

DOSSIER

05

Les déchets radioactifs du secteur médical

UN PEU D'HISTOIRE **121**

La radiothérapie **121**

Le diagnostic en médecine nucléaire **122**

L'UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS **122**

En médecine nucléaire **122**

Le diagnostic *in vivo* **122**

Le diagnostic *in vitro* : la radio-immunologie **125**

La radiothérapie métabolique **127**

En radiothérapie **128**

La radiothérapie externe **128**

La curiethérapie **129**

La protonthérapie **130**

LES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR MÉDICAL **130**

Leur nature **130**

Leur gestion **131**

La gestion des déchets contaminés **131**

La gestion des effluents liquides radioactifs **133**

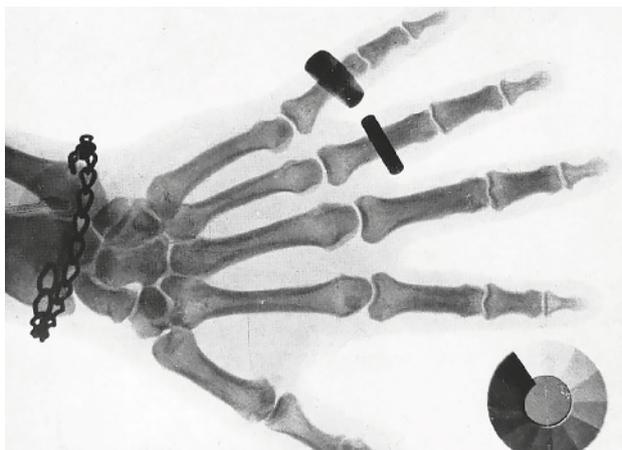
La gestion des effluents gazeux radioactifs **133**

Le cas particulier des accélérateurs linéaires de particules **133**

UN PEU D'HISTOIRE

LA RADIOTHÉRAPIE

La découverte en 1895 des rayons X par Röntgen marque le début de la radiothérapie, puisqu'un an plus tard, des médecins utilisent pour la première fois ces rayons pour soigner une tumeur. Suite à la découverte de la radioactivité en 1896 et du radium en 1898, Pierre Curie et Henri Becquerel publient un écrit¹ en 1901 qui témoigne de l'effet énergétique des rayons du radium sur la peau, engendrant des lésions cutanées. Cet écrit est le point de départ de l'utilisation du radium en médecine pour guérir les infections dermatologiques et les cancers. Rapidement, les traitements aux rayons X et au radium connaissent leurs premiers développements.

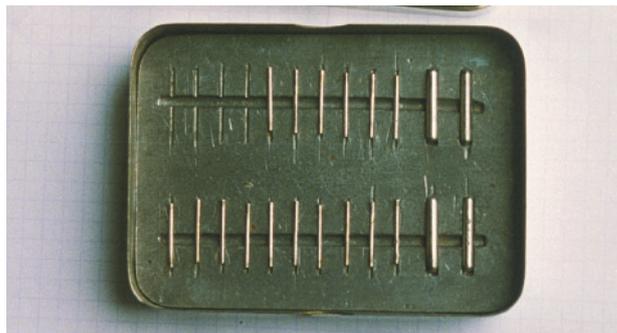


Cliché radiographique d'une main

Les médecins ont d'abord utilisé des tubes à rayons X, dispositifs composés d'une cathode et d'une anode émettant des rayons X, pour soigner les tumeurs. Toutefois, les rayons X issus de ces tubes n'ont qu'une faible énergie et ne pénètrent pas profondément sous la peau. Ils étaient donc essentiellement utilisés pour traiter les cancers de la peau. C'est un peu plus tard, avec l'utilisation du radium (élément extrêmement rare) que des traitements pour soigner d'autres types de cancers commencent à se développer. En effet, le radium émet des rayonnements de plus haute énergie qui peuvent atteindre les tumeurs plus profondes.

De petits sachets en plastique contenant de la poudre de radium mis au contact de la peau sont d'abord utilisés par les médecins pour soigner les tumeurs et les lésions de la peau. Puis, en 1920, le radium est conditionné en petits tubes et en aiguilles.

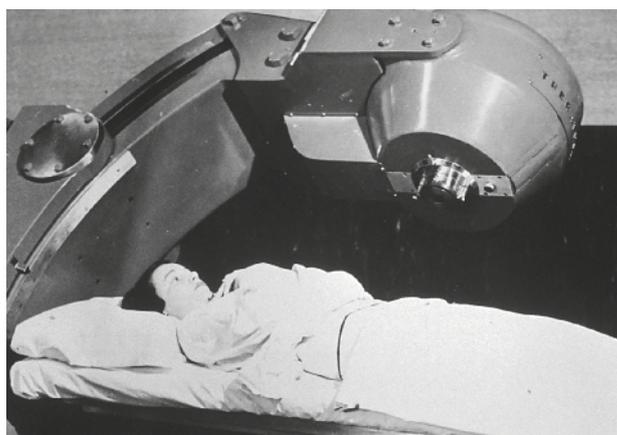
C'est le début de la curiethérapie, technique consistant à traiter les cancers avec des sources radioactives placées au contact des tumeurs, ou implantées directement dans ces tumeurs.



Aiguilles au radium

Avec la découverte de la radioactivité artificielle en 1934, l'utilisation du radium va progressivement décliner au profit des radioéléments artificiels plus adaptés aux traitements et moins onéreux. Ainsi, de nouvelles sources radioactives sont mises à disposition des radiothérapeutes qui remplacent le radium par du césium 137, de l'iridium 192 et de l'iode 125.

À partir de 1955, des sources de cobalt produisant des rayonnements de haute énergie plus pénétrants sont utilisées dans des « bombes à cobalt » permettant une meilleure irradiation des tumeurs tout en limitant celle des tissus sains. À la fin des années 1960, les « bombes à cobalt » sont remplacées par les accélérateurs de particules, plus performants et toujours utilisés de nos jours.



Bombe au cobalt

¹ *Physiologie - Action physiologique des rayons du radium*. Note de Henri Becquerel et Pierre Curie

LE DIAGNOSTIC EN MÉDECINE NUCLÉAIRE

En 1913, Georg von Hevsey emploie pour la première fois la méthode des traceurs radioactifs : il arrose des plantes avec de l'eau contenant un radioélément, le plomb 210, et suit son mouvement dans les plantes en mesurant la radioactivité dans les racines, les tiges puis les feuilles. Onze ans plus tard, en 1924, deux médecins injectent à des patients du bismuth 214 utilisé comme traceur

pour déterminer la vitesse de circulation du sang en mesurant la radioactivité dans le corps du patient : c'est le début de la médecine nucléaire. Ensuite, le radiodiagnostic ne se développe réellement qu'avec la découverte des radioéléments artificiels en 1934 et la découverte du technétium 99m en 1937, radioélément le plus utilisé encore aujourd'hui en médecine nucléaire du fait de sa faible période (six heures), son coût, sa disponibilité et sa capacité à être associé à de nombreuses molécules.

