

septembre 2013

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4315

**111
49 In**

Indium-111

▷ Émissions :

γ : raies à 171 keV et à 245 keV
X : raie principale à 23 keV
e⁻ : énergie principale à 3 keV

▷ Période physique : 2,8 jours

▷ Seuils d'exemption : 10⁶ Bq, 10² Bq/g

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

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

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

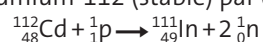
▷ **Surveillance individuelle de l'exposition interne :** anthroporadiométrie à réaliser en fonction de la fréquence d'utilisation. Sous forme vectorisée, dans le cadre de son application en médecine nucléaire, la surveillance individuelle de l'exposition interne peut également être pratiquée par analyse radiotoxicologique des urines.

Appartenant à la famille des métaux pauvres, l'indium est un métal gris brillant, malléable. Tandis que le point de fusion de l'indium (élément) est de 157°C, son point d'ébullition est de 2027°C. Il résiste à la corrosion à température ordinaire. Il est rare et constitue une ressource non renouvelable. Il est utilisé dans les écrans plats de type LCD. Aux quantités administrées en médecine nucléaire, l'indium ne présente pas de toxicité chimique.

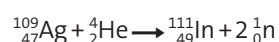
1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

L'indium-111 est produit au moyen d'un cyclotron par le bombardement d'une cible enrichie en cadmium-112 (stable) par des protons :



Ce mode de production est préférentiellement utilisé pour son rendement plus élevé. L'indium-111 est également obtenu par l'irradiation d'une cible d'argent, processus de moindre rendement mais de meilleure pureté isotopique :



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.*

Propriétés radiophysiques

L'indium-111 a une période radioactive de 2,8 jours et une activité massique de $1,55 \times 10^{16}$ Bq/g.

L'indium-111 se désintègre (rapport de branchement = 100 %) par capture d'un électron atomique entraînant la transformation dans le noyau d'un proton en un neutron. Cette transition nucléaire (désintégration) est accompagnée par l'émission d'électrons et de rayonnements X et gamma. Les données du [tableau I](#) concernent les principales émissions d'énergie supérieure à 1 keV dont le pourcentage est supérieur à 1 %.

▽ Principales émissions de l'indium-111 **Tableau I**

Principales émissions	Énergie (keV)	Pourcentage d'émission (%)
Électrons	2,61-3,52	102
	19,3-22,4	15,0
	145	8,51
	219	5,04
X	22,9-23,2	68,9
	26,0-26,6	13,3
	31,2-33,1	4,99
Gamma	171	90,1
	245	94,1

▽ Filiation de l'indium-111 **Tableau II**

Produit de filiation	Cadmium-111 (stable)
Équation	$^{111}\text{In} \xrightarrow{\text{capture électronique}} ^{111}\text{Cd}$

Propriétés biologiques

Une fois dans le sang, l'indium-111 se dépose dans la moelle osseuse (30 %), le foie (20 %), les reins (7 %), la rate (1 %) et le reste du corps (42 %) d'où il disparaît par décroissance radioactive.

Livré sous forme de chlorure, c'est sous forme vectorisée que l'indium-111 est administré en médecine nucléaire ; de ce fait c'est le vecteur chimique auquel il est attaché qui détermine son comportement biocinétique. Ceci implique une évaluation spécifique qui pourra s'inspirer des informations fournies par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)⁽¹⁾. Pour illustrer cette complexité, la CIPR indique que, couplé à un analogue de synthèse de l'hormone somatostatine (octréotide, pentétérotide), 6 % de l'indium-111 injecté se distribue dans le foie, 5 % dans la rate, 6 % dans les reins et 0,1 % dans la thyroïde. Dans ces organes, la rétention est 2,5 jours sauf pour le foie où 40 % est éliminé avec une période de 2 heures, 30 % avec une période de 2,5 jours et 30 % avec une période de 70 jours. Les 82,9 % restants se distribuent dans les autres organes et tissus et sont excrétés selon des périodes biologiques de 3 heures (90 %) et 2,5 jours (10 %).

(1) Publication CIPR 106 (*Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals – Addendum 3 to ICRP Publication 53*).

