

mars 2013

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4310

⁹⁰Y
39

Yttrium-90

▷ Émissions :

β^- : $E_{\text{moyenne}} = 933 \text{ keV}$; $E_{\text{max}} = 2 280 \text{ keV}$

▷ Période physique : 2,7 jours

▷ Seuils d'exemption : 10^5 Bq , 10^3 Bq/g

▷ Organes critiques en termes de dose efficace (incorporé sous forme libre) : côlon, poumons

▷ Surveillance du poste de travail : mesure de la contamination surfacique (contaminamètre ou frottis) et du débit d'équivalent de dose ambiant (radiamètre)

▷ Surveillance individuelle de l'exposition externe : dosimétrie passive (poitrine et extrémités), dosimétrie opérationnelle en zone contrôlée

▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : analyse radiotoxicologique des urines à organiser en fonction des conditions réelles d'utilisation et impérativement suite à une suspicion de contamination

Dans le groupe des métaux de transition, l'yttrium est classé dans la famille des terres rares. Il possède une surface brillante argentée. Son point de fusion est de 1 520 °C et son point d'ébullition est de 3 340 °C. Le plus souvent combiné avec des lanthanides, l'yttrium est présent dans la plupart des minerais de terres rares, particulièrement la monazite. Il s'oxyde lentement mais, réduit en poudre ou en copeaux, peut s'enflammer dans l'air. Il réagit avec l'eau et se dissout dans les acides. Sous forme vapeur ou gazeuse, l'yttrium est dangereux sur le lieu de travail car il peut provoquer des complications pulmonaires.

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

L'yttrium-90 n'existe pas à l'état naturel. Il est produit par la désintégration du strontium-90⁽¹⁾ : ${}^{90}\text{Sr} \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}\text{Y}$. L'yttrium-90 peut également être produit par réaction de capture, ${}^{89}\text{Y}(n,\gamma){}^{90}\text{Y}$ ou ${}^{90}\text{Zr}(n,p){}^{90}\text{Y}$.

Cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides essentiellement 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 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.*

(1) Fiche dans la même collection : *Strontium-90*, ED 4309.

Propriétés radio-physiques

L'yttrium-90 a une période radioactive de 2,7 jours et une activité massique de $1,99 \times 10^{16}$ Bq/g.

L'yttrium-90 est un émetteur β^- quasi pur ; les contributions des électrons et des rayonnements X et γ qui accompagnent sa transition nucléaire (désintégration) sont faibles et ne sont pas reportés dans le [tableau I](#).

▼ Principales émissions de l'yttrium-90

Tableau I

Principales émissions	Énergie (keV)		Pourcentage d'émission (%)
	E_{\max}	E_{moy}	
β^- (spectre continu)	2280	933	~ 100

▼ Filiation de l'yttrium-90

Tableau II

Produit de filiation	Zirconium-90 (stable)
Équation	${}^{90}\text{Y} \xrightarrow{\beta^-} {}^{90}\text{Zr}$

Propriétés biologiques

L'yttrium-90 retenu dans l'organisme se retrouve principalement dans le foie et l'os. De la fraction transférée au sang, environ un quart est excrété tandis que la majeure partie est retenue dans le squelette (50%) et dans le foie (15%), les 10% restant retenu dans les autres organes.

L'élimination fécale et urinaire est lente. Cependant, sur quelques semaines, l'élimination se fait rapidement par décroissance radioactive compte tenu de la courte période radioactive de l'yttrium-90.

Dans le cadre de cette fiche, l'yttrium-90 est considéré isolément pour son comportement biocinétique. Le cas échéant, il faut tenir compte du vecteur chimique utilisé, ce qui implique une évaluation spécifique.

2. UTILISATIONS

Le fait d'être un émetteur bêta quasi pur, d'énergie β élevée et de courte période a fait de l'yttrium-90 un radioélément privilégié pour son application thérapeutique en médecine.

Tenant compte de son utilisation dans des microsphères pour le traitement palliatif du cancer du foie, ce sont ses applications en sources non scellées qui retiennent l'attention. L'assimilation des microsphères à des sources non scellées vu leur grand nombre et leur petite taille est du reste actuellement discutée.