L'UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

EN MÉDECINE NUCLÉAIRE

La médecine nucléaire regroupe l'ensemble des utilisations des radioéléments en sources non scellées¹ à des fins de diagnostic ou de thérapie. Les utilisations diagnostiques se décomposent en techniques *in vivo* fondées sur l'administration à un patient de radioéléments et en techniques *in vitro* pour lesquelles les radioéléments ne sont pas injectés au patient mais utilisés dans des prélèvements du patient.

LE DIAGNOSTIC *IN VIVO*

► LA SCINTIGRAPHIE

La scintigraphie est une technique d'imagerie médicale dite fonctionnelle qui permet d'observer la structure et le fonctionnement d'un organe et ainsi de détecter de nombreuses affections des organes et des processus pathologiques telles qu'une inflammation, une tumeur ou une infection, etc. Elle est complémentaire de l'imagerie dite morphologique comme l'IRM ou le scanner, qui prennent une photo de l'organisme sans donner d'information sur son fonctionnement.

RADIOGRAPHIE ET SCANNER

La radiographie et le scanner utilisent des rayons X, rayonnements électromagnétiques à haute fréquence constitués de photons. Ces rayons X ne sont pas issus des noyaux des atomes contrairement aux rayons gamma et ne sont pas dus à la radioactivité.

Ils sont produits à partir de générateurs électriques. Des électrons sont émis par une cathode constituée d'un filament (généralement en tungstène) chauffée par un courant électrique. Ils sont accélérés entre la cathode et l'anode métallique (généralement en tungstène) par une différence de potentiel.

L'anode est alors bombardée par les électrons, qui émettent des rayonnements X selon les interactions suivantes :

- l'électron est freiné par l'anode et émet un photon ;

- l'électron excite les atomes de l'anode qui émettent des photons pour retourner à leur état fondamental.

Les rayons X ainsi formés traversent le corps humain et sont plus ou moins atténués selon les tissus traversés. Ils atteignent ensuite le film photosensible (radiographie) ou un capteur (scanner) placé derrière le corps et cela produit une image des tissus analysés. Le corps du patient étant traversé par des rayonnements, il reçoit, comme pour les examens scintigraphiques ou lors d'une radiothérapie, une certaine dose qui dépend notamment de l'organe à observer.

Ces techniques sont des imageries dites morphologiques qui parfois sont complémentaires des imageries fonctionnelles comme la scintigraphie.

¹ Les sources radioactives non scellées sont des sources dont la présentation et les conditions normales d'emploi ne permettent pas de prévenir toute dispersion de substance radioactive.

Le principe de la scintigraphie consiste à administrer au patient par voie intraveineuse, par inhalation ou par ingestion en petite quantité, une substance radioactive appelée radio-pharmaceutique qui se fixe sélectivement sur l'organe ou le tissu à explorer. Le radio-pharmaceutique injecté est un émetteur de rayonnements gamma choisi en fonction de l'organe ou de la pathologie à observer. Il peut s'agir d'un radionucléide seul ou fixé sur une molécule ou une cellule (hormone, anticorps). Les radioéléments utilisés ont, le plus souvent, une période très courte et sont évacués rapidement de l'organisme. À titre d'exemple, la période du technétium 99m, très utilisé en scintigraphie, est de

six heures et son élimination urinaire est très rapide. L'activité injectée au patient varie en fonction de l'examen.

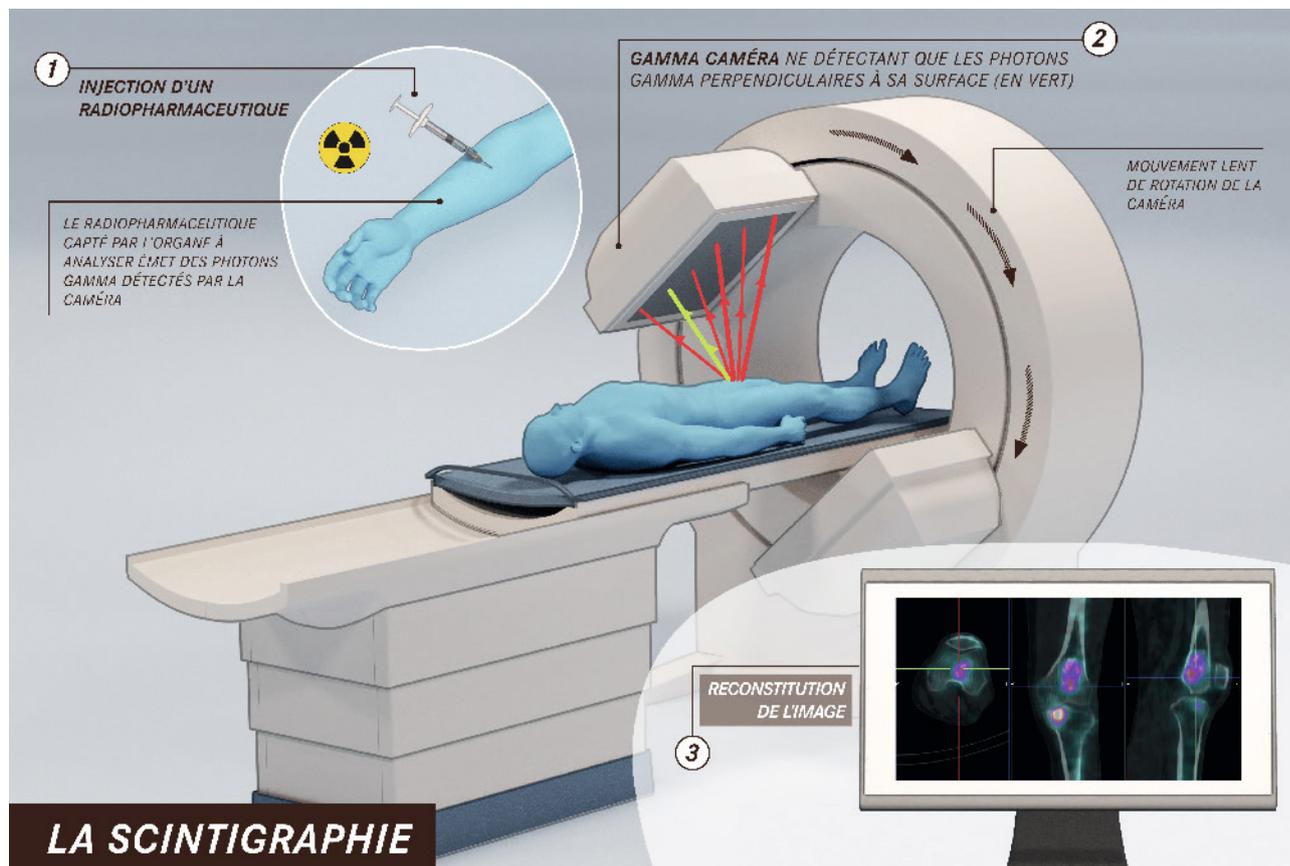
Les rayonnements gamma émis par le radio-pharmaceutique fixé sur l'organe ou le tissu à analyser sont détectés à l'aide d'une caméra spéciale dite gamma-caméra. L'enregistrement d'une succession d'images permet de visualiser le fonctionnement de l'organe ou du tissu analysé. La prise de clichés peut avoir lieu directement après l'injection, après quelques heures ou quelques jours et dure entre 5 et 30 minutes. L'injection d'un radio-pharmaceutique n'a aucun effet sur l'organisme du fait de la faible quantité administrée.