2. UTILISATIONS

L'indium-111 trouve son application en scintigraphie⁽²⁾. Sous forme d'oxinate, il est utilisé entre autres pour marquer les globules blancs afin de localiser des foyers infectieux récents. Il peut être également employé pour marquer les plaquettes afin de déterminer leur durée de vie ou détecter une menace de rejet d'organe transplanté ou pour marquer les globules rouges afin de détecter des hémorragies gastriques et intestinales masquées.

Couplé à un analogue de synthèse de l'hormone somatostatine, cet isotope radioactif permet de localiser différentes tumeurs neuro-endocrines (tels que les insulinomes, tumeurs du pancréas).

L'indium-111 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 (MCNPX).

▽ Source ponctuelle **Tableau III**

	Débit de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$5,5 \times 10^2$	$2,3 \times 10^1$	$9,9 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	$9,5 \times 10^0$	$1,1 \times 10^0$	$9,4 \times 10^{-2}$

▽ Flacon (10 mL) en verre standard rempli au tiers **Tableau IV**

	Débit de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq	
	Tenu en main	Sous le flacon	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$2,5 \times 10^2$	$4,3 \times 10^2$	$8,7 \times 10^{-1}$	$7,7 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$8,6 \times 10^{-1}$	$7,7 \times 10^{-2}$

▽ Seringue en polyéthylène pleine **Tableau V**

	Débit de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit 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
$\dot{H}_p(0,07)$	$2,3 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	$9,6 \times 10^0$	$1,1 \times 10^0$	$9,4 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$9,1 \times 10^0$	$1,0 \times 10^0$	$9,0 \times 10^{-2}$

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

(2) Pour plus d'informations, se référer à la fiche *Médecine nucléaire. Diagnostic in vivo (hors TEP)*, coll. « Radioprotection : secteur médical », FR 5.

(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 3 x 10⁵ 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 incorporée de 1 Bq 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

Forme	Inhalation de 1 Bq (par défaut aérosol de 5 μm)		Ingestion de 1 Bq	
	Type	Dose efficace engagée (μSv)	f ₁	Dose efficace engagée (μSv)
Composés non spécifiés	F	2,2 x 10 ⁻⁴	0,02	2,9 x 10 ⁻⁴
Oxydes, hydroxydes, halogénures, nitrates	M	3,1 x 10 ⁻⁴		

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

- tous les composés considérés sont caractérisés par un facteur d'absorption gastro-intestinale f₁ (qui indique quelle fraction de la radioactivité de l'intestin grêle passe dans le sang) égal à 0,02 ;
- les organes critiques (contribution à la dose efficace ≥ 10%) sont les suivants :
 - après inhalation, type F : moelle osseuse (10%), côlon (19%), gonades (11%),
 - après inhalation, type M : côlon (23%), poumon (29%),
 - après ingestion : côlon (61%), gonades (25%).

Les modes d'incorporation classiques considérés dans le *tableau VI* ne permettent pas de couvrir des situations accidentelles telles qu'une blessure, une piqûre ou une brûlure au cours desquelles le radionucléide passe directement dans le sang. Ces situations nécessitent une évaluation par des experts tenant compte de la forme sous laquelle était l'indium avant l'incident. Pour illustrer cette complexité en reprenant l'exemple de l'octroétide (partie 2, propriétés biologiques), la CIPR⁽¹⁾ évalue la dose efficace engagée à 0,5 x 10⁻⁴ μSv pour l'incorporation par injection de 1 Bq sous cette forme.

Étant donné la période de l'indium-111, 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'indium-111.

▽ Techniques de surveillance

Tableau VII

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

Mesure du débit d'équivalent de dose ambiant (μSv/h)

Pour l'indium-111, le débit d'équivalent de dose ambiant peut être mesuré grâce à un radiamètre équipé d'une sonde γ/X.

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

La mesure d'une contamination surfacique en indium-111 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'indium-111. 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 γ/X 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 γ/X 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%.

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

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 petite taille.

