

décembre 2012

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4309

Strontium-90



▷ Émissions principales :

Strontium-90 :

β^- (100 % de décroissance) : $E_{\text{moyenne}} = 196 \text{ keV}$; $E_{\text{max}} = 546 \text{ keV}$

Yttrium-90 :

β^- (100 % de décroissance) : $E_{\text{moyenne}} = 933 \text{ keV}$; $E_{\text{max}} = 2\,280 \text{ keV}$

▷ Période physique du strontium-90 : 29 ans
Période physique du l'yttrium-90 : 2,7 jours

▷ Seuils d'exemption : 10^4 Bq , 100 Bq/g

▷ Organes critiques en termes de dose efficace : moelle osseuse, surface osseuse, côlon, poumons

▷ Surveillance du poste de travail : mesures de débit d'équivalent de dose ambiant (radiamètre) et 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 : analyse radiotoxicologique des urines

Le strontium est un métal malléable de couleur gris-jaune. Son point de fusion est de 777 °C et son point d'ébullition est de 1377 °C. Le strontium appartient, comme le calcium, au groupe des métaux alcalino-terreux. En solution, il est le plus souvent sous forme de chlorures ou de nitrates. Il s'oxyde rapidement à l'air. Il s'enflamme et brûle facilement dans l'air et réagit violemment avec l'eau pour produire de l'hydroxyde de strontium, corrosif, et de l'hydrogène.

Cette fiche concerne le strontium-90 seul d'une part et le couple strontium-90/yttrium-90 à l'équilibre d'autre part. L'yttrium-90 seul fait l'objet d'une fiche dédiée⁽¹⁾.

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 : Yttrium-90, ED 4310.

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le strontium-90 n'existe pas à l'état naturel. Il résulte de la chaîne de désintégration du brome-90 (^{90}Kr : krypton-90, 32 s ; ^{90}Rb : rubidium-90, 2,6 min) : $^{90}_{35}\text{Br} \xrightarrow{\beta^-} ^{90}_{36}\text{Kr} \xrightarrow{\beta^-} ^{90}_{37}\text{Rb} \xrightarrow{\beta^-} ^{90}_{38}\text{Sr}$

Propriétés radiophysiques

Le strontium-90 a une période radioactive de 29 ans et une activité massique de $5,16 \times 10^{12}$ Bq/g.

Le strontium-90 par désintégration β^- conduit à l'yttrium-90. L'yttrium-90 ayant une période beaucoup plus courte, son activité devient rapidement sensiblement égale à celle du père (équilibre radioactif).

Par la suite, on parlera du couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre pour désigner cet équilibre.

Les seuils d'exemption du code de la santé publique rappelés dans cette fiche sont ceux du strontium-90 mais prennent en compte l'équilibre avec l'yttrium-90.

Quel que soit l'état d'équilibre, l'association strontium 90 + yttrium 90 (couple Sr-90/Y-90) est un émetteur β quasi pur ; les contributions des électrons et des rayonnements X et γ qui accompagnent la transition nucléaire (désintégration) de l'yttrium-90 sont faibles et ne sont pas reportées dans le [tableau I](#).

▽ Principales émissions du couple Sr-90/Y-90 **Tableau I**

Principales émissions	Énergie (keV)		Pourcentage d'émission (%)	
	E_{\max}	E_{moy}		
β^- (spectre continu)	Strontium	546	196	100
	Yttrium	2 280	933	~ 100

▽ Filiation du strontium-90 et de l'yttrium-90 **Tableau II**

Produits de filiation	Yttrium-90 et zirconium-90 (stable)
Équations	$^{90}_{38}\text{Sr} \xrightarrow{\beta^-} ^{90}_{39}\text{Y} \xrightarrow{\beta^-} ^{90}_{40}\text{Zr}$

Propriétés biologiques

La biocinétique de l'yttrium-90 formé par décroissance *in vivo* du strontium-90 incorporé est celle du strontium décrite ci-dessous. La biocinétique de l'yttrium incorporé avec le strontium-90 est décrite dans la fiche dédiée à l'yttrium-90⁽¹⁾.

Les études cinétiques ont montré la similitude qui caractérise du point de vue qualitatif la distribution du calcium et celle du strontium.

Plus de 99 % du strontium-90 retenu dans l'organisme se trouve au niveau des tissus osseux et des dents.