Principe de la gamma-caméra

La gamma-caméra est constituée d'un collimateur, épaisse plaque de plomb ou de tungstène percée de canaux fins parallèles, d'un cristal et d'un photomultiplicateur, sous forme de tube électronique qui détecte les signaux lumineux.

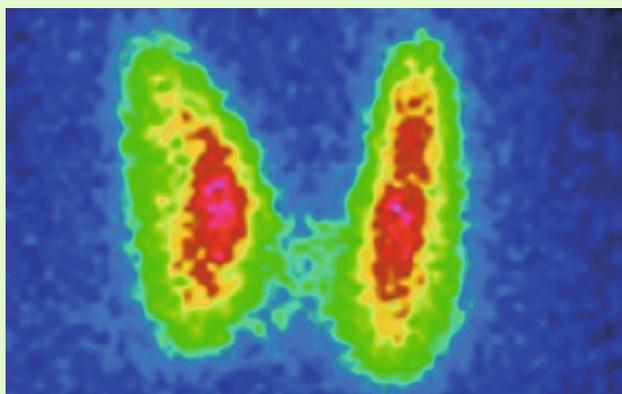
Le collimateur sélectionne les photons gamma émis par le radio-pharmaceutique dont la direction est perpendiculaire à la surface du cristal. Le cristal en iodure de sodium dopé au thallium arrête les photons gamma et convertit une partie de l'énergie déposée en scintillation lumineuse détectée par les photomultiplicateurs qui convertissent le signal lumineux en signal électrique.

L'énergie et la position du rayon gamma ayant interagi dans le cristal sont alors déterminées.



EXEMPLES D'EXAMENS SCINTIGRAPHIQUES

La scintigraphie de la thyroïde permet d'observer le métabolisme de l'iode dans la glande thyroïde. De l'iode 123 ou du technétium 99m sont injectés au patient et vont se fixer sélectivement sur la thyroïde. La scintigraphie permet ainsi de visualiser les régions de la thyroïde qui captent le moins de radio-pharmaceutiques (nodules froids) ou qui captent le plus de radio-pharmaceutiques.



Scintigraphie de la thyroïde

La scintigraphie pulmonaire permet d'étudier le fonctionnement des poumons : la ventilation des poumons (circulation de l'air) et la perfusion (circulation du sang). La scintigraphie de ventilation consiste à administrer par inhalation un aérosol contenant une quantité connue de produit radioactif (xénon 133, krypton 81m, technétium 99m) au patient. Les images réalisées à l'aide de la gamma-caméra permettent de mettre en évidence un défaut de fixation du radio-pharmaceutique inhalé qui se traduit par une zone pulmonaire qui ne reçoit pas d'air. La scintigraphie de perfusion consiste à injecter par voie intraveineuse le radio-pharmaceutique qui se diffuse dans l'organisme. Lorsque le poumon est normalement perfusé, les radio-pharmaceutiques se répartissent de façon homogène dans les deux poumons. Lorsqu'une artère est obstruée par un caillot, les particules n'y pénètrent pas et ne sont pas détectées par la gamma-caméra : c'est le cas de l'embolie pulmonaire.

► LA TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITONS (TEP)

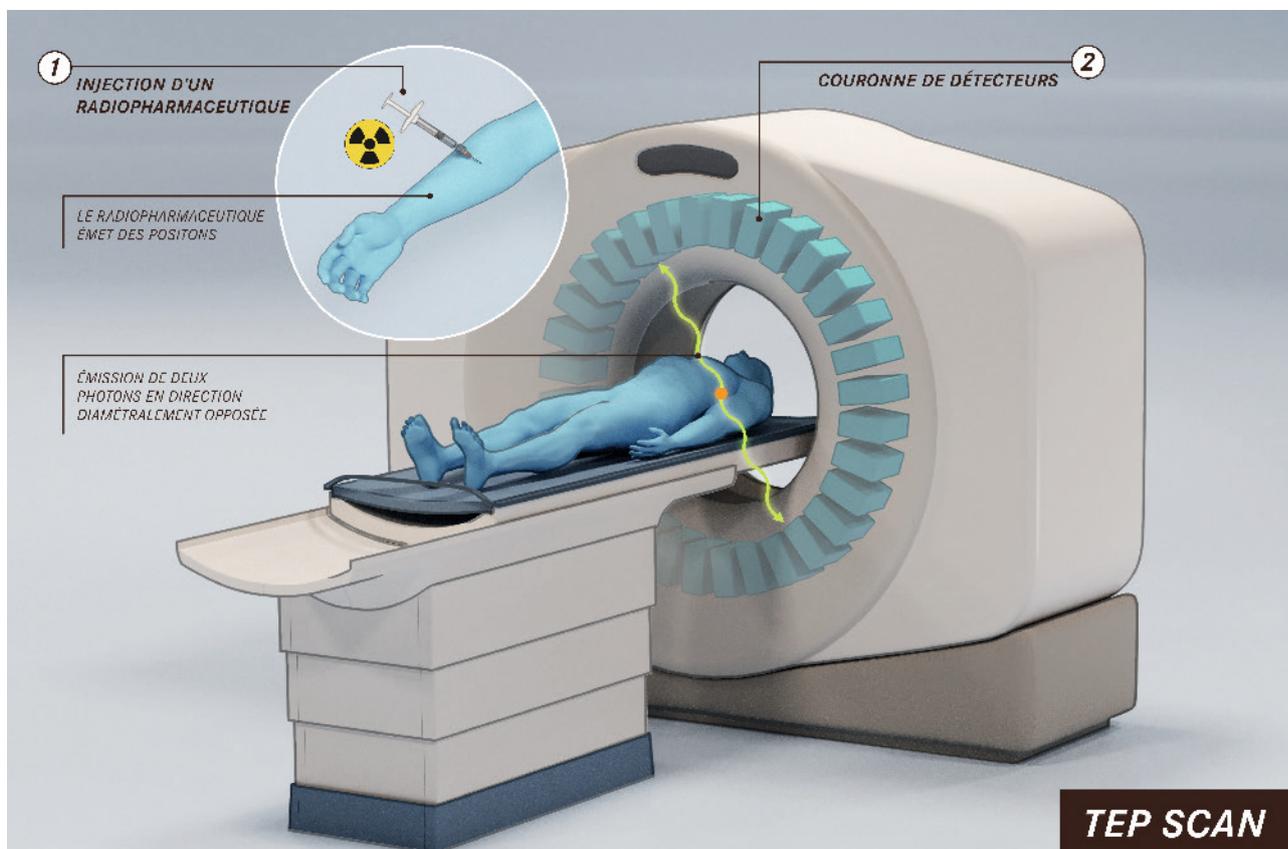
La tomographie par émission de positons (TEP) est une scintigraphie utilisant des radioéléments émetteurs de positons tels que le fluor 18, le brome 76 ou l'oxygène 15. Contrairement aux radioéléments émetteurs de photons utilisés en scintigraphie classique, les émetteurs de positons sont légers, abondants et plus faciles d'utilisation. Après un court parcours dans le corps, les positons disparaissent en émettant deux rayons gamma émis dos à dos. La détection simultanée des deux rayons gamma permet de localiser la zone d'émission et de dresser une carte de la fixation des atomes radioactifs dans les cellules. La TEP nécessite une caméra à scintillation adaptée. Cette technique d'imagerie permet le dépistage précoce des cancers, le suivi du traitement ou la surveillance des cancers. Elle est également utilisée pour diagnostiquer des maladies cérébrales dégénératives comme la maladie d'Alzheimer, des pathologies inflammatoires ou infectieuses.