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 d'indium-111 au sein d'un service de médecine nucléaire, compte tenu des activités manipulées et de la faible volatilité du produit, la mesure de la contamination atmosphérique en routine n'est pas nécessaire.

5. MOYENS DE PROTECTION

Les moyens de protection décrits ci-dessous sont recommandés de manière générale lorsque des sources non scellées sont manipulées. Leur mise en œuvre de manière spécifique repose sur l'analyse préalable de l'utilisation réelle du radionucléide afin d'identifier le ou les risque(s) présent(s). Il est recommandé de pratiquer une simulation de toute nouvelle opération pour définir les règles de manipulation, en maîtriser les gestes et la durée.

Installation des locaux

Les locaux sont conçus pour la manipulation de sources non scellées :

- les locaux sont 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 est en matériau lisse, imperméable, sans joint et facile à décontaminer ;
- 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 ainsi qu'un appareil de contrôle de la contamination ;
- 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 (conteneur, cuves...).

En médecine nucléaire⁽²⁾, le matériel médical utilisé pour le travail avec l'Indium-111 ne sert qu'à cette seule fonction. L'utilisation de couvre-plateaux absorbants et jetables est recommandée.

Dans un établissement, en particulier au sein d'un service de médecine nucléaire, le transfert d'une source d'un local à l'autre se fait 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 : utiliser des pinces longues voire des systèmes automatisés pour manipuler l'indium-111 ;
- interposer un ou plusieurs écran(s) entre la source de rayonnements et les personnes.

Les gants utilisés pour éviter les risques de contamination cutanée ne constituent pas une protection efficace des mains contre l'exposition externe aux rayonnements X et γ .

Les épaisseurs d'écran renseignées au [tableau VIII](#) ont été évaluées en termes de diminution du débit de dose due à l'émission des rayonnements X/ γ . Ces épaisseurs sont suffisantes pour arrêter les électrons émis lors de la transition de l'indium-111.

▽ *Caractéristiques des écrans permettant de diminuer le débit de dose lié au chrome-51* **Tableau VIII**

	Épaisseur d'eau	Épaisseur d'acier	Épaisseur de plomb
Diminution d'un facteur 10 du débit de dose	490 mm	37 mm	2,9 mm
Diminution d'un facteur 2 du débit de dose	280 mm	14 mm	0,8 mm

En médecine nucléaire, les dispositifs de protection (protège-seringue, protège-flacon, équipement de protection mobile...) sont utilisés. L'utilisation de tabliers plombés est sans utilité.

Protection contre l'exposition interne

La manipulation de l'indium-111 se fait sous hottes ou boîtes à gants ventilées suivant l'activité manipulée. Lorsque cette pratique ne peut être mise en œuvre et notamment en médecine nucléaire lors des injections au patient, les mesures de prévention et la vigilance sont renforcées.

Lors de la préparation ou lors de l'injection d'indium-111, les équipements de protection individuelle suivants sont utilisés :

- gants jetables (il est rappelé néanmoins qu'après chaque manipulation, un contrôle de non-contamination et un lavage des mains sont nécessaires) ;
- blouse à manches longues, fermée ;
- lunettes de protection.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLE DES LOCAUX

Les locaux dans lesquels l'indium-111 est 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, des dispositions de protection et de confinement mises en œuvre, et bien entendu de l'ensemble des radionucléides utilisés. Ils sont, dans la mesure du possible, regroupés géographiquement.

Le classement des locaux en médecine nucléaire est décrit dans la fiche Médecine nucléaire. *Diagnostic in vivo (hors TEP)*⁽²⁾.

Délimitation des zones réglementées

Le zonage des locaux est justifié et formalisé 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 prend en compte à la fois les risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et entreposées (*tableaux IX et X*).

Tableau IX

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 $\text{DDD} > 100 \text{ mSv}/\text{h}$

Tableau X

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	$H < 0,2 \text{ mSv}$	$H < 0,65 \text{ mSv}$	$H < 50 \text{ mSv}$	$H < 2,5 \text{ Sv}$	$H > 2,5 \text{ Sv}$

Contrôles

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

▽ Contrôles réglementaires

Tableau XI

	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 ces travailleurs exposés, ceux susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv/an (limite annuelle de dose efficace de 20 mSv) ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition fixées

pour les extrémités (500 mSv), la peau (500 mSv) ou le cristallin (150 mSv⁽⁴⁾) sont classés en catégorie A ([tableau XII](#)), ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

De plus, la femme enceinte et les jeunes de moins de 18 ans ne peuvent être affectés à un poste impliquant un classement en catégorie A.

