

octobre 2009

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4301

$^{99}_{43}\text{Tc}^m$

Technétium-99m

- ▷ Émetteur X et gamma (raie principale = 141 keV)
- ▷ Période physique = 6 heures
- ▷ Période effective = 4 à 6 heures (en fonction de l'organe concerné)

- ▷ **Organes cibles** = thyroïde, foie et tractus gastro-intestinal
- ▷ **Surveillance du poste de travail** : mesures de débit de dose ambiant (radiamètre) et de contamination surfacique (contaminamètre, sondes X ou γ)
- ▷ **Surveillance individuelle de l'exposition externe** : dosimétrie passive (poitrine et extrémités), dosimétrie opérationnelle
- ▷ **Surveillance individuelle de l'exposition interne** : analyse radiotoxicologique des urines ou des fèces, ou anthroporadiométrie

Le technétium est un métal gris argenté brillant. Son point de fusion est évalué à 2 140 °C. La densité de l'élément pur est de 11,5.

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le technétium-99 métastable (Tc-99m) est une substance artificielle de courte période physique obtenue par décroissance du molybdène-99 (période physique de 66 heures). Les rayonnements γ de 740 keV et 778 keV liés à la désintégration du molybdène doivent donc être pris en compte pour la radioprotection lors de la manipulation du générateur. Cet aspect n'est pas pris en compte dans cette fiche.

Le molybdène-99 peut être produit en bombardant au moyen d'un flux de neutrons des cibles de molybdène naturel ou de molybdène enrichi en Mo-98 (réaction $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$). Le molybdène-99 ainsi produit est récupéré par séparation chimique puis fixé sur une colonne de chromatographie. Cependant, la production de Mo-99 selon cette méthode est relativement faible en raison de la présence dans le produit final de Mo-98.

Une autre méthode consiste à irradier par un flux de neutrons des cibles à base d'uranium enrichi en uranium 235. Du molybdène-99 est obtenu et récupéré par séparation chimique. Le molybdène est ensuite fixé sur une

Cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides en sources non scellées.

L'objectif n'est pas de se substituer à la réglementation en vigueur, mais d'en faciliter la mise en œuvre en réunissant sur un support unique, pour chaque radionucléide, les informations les plus pertinentes ainsi que les bonnes pratiques de prévention à mettre en œuvre.

Ces fiches sont réalisées à l'intention des personnes en charge de la radioprotection : utilisateurs, personnes compétentes en radioprotection, médecins du travail.

Sous ces aspects, chaque fiche traite :

- 1. des propriétés chimiques, radiophysiques et biologiques,*
- 2. des utilisations principales,*
- 3. des paramètres dosimétriques,*
- 4. du mesurage,*
- 5. des moyens de protection,*
- 6. de la délimitation et du contrôle des locaux,*
- 7. du classement, de la formation et de la surveillance du personnel,*
- 8. des effluents et déchets,*
- 9. des procédures administratives d'autorisation et déclaration,*
- 10. du transport,*
- 11. de la conduite à tenir en cas d'incident ou d'accident.*

colonne de chromatographie en phase liquide. Le générateur isotopique ainsi constitué permet ensuite d'extraire par élution en solution saline isotonique le technétium-99m, formé par désintégration du molybdène.

Les services de médecine nucléaire reçoivent des générateurs isotopiques Mo-99/Tc-99m. Ils bénéficient ainsi d'une ressource de Tc-99m pour quelques jours.

Propriétés radiophysiques

Période radioactive : 6 heures

Les principales émissions du technétium-99m sont reportées dans le *tableau I*.

▽ Principales émissions du technétium-99m **Tableau I**

Principales émissions	Énergie (keV)	Pourcentage d'émission
Gamma/X	18	6
	141	89
Électron	120	9

Les données ci-dessus concernent les principales émissions dont le pourcentage est supérieur à 1 %.

▽ Filiation du technétium-99m **Tableau II**

Produits de filiation	$^{99}_{43}\text{Tc}$	$^{99}_{44}\text{Ru}$
Équations	$^{99}_{43}\text{Tc}^m \xrightarrow{\gamma} ^{99}_{43}\text{Tc}$	$^{99}_{43}\text{Tc} \xrightarrow{\beta} ^{99}_{44}\text{Ru}$ stable

Le technétium-99 a une période de 212 000 ans. Dans la suite de la fiche, la contribution du Tc-99 est négligée compte tenu de sa faible activité résiduelle par rapport à celle du Tc-99m.

Propriétés biologiques

Le technétium élué est sous forme d'ion pertechnétate TcO_4^- . Incorporé sous cette forme par voie intraveineuse ou orale, le technétium se retrouve dans le tractus gastro-intestinal et le foie. Environ 50 à 80 % de la quantité ingérée est transféré dans la voie sanguine. Une fois dans le sang, environ 10 % de TcO_4^- se retrouve dans la paroi de l'estomac, 4 % dans la thyroïde et 3 % dans le foie ; le reste est uniformément distribué dans les autres organes.