Pour diagnostiquer les cancers, le radio-pharmaceutique majoritairement utilisé est le fluor 18 sous forme de sucre comparable au glucose, le 18F-FDG (Fluorodesoxyglucose au fluor 18). Il est injecté au patient par voie intraveineuse, et

va se fixer sur les cellules cancéreuses. En effet, les cellules cancéreuses se multiplient sans cesse, elles ont besoin de beaucoup d'énergie et donc de beaucoup de glucose. Elles vont donc consommer une quantité anormalement élevée de glucose par rapport aux cellules saines. Le radio-pharmaceutique se fixe en grande quantité sur les cellules cancéreuses qui peuvent alors être détectées avec la caméra TEP.



TEP scan



LE DIAGNOSTIC *IN VITRO* : LA RADIO-IMMUNOLOGIE

La radio-immunologie est une technique d'analyse de biologie médicale. Contrairement au diagnostic *in vivo*, le radioélément n'est pas injecté au patient. Cette technique permet de mesurer la quantité de composés (hormones, médicaments, enzymes, etc.) dans les fluides biologiques préalablement prélevés sur le patient (le sang, l'urine, la salive, etc.). Toutefois, aujourd'hui, la radio-immunologie est fortement concurrencée par les techniques d'analyse ne faisant pas appel à des radionucléides, plus simples à mettre en œuvre.

La radio-immunologie est une technique de dosage qui se base généralement sur les réactions immunologiques (réactions spécifiques anticorps-antigène). Pour déterminer la quantité

d'antigènes dans l'échantillon prélevé sur le patient, une quantité connue d'antigènes marqués avec un radionucléide et une faible quantité d'anticorps spécifiques sont ajoutés au milieu. L'antigène marqué permet de déterminer la quantité d'antigène dans l'échantillon.

Les antigènes, qu'ils soient marqués ou non, se fixent sur les anticorps. Étant donné qu'ils se trouvent en excès dans l'échantillon par rapport aux anticorps, une partie des antigènes sera fixée sur les anticorps et l'autre restera libre.

Les antigènes libres sont séparés des antigènes fixés et les quantités d'antigènes marqués libres et liés sont mesurées et permettent de déterminer la quantité d'antigènes non marqués présente dans l'échantillon prélevé au patient.

LA PRODUCTION DE RADIOISOTOPES

Les radioisotopes sont des atomes dont le noyau est instable. Cette instabilité est due à un excès de protons et/ou de neutrons. Ils se stabilisent en libérant de l'énergie sous forme de rayonnements.

90 % des radioisotopes sont utilisés à des fins diagnostiques et 10 % pour des thérapies. Les radioéléments utilisés en médecine sont produits avec des accélérateurs de particules (cyclotron et accélérateur linéaire) ou par des réacteurs nucléaires.

Le technétium ^{99m}Tc , utilisé dans 75 % des examens scintigraphiques, est obtenu par désintégration β du molybdène ^{99}Mo , lui-même produit par irradiation dans un réacteur nucléaire d'uranium enrichi à près de 20 %. Après irradiation, le molybdène est extrait du réacteur puis mis en générateur qui permet l'extraction du ^{99m}Tc . Du fait de sa période radioactive plus élevée (66 heures pour ^{99}Mo , contre six heures pour ^{99m}Tc), le molybdène peut être stocké plus longtemps que le technétium. Les générateurs sont distribués dans les hôpitaux une à deux fois par semaine. Le technétium peut alors être extrait de ce générateur et mélangé avec des molécules injectables. Le ^{99}Mo de fission est produit essentiellement par six réacteurs de recherche dans le monde.

Certains radioisotopes sont produits dans des accélérateurs de particules appelés cyclotrons. Ils sont composés de deux demi-cylindres métalliques se faisant face, séparés par un espace, le tout dans un vide poussé. Un champ magnétique perpendiculaire au plan des demi-cylindres est appliqué ainsi qu'un champ électrique dans l'espace qui sépare les demi-cylindres. Une source, placée au voisinage du centre du cyclotron, émet des particules chargées. Ces particules sont soumises au champ magnétique qui courbe leur trajectoire et au champ électrique qui les accélère. Les particules ont ainsi une trajectoire accélérée en forme de spirale jusqu'à être expulsées du cyclotron pour être propulsées sur leur cible.

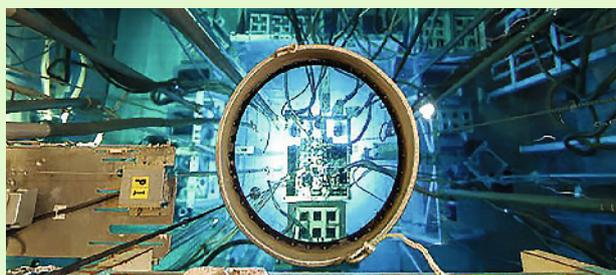
À titre d'exemple, la source utilisée en protonthérapie est un système qui ionise un gaz d'hydrogène en le chauffant. Le noyau d'hydrogène étant constitué d'un seul proton, celui-ci est séparé

de son électron par un champ électrique, puis le proton est extrait pour être accéléré dans le cyclotron avant d'être orienté vers la tumeur du patient.