L'application thérapeutique de l'yttrium-90 en médecine nucléaire a fait l'objet d'une fiche spécifique⁽²⁾ :

- en radio-immunothérapie, l'yttrium-90 est fixé à des anticorps monoclonaux qui se lient aux cellules cancéreuses, le but du traitement étant de détruire celles-ci par le rayonnement β émis. Les activités mise en jeu sont de l'ordre du Gbq ;
- visant le traitement anti-inflammatoire d'une articulation, l'yttrium-90 est également injecté dans l'articulation pour léser le tissu synovial (synoviorthèse). Les activités mises en jeu dépendent de l'organe visé. Typiquement, pour les genoux ou la hanche, elles sont de l'ordre de plusieurs dizaines de MBq.

L'yttrium-90 peut être utilisé dans certains domaines spécifiques de la recherche.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe

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 ; ils ont été calculés avec un code Monte-Carlo (MCNXPX).

▼ 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
$\dot{H}_p(0,07)$	$1,2 \times 10^3$	$1,4 \times 10^2$	$1,2 \times 10^1$
$\dot{H}_p(10)$	3×10^{-1}	2×10^{-2}	$< 1 \times 10^{-2}$

▼ Flacon (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
$\dot{H}_p(0,07)$	$5,4 \times 10^3$	$7,6 \times 10^3$	$8,5 \times 10^0$	$8,3 \times 10^{-1}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

▼ Seringue en polyéthylène pleine

Tableau V

	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
$\dot{H}_p(0,07)$	$1,3 \times 10^5$	$4,0 \times 10^4$	$3,4 \times 10^2$	4×10^1	$3,7 \times 10^0$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

* Épaisseur = 0,6 mm. ** Épaisseur = 1 mm.

(2) Pour plus d'informations, se référer à la fiche *Médecine nucléaire thérapeutique (radiothérapie interne vectorisée)*, coll. « Radioprotection : secteur médical », FR 8.

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

Contamination cutanée

Un dépôt uniforme sur la peau de 1 MBq par cm² délivre un débit d'équivalent de dose à la peau [H_p (0,07)] égal à 1,7 x 10⁶ µSv/h.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

Le *tableau VI* donne les valeurs de dose efficace engagée en µSv correspondant à une activité de 1 Bq d'yttrium-90 incorporée sous forme libre.

▽ Doses efficaces engagées à la suite d'incorporation de 1 Bq (DPUI) pour les travailleurs de plus de 18 ans (valeurs réglementaires)

Tableau VI

	Inhalation de 1 Bq (par défaut aérosol de 5 µm)		Ingestion de 1 Bq
	Type	Dose efficace engagée (µSv)	Dose efficace engagée (µSv)
Tous les autres composés	M	1,6 x 10 ⁻³	2,7 x 10 ⁻³
Oxydes et hydroxydes	S	1,7 x 10 ⁻³	

Dans les calculs de DPUI ci-dessus (incorporation sous forme libre) :

- tous les composés sont caractérisés par un facteur d'absorption gastro-intestinale f₁ (qui indique quelle fraction de la radioactivité présente dans l'intestin grêle passe dans le sang) égal à 1 x 10⁻⁴ ;
- les organes critiques (contribution à la dose efficace > 10%) sont les suivants :
 - après inhalation (type M ou S) : côlon (62%), poumons (34%) ;
 - après ingestion : côlon (95%).

Étant donné la courte période de l'yttrium-90, les doses engagées sur un an sont identiques à celles engagées sur 50 ans.

Exposition interne due à une contamination chronique

Selon la CIPR, l'exposition chronique est considérée comme une succession d'expositions aiguës ; en conséquence, pour une incorporation d'1 Bq/jour pendant n jours, multiplier les valeurs précédentes par n (hypothèse linéaire).

4. DÉTECTION ET MESURES

Le *tableau VII* résume les techniques de surveillance de l'exposition à l'yttrium-90.