La période effective du technétium-99m est de 4 heures pour la partie fixée à la thyroïde. De même et à partir de modèles biocinétiques simplifiés ne prenant pas en compte les phénomènes de redistribution entre organes, environ 75 % du technétium

1 Les débits d'équivalent de dose $\dot{H}_p(0,07)$ et $\dot{H}_p(10)$ ont été calculés avec un code Monte-Carlo (MCNPX).

2 Pour l'exposition des mains tenant la source, seule la valeur $\dot{H}_p(0,07)$ est pertinente.

99m est éliminé avec une période effective de 5,2 heures, 20 % avec une période effective de 5,6 heures et 5 % avec une période effective de 6 heures.

Lorsque le technétium est utilisé pour le marquage de molécules, cas le plus fréquent en médecine nucléaire, son métabolisme est celui de la molécule ainsi marquée.

2. UTILISATIONS

Les applications du technétium-99m sont essentiellement en médecine nucléaire. Il est utilisé dans des activités de diagnostic le plus souvent en tant que marqueur moléculaire de solutions salines injectées au patient.

Il est également utilisé sous forme gazeuse pour les scintigraphies pulmonaires. Les activités administrées sont variables : de l'ordre de 80 MBq pour une scintigraphie de la thyroïde à 800 MBq pour une scintigraphie osseuse.

En recherche, le technétium-99m est très peu utilisé.

En industrie, le technétium-99m n'est pas utilisé.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe ⁽¹⁾

Note préalable : les données dosimétriques ci-après sont obtenues par calcul, en l'absence de toute protection.

Les *tableaux III, IV et V* donnent pour une activité de 1 MBq, le débit d'équivalent de dose, exprimé en $\mu\text{Sv/h}$, en fonction de la distance, dans différentes configurations. Les grandeurs $\dot{H}_p(0,07)$ et $\dot{H}_p(10)$ correspondent respectivement aux débits d'équivalent de dose à la peau et au corps entier.

▽ Source ponctuelle **Tableau III**

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$2,7 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	$2,6 \cdot 10^0$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

▽ Flacon de 10 ml en verre standard rempli au tiers **Tableau IV**

	Débit d'équivalent de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq	
	Tenu en main	Sous le flacon	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$1,8 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽²⁾	Sans objet ⁽²⁾	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$

	Débit d'équivalent de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq (seringue de 5 ml)		
	Seringue 2 ml	Seringue 5 ml	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$7,4 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^0$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽²⁾	Sans objet ⁽²⁾	$2,5 \cdot 10^0$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$

Contamination cutanée

Une contamination cutanée de 1 MBq par cm^2 délivre un débit de dose à la peau [$\dot{H}_p(0,07)$] de l'ordre de 220 mSv/h.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

▽ Doses efficaces engagées et doses équivalentes engagées à l'organe à la suite d'incorporation de 1 Bq, (DPUI) pour les travailleurs de plus de 18 ans [Logiciel IMBA Professionnal – HPA]

Tableau VI

Forme	F	M	S
a) Inhalation de 1 Bq ($5 \mu\text{m}$)			
Dose efficace engagée (μSv)	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée à la thyroïde (μSv)	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée à l'estomac (μSv)	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée au foie (μSv)	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Dose équivalente engagée aux reins (μSv)	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Dose équivalente engagée à la vessie (μSv)	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$

b) Ingestion de 1 Bq ($f_i = 0,80$)	
Dose efficace engagée (μSv)	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée à la thyroïde (μSv)	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée à l'estomac (μSv)	$7,2 \cdot 10^{-5}$
Dose équivalente engagée au foie (μSv)	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Dose équivalente engagée aux reins (μSv)	$5,3 \cdot 10^{-6}$
Dose équivalente engagée à la vessie (μSv)	$8,6 \cdot 10^{-6}$

Compte tenu de la période effective du technétium-99m, les doses engagées sur un an sont identiques à celles engagées sur cinquante ans.

Exposition interne due à une contamination chronique

Pour 1 Bq/jour pendant n jours, multiplier les valeurs précédentes par n (hypothèse linéaire).

4. DÉTECTION ET MESURES

▽ Mesures de surveillance à réaliser

Tableau VII

	Appareil de mesure	Mise en œuvre
Mesure de débit de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)	Radiamètre équipé d'une sonde X ou γ	- En routine - En cas d'incident
Recherche de points de contamination	Sonde X ou γ	- Après chaque manipulation - En cas d'incident
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	Sonde X ou frottis	- En routine - En cas d'incident
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	Balise de détection adaptée à la mesure des aérosols ou de micro-particules marquées	En routine, si le risque de contamination atmosphérique est avéré

Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)

Le débit de dose ambiant peut être mesuré grâce à un radiamètre équipé d'une sonde X (éventuellement d'une sonde gamma). Cette même technique peut être utilisée pour la recherche de points de contamination.