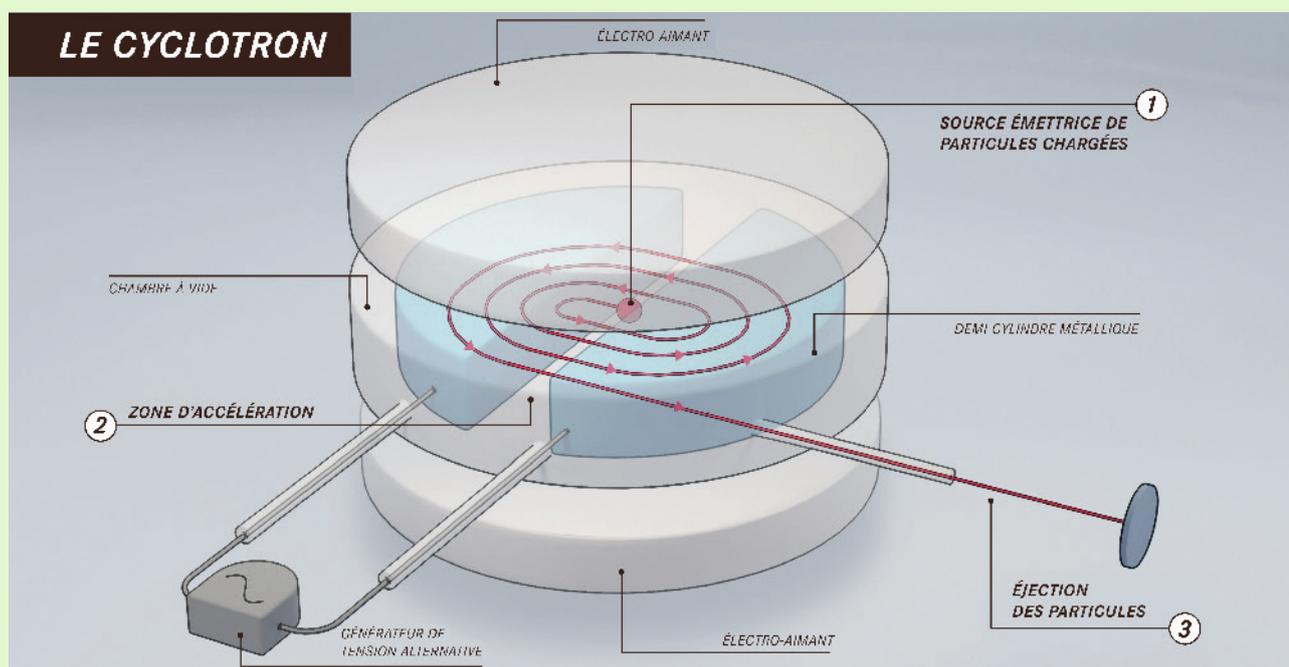
Le fluor 18 utilisé par la tomographie à émission de positon est produit dans un cyclotron par bombardement des noyaux d'oxygène 18 avec des protons accélérés dans le cyclotron. Une réaction nucléaire a lieu et transforme les noyaux d'oxygène en fluor 18. Du fait de la faible période du fluor 18 (110 minutes), celui-ci doit être produit à proximité de l'hôpital.

Il existe un autre type d'accélérateur de particules utilisé pour la fabrication de radioisotopes : l'accélérateur linéaire des particules. Il est constitué d'un alignement de tubes conducteurs séparés par des espaces dans lesquels un champ électrique alternatif est appliqué. Les particules sont accélérées dans cet espace.

En médecine nucléaire, les radioisotopes formés peuvent être liés à des molécules pour former des radio-pharmaceutiques. Leur préparation s'effectue dans une pièce isolée appelée laboratoire « chaud », équipée de poubelles plombées, de réfrigérateurs plombés, de boîtes à gants dans lesquelles sont préparés les radio-pharmaceutiques. Les seringues sont mises dans des protections blindées pour protéger les travailleurs. Le produit radioactif est injecté au patient dans une salle d'injection adjacente au laboratoire chaud.



Réacteur expérimental Osiris



STÉRILISATION DU MATÉRIEL PAR RAYONNEMENTS

Les rayonnements sont également utilisés dans le secteur médical pour stériliser le matériel utilisé dans les blocs opératoires et pour les soins : seringues, aiguilles, gants chirurgicaux, compresses, implants, poches pour solution intraveineuse, etc. Les rayonnements provoquent des lésions dans les molécules d'ADN et entraînent ainsi la destruction de divers organismes (champignons, insectes, parasites, moisissures, microbes et bactéries). La stérilisation est effectuée dans une usine de stérilisation avec généralement des sources de cobalt 60 ou césium 137, émetteurs gamma de haute énergie et dure quelques secondes. Ce mode de stérilisation est idéal pour stériliser les matériaux sensibles à la chaleur. Ainsi, le matériel peut être directement stérilisé dans son emballage.

Avant une transfusion sanguine, les poches de sang sont irradiées dans les hôpitaux dans des irradiateurs afin d'éliminer les cellules susceptibles d'engendrer la mort du patient.

Que ce soit pour la stérilisation du matériel médical ou le traitement des poches de sang, les rayonnements n'ont aucun effet sur le produit en lui-même.



Irradiateur sanguin

LA RADIOTHÉRAPIE MÉTABOLIQUE

La radiothérapie métabolique est une technique de radiothérapie mise en œuvre en médecine nucléaire (utilisation de sources non scellées) lors de laquelle les radionucléides sont directement injectés aux patients. Elle consiste à irradier localement par un radio-pharmaceutique les tumeurs de petites tailles ou disséminées dans l'organisme.

Le radio-pharmaceutique, molécule porteuse d'un atome radioactif émetteur bêta moins se fixant sélectivement sur les cellules à traiter, est injecté au patient. C'est donc le même principe que pour la scintigraphie mais avec des quantités beaucoup plus élevées (la dose délivrée est supérieure à 50 Gy). Le radio-pharmaceutique est injecté par voie orale ou intraveineuse. Il se fixe sélectivement sur les cellules à traiter et l'électron bêta émis lors de sa désintégration dépose son énergie par ionisation à l'intérieur de la cellule, ce qui engendre sa destruction. Du fait du parcours limité des émetteurs bêta dans la matière, les rayonnements restent confinés dans les tissus à soigner.

L'iode 131 est utilisé pour le traitement des hyperthyroïdies et des cancers thyroïdiens. La dose administrée est très élevée et induit une hospitalisation dans une chambre dont les murs et les fenêtres sont plombés pour notamment protéger le personnel des rayonnements ionisants. L'iode 131 est capté préférentiellement par la thyroïde et détruit ainsi les cellules thyroïdiennes tout en limitant l'irradiation des cellules avoisinantes.

Aujourd'hui, l'utilisation de radio-pharmaceutiques émetteurs alpha est en plein essor. Ils ont l'avantage, par rapport aux émetteurs bêta, de délivrer une grande quantité d'énergie sur un faible parcours et ainsi d'irradier la tumeur tout en limitant l'exposition des cellules saines. À titre d'exemple, le dichlorure de radium 223 (aussi appelé Xofigo®), destiné au traitement des métastases osseuses du cancer de la prostate, se fixe dans l'os en formation (comme le calcium) et y détruit les cellules cancéreuses tout en limitant l'irradiation des tissus sains.

