .....

Date de la première criticité : .....

Puissance : .....MW

Flux neutronique neutronique maximal : ..... n/cm<sup>2</sup>.s

Flux neutronique épithermique maximal : ..... n/cm<sup>2</sup>.s

Flux neutronique rapide(> 1 MeV) maximal : ..... n/cm<sup>2</sup>.s

Chargement/déchargement en cours de fonctionnement disponible  Oui  Non

Capacité de stockage disponible  Oui  Non

Cellules chaudes disponibles  Oui  Non

Appartenant à une(des) société(s) privée(s)  Oui  Non

Exploité par une(des) société(s) privée(s)  Oui  Non

### UTILISATIONS DU RÉACTEUR

Production de radio-isotopes

Répartition de la production d'isotopes .....% (temps) ..... % (budget)

Autres (spécifier)

### EXPLOITATION DU RÉACTEUR

Nombre de jours d'exploitation 1996 ..... 1997 ..... 1998.....

Planification d'amélioration (1-5 ans)       Oui (date: ..... )       Non

Planification de mise hors service (1-5 ans)       Oui (date: ..... )       Non

Planification de remplacement       Oui (date: ..... )       Non

### PRODUCTION D'ISOTOPES EN 1998

Isotopes	Activité <sup>1</sup> Ci ou Bq (spécifier)	Flux neutronique moyen 10 <sup>14</sup> n/cm <sup>2</sup> .s	Utilisation d'isotopes produits <sup>3</sup>			% de la puissance totale <sup>2</sup>	Évolution de la production <sup>4</sup>
			Interne	Externe			
				Recherche	Commercial		
<sup>99</sup> Mo							
<sup>60</sup> Co							
<sup>192</sup> Ir							
<sup>131</sup> I							
<sup>32</sup> P							
<sup>125</sup> I							
<sup>89</sup> Sr							
..... <sup>5</sup>							

- 1) Activité totale à la fin de l'irradiation.
- 2) Partage de la puissance utilisée à la production de chaque isotope.
- 3) Cocher la cellule appropriée.
- 4) Spécifier = ↗ ou ↘.
- 5) Spécifier les isotopes supplémentaires principaux produits.

## INSTALLATION DE TRAITEMENT

### DONNÉES DE LA PERSONNE INTERROGÉE

Nom : .....

Fonction : .....

Institut/Organisation : .....

Adresse : .....

Téléphone : .....

Facsimilé : .....

Adresse électronique : .....

Site Internet : .....

### INSTALLATION(S)

Isotopes	Capacité maximale	Cellules chaudes pour traitement primaire	Cellules chaudes pour produits finis	Gestion des déchets	Stockage	Conditionnement

## ÉGALEMENT DISPONIBLE

### Publications de l'AEN d'intérêt général

*Rapport annuel 1999* (2000)

*Disponible sur le Web.*

*AEN Infos*

ISSN 1605-959X

Abonnement annuel : FF 240 US\$ 45 DM 75 £ 26 ¥ 4 800

*Le Point sur l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques* (2000)

ISBN 92-64-28425-7

Prix : FF 130 US\$ 20 DM 39 £ 12 ¥ 2 050

*Le Point sur les rayonnements – Applications, risques et protection* (1997)

ISBN 92-64-25483-8

Prix : FF 135 US\$ 27 DM 40 £ 17 ¥ 2 850

*Le Point sur la gestion des déchets radioactifs* (1996)

ISBN 92-64-24692-4

Prix : FF 310 US\$ 63 DM 89 £ 44

### Développement de l'énergie nucléaire

*Données de l'OCDE sur l'énergie nucléaire 2000*

Bilingue

ISBN 92-64-05913-X

Prix : FF 130 US\$ 20 DM 39 £ 12 ¥ 2 050

*Méthodes d'évaluation des conséquences économiques des accidents nucléaires*

ISBN 92-64-27658-0

Prix : FF 200 US\$ 31 DM 60 £19 ¥ 3 250

*Business as Usual and Nuclear Power* (2000)

ISBN 92-64-17175-4

Prix : FF 160 US\$ 25 DM 48 £ 16 ¥ 2 850

*Réduction des coûts en capital des centrales nucléaires* (2000)

ISBN 92-64-27144-9

Prix : FF 240 US\$ 38 DM 72 £ 24 ¥ 4 400

*Aspects environnementaux de la production d'uranium* (1999)

ISBN 92-64-27064-7

Prix : FF 280 US\$ 47 DM 84 £ 29 ¥ 5 550

*Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)

ISBN 92-64-28521-0

Price: FF 210 US\$ 31 DM 63 £ 19 ¥ 3 300

*Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)

Un rapport de synthèse ISBN 92-64-28260-2

*Gratuit : papier ou Web*

*L'énergie nucléaire face à la concurrence sur les marchés de l'électricité* (2000)

ISBN 92-64-28262-9

*Gratuit : papier ou Web*

*L'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable* (2000)

ISBN 92-64-28278-5

*Gratuit : papier ou Web*

**Bon de commande au dos.**



LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIMÉ EN FRANCE  
(66 2000 20 2 P 1) ISBN 92-64-28417-6 – n° 51624 2000