L'excrétion rénale est maximale le jour de l'incorporation et diminue ensuite progressivement.

2. UTILISATIONS

Les sources de strontium-90 ne sont pas utilisées sous forme non scellée. On notera toutefois que le strontium-90 peut comme d'autres radionucléides être l'objet d'une recherche (en radiotoxicologie par exemple).

Le couple Sr-90/Y-90 étant un émetteur quasiment pur β^- avec deux énergies caractéristiques différentes ($E_{\max} = 546$ keV et 2 280 keV), les sources scellées sont utilisées comme références pour l'étalonnage d'appareils, pour réaliser des mesures d'épaisseur et de grammage. On le trouve également dans quelques applications particulières comme la préionisation de tubes électroniques (quasiment plus utilisée aujourd'hui) ou encore des sondes de détection de givre pour hélicoptère. Il équipe quelques irradiateurs.

En médecine, des sources scellées ont été utilisées sous forme d'applicateurs ophtalmologiques pour la thérapie des ptérygions (tumeurs bénignes d'origine conjonctivale envahissant la cornée) ; cette utilisation n'est plus pratiquée en France.

Notons ici que cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides, essentiellement sous forme de sources non scellées. Bien que les sources de strontium-90 ne soient pas utilisées sous cette forme, le risque d'exposition au couple Sr-90/Y-90 existe lors de la fabrication des sources, en cas d'endommagement des sources ou de dispersion accidentelle. Par ailleurs, l'exposition au couple Sr-90/Y-90 existe dans les activités du cycle nucléaire dont les activités de démantèlement.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe⁽²⁾

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

Les [tableaux III et IV](#) 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 le cas de l'exposition à une source ponctuelle. 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 (Sr-90) **Tableau III**

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

▽ Source ponctuelle (couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre) **Tableau IV**

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$3,1 \times 10^3$	$2,6 \times 10^2$	$1,4 \times 10^1$
$\dot{H}_p(10)$	3×10^{-1}	2×10^{-2}	$< 1 \times 10^{-2}$

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

Les **tableaux V et VI** ci-dessous sont fournis à titre indicatif, le couple Sr-90/Y-90 n'étant pratiquement pas utilisé sous forme de sources non scellées. Dans les configurations envisagées, la contribution de l'yttrium-90 est largement dominante étant donné l'énergie élevée de l'émission bêta. Les rayonnements bêta du strontium-90 sont eux quasiment arrêtés par la paroi du conteneur.

▽ **Flacon (10 mL) en verre standard rempli au tiers (couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre)** **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	
	Tenu en main	Sous le flacon	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$5,4 \times 10^3$	$7,6 \times 10^3$	$8,7 \times 10^0$	$8,3 \times 10^{-1}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

▽ **Seringue en polyéthylène pleine (couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre)** **Tableau VI**

	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
$\dot{H}_p(0,07)$	$1,3 \times 10^5$	$4,0 \times 10^4$	$3,4 \times 10^2$	$4,2 \times 10^1$	$3,7 \times 10^0$
$\dot{H}_p(10)$	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.

Contamination cutanée

Un dépôt uniforme sur la peau de 1 MBq par cm^2 délivre un débit d'équivalent de dose à la peau [$\dot{H}_p(0,07)$] égal à $1,5 \times 10^6 \mu\text{Sv/h}$ pour le strontium-90 seul et à $3,1 \times 10^6 \mu\text{Sv/h}$ pour le couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

Le **tableau VII et VIII** donnent les valeurs de dose efficace en μSv engagée correspondant à une activité incorporée de 1 Bq. Le **tableau VII** reprend les valeurs de DPUI réglementaires pour le strontium-90 incorporé seul. Le **tableau VIII** évalue les coefficients correspondants pour le couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre, dans le scénario où l'incorporation de 1 Bq de strontium-90 s'accompagne de l'incorporation de 1 Bq d'yttrium-90 sur la base des valeurs de DPUI pour l'yttrium-90⁽¹⁾.