Mesure de la contamination surfacique (Bq/cm^2)

La mesure d'une contamination surfacique en technétium-99m peut être réalisée :

- soit directement avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm^2 . Veiller à ce que l'appareil soit étalonné, contrôlé et adapté à la mesure du technétium-99m. En cas de doute, contacter le constructeur ;
- soit par la mesure d'un taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde X que l'on applique sur la surface à contrôler ;
- soit indirectement par un frottis (qui est ensuite compté par une sonde X) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions de prélèvement. Dans tous les cas, la surface du frottis doit être égale ou inférieure à la surface du détecteur. L'utilisation du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur précise de rendement. Dans le cas où celui-ci ne peut pas être évalué, il est suggéré de retenir la valeur de 10 % tel qu'indiqué dans la norme NF-ISO 7503-1 relative à l'évaluation de la contamination de surface.

La mesure par frottis complète souvent la mesure directe pour distinguer une contamination labile d'une contamination fixée, ou en présence d'un environnement défavorable (rayonnement ambiant perturbant la mesure, géométrie non adaptée à la mesure directe...).

Relation entre le taux de comptage et l'activité surfacique

$$As = \frac{n}{Rd \times S \times K}$$

où **As** est l'activité surfacique en Bq/cm² ;
n est le taux de comptage en impulsions par seconde ;
Rd est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π) ;
S est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm², selon le cas ;
K est le rendement de la mesure ou de frottis (K = 1 pour la mesure par taux de comptage, K = 0,1 par défaut pour la mesure par frottis).

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³)

La contamination atmosphérique en technétium-99m peut être mesurée en temps réel par des balises. Le point de prélèvement doit être placé au plus près du poste de travail : le capteur doit être éloigné afin d'éviter qu'il soit perturbé par le débit de dose ambiant ou contaminé.

La contamination atmosphérique peut également être mesurée en temps différé au moyen d'appareil de prélèvement d'air. La périodicité de comptage du filtre dépend notamment de la quantité de substances manipulées et du temps de présence du personnel. Une étude de poste de travail déterminera ces paramètres.

5. MOYENS DE PROTECTION

Le choix des moyens de protection repose sur une analyse préalable de l'intervention à réaliser (ou des protocoles expérimentaux) afin d'identifier le ou les risque(s) présent(s) selon les formes chimiques manipulées. Il est recommandé de pratiquer une simulation de l'opération pour en définir les règles de manipulation et en maîtriser les gestes et la durée.

Installation des locaux

Les locaux doivent être conçus pour la manipulation du technétium-99m, être réservés à cet effet et situés à l'écart des circulations générales :

- le revêtement des sols, des murs, des plafonds et des surfaces de travail doit être en matériau lisse, imperméable, sans joint et facilement décontaminable ;
- les locaux mis en dépression doivent bénéficier d'une ventilation indépendante du système général de ventilation, le renouvellement d'air doit être de 10 volumes par heure pour le laboratoire chaud et de 5 volumes par heure pour les autres locaux ;
- en médecine nucléaire, les parois du laboratoire chaud et de la chambre blindée destinée à recevoir le générateur de technétium

doivent être suffisamment épaisses pour tenir compte des rayonnements γ de 740 keV et 778 keV du molybdène (à titre indicatif, pour utiliser un générateur de 37 GBq sans protection autre que les 5 cm de plomb du générateur lui-même, et situé contre la paroi d'un local en limite de zone publique, il faudrait une épaisseur équivalente à 45 cm de béton). Cela permet de garantir, à l'extérieur des locaux, que la limite de dose pour le public ne sera pas dépassée ;

- le sas vestiaire pour le personnel est conçu et aménagé pour permettre la séparation, dans deux secteurs distincts, des vêtements de ville et des vêtements de travail (y compris les chaussures), et comporte douche et lavabo ;
- les éviers doivent comporter des robinets à commande non manuelle et être reliés à des cuves de décroissance quand ils sont susceptibles de recevoir des effluents liquides contaminés. Dans ce cas, les éviers doivent être clairement identifiés ;
- le matériel médical ou de laboratoire utilisé pour le travail avec le technétium-99m ne doit servir qu'à la manipulation de substances radioactives et être nettoyé au moins une fois par jour ;
- l'utilisation de couvre-plateaux absorbants et jetables est recommandée.

Protection contre l'exposition externe

Trois actions majeures permettent de se protéger contre les risques d'exposition externe :

- diminuer le temps d'exposition aux rayonnements : par exemple, limiter le temps de manipulation des sources et le temps de présence auprès des patients injectés ;
- s'éloigner de la source de rayonnements : des pinces longues peuvent être utilisées ;
- interposer un ou plusieurs écran(s) entre la source de rayonnements et les personnes (*voir tableau VIII*).

▽ *Caractéristiques des écrans permettant de diminuer le débit de dose lié au technétium-99m* **Tableau VIII**

	Épaisseur de plomb	Épaisseur d'acier
Atténuation d'un facteur 10 du débit de dose	2 mm	21 mm
Atténuation d'un facteur 2 du débit de dose	0,4 mm	8 mm

Dans les laboratoires de production ou de préparation de solutions contenant du technétium-99m, les manipulations doivent avoir lieu en enceinte blindée.