▽ Critères de classement des travailleurs exposés

Tableau XII

	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 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, classés ou non, devant intervenir en zone réglementée bénéficient d'une formation à la radioprotection, organisée par l'employeur et renouvelée au moins tous les trois ans, 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 risques spécifiques à l'indium-111, aux procédures de radioprotection propres au poste de travail occupé ainsi qu'aux règles de conduite à tenir en cas de situation anormale.

Une attention particulière est 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 :

- une 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⁽⁵⁾ ;
- 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 ;

(4) Attention : La valeur limite actuelle de 150 mSv/an est en cours de révision au niveau des normes de base européennes. Elle devrait être abaissée à 20 mSv/an.

(5) Entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2012.

- 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'indium-111, en tout état de cause, obligatoire lorsque la dose équivalente est susceptible de dépasser 50 mSv par an.

Exposition interne

L'exposition interne est évaluée pour ce qui concerne le radioélément par examen anthroporadiométrique. Sous forme vectorisée, dans le cadre de son application en médecine nucléaire, l'exposition interne est également évaluée par analyse radiotoxicologique des urines.

Compte tenu de la période de l'indium-111, la surveillance de l'exposition interne doit impérativement être réalisée au plus vite après manipulation, en particulier en cas d'incident ou de suspicion de contamination.

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, d'entreposage, de contrôle et d'élimination des effluents et des déchets produits (voir dispositions réglementaires en vigueur). L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

L'indium-111 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

Les déchets sont déposés dans des poubelles spécifiques plombées à ouverture non manuelle. Ils sont ensuite entreposés dans un local réservé pendant au moins dix périodes radioactives, soit pour l'indium-111 au moins 28 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'entreposage 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 munis d'un capteur de fuite.

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

Effluents gazeux

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

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

La détention et l'utilisation de l'indium-111 concernent principalement les cas d'application ci-dessous.

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

La détention et l'utilisation de l'indium-111 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.

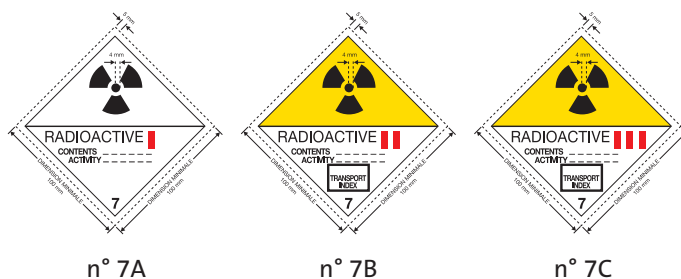
Application non médicale conduite dans un établissement industriel produisant de l'indium-111

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 10^6 Bq (activité totale) ou à 10^2 Bq/g (activité massique).

Cette application concerne les organismes de recherche.



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'indium-111, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10^2 Bq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 10^6 Bq, cette réglementation ne s'applique pas.

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

Se référant au règlement de transport des matières radioactives⁽⁶⁾, la démarche de base est ici décrite de manière succincte par trois prescriptions générales.

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 XIII). 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'indium-111, A2 vaut 3 TBq.

▽ Classement des colis selon l'activité en indium-111 (exemple de contenu liquide) **Tableau XIII**

Type de colis	Activité mise en jeu pour l'indium-111	Caractéristiques du colis
Colis excepté	< 0,3 GBq (< A2/10 000)	Peu résistant
Colis de type A	< 3 TBq (< A2)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	> 3 TBq (> A2)	Étanche et blindé

L'indium-111 émettant des rayonnements gamma, la règle générale qui s'applique pour la contamination non fixée sur les surfaces externes d'un colis est d'être maintenue aussi faible que possible et en tout état de cause de ne pas dépasser 4 Bq/cm² en moyenne sur 300 cm².