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

▽ **Doses efficaces engagées à la suite d'incorporation de 1 Bq de strontium-90 (DPUI) pour les travailleurs de plus de 18 ans (valeurs réglementaires)** **Tableau VII**

Forme	Inhalation de 1 Bq (par défaut: aérosol de 5 μm)		Ingestion de 1 Bq
	Type	Dose efficace engagée (μSv)	Dose efficace engagée (μSv)
Composés non spécifiés	F	$3,0 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-2}$
Titanate de strontium (SrTiO_3)	S	$7,7 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3}$

Dans les calculs de DPUI ci-dessus :

- les composés sont caractérisés par un facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 (qui indique quelle fraction de la radioactivité présente dans l'intestin grêle passe dans le sang) égal à 0,3 (plus solubles) et à 0,01 (moins solubles) ;
- les organes critiques (contribution à la dose efficace $\geq 10\%$) sont les suivants :
 - après inhalation, type F : moelle osseuse (81%), surface osseuse (15%),
 - après inhalation, type S : poumons (98%),
 - après ingestion, $f_1 = 0,3$: moelle osseuse (78%), surface osseuse (15%),
 - après ingestion, $f_1 = 0,01$: côlon (66%), moelle osseuse (27%).

▽ **Doses efficaces engagées sur 50 ans à la suite d'incorporation de 1 Bq de strontium-90, (couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre) pour les travailleurs de plus de 18 ans (coefficients de doses les plus élevés)** **Tableau VIII**

Inhalation de 1 Bq (aérosol de 5 μm)	Ingestion de 1 Bq
Dose efficace engagée (μSv)	Dose efficace engagée (μSv)
$7,9 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$

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

Le **tableau IX** résume les techniques de surveillance de l'exposition au couple Sr-90/Y-90.

▽ **Techniques de surveillance à réaliser** **Tableau IX**

	Appareil de mesure
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)	Radiamètre équipé d'une sonde β et d'une sonde γ/X
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	Contaminamètre ou sonde β ou frottis
Recherche de petits foyers de contamination	Sonde β
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	Mesure par prélèvement sur filtre

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

La mesure se fait avec un radiamètre équipé d'une sonde β et d'une sonde γ/X pour la détection du rayonnement de freinage ou *Bremsstrahlung* induit autour de la source.

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

Elle 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 couple Sr-90/Y-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 (qui est ensuite compté par une sonde bêta 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 de prélèvement. La technique du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur précise pour son 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

$$A_s = \frac{n}{R_d \times S \times K}$$

où A_s est l'activité surfacique en Bq/cm^2
 n est le taux de comptage en impulsions par seconde après soustraction du bruit de fond
 R_d est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π)
 S est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm^2
 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 (valeur par défaut) 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 petites tailles.

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m^3)

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

5. MOYENS DE PROTECTION

Le choix des moyens de protection repose sur une analyse préalable de l'action à réaliser afin d'identifier les risques présents. 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.

Le couple Sr-90/Y-90 n'étant pas utilisé sous forme de sources non scellées, on est concerné principalement par la protection contre l'exposition externe.

Installation des locaux

Dans les cas particuliers où le risque d'exposition à une source non scellée existe, les locaux doivent être adaptés à la manipulation du couple Sr-90/Y-90 :

- 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 facile à décontaminer ;
- 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 ;
- 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 ;
- 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 le strontium-90 et l'yttrium-90 qui sont des émetteurs β de forte énergie, il est recommandé en fonction des activités manipulées d'utiliser des pinces ;
- interposer un ou plusieurs écrans entre la source de rayonnements et les personnes pour à la fois arrêter le rayonnement bêta (par exemple : 6 mm de pyrex, 10 mm de PMMA) et diminuer suffisamment la contribution du rayonnement de freinage induit par ce processus.

La solution est de rechercher le meilleur compromis pour optimiser la protection à mettre en œuvre. Elle relève d'un calcul spécifique lié à la géométrie de la source et peut conduire au

(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 ».

choix d'un matériau ou à l'association de matériaux de Z faible (créant moins de rayonnement de freinage) et élevé (atténuant plus le rayonnement de freinage). Pour un container, la protection pourra être constituée de 10 mm de PMMA entourée de quelques mm de plomb, 1 mm de plomb diminuant le débit d'équivalent de dose au contact d'environ 4 par comparaison à 10 mm de PMMA seul⁽⁵⁾.

Protection contre l'exposition interne

Les sources de Sr-90/Y-90 étant généralement fragiles, il convient de les manipuler avec précaution pour limiter le risque de les endommager et, le cas échéant, de disperser le radionucléide. Dans ce cas, le port d'un équipement individuel de protection des voies respiratoires est recommandé.