Dans les services de médecine nucléaire, le molybdène-99 est présent dans les générateurs isotopiques de Tc-99m. La partie de l'installation où se trouve le générateur isotopique doit être blindée en prenant en compte les énergies des rayonnements γ et en particulier ceux de 740 keV et 778 keV.

Dans les services de médecine nucléaire, les solutions doivent être placées dans des protège-flacons en verre au plomb. Il est également indispensable d'utiliser des protège-seringues en plomb ou en tungstène munies d'une fenêtre en verre au plomb.

Un tablier de plomb peut être utilisé en particulier lors de l'administration au patient.

Protection contre l'exposition interne

Les équipements de protection individuelle doivent être utilisés :

- gants jetables (latex ou de caoutchouc...) : le port de gants, à changer toutes les 15 minutes environ, constitue une barrière contre la contamination cutanée mais pas contre l'irradiation. Il est rappelé qu'après chaque manipulation, un contrôle de non-contamination et un lavage des mains sont nécessaires ;
- blouse à manches longues, fermée ;
- lunettes de protection.

La préparation des solutions de technétium-99m a lieu dans des boîtes à gants blindées. Celles-ci doivent être équipées d'un

système de ventilation indépendant avec filtres (les filtres sont changés tous les ans ou à la suite de colmatage pouvant affecter leur efficacité).

En cas d'utilisation du technétium-99m sous forme gazeuse, lorsqu'il est impossible de travailler en boîte à gants (examen *in vivo*), un dispositif permettant une captation de l'air doit se situer au plus près de la tête du patient et être raccordé à une gaine d'extraction indépendante du système d'extraction d'air du bâtiment pour éviter tout recyclage.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLES DES LOCAUX

Délimitation des locaux (3)

Pour le technétium-99m, la délimitation des locaux doit prendre en compte les risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et stockées (voir [tableau IX et X](#)).

Tableau IX

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 h

	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
Zone non réglementée ■ Dose efficace susceptible d'être reçue par un travailleur $E < 80 \mu\text{Sv}/\text{mois}$ ■ Contrôle de l'état de propreté radiologique si risque de contamination dans les zones réglementées attenantes	Zone surveillée gris-bleu $E < 7,5 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée verte $E < 25 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée jaune $E < 2 \text{ mSv}$ & $\text{DDD}^* < 2 \text{ mSv}/\text{h}$	Zone contrôlée orange $E < 100 \text{ mSv}$ & $\text{DDD}^* < 100 \text{ mSv}/\text{h}$	Zone rouge dite zone interdite $E > 100 \text{ mSv}$ ou $\text{DDD}^* > 100 \text{ mSv}/\text{h}$

* DDD : débit de dose

Tableau X

EXPOSITION DES EXTRÉMITÉS (MAINS, PIEDS, CHEVILLES ET AVANT-BRAS) Dose équivalente (H) susceptible d'être reçue en 1 h

	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
Zone non réglementée Pas de valeur affichée	Zone surveillée gris-bleu $H < 0,2 \text{ mSv}$	Zone contrôlée verte $H < 0,65 \text{ mSv}$	Zone contrôlée jaune $H < 50 \text{ mSv}$	Zone contrôlée orange $H < 2,5 \text{ Sv}$	Zone rouge dite zone interdite $H > 2,5 \text{ Sv}$

3 Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites.

Sous réserve de la présence d'une signalétique adaptée, il est possible de limiter les zones réglementées à une partie du local dans lequel le technétium-99m est manipulé.

Dans les services de médecine nucléaire ⁽⁴⁾, dans les conditions habituelles de pratique, l'étude de zonage conduit généralement à classer les locaux dans lesquels le Tc-99m est manipulé régulièrement en zones contrôlées : zone de réception des produits radioactifs, laboratoire chaud, salle d'administration, zones de manipulation et de stockage des déchets solides et liquides. Il en est de même pour les salles de caméra à scintillations.

L'étude de zonage conduit généralement à classer les autres locaux d'accès réglementé en zones surveillées.

Les activités nécessitant un classement en zones contrôlées ou surveillées doivent être regroupées géographiquement.

Contrôles ⁽⁵⁾

Le contrôle de la contamination surfacique doit être réalisé après chaque manipulation et en cas d'incident sur les surfaces, matériels, écrans, mains... Les boîtes à gants et leur système de filtration doivent être contrôlés au moins une fois par an. Des contrôles de routine peuvent également être organisés afin de vérifier périodiquement l'état radiologique de la boîte à gants et des filtres d'extraction.

En cas de risque de dispersion atmosphérique de technétium-99m, la présence d'une balise de détection servira de moyen d'alerte.

Le bon fonctionnement des appareils de mesure utilisés doit être vérifié au moins annuellement (et avant utilisation si celui-ci n'a pas été utilisé depuis plus d'un mois).

Par ailleurs, après toute manipulation et en sortie de zone réglementée, un contrôle de non-contamination corporelle doit être réalisé de manière systématique.

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL EXPOSÉ

Classement

Contrairement à la délimitation des zones de travail qui est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé sur la base des résultats obtenus à la suite d'une étude de poste.