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 de l'étiquette apposée sur le colis, l'indice de transport et le débit d'équivalent de dose (DDD) **Tableau XIV**

Indice de transport (IT) ⁽⁷⁾	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 ⁽⁸⁾	III – JAUNE et transport exclusif

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 de sécurité affichées.
- 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).

(7) 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.

(8) 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.

(6) Règlement de transport des matières radioactives, normes de sûreté de l'AIEA, Prescriptions n° TS-R-1, édition 2009.

Contamination des locaux et/ou du matériel

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée à l'aide d'une sonde γ/X , 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 γ/X , frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

En cas de dispersion d'indium-111, il est recommandé d'interdire l'accès du local et d'attendre le renouvellement de l'air de celui-ci. L'interdiction est 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 portent, *a minima*, des gants, une surtenuie et des surbottes (étanches en cas de déversement de liquide); dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires filtrant adapté est recommandé.

Exposition 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 des personnels impliqués.
- Si l'irradiation est avérée ou en cas de doute, transmettre les dosimètres passifs 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).
- 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, un pansement étanche peut être placé sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

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 ;
- faire réaliser si possible un examen anthroporadiométrique et débiter immédiatement les prélèvements des urines sur une période de 24 heures pour examen par l'IRSN ou par un organisme agréé. Des prélèvements nasaux sont recommandés pour analyse du mucus nasal ;
- si le résultat est positif, le médecin du travail demande des mesures anthroporadiométriques ou des analyses ultérieures pour suivre l'évolution de la contamination interne.

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée (inhalation d'indium-111 sous forme particulaire (5 μm) de type F)

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

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

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 J après la contamination

F(t) = fraction excrétée ou retenue au jour J

DPUI = dose efficace engagée par unité d'incorporation

Le *tableau XV* présente les valeurs de rétention corps entier évaluées au moyen du logiciel DCAL (Oak Ridge National Laboratory, USA) et des modèles de la CIPR (incorporation d'indium-111 sous forme libre).

▽ Valeurs de rétention corps entier, en Bq par Bq incorporé, pour l'inhalation d'indium-111 sous forme libre et particulaire (5 µm) de types F

Tableau XV

Temps après l'incorporation (j)	Rétention corps entier
1	$4,31 \times 10^{-1}$
2	$2,42 \times 10^{-1}$
3	$1,57 \times 10^{-1}$
4	$1,13 \times 10^{-1}$
5	$8,55 \times 10^{-2}$
6	$6,61 \times 10^{-2}$
7	$5,15 \times 10^{-2}$
8	$4,02 \times 10^{-2}$
9	$3,15 \times 10^{-2}$
10	$2,46 \times 10^{-2}$

Exemple numérique utilisant le résultat de mesures anthroporadiométriques

Dans les trois jours (J2, J3 et J4) suivant la contamination interne à de l'indium (type F), la mesure anthroporadiométrique corps entier donne les résultats suivants :

$$A_{J2} = 9\,500 \text{ Bq}$$

$$A_{J3} = 5\,500 \text{ Bq}$$

$$A_{J4} = 4\,000 \text{ Bq}$$

Suivant le *tableau XV*, l'évaluation de l'activité inhalée sur la base de ces mesures donne :

$$I_{J2} = 9\,500 / 2,4 \times 10^{-1} = 3,9 \times 10^4 \text{ Bq}$$

$$I_{J3} = 5\,500 / 1,6 \times 10^{-1} = 3,5 \times 10^4 \text{ Bq}$$

$$I_{J4} = 4\,000 / 1,1 \times 10^{-1} = 3,5 \times 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$I = 3,6 \times 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$E = (3,6 \times 10^4) \times (2,2 \times 10^{-4}) = 8 \text{ µSv}$$

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 est 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⁽⁹⁾ (notamment le critère 1 relatif à la protection des travailleurs) est déclaré, dans les meilleurs délais, par l'employeur 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) est signalé à l'ASN, au préfet compétent et à l'IRSN.

(9) – 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.

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 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



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