Lorsque le risque de dispersion de Sr-90/Y-90 ne peut pas être exclu, la vigilance doit être renforcée et les équipements de protection individuels doivent être utilisés :

- gants jetables ;
- blouse à manches longues et fermée ;
- lunettes de protection.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLES DES LOCAUX

Sous réserve de la présence d'une signalétique adaptée, il est possible de limiter les zones réglementées à une partie des locaux dans laquelle les sources sont manipulées et stockées.

Les activités nécessitant un classement en zones contrôlées ou surveillées sont si possible regroupées géographiquement.

Délimitation des locaux

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 doit être prise pour empêcher l'accès non autorisé aux sources radioactives, notamment aux zones où elles sont stockées.

La délimitation des locaux doit prendre en compte les risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et stockées (*tableaux X et XI*).

Tableau X

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				
	Zones spécialement réglementées				
<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 	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
	$E < 7,5 \mu\text{Sv}$	$E < 25 \mu\text{Sv}$	$E < 2 \text{ mSv}$ 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 XI

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

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

(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 (11), 1330-1333 (2011).

Contrôles

Les contrôles techniques réglementaires de radioprotection sont présentés dans le *tableau XII*. Les appareils de mesure recommandés sont donnés au *tableau IX*.

▽ Contrôles réglementaires

Tableau XII

	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)	

À côté 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 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 XIII*) ; 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 XIII

	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

* 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. Consécutivement, le critère de classement devrait passer à 6 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 risques spécifiques du couple Sr-90/Y-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 :

- 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⁽⁶⁾ ;
- le médecin du travail a un libre choix de prescription des examens complémentaires ;
- en cas de grossesse, 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 ; il est déconseillé d'affecter une femme enceinte à un poste de travail où le risque de contamination interne existe ;
- 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 ;

(6) 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 $\dot{H}_p(0,07)$] pour toute opération en zone contrôlée, quelle que soit la catégorie du travailleur.

La dosimétrie des extrémités (de type bague) est obligatoire lorsque la dose équivalente est susceptible de dépasser 50 mSv/an. Elle est fortement recommandée pour des valeurs inférieures si le niveau d'exposition attendu de l'étude de poste est significatif.

Exposition interne

Le niveau d'exposition interne est évalué par analyse radiotoxilogique des urines (prélèvement sur 24 heures). Le prélèvement des urines est réalisé le plus rapidement possible après l'incorporation.

Dans le cas de manipulation régulière, l'intervalle maximal recommandé entre deux examens est de 180 jours pour les types S et de 30 jours pour les types F⁽⁷⁾.

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

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 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 déchets produits. L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

Les déchets doivent être gérés dans des filières autorisées. Aucun rejet direct n'est autorisé.

Les déchets contaminés sont entreposés dans un lieu réservé à ce type de déchets. Ce lieu est fermé et son accès est limité aux seules personnes habilitées par le titulaire de l'autorisation.

Les déchets solides et liquides des producteurs ou des détenteurs de déchets radioactifs hors secteur électronucléaire (universités, laboratoires de recherche, industries...) doivent faire l'objet d'un tri répondant aux spécifications de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) (les traitements ultérieurs ne sont pas les mêmes en fonction des caractéristiques des déchets). Ce tri consiste à séparer les déchets en prenant en compte leur nature physico-chimique et les risques spécifiques autres que le risque radiologique. Pour aider les producteurs, l'ANDRA édite et diffuse chaque année un guide d'enlèvement détaillant les différentes catégories de déchets.

Les déchets liquides sont entreposés sur des dispositifs de rétention permettant de récupérer les liquides en cas de fuite de leur conditionnement.

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

Application non médicale conduite dans un établissement industriel ou commercial

Dont aucune installation n'est soumise à autorisation au titre d'une autre rubrique de la nomenclature ICPE (détention d'un produit chimique, bruit...)

Une autorisation préalable délivrée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10⁴ Bq (activité totale) ou à 100 Bq/g (activité massique).

Dont au moins une installation est soumise à autorisation au titre d'une autre rubrique de la nomenclature ICPE

La déclaration ICPE auprès du préfet du département est imposée lorsque l'activité totale détenue est comprise entre 10⁴ Bq et 10⁸ Bq. À partir de 10⁸ Bq et au-delà, l'autorisation ICPE est requise et est délivrée par le préfet du département.