L'évaluation de la dose prévisionnelle annuelle, prenant en compte les expositions externe et interne aux différents postes occupés, permet de classer les travailleurs exposés en deux catégories, A et B. Ce classement n'est pas fondé sur l'affectation habituelle ou non en zone réglementée (surveillée ou contrôlée), mais sur un niveau de dose susceptible d'être atteint dans les conditions normales de travail. Les niveaux de référence sont fournis au *tableau XI*.

▽ Critères de classement des travailleurs exposés **Tableau XI**

	Dose efficace	Dose équivalente mains, avant-bras, pieds, chevilles	Dose équivalente à tout cm ² de la peau	Dose équivalente au cristallin
Travailleurs exposés de catégorie A	≥ 6 mSv sur 12 mois consécutifs	≥ 150 mSv	≥ 150 mSv	≥ 45 mSv
Travailleurs exposés de catégorie B	< 6 mSv sur 12 mois consécutifs	< 150 mSv	< 150 mSv	< 45 mSv

Formation du personnel

Tous les personnels susceptibles d'intervenir en zone réglementée doivent bénéficier d'une formation à la radioprotection organisée par l'employeur portant sur les risques d'exposition externe et interne, sur les procédures générales de radioprotection en vigueur ainsi que sur les règles de protection contre les rayonnements ionisants.

Une attention particulière doit être portée à la formation des travailleurs temporaires et des nouveaux entrants. Une formation (information) spécifique peut être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale du personnel

Les points importants sont les suivants :

- surveillance médicale renforcée, au moins annuelle, s'appuyant sur une fiche d'exposition établie par le chef d'établissement (copie dans le dossier médical) ;
- carte individuelle de suivi médical (contacter l'IRSN : www.siseri.com) ;
- attestation d'exposition professionnelle établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche d'exposition.

Aucune femme enceinte ne peut être affectée à un poste impliquant un classement en catégorie A. La dose de l'enfant à naître doit, dans tous les cas, rester inférieure à 1 mSv entre la déclaration de grossesse et l'accouchement. En cas d'allaitement, tout travail comportant un risque de contamination interne doit être exclu.

4 Pour plus d'informations, se référer à la fiche INRS, coll. « Radioprotection », *Médecine nucléaire. Diagnostic in vivo hors TEP*, ED 4238.

5 Arrêté du 26 octobre 2005 définissant les modalités de contrôle de radioprotection en application des articles R. 4452-12, R. 4452-14 à R. 4452-16 du code du travail et R. 1333-44 du code de la santé publique.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

- Dosimètre passif individuel :
 - Catégorie A : mensuel
 - Catégorie B : mensuel ou trimestriel
- Dosimétrie opérationnelle pour toute opération en zone contrôlée, quelle que soit la catégorie du travailleur

Exposition des extrémités

Le risque lié à l'exposition des extrémités étant présent (notamment lors de la préparation des solutions actives et des injections aux patients), il est fortement recommandé de porter un dosimètre bague.

Exposition interne

Elle peut être évaluée de préférence par examen anthroporadiométrique ou à défaut par analyse radiotoxicologique urinaire (durée du prélèvement : 24 heures) voire des fèces.

En cas de suspicion de contamination, ces examens doivent être réalisés très rapidement étant donné la courte période du technétium-99m.

En routine, le rythme des examens doit tenir compte des phases d'exposition (en médecine nucléaire par exemple : préparation de solutions, injections, réalisation de scintigraphies) et intervenir dans les meilleurs délais après les manipulations.

En cas de contrôle positif, le médecin du travail demandera des contrôles ultérieurs pour suivre l'évolution du niveau de l'exposition. Les circonstances de l'exposition seront analysées avec l'appui de la PCR.

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement a le devoir de mettre en œuvre un plan de gestion individualisé définissant les modalités de tri, de conditionnement, de stockage, de contrôle et d'élimination des effluents et des déchets produits⁽⁶⁾. L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

Après décroissance, les déchets et les effluents doivent être éliminés selon la filière appropriée en fonction de leur nature (banale, chimique, biologique...).

La période radioactive du technétium-99m étant inférieure à 100 jours, les déchets et les effluents produits peuvent faire l'objet d'une gestion et d'une élimination locales sans qu'il n'y ait de prise en charge obligatoire par l'ANDRA.

Déchets solides

Les déchets sont déposés dans des poubelles spécifiques plombées dont l'ouverture doit pouvoir se faire à l'aide du pied. Ils sont ensuite stockés dans un local réservé pendant au moins 10 périodes radioactives, soit pour le technétium-99m, près de 60 heures (2,5 jours). L'élimination ne peut se faire que si le jour où l'élimination est prévue, l'activité détectée ne dépasse pas 2 fois le bruit de fond.

Effluents liquides

Cas général

Les effluents liquides sont dirigés vers un système de cuves d'entreposage dont le contenu est ensuite rejeté dans le réseau d'assainissement après entreposage pendant au moins 10 périodes radioactives et en tout état de cause après avoir vérifié que l'activité volumique est inférieure à 10 Bq/l. Les canalisations, signalées, sont étanches et résistent à l'action physique et chimique des effluents concernés.