Le contrôle de l'ASN dans le secteur médical

Les activités nucléaires relatives à la fabrication, la détention et l'utilisation de radionucléides et produits ou dispositifs en contenant et à la détention et l'utilisation d'un accélérateur de particules sont soumises à autorisation. Les demandes d'autorisation sont effectuées auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

L'ASN est en charge du contrôle de la radioprotection dans le domaine du médical. Ainsi, elle mène tous les deux ans des inspections dans les centres de radiothérapie (respect des règles relatives à la radioprotection des travailleurs et des patients, l'aménagement des locaux, les équipements et la gestion des sources, assurance de la qualité). L'ASN réalise également des inspections dans les services de médecine nucléaire. Les synthèses des inspections sont consultables sur le site Internet de l'ASN (asn.fr).

Une personne compétente en radioprotection est désignée dans chaque établissement pour assurer la radioprotection des travailleurs qui consiste à : évaluer les risques, diffuser les bonnes pratiques, mettre en place un zonage, former les travailleurs et suivre la dosimétrie.

La radioprotection des patients est également assurée.

EN RADIOTHÉRAPIE

La radiothérapie est une méthode de traitement des cancers utilisant des rayonnements ionisants issus de sources radioactives. Elle est, avec la chirurgie et la chimiothérapie, l'une des techniques majeures employées pour le traitement des cellules cancéreuses.

Il existe plusieurs techniques de radiothérapie selon les rayonnements utilisés et la localisation des sources radioactives. Elles reposent toutes sur un même principe : l'irradiation des cellules cancéreuses entraîne leur destruction et bloque leur capacité à se multiplier tout en préservant le mieux possible les tissus sains et les organes avoisinants. Les rayonnements orientés vers les cellules cancéreuses créent des lésions sur ces cellules et induisent des altérations de leur ADN. Ainsi, les cellules ne peuvent plus se multiplier ce qui engendre la mort cellulaire.

Les différentes techniques de radiothérapie sont décrites ci-après.

LA RADIOTHÉRAPIE EXTERNE

La radiothérapie externe consiste à irradier les cellules cancéreuses avec des rayonnements émis par une source située à distance du patient qui traversent la peau pour atteindre la tumeur. En radiothérapie externe, les rayonnements utilisés sont les photons de haute énergie (ou rayons X) et les électrons produits par des accélérateurs de particules. Les protons peuvent également être utilisés, il s'agit alors de protonthérapie.

La radiothérapie externe est utilisée pour traiter un grand nombre de cancers tels que les cancers du sein, du poumon, du sang, etc.

Il existe plusieurs techniques de radiothérapie externe, détaillées ci-après, qui se modernisent sans cesse pour améliorer les traitements et diminuer les effets secondaires dus essentiellement à l'irradiation des cellules saines à proximité des cellules cancéreuses :

- la plus utilisée de nos jours est la **radiothérapie conformationnelle 3D** qui fait correspondre le plus précisément possible le volume sur lequel sont dirigés les rayons au volume de la tumeur, en épargnant au maximum les tissus sains avoisinants ;
- la **radiothérapie conformationnelle par Modulation d'intensité** repose sur le même principe que la radiothérapie conformationnelle 3D mais en modulant le débit de dose délivré ;
- la **radiothérapie asservie à respiration** prend en compte les mouvements du patient et donc de ses organes dus à la respiration. Cette technique de radiothérapie asservit les rayonnements aux mouvements des organes et améliore ainsi la précision des traitements ;
- la **radiothérapie stéréotaxique** est une technique de haute précision qui utilise des microfaisceaux de photons ou de protons ce qui permet d'irradier à hautes doses de petits volumes. Elle est notamment utilisée pour traiter les tumeurs cérébrales ;
- la **tomothérapie** réalise des irradiations adaptées à la tumeur en épargnant au mieux les organes avoisinants. L'accélérateur de particules tourne autour du patient pendant que le patient se déplace longitudinalement ;



Appareil de tomothérapie

- la **cyberknife** est une technique où de nombreux faisceaux convergent avec une grande précision vers la tumeur en minimisant ainsi l'impact sur les tissus sains.



Appareil cyberknife

Ces deux dernières techniques sont destinées à traiter des tumeurs dont la localisation ne permet pas la réalisation d'une radiothérapie plus classique de type conformationnelle.

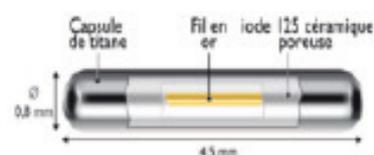
LA CURIETHÉRAPIE

La curiethérapie est une technique d'irradiation consistant à introduire les sources radioactives directement au contact ou à l'intérieur de la tumeur.

Il existe trois types de curiethérapie :

- **la curiethérapie à bas débit** : elle nécessite l'hospitalisation du patient pendant plusieurs jours. Elle délivre des débits de dose allant de 0,4 à 2 Gy/h. Les sources d'iridium 192 se présentent sous forme de fils (de 0,3 à 0,5 mm de diamètre et 14 cm de longueur maximale). Elles sont mises en place sur le patient

dans une chambre protégée et laissées pendant le temps de l'hospitalisation. La curiethérapie en bas débit peut être utilisée pour traiter les cancers de l'œil, ORL, du sein ou gynécologiques. Elle est également utilisée pour le traitement des cancers de la prostate : des sources scellées d'iode 125 de quelques millimètres de long sont implantées de façon permanente dans la prostate du patient en raison de la décroissance rapide de leur radioactivité. Les sources radioactives émettent des rayons qui détruisent les cellules cancéreuses ;



Grains d'iodes 125 pour la curiethérapie de la prostate



Radiographie de la prostate avec visualisation des grains d'iode 125

- **la curiethérapie pulsée à moyen débit** : elle délivre des doses identiques à la curiethérapie à bas débit mais sur des temps plus courts avec une source d'iridium de petite dimension. Contrairement à la curiethérapie à bas débit, le patient ne porte pas en permanence des sources. Cette technique est amenée à remplacer la curiethérapie à bas débit car elle renforce la radioprotection des personnels qui peuvent intervenir sans être exposés, mais également le confort du patient. Elle peut être utilisée pour traiter les cancers ORL, du sein ou gynécologiques ;

- **la curiethérapie à haut débit** : le débit de dose est élevé, de l'ordre de 12 Gy/h et le temps de traitement très court. La source utilisée est une source d'iridium de petite dimension. Elle est essentiellement utilisée pour traiter les cancers de l'œsophage, des bronches, du sein, etc.

Les radionucléides utilisés en curiethérapie sont différents de ceux utilisés en médecine nucléaire. Ils possèdent une énergie plus élevée et sont émetteurs de rayonnements bêta et gamma. Les doses administrées aux patients sont plus élevées et varient selon le type de cancer, le stade du cancer, l'organe à traiter, l'âge du patient, etc.