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 10⁴ Bq (activité totale) ou à 100 Bq/g (activité massique).

(7) Norme NF ISO 20553:2006 : « Surveillance professionnelle des travailleurs exposés à un risque de contamination interne par des matériaux radioactifs ».

10. TRANSPORTS ROUTIERS

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses (matières radioactives : classe 7). Pour le couple Sr-90/Y-90 à l'équilibre, 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 10^4 Bq, la réglementation ne s'applique pas. Néanmoins, en cas de quantités inférieures et de transport d'autres matières radioactives, l'état de contamination radiologique est vérifié avant tout transport. Dans tous les cas, un contrôle de non-contamination de l'emballage doit être effectué par l'utilisateur.

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

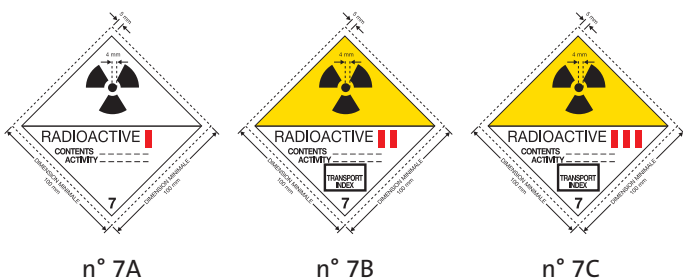
L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans ces règlements. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée (tableau XIV). Un niveau d'activité de référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le couple Sr-90/Y-90, A2 vaut 0,3 TBq.

▽ Classement des colis selon l'activité du contenu (exemple de contenu solide)

Tableau XIV

Type de colis	Activité de ^{90}Sr - ^{90}Y contenue	Caractéristiques du colis
Colis excepté	$< 0,3 \text{ GBq}$ ($< \text{A2}/1000$)	Peu résistant
Colis de type A	$< 0,3 \text{ TBq}$ ($< \text{A2}$)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	$> 0,3 \text{ TBq}$ ($> \text{A2}$)	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.



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

Tableau XV

Indice de transport (IT) ⁽⁸⁾	Débit d'équivalent de dose en tout point de la surface	Étiquette
0	$\text{DDD} \leq 5 \mu\text{Sv/h}$	I – BLANCHE
Plus de 0 mais pas plus de 1	$5 \mu\text{Sv/h} < \text{DDD} \leq 500 \mu\text{Sv/h}$	II – JAUNE
Plus de 1 mais pas plus de 10	$500 \mu\text{Sv/h} < \text{DDD} \leq 2 \text{ mSv/h}$	III – JAUNE
Plus de 10	$2 \text{ mSv/h} < \text{DDD} \leq 10 \text{ mSv/h}$ ⁽⁹⁾	III – JAUNE et transport exclusif

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.

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).

Contamination des locaux et/ou du matériel

- 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 le faire évacuer.
- Décontaminer de l'extérieur vers l'intérieur avec du matériel jetable en utilisant des détergents de laboratoire (exemples : TFD 4, FDK).

(8) 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 .

(9) 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.

- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde bêta, frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

Toute contamination de locaux 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 surtenue et des surbottes ; dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires filtrant est recommandé

Expositions externe et interne d'une personne

Exposition externe

- Relever la dosimétrie opérationnelle, 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.

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 les 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 les 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 (prélèvement sur 24 heures) et les envoyer rapidement pour examen à l'IRSN. Des prélèvements nasaux sont recommandés pour analyse du mucus nasal ;
- en cas de résultat 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 h⁽¹⁰⁾ qui suivent la contamination. Il consiste en l'administration de chlorure d'ammonium ou de gluconate de calcium. En cas d'ingestion, l'usage d'alginate de sodium est recommandé.

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

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

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

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

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 au jour J

DPUI = dose efficace engagée par unité d'incorporation

Le **tableau XVI** présente les valeurs d'excrétion urinaire F(t) évaluées par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

▽ Valeurs d'excrétion urinaire évaluées par la CIPR⁽¹¹⁾ au jour J, en Bq par Bq incorporé, pour l'inhalation de strontium-90 sous forme particulaire (5 µm) de types F et S

Tableau XVI