Les cuves d'entreposage sont équipées de dispositifs de mesure de niveau et de prélèvement. Elles fonctionnent alternativement en remplissage et en entreposage de décroissance. Un dispositif permet la transmission de l'information du niveau de remplissage des cuves vers un service où une présence est requise 24 heures sur 24. Ces cuves sont installées dans un local indépendant, ventilé et fermé à clé, muni d'un détecteur de liquide en cas de fuite. Elles doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- constituées d'un matériau facilement décontaminable (béton à proscrire) ;
- situées au-dessus d'un cuvelage de sécurité permettant la rétention de liquide en cas de fuite, ce cuvelage doit être muni d'un capteur de fuite.

Cas particulier des sanitaires en médecine nucléaire

En médecine nucléaire, une fosse de décroissance (type fosse septique) est interposée entre les sanitaires (réservés aux patients injectés) et le collecteur de l'établissement (2 m³ minimum pour une fréquentation journalière de 25 personnes).

En sortie de site, l'activité des effluents doit être inférieure à 1 000 Bq/l. Elle est surveillée :

- soit par un bilan sur 8 h réalisé par un spectromètre au moins 4 fois par an ;
- soit par un contrôle en continu au moyen d'un détecteur approprié.

Effluents gazeux

Les effluents gazeux ne peuvent pas être rejetés sans un contrôle préalable. Ils sont captés sur des filtres qui doivent être contrôlés puis traités avec les déchets radioactifs solides.

Les systèmes de filtration des enceintes ventilées doivent être contrôlés selon une périodicité définie par le plan de gestion des déchets et effluents radioactifs de l'établissement.

⁶ Arrêté du 23 juillet 2008 relatif à l'élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides.

9. PROCÉDURES ADMINISTRATIVES D'AUTORISATION ET DE DÉCLARATION

Application à des fins médicales : médecine, art dentaire, biologie humaine, recherche biomédicale

La détention et l'utilisation du technétium-99m sont soumises à autorisation préalable prise au titre du code de la santé publique et délivrée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), quelles que soient les activités détenues et manipulées.

Application non médicale conduite dans un établissement industriel produisant du molybdène (générateur de technétium-99m)

Une autorisation délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique, quelles que soient les activités mises en jeu.

L'expéditeur est également responsable de la signalisation des colis qui est destinée à limiter les risques d'exposition des personnes du public ou des travailleurs en cours de transport. Cette signalisation est effectuée par l'une des étiquettes 7A, 7B ou 7C représentées ci-dessous, choisie en fonction des débits de dose mesurés autour du colis.



▽ Correspondance entre la catégorie des étiquettes apposées au colis, l'indice de transport et le débit de dose

Tableau XIII

Indice de transport IT ⁽¹³⁾	Débit de dose (DDD) en tout point de la surface externe	Étiquette
0	DDD ≤ 5 µSv/h	I – BLANCHE
Plus de 0 mais pas plus de 1	5 µSv/h < DDD ≤ 500 µSv/h	II – JAUNE
Plus de 1 mais pas plus de 10	500 µSv/h < DDD ≤ 2 mSv/h	III – JAUNE
Plus de 10	2 mSv/h < DDD ≤ 10 mSv/h ⁽¹⁴⁾	III – JAUNE et transport exclusif

10. TRANSPORTS SUR LA VOIE PUBLIQUE

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses. Pour le molybdène-99, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 100 Bq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 1 MBq, la réglementation ne s'applique pas.

Si ces deux seuils sont dépassés, le transport est soumis aux exigences des règlements applicables; pour les transports par route, rail, voie fluviale, mer ou air, des arrêtés français rendent applicables les règlements ADR⁽⁷⁾, RID⁽⁸⁾, ADN⁽⁹⁾ ou ADN^R⁽¹⁰⁾, IMDG⁽¹¹⁾ ou les instructions techniques de l'OACI⁽¹²⁾, respectivement. Tous ces règlements sont compatibles entre eux pour faciliter les transports multimodaux.

L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans ces règlements. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée. Un niveau d'activité de référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le molybdène-99, A2 vaut 600 GBq.

▽ Classement des colis selon l'activité du contenu

Tableau XII

Type de colis	Activité du molybdène-99 contenu	Exigences de conception du colis
Colis excepté	< 600 MBq (< A2/1000)	Faibles : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en l'absence d'incident.
Colis de type A	< 600 GBq (< A2)	Moyennes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'incident mineur (choc de manutention, pluie, etc.).
Colis de type B	> 600 GBq (> A2)	Fortes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'accident sévère (collision, incendie, submersion).

7 ADR : accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route.

8 RID : règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses.

9 ADN : accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures.

10 ADN^R : règlement pour le transport de matières dangereuses sur le Rhin.

11 IMDG : code maritime international des matières dangereuses, Organisation maritime internationale.

12 Instructions techniques de l'OACI : instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses, Organisation de l'aviation civile internationale.

13 IT = intensité de rayonnement maximale à 1 m de tout point situé à la surface du colis (en mSv/h) x 100 x k où k est un coefficient qui dépend de la géométrie du colis avec k = 1 pour les colis dont la plus grande section est de 1 m².

14 L'intensité en tout point de la surface externe ne peut dépasser 2 mSv/h que si le véhicule est équipé d'une enceinte qui, dans les conditions de transport de routine, empêche l'accès des personnes non autorisées à l'intérieur de l'enceinte, des dispositions sont prises pour immobiliser le colis à l'intérieur de l'enceinte du véhicule et il n'y a pas d'opérations de chargement/déchargement entre le début et la fin de l'expédition.

11. CONDUITE À TENIR EN CAS D'INCIDENT OU D'ACCIDENT

Le traitement de l'urgence vitale médico-chirurgicale prime sur toute action de décontamination.

Dès la découverte de l'événement :

- suivre les consignes affichées en tenant compte des circonstances de l'incident et des activités mises en jeu ;
- alerter la personne compétente en radioprotection, le responsable de l'installation et le médecin du travail ;
- contacter, si nécessaire, l'IRSN pour un appui technique (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

Contamination des locaux et/ou du matériel

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée (à l'aide d'une sonde X par exemple), délimiter et baliser un périmètre de sécurité.
- Confiner le déversement ou la fuite (produits absorbants...).
- Avertir le personnel et éventuellement le faire évacuer.
- Décontaminer de l'extérieur vers l'intérieur avec du matériel jetable en utilisant des détergents de laboratoire.
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde X, frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

Les personnes intervenant au cours de la décontamination doivent porter, *a minima*, des gants, une blouse et des surbottes (les surbottes doivent être étanches en cas de déversement de liquide).

Dans le cas d'une dispersion non contrôlée de technétium-99m sous forme gazeuse, il est recommandé de faire évacuer la zone, d'en interdire l'accès et d'attendre le renouvellement de l'air. L'interdiction doit être maintenue pendant toute la durée de la dispersion. Après l'arrêt, il est conseillé d'évaluer la quantité dispersée à partir de l'activité de la source-mère puis de déterminer le temps nécessaire à la décroissance.

Toute contamination de locaux ou de surfaces de travail doit conduire à rechercher une contamination éventuelle des personnes présentes.

Expositions externe et interne d'une personne

Exposition due à une source distante

- Relever la dosimétrie opérationnelle. Le cas échéant, la comparer avec les résultats des dosimètres des autres intervenants.
- Réaliser une première investigation en vérifiant le débit de dose de la source et le temps de présence de l'intervenant.
- Si l'irradiation est avérée ou en cas de doute, transmettre les dosimètres passifs au laboratoire pour exploitation en urgence.

Contamination cutanée

- Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures (éventuellement, les sécrétions nasales).

- Procéder à la décontamination par un lavage à l'eau savonneuse de préférence (ou un produit équivalent non abrasif) sans frotter afin de ne pas favoriser le passage transcutané du contaminant.

- Contrôler après la décontamination.

- Si une contamination cutanée persiste, un pansement étanche peut être placé sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

- Réaliser un examen anthroporadiométrique ou une analyse radiotoxicologique des urines voire des fèces.

Il est impératif d'obtenir une décontamination complète de façon à éviter une contamination interne induite.

Toute contamination du personnel doit être analysée car elle peut être le seul signe apparent d'une contamination d'un local ou d'une zone.

Contamination oculaire

- Laver abondamment sous l'eau à température ambiante pendant 15 minutes.
- Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.
- Réaliser un examen anthroporadiométrique ou une analyse radiotoxicologique des urines voire des fèces.

Contamination interne

Toute contamination cutanée ou oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne.

Cette situation impose l'intervention immédiate de la PCR et du médecin du travail qui, si nécessaire, feront appel à un service spécialisé ou à l'IRSN.

- Déterminer l'activité manipulée.
- Débuter immédiatement les prélèvements urinaires (durée : entre 12 et 24 heures au maximum compte tenu de la période effective du technétium-99m) et les envoyer pour analyse à l'IRSN ou à un organisme agréé.
- Apprécier le niveau de contamination par un examen anthroporadiométrique.

Exemples d'évaluation de la dose efficace engagée

Par analyses radiotoxicologiques

Dans le cas d'un recueil des urines, le calcul de dose s'effectue de la manière suivante :

$$I = A_m / F(t) \\ E(Sv) = I(Bq) \times DPUI (Sv/Bq)$$

Avec

E = dose efficace engagée

I = activité incorporée au jour de la contamination

A_m = activité mesurée (soit en excrétion, soit en rétention) au jour t après la contamination

F(t) = fraction excrétée ou retenue au jour t pour 1 Bq incorporé

DPUI = dose par unité d'incorporation

Exemple numérique :

L'analyse des urines des 24 heures prélevées le jour qui suit la contamination donne le résultat suivant :

$$A_1 = 95.10^2 \text{ Bq sur 24 h}$$

Le *tableau XIV* donne l'excrétion urinaire mesurée au jour t, en Bq par Bq inhalé (5 µm) et ingéré, pour le technétium 99m. Ces valeurs de F(t) ont été évaluées au moyen du logiciel IMBA Professionnal (Health Protection Agency – GB).

L'évaluation de l'activité incorporée sera, sur la base des mesures d'excrétion au 1^{er} jour :

$$I = 95.10^2 / 5,4.10^{-4} = 17,6.10^6 \text{ Bq}$$

Ce qui donne en prenant la DPUI correspondante (*voir tableau VI*) :

$$E = 17,6.10^6 \times 2,9.10^{-11} = 51.10^{-5} \text{ Sv soit } 0,51 \text{ mSv}$$

▽ Excrétion urinaire journalière
(Bq par Bq incorporé)

Tableau XIV

	Temps en jours après l'incorporation		
	1	2	3
Inhalation (5 µm)			
F	3,9.10 ⁻³	1,9.10 ⁻⁴	7,8.10 ⁻⁶
M	5,4.10 ⁻⁴	3,0.10 ⁻⁵	1,3.10 ⁻⁶
Ingestion	6,8.10 ⁻³	3,5.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁵

À titre indicatif, l'activité urinaire susceptible d'être mesurée au 3^e jour est égale (d'après le tableau XIV) à :

$$17,6.10^6 \times 1,3.10^{-6} = 23 \text{ Bq}$$

Par mesures anthroporadiométriques

Quatre heures après une contamination interne, la mesure anthroporadiométrique corps entier indique la présence de Tc99m (type M) avec une activité égale à 100 kBq.

Le tableau XV donne les valeurs F(t) de rétention de l'activité inhalée au temps t pour le corps entier. Ces valeurs ont été

15 Guide ASN/DEU/03 relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection hors installations nucléaires de base et transports de matières radioactives.

évaluées au moyen du logiciel IMBA Professionnal (Health Protection Agency – GB).

Tableau XV

Temps en heures après l'incorporation	Inhalation (5 µm)		
	F	M	S
1	7,2.10 ⁻¹	7,2.10 ⁻¹	7,2.10 ⁻¹
2	6,3.10 ⁻¹	6,3.10 ⁻¹	6,3.10 ⁻¹
3	5,5.10 ⁻¹	5,5.10 ⁻¹	5,5.10 ⁻¹
4	4,8.10 ⁻¹	4,8.10 ⁻¹	4,8.10 ⁻¹
5	4,5.10 ⁻¹	4,5.10 ⁻¹	4,5.10 ⁻¹
10	2,1.10 ⁻¹	2,2.10 ⁻¹	2,2.10 ⁻¹
12	1,6.10 ⁻¹	1,7.10 ⁻¹	1,7.10 ⁻¹
14	1,3.10 ⁻¹	1,3.10 ⁻¹	1,3.10 ⁻¹
16	9,6.10 ⁻²	9,7.10 ⁻²	9,7.10 ⁻²
18	7,3.10 ⁻²	7,4.10 ⁻²	7,4.10 ⁻²
20	5,6.10 ⁻²	5,7.10 ⁻²	5,7.10 ⁻²
24	3,3.10 ⁻²	3,3.10 ⁻²	3,3.10 ⁻²
36	6,7.10 ⁻³	6,8.10 ⁻³	6,8.10 ⁻³
48	1,4.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³

L'activité inhalée est donc de :

$$I = 100.10^3 / 4,8.10^{-1} = 2,1.10^5 \text{ Bq}$$

Ce qui donne en prenant la DPUI correspondante (*voir tableau VI*) :

$$E = 2,1.10^5 \times 2,9.10^{-11} = 6.10^{-6} \text{ Sv soit } 6 \text{ µSv}$$

Déclarations à effectuer

Tout incident ou accident doit être consigné dans le registre d'hygiène et de sécurité.

Tout accident du travail doit être déclaré par l'employeur auprès de la caisse primaire d'assurance maladie.

Tout accident ou incident significatif doit être déclaré, dans les meilleurs délais, auprès de la division territoriale compétente de l'ASN selon les dispositions en vigueur⁽¹⁵⁾.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail doit également être prévenu.

Cette fiche a été élaborée par un groupe de travail animé par l'INRS et l'IRSN auquel ont participé des experts de l'AP-HP, CEA, CH de Poissy-St-Germain, CNRS, EDF, INSERM, ainsi que l'ASN et la DGT. Les experts qui ont plus particulièrement contribué à cette fiche sont :

- Bernard Aubert (IRSN),
- Jean-Michel Deligne (IRSN),
- Alain Despres (IRSN),
- Laurent Donadille (IRSN),
- Denis-Jean Gambini (AP-HP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St-Germain),
- Alain Rannou (IRSN),
- Gilles Sert (IRSN),
- Jean-Pierre Servent (INRS).



Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
31, avenue de la Division-Leclerc 92260 Fontenay-aux-Roses
Tél. 01 58 35 88 88 • www.irsn.fr



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • www.inrs.fr • info@inrs.fr