LA PROTONTHÉRAPIE

Cette technique consiste à traiter les tumeurs avec des protons accélérés contrairement à la radiothérapie conventionnelle qui utilise exclusivement des faisceaux de photons ou d'électrons. C'est une technique précise qui épargne les tissus sains, c'est pourquoi elle est utilisée pour des tumeurs situées à proximité d'organes critiques et sensibles aux radiations tels que l'œil ou le cerveau, elle est également utilisée en pédiatrie.

Le principe de la protonthérapie consiste à diriger le faisceau de protons accélérés issu de l'accélérateur de particules vers la tumeur du patient. L'énergie des protons est réglée pour atteindre la tumeur et libérer le maximum de leur énergie sur la tumeur. Au-delà de celle-ci, les tissus ne sont pas atteints.

Cette technique est très coûteuse car elle nécessite des technologies lourdes et sophistiquées. En France, il existe aujourd'hui seulement deux installations de protonthérapie.



Protonthérapie

LES DÉCHETS RADIOACTIFS DU SECTEUR MÉDICAL

LEUR NATURE

Les déchets radioactifs du secteur médical produits suite aux analyses *in vitro*, *in vivo* ou aux radiothérapies peuvent être des effluents liquides ou gazeux ou des déchets solides ou liquides contaminés.

Les effluents liquides radioactifs proviennent essentiellement :

- du rinçage dans des éviers réservés aux effluents radioactifs, dits « éviers chauds », des instruments non jetables utilisés par exemple pour les préparations et les injections (protège-seringue, plateaux, etc.) ;

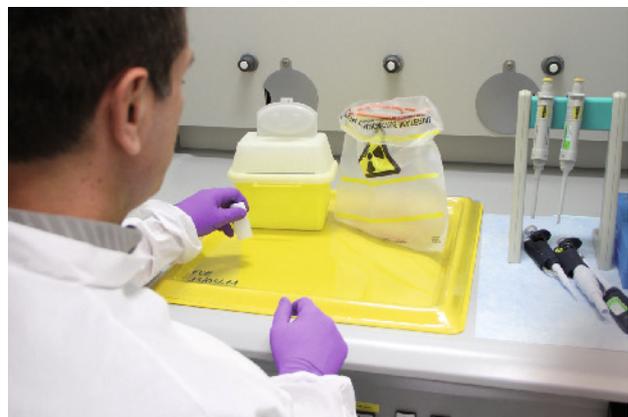


Protège-seringue

- des sanitaires des patients ayant reçu des injections de radionucléides (scintigraphie, TEP) ou des sanitaires des chambres protégées dans le cas des traitements à l'iode 131.

Les effluents gazeux radioactifs proviennent des radionucléides potentiellement volatilisés lors des phases de préparation et de manipulation des sources non scellées ou des examens de ventilation pulmonaire.

Les déchets contaminés sont de deux types : les déchets piquants ou coupants (lames, aiguilles, etc.) et les autres (gants, compresses, cotons, tubulures, tubes réactifs, embouts de pipette, etc.). La particularité de ces déchets est, qu'outre le risque radioactif, ils peuvent présenter d'autres risques : le risque infectieux, le risque chimique ou toxique.



Utilisation de produits radioactifs dans le secteur médical

Les autres déchets : certains déchets peuvent être induits. Il s'agit par exemple des pots en plomb transportant les radiopharmaceutiques qui, après contrôle de non-contamination, sont évacués vers une filière spécifique.

Les déchets du médical dans l'Inventaire national

Les établissements qui utilisent des radionucléides à des fins de diagnostic ou de thérapie dans le domaine de la médecine sont tenus de transmettre chaque année à l'Andra un inventaire des déchets radioactifs qu'ils détiennent au 31 décembre de l'année écoulée, en indiquant la filière de gestion utilisée. À fin 2016, le volume de déchets produits par les activités médicales est de l'ordre de 10 500 m³ parmi lesquels 1 950 m³ sont gérés en décroissance et 8 400 m³ sont stockés au Centre de stockage de la Manche (CSM).

LEUR GESTION

La gestion des déchets issus du secteur médical est encadrée par la loi. L'arrêté du 23 juillet 2008 a homologué la décision n° 2008-DC-0095 de l'ASN, prise en application des dispositions de l'article R.1333-12 du Code de la santé publique, qui « fixe les règles techniques auxquelles doit satisfaire l'élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides, ou susceptibles de l'être du fait d'une activité nucléaire. »

Dans les établissements de soins, un « zonage déchets » est mis en place afin de distinguer les zones où les déchets et effluents produits sont contaminés ou susceptibles de l'être, des zones où les déchets ou effluents produits sont conventionnels. Il peut s'agir d'une simple paillasse (évier chaud par exemple), d'une partie d'un local ou de sa totalité.

Les modalités de gestion des déchets et des effluents contaminés sont décrites pour chaque établissement dans un document, le plan de gestion des déchets et des effluents contaminés.

Ce plan comprend :

- les modes de production et de gestion des effluents et déchets radioactifs (modalités de tri, de conditionnement, de stockage) ;
- les dispositions assurant l'élimination des déchets et des effluents et les modalités de contrôles associés ;
- l'identification des zones où sont produits et entreposés les effluents et les déchets ;
- l'identification et la localisation des points de rejets des effluents ;
- la surveillance du réseau récupérant les effluents et de l'environnement.

Les déchets contaminés et les effluents radioactifs sont gérés indépendamment.

ARTICLE R. 1333-16 DU CODE DE LA SANTÉ PUBLIQUE

« Les effluents et déchets contaminés par des radionucléides ou susceptibles de l'être ou activés du fait d'une activité nucléaire sont collectés et gérés en tenant compte des caractéristiques et des quantités de ces radionucléides, du risque d'exposition encouru ainsi que des exutoires retenus. Les modalités de

collecte, de gestion et d'élimination des effluents et déchets sont consignées par le responsable d'une activité nucléaire dans un plan de gestion des effluents et des déchets tenu à la disposition de l'autorité compétente ».

LA GESTION DES DÉCHETS CONTAMINÉS

Les déchets contaminés par des radionucléides présentent un risque d'exposition et de contamination pour le personnel, les patients et l'environnement. Il convient donc de les éliminer dans des filières dédiées en assurant la maîtrise des risques d'exposition et de contamination.

Les établissements de soins qui possèdent ou produisent des déchets contaminés en sont responsables jusqu'à leur élimination définitive. L'élimination des déchets comporte des opérations de tri, de conditionnement, de caractérisation, d'entreposage, de collecte, de transport et de traitement éventuel.



Poubelles de tri utilisées dans les hôpitaux

Les déchets contaminés sont séparés des déchets non contaminés puis triés en fonction de leur nature, des radionucléides qu'ils contiennent, et des risques spécifiques (infectieux, cancérigène, reprotoxique, etc.). Ils sont conditionnés dans des emballages adaptés qui protègent du risque radiologique (poubelle en plomb) et également des autres risques (infectieux, chimique ou toxique). Ainsi, les poubelles en plomb peuvent contenir un emballage DASRI (déchets d'activités de soins à risques infectieux et assimilés)¹. Les déchets contaminés sont gérés selon la période radioactive des radionucléides qu'ils contiennent.