▽ Techniques de surveillance à réaliser

Tableau VII

	Appareil de mesure
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant (µSv/h)	Radiamètre équipé d'une sonde bêta et d'une sonde γ/X
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm ²)	Contaminamètre ou sonde bêta ou frottis
Recherche de petits foyers de contamination	Sonde bêta
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m ³)	Mesure par prélèvement sur filtre

Mesure du débit de dose ambiant (µSv/h)

La mesure se fait avec un radiamètre équipé d'une sonde bêta et d'une sonde γ/X pour la détection du rayonnement de freinage ou *Bremsstrahlung* (par exemple, induit dans un patient après traitement anticancéreux).

Mesure de la contamination surfacique (Bq/cm²) et de petits foyers de contamination

Elle peut-être réalisée :

- soit directement avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm². Veiller à ce que l'appareil soit étalonné, contrôlé et adapté à la mesure de l'yttrium-90. En cas de doute, contacter le constructeur. On peut aussi évaluer une contamination surfacique à partir du taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde bêta placée au plus près de la surface à contrôler ;
- soit indirectement par frottis à l'aide d'une compresse (dont le taux de comptage est mesuré avec une sonde β dont la surface est supérieure ou égale à celle de la compresse) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions du prélèvement. La technique 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⁽⁴⁾.

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 après soustraction du bruit de fond
 - 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
 - K** est un facteur correctif, égal à 1 si c'est une mesure du taux de comptage fourni par la sonde, égal à 0,1 si c'est une mesure de frottis

(4) Norme ISO 7503-1:1988, « Évaluation de la contamination de surface – Partie 1 : Émetteurs bêta (énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV) et émetteurs alpha ».

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

La recherche de petits foyers de contamination est réalisée avec les mêmes techniques moyennant l'utilisation de sondes de petites tailles.

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³)

Un système de mesure en continu équipé d'un filtre permet de détecter une éventuelle contamination atmosphérique et d'en mesurer l'évolution. Les bouches de prélèvement se situent au plus proche des postes de travail. L'appareil est situé à l'extérieur du local ou de la zone où le risque de contamination existe.

Dans le cas de l'utilisation de l'yttrium-90 au sein d'un service de médecine nucléaire, compte tenu de sa faible volatilité, la mesure de la contamination atmosphérique n'est pas pertinente.

5. MOYENS DE PROTECTION

Le choix des moyens de protection repose sur l'analyse préalable de l'intervention à réaliser (ou des protocoles expérimentaux) afin d'identifier les risques radiologiques. Il est recommandé de pratiquer une simulation de toute nouvelle opération pour définir les règles de manipulation et en maîtriser les gestes et la durée.

Installation des locaux

Les locaux doivent être conçus pour la manipulation de sources scellées :

- les locaux doivent être réservés à la manipulation de substances radioactives 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 équipements de travail, mis en dépression, bénéficient d'une ventilation indépendante du système général de ventilation dont le renouvellement d'air est adapté à la volatilité des molécules marquées ;
- 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 susceptibles de recevoir des effluents liquides contaminés sont clairement identifiés, comportent des robinets à commande non manuelle et sont reliés à des dispositifs de rétention (contenants, cuves...).

Dans un établissement, en particulier au sein d'un service de médecine nucléaire, le transfert d'une source d'un local à un autre doit se faire à l'aide d'un dispositif adapté permettant une protection contre l'exposition externe et évitant le risque de dispersion.

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 ;
- s'éloigner de la source de rayonnements. Pour l'yttrium-90, qui est un émetteur β de forte énergie, il est recommandé en fonction des activités manipulées d'utiliser des pinces voire des systèmes automatisés ;
- utiliser des protections *ad hoc*. La démarche générale d'optimisation est de trouver le meilleur compromis pour choisir un ou plusieurs écrans permettant à la fois d'arrêter le rayonnement bêta (par exemple : 6 mm de pyrex ou 10 mm de PMMA), de ne pas trop créer de rayonnements de freinage et d'atténuer suffisamment ceux-ci. Cette optimisation relève d'une évaluation au cas par cas en tenant compte à la fois de la géométrie de la source et des impératifs pratiques. L'IRSN a notamment montré pour l'yttrium-90 qu'une épaisseur 10 mm de PMMA entourée de quelques mm de plomb assure la protection d'un flacon, et qu'une épaisseur de 5 mm de tungstène assure la protection d'une seringue⁽⁵⁾. Porter un tablier plombé durant les soins est recommandé et efficace contre les rayonnements de freinage.

Protection contre l'exposition interne

La manipulation d'yttrium-90 doit se faire dans des installations dédiées, sous hotte ou boîte à gants ventilée suivant l'activité manipulée.

Lorsque ce principe ne peut être respecté et notamment en médecine nucléaire lors des injections au patient, les mesures de prévention et de vigilance vis-à-vis d'une éventuelle dispersion doivent être renforcées. De plus, les équipements de protection individuelle suivants doivent être utilisés :

- gants jetables (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.

(5) Résultats du projet européen ORAMED dans lequel l'IRSN s'est impliqué (groupe de travail 4) : M. Sans-Merce et al., « Recommendations to reduce hand exposure for standard nuclear medicine procedures », *Radiation Measurements*, 46 (n° 11), 2011, p. 1330-1333.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLE DES LOCAUX

Les locaux dans lesquels l'yttrium-90 est susceptible d'être manipulé ainsi que les locaux attenants à ceux-ci seront délimités comme des zones contrôlées, surveillées ou non réglementées en fonction de l'activité utilisée et des dispositions de protection et de confinement mises en œuvre. Ils doivent, dans la mesure du possible, être regroupés géographiquement.

En médecine nucléaire, le classement des locaux dans lesquels l'yttrium-90 est susceptible d'être manipulé régulièrement est décrit dans la fiche *Médecine nucléaire thérapeutique (radiothérapie interne vectorisée)*⁽²⁾.

Délimitation des zones réglementées

Le zonage des locaux doit être justifié et formalisé dans chaque cas sous forme d'un document à conserver (à joindre au document unique relatif aux risques professionnels). Il est formalisé par l'affichage de panneaux conformes aux dispositions réglementaires en vigueur.

Toute mesure appropriée est prise pour empêcher l'accès non autorisé aux zones où les sources radioactives sont utilisées et entreposées.

La délimitation des locaux doit prendre en compte à la fois les risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et stockées (*tableaux VIII et IX*).

Tableau VIII

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER

Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 heure
et, pour ce qui concerne les zones spécialement réglementées, débit d'équivalent de dose (DDD)

Zone non réglementée	Zones réglementées				
	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
<ul style="list-style-type: none"> ■ 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 	$E < 7,5 \mu\text{Sv}$	$E < 25 \mu\text{Sv}$	$E < 2 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 2 \text{ mSv}/\text{h}$	$E < 100 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 100 \text{ mSv}/\text{h}$	$E > 100 \text{ mSv}$ ou $\text{DDD} > 100 \text{ mSv}/\text{h}$
	Zones spécialement réglementées				

Tableau IX

EXPOSITION DES EXTRÉMITÉS (MAINS, PIEDS, CHEVILLES ET AVANT-BRAS)

Dose équivalente (H) susceptible d'être reçue en 1 heure

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

Contrôles

Les contrôles techniques réglementaires de radioprotection sont présentés dans le [tableau X](#). Les appareils de mesure recommandés sont donnés au [tableau VII](#).

▽ Contrôles réglementaires

Tableau X

	Mise en œuvre
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)	En continu ou au moins mensuelle
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	

En complément des contrôles réglementaires, les bonnes pratiques suivantes sont recommandées :

- la mesure régulière du débit d'équivalent de dose ambiant ;
- la vérification régulière de la contamination surfacique, après chaque manipulation et en cas d'incident sur les paillasses, matériels, écrans, sols... ;
- la vérification régulière de l'état radiologique de la boîte à gants ou de la hotte ventilée et de son filtre ; le rythme des contrôles sera adapté à la fréquence des manipulations ;
- la mesure de la contamination atmosphérique en continu au niveau de chaque poste de travail si un risque de contamination atmosphérique est identifié ou en cas de dispersion accidentelle ;
- la vérification de la non-contamination corporelle externe de manière systématique après toute manipulation et en sortie de zone.

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL

Classement

Tandis que la délimitation des zones de travail est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé par l'étude des postes de travail.

L'évaluation de la dose prévisionnelle (organisme entier et cristallin, peau, extrémités si nécessaire) 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. Les travailleurs pour lesquels la dose prévisionnelle dans les conditions habituelles de travail ou en cas de situation incidentelle raisonnablement prévisible dépasse la limite réglementaire pour le public sont considérés comme étant exposés aux rayonnements ionisants. Leur 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.

Parmi les travailleurs exposés, ceux susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv/an ou une dose équivalente

supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition fixées pour les extrémités, la peau ou le cristallin sont classés en catégorie A (tableau XI) ; ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

De plus, aucune femme enceinte ni aucun étudiant ou apprenti de moins de dix-huit ans ne peut être affecté(e) à un poste impliquant un classement en catégorie A.

▽ Critères de classement des travailleurs exposés

Tableau XI

	Dose efficace corps entier	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	$> 6 \text{ mSv}$ sur 12 mois consécutifs	$> 150 \text{ mSv}$	$> 150 \text{ mSv}$	$> 45 \text{ mSv}$
Travailleurs exposés de catégorie B	$\leq 6 \text{ mSv}$ sur 12 mois consécutifs	$\leq 150 \text{ mSv}$	$\leq 150 \text{ mSv}$	$\leq 45 \text{ mSv}$

Formation du personnel

Tous les personnels, classés ou non, devant intervenir en zone réglementée doivent bénéficier d'une formation à la radioprotection, renouvelée au moins tous les trois ans et 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.

La formation est adaptée aux caractéristiques radiologiques de l'yttrium-90 et aux procédures particulières de radioprotection touchant au poste de travail occupé ainsi qu'aux règles de conduite à tenir en cas de situation anormale.

Une attention particulière doit être portée à la formation des travailleurs temporaires, des nouveaux entrants et des femmes en âge de procréer. Une formation spécifique peut-être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale des travailleurs exposés

Les points importants sont les suivants :

- la surveillance médicale renforcée est mise en place pour les travailleurs exposés classés en catégorie A et B, avec en catégorie A une surveillance au moins une fois par an ;
- le médecin du travail a un libre choix de prescription des examens complémentaires ;
- en cas de grossesse, il appartient au médecin du travail d'évaluer si la femme enceinte peut rester au poste de travail, et en tout état de cause la dose de l'enfant à naître reste dans tous les cas inférieure à 1 mSv entre la déclaration de grossesse et l'accouchement ;
- il est par ailleurs interdit d'affecter ou de maintenir une femme allaitante à un poste de travail comportant un risque d'exposition interne à des rayonnements ionisants ;

- la carte individuelle de suivi médical est remise par le médecin du travail (contacter l'IRSN : www.siseri.com);
- l'attestation d'exposition professionnelle est établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche individuelle d'exposition aux rayonnements ionisants.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

Dosimètre passif individuel :

- catégorie A : période de port mensuelle;
- catégorie B : période de port mensuelle ou trimestrielle.

Dosimètre opérationnel [avec mesure de $H_p(0,07)$] pour toute opération en zone contrôlée, quelle que soit la catégorie du travailleur.

La dosimétrie des extrémités (de type bague) est fortement recommandée pour toute manipulation (préparation, injection...) de source d'yttrium-90. Elle est obligatoire lorsque la dose équivalente est susceptible de dépasser 50 mSv/an.

Exposition interne

L'exposition interne est évaluée par analyse radiotoxicologique des urines (durée du prélèvement sur 24 heures). Tenant compte de la période de l'yttrium-90, la surveillance de l'exposition interne doit toujours être réalisée impérativement au plus vite, en particulier en cas d'incident ou de suspicion de contamination.

Les examens sont réalisés après chaque campagne de manipulations lorsqu'il s'agit d'utilisations ponctuelles.

En cas de résultat positif, le médecin du travail demandera des contrôles ultérieurs pour suivre l'évolution du niveau de l'exposition interne; il analysera les circonstances de l'exposition avec l'appui de la personne compétente en radioprotection (PCR).

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement a l'obligation 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. L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

L'yttrium-90 ayant une période radioactive inférieure à 100 jours, les déchets et effluents produits peuvent faire l'objet d'une gestion par décroissance radioactive et d'une élimination locale, sans obligation de prise en charge par une filière autorisée.

Déchets solides et liquides

Les déchets sont déposés dans des poubelles spécifiques en plexiglas plombé dont l'ouverture doit se faire à l'aide du pied. Ils sont ensuite entreposés dans un local réservé pendant au moins dix périodes radioactives soit pour l'yttrium-90 au moins 27 jours. À l'issue du délai nécessaire à la décroissance radioactive, une mesure pour estimer la radioactivité résiduelle des déchets est réalisée. L'élimination ne peut se faire que lorsque la radioactivité détectée ne dépasse pas deux fois le bruit de fond.

Effluents liquides

Les effluents liquides sont entreposés vers un système d'entreposage (cuve, conteneur...) pendant au moins dix périodes radioactives. Les canalisations y sont étanches et résistent à l'action physique et chimique des effluents concernés. Les cuves d'entreposages sont, quant à elles, équipées de dispositifs de mesure de niveau et de prélèvement. Elles fonctionnent alternativement en remplissage et en entreposage de décroissance. Ces systèmes sont installés dans un local indépendant, ventilé et fermé à clé. Ils sont situés au-dessus d'un cuvelage de sécurité permettant la rétention de liquide en cas de fuite et muni d'un capteur de fuite.

Le contenu de ces systèmes d'entreposage ne pourra être rejeté dans le réseau d'assainissement qu'après avoir vérifié que l'activité volumique résiduelle est inférieure à 10 Bq/L.

Effluents gazeux

Les effluents gazeux doivent être retenus sur des filtres qui sont contrôlés puis éliminés comme déchets radioactifs solides.

Les systèmes de filtration des boîtes à gant ou hottes ventilées sont contrôlés selon une périodicité définie par le plan de gestion des déchets et effluents radioactifs de l'établissement.

9. PROCÉDURES ADMINISTRATIVES D'AUTORISATION ET DE DÉCLARATION (DÉTENTION ET UTILISATION DE SOURCES SCÉLÉES ET NON SCÉLÉES)

La détention et l'utilisation de l'yttrium-90 concernent les cas d'application ci-dessous.

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

La détention et l'utilisation d'yttrium-90 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 de l'yttrium-90

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

Application non médicale conduite dans un établissement ni industriel, ni commercial

Une autorisation préalable délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^5 Bq (activité totale) ou à 10^3 Bq/g (activité massique).

Cette application concerne les organismes de recherche.

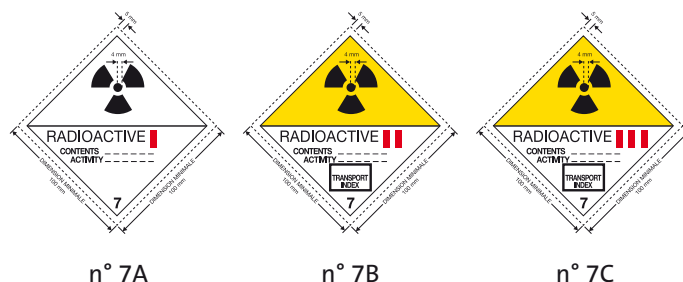


Tableau XIII
Correspondance entre la catégorie de l'étiquette apposée sur le colis, l'indice de transport et le débit d'équivalent de dose (DDD)

Indice de transport (IT) ⁽⁶⁾	Débit d'équivalent de dose en tout point de la surface	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 ⁽⁷⁾	III – JAUNE et transport exclusif

10. TRANSPORTS ROUTIERS

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses (matières radioactives : classe 7). Pour l'yttrium-90, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10^3 Bq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 10^5 Bq, cette réglementation ne s'applique pas.

Si ces deux seuils sont dépassés, le transport est soumis aux dispositions réglementaires en vigueur.

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 (tableau XII). 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 l'yttrium-90, A2 vaut 0,3 TBq.

Tableau XII
Classement des colis selon l'activité en yttrium-90 (exemple de contenu liquide)

Type de colis	Activité mise en jeu pour l'yttrium-90	Caractéristiques du colis
Colis exceptés	< 3×10^{-2} GBq (< A2/10 000)	Peu résistant
Colis de type A	< 3×10^{-1} TBq (< A2)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	> 3×10^{-1} TBq (> A2)	Étanche et blindé

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.

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

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

Sans préjudice de ce principe général, la conduite à tenir en cas d'incident/accident implique de hiérarchiser les actions dès la découverte de l'événement, pour caractériser le risque de contamination des locaux et/ou du matériel, évaluer l'exposition d'une personne, et enfin déclarer l'événement.

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.
- Engager au plus tôt les opérations de décontamination des personnes.
- Contacter, si nécessaire, l'IRSN pour un appui technique (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

(6) IT = intensité de rayonnement maximale à 1 m de tout point situé à la surface du colis (en mSv/h) $\times 100 \times k$ 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 m^2 .

(7) 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.

Contamination des locaux et/ou du matériel

S'il s'agit d'une contamination de surface

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée à l'aide d'une sonde β , 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 (exemples : TFD 4, FDK...).
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde bêta ; frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

S'il s'agit d'une contamination atmosphérique

- Faire évacuer le personnel présent dans le local, si cela n'a pas déjà été fait.
- Apposer les premiers balisages de sauvegarde.
- Évaluer rapidement le niveau et le caractère de l'incident (relevé les valeurs indiquées par l'appareil de contrôle atmosphérique, estimer la concentration dans l'air du radionucléide).

Dans le cas d'une dispersion d'yttrium-90, il est recommandé d'interdire l'accès du local et d'attendre le renouvellement de l'air de celui-ci. L'interdiction doit être maintenue pendant toute la durée de la dispersion. Après l'arrêt de celle-ci, il est conseillé d'évaluer la quantité dispersée à partir de l'activité de la source mère puis de déterminer le temps nécessaire avant la levée de l'interdiction d'accès après décroissance radioactive.

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

Les personnes intervenant dans des locaux suspectés ou avérés contaminés doivent porter, *a minima*, des gants, une surtenuie et des surbottes ; dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires filtrant est recommandé.

Exposition externe et interne d'une personne

Exposition externe

- Relever la dosimétrie opérationnelle [avec mesure de $\dot{H}_p(0,07)$], si elle existe. La comparer avec les résultats des dosimètres des autres personnels présents.
- Réaliser une première investigation en vérifiant le débit de dose de la source et le temps de présence des personnels impliqués.
- Si l'exposition externe est avérée ou en cas de doute, transmettre les dosimètres passifs pour une exploitation en urgence.

En cas de dispersion accidentelle (bris d'un flacon par terre par exemple), des éléments (surface du dépôt, distance la plus courte entre le dépôt et la peau, temps d'exposition, épaisseurs d'écrans éventuels) peuvent être utiles à recueillir en vue d'une reconstitution dosimétrique.

Contamination cutanée

- Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures, les sécrétions nasales (mouchage).
- Faire ôter les vêtements contaminés.
- 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 et, si nécessaire, recommencer la procédure.
- Si une contamination cutanée persiste, le médecin du travail peut mettre en place un pansement étanche sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

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.

Toute contamination cutanée d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

Contamination oculaire

- Laver abondamment sous l'eau à température ambiante.
- Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.

Toute contamination oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

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.

Il est recommandé de :

- déterminer l'activité manipulée ;
- débiter immédiatement les prélèvements urinaires (un prélèvement sur 24 heures est recommandé) et les envoyer pour examen à l'IRSN ou à un laboratoire d'analyse agréé. Des prélèvements nasaux sont recommandés pour analyse du mucus nasal ;

■ si le résultat est positif, le médecin du travail demande des analyses ultérieures pour suivre l'évolution de la contamination interne.

Le traitement d'urgence doit être effectué sous contrôle médical le plus tôt possible et de préférence dans les 2 heures qui suivent la contamination. Il consiste en l'administration de DTPA (acide diéthylènetriamine penta-acétique)⁽⁸⁾. Cette approche est retenue en cas de contamination pulmonaire ou de plaie contaminée.

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée (inhalation d'yttrium-90 sous forme particulaire (5 µm) de type M)

Le calcul de la dose efficace engagée s'effectue de la manière suivante :

$$I = Am/F(t)$$

$$E(Sv) = I(\text{Bq incorporé}) \times \text{DPUI}(\text{Sv} / \text{Bq incorporé})$$

Avec

E = dose efficace engagée

I = activité incorporée au jour de la contamination

Am = activité mesurée (soit en excrétion, soit en rétention) au jour J après la contamination

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

DPUI = dose efficace engagée par unité d'incorporation

Le **tableau XIV** présente les valeurs d'excrétion urinaire F(t) évaluées au moyen du logiciel IMBA Professional (Health Protection Agency, UK) et des modèles de la CIPR.

▽ Valeurs d'excrétion urinaire, en Bq par Bq incorporé, pour l'inhalation d'yttrium-90 sous forme particulaire (5 µm) de types M et S **Tableau XIV**

Temps après l'incorporation (J)	Inhalation	
	Type M	Type S
1	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-5}$
2	$1,8 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-6}$
3	$2,4 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-7}$
4	$1,3 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-7}$
5	$9,3 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-7}$
6	$7,0 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-7}$
7	$5,3 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-7}$
8	$4,1 \times 10^{-6}$	$9,4 \times 10^{-8}$
9	$3,1 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^{-8}$
10	$2,3 \times 10^{-6}$	$5,5 \times 10^{-8}$

Exemple numérique

L'analyse des urines des 24 heures prélevées dans les trois jours (J1, J2 et J3) suivant la contamination donne les résultats suivants :

$$A_{J1} = 3\,200 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J2} = 205 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J3} = 26 \text{ Bq sur 24 heures}$$

Suivant le **tableau XIII**, l'évaluation de l'activité inhalée sur la base des mesures d'excrétion à J1, J2 et J3 donne :

$$I_{J1} = 3\,200 / (2,5 \times 10^{-3}) = 1\,280 \text{ kBq}$$

$$I_{J2} = 205 / (1,8 \times 10^{-4}) = 1\,140 \text{ kBq}$$

$$I_{J3} = 26 / (2,4 \times 10^{-5}) = 1\,080 \text{ kBq}$$

L'activité incorporée est égale, en première approche, à la moyenne⁽⁹⁾ des trois valeurs de I :

$$I = 1\,200 \text{ kBq}$$

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

$$E = 1,2 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-3} = 1\,900 \text{ µSv}$$

Déclarations à effectuer

Tout incident ou accident est consigné dans le registre d'hygiène et de sécurité et fait l'objet d'une information au CHSCT.

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

Tout événement significatif répondant aux critères définis dans les guides de l'ASN⁽¹⁰⁾ (notamment le critère 1 relatif à la protection des travailleurs) doit être déclaré, dans les meilleurs délais, par le chef d'établissement auprès de la division territoriale compétente de l'ASN.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail est également prévenu, ainsi que l'IRSN, qui pourra apporter son support au médecin du travail.

Tout incident ou accident intervenant lors d'un transport (notamment en cas de perte ou détérioration du colis) doit être signalé à l'ASN, au préfet compétent et à l'IRSN.

(9) Bien que le calcul de la moyenne arithmétique ait été suffisant dans cet exemple numérique, le calcul de la moyenne géométrique est plutôt recommandé.

(10) – Guide n° 11 de l'ASN (ex. 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.

– Guide ASN relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux INB et au TMR.

(8) Guide de l'ASN relatif à l'intervention médicale en cas d'événement nucléaire ou radiologique, 2008.

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, INSERM et la DGT.

Les experts qui ont plus particulièrement contribué à cette fiche sont :

- Marc Ammerich (CEA),
- Patricia Frot (INSERM),
- Denis-Jean Gambini (AP-HP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St-Germain),
- Thierry Lahaye (DGT),
- Patrick Moureaux (INRS),
- Pascal Pihet (IRSN),
- Alain Rannou (IRSN),
- Éric Vial (IRSN).



Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
77-83, avenue du Général-de-Gaulle 92140 Clamart
Tél. 01 58 35 88 88 • Internet : www.irsn.org



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 • Internet : www.inrs.fr • e-mail : info@inrs.fr