Les déchets contaminés peuvent être gérés en décroissance :

- s'ils contiennent ou sont contaminés par des radionucléides de période radioactive inférieure à 100 jours ;
- si les produits de filiation de ces radionucléides, issus des désintégrations successives des radionucléides, ne sont pas eux-mêmes des radionucléides de période supérieure à 100 jours. Dans le cas où les produits de filiation seraient des radionucléides de période supérieure à 100 jours, les déchets peuvent être gérés par décroissance radioactive si le rapport de la période du radionucléide père sur celle du radionucléide descendant est inférieur au coefficient 10^{-7} .



Emballages DASRI

La plupart des radionucléides utilisés pour des applications *in vivo* ont une période inférieure à 100 jours : ^{99m}Tc , ^{123}I , ^{131}I , ^{18}F .

Les déchets sont entreposés dans un lieu fermé et réservé à ce type de déchets. Après une durée d'entreposage au moins 10 fois supérieure à la période du radionucléide ayant la période la plus élevée, les déchets peuvent être éliminés comme des déchets non radioactifs après contrôle d'absence de contamination. Ainsi, après décroissance, les déchets sont dirigés :

- en l'absence de risques infectieux et chimiques, vers les filières des déchets non dangereux ;
- en présence d'un risque infectieux, vers la filière des déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI) ;
- en présence de risques chimiques ou toxiques, vers la filière adaptée des déchets à risques chimiques ou toxiques.

Afin de s'assurer de l'absence de contamination des déchets destinés à des filières de gestion de déchets non radioactifs, des systèmes de détection (balises, portiques) sont mis en place dans les établissements disposant d'une installation de médecine nucléaire.



Local d'entreposage des déchets radioactifs

Les générateurs produisant le technétium utilisés en médecine nucléaire et livrés régulièrement dans les établissements de soins, peuvent être utilisés pendant une durée limitée. Du fait de la décroissance radioactive, au bout d'environ une semaine, le générateur ne produit plus assez de technétium. Il est alors mis en décroissance pendant 3 semaines. Puis lorsque le niveau de radioactivité est assez faible, il est retourné au fournisseur.

Les déchets ne pouvant être gérés par décroissance, dont la période radioactive est supérieure à 100 jours, sont gérés dans les filières autorisées pour la gestion des déchets radioactifs. Ils sont dirigés vers les centres de stockage de l'Andra.



Conteneur de transport de générateur de technétium



Générateur de technétium

¹ Les DASRI contiennent des microorganismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou dont on a de bonnes raisons de croire qu'en raison de leur nature, de leur quantité ou de leur métabolisme, ils causent une maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants. Même en l'absence de risque infectieux, sont également considérés comme DASRI : les matériels et matériaux piquants ou coupants et les produits sanguins.

LA GESTION DES EFFLUENTS LIQUIDES RADIOACTIFS

Les effluents liquides peuvent être gérés par décroissance radioactive s'ils répondent aux mêmes critères que ceux énoncés pour les déchets contaminés.

Les effluents liquides sont dirigés et entreposés dans des cuves avant leur rejet pour éviter un rejet direct dans le réseau d'assainissement. Au moins deux cuves récoltent les effluents : lorsqu'une est en phase de remplissage, l'autre est en phase d'entreposage de décroissance. Les effluents liquides contenus dans les cuves d'entreposage sont rejetés dans le réseau d'assainissement si l'activité est inférieure à 10 Bq/L, excepté pour les chambres de patients traités à l'iode 131 où la limite est de 100 Bq/L. À noter que la dilution volontaire des effluents liquides radioactifs avant rejet est strictement interdite.



Cuves de décroissance

Après décroissance d'une durée équivalente à au moins 10 fois la période du radionucléide ayant la période la plus élevée et après contrôle, les effluents peuvent être rejetés dans l'environnement. Toutefois, il convient de noter que « tout déversement d'eaux usées autres que domestiques dans le réseau public doit être préalablement autorisé par le gestionnaire de réseau. »

Le rejet d'effluents liquides contenant des radionucléides de période supérieure à 100 jours est soumis à l'approbation de l'ASN. L'établissement doit réaliser une étude technico-économique, une étude d'incidence présentant les effets des rejets sur la population, l'environnement et les travailleurs et doit définir les modalités mises en place pour contrôler les rejets et les suspendre si besoin. Sur la base de ces éléments, l'ASN peut, soit autoriser le rejet des effluents en fixant des conditions de rejet dans l'environnement, soit imposer leur évacuation vers les centres de stockage de l'Andra si l'impact sur l'environnement, la population ou les travailleurs est trop important.

LA GESTION DES EFFLUENTS GAZEUX RADIOACTIFS

Le rejet des effluents gazeux doit être aussi faible que raisonnablement possible. Des filtres, tels que des filtres à charbon actifs sont mis en place. Ces filtres sont éliminés avec les déchets contaminés. Lorsque les effluents gazeux contiennent un radionucléide de période supérieure à 100 jours, l'ASN fixe les conditions de rejets dans l'environnement (suivi de l'activité rejetée, plan de surveillance, etc.) comme pour les effluents liquides radioactifs.

LE CAS PARTICULIER DES ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES DE PARTICULES

Le démantèlement des accélérateurs linéaires de particules induit également des déchets. En effet, certaines pièces de l'accélérateur peuvent être activées sous le flux de particules. Ces pièces doivent être identifiées, caractérisées et leur activité évaluée en vue de définir leur filière de gestion et leur prise en charge éventuelle par l'Andra. Toutefois, la caractérisation des émetteurs bêta purs à vie longue étant difficile et coûteuse, les déchets sont généralement entreposés *in situ* en attente de caractérisation. Des études sont en cours pour aider à la caractérisation de ces pièces métalliques.

LES PACEMAKERS AU PLUTONIUM 238

Les premiers stimulateurs cardiaques fonctionnaient avec une pile dont la durée de vie était limitée, et qui nécessitait un changement régulier (tous les 10 ans environ). Pour pallier ce défaut, des stimulateurs cardiaques au plutonium 238 ont été mis au point dans les années 1970. Leur durée de vie étant beaucoup plus élevée que les pacemakers de l'époque (environ 40 ans), ils peuvent donc fonctionner jusqu'au décès du patient. Ces stimulateurs utilisent l'énergie thermique de la désintégration alpha du plutonium, transformée en électricité qui alimente le stimulateur. Le plutonium 238 est enfermé dans un boîtier à plusieurs couches métalliques afin de protéger le patient des rayonnements. Les pacemakers au plutonium 238 ont été abandonnés au profit des pacemakers à pile iode/lithium du fait du risque d'irradiation en cas de défaillance du boîtier hermétique. Aujourd'hui ces pacemakers fonctionnent encore chez certains patients. Au décès du patient, il est retiré et renvoyé au fournisseur car considéré comme une source scellée.



Pacemaker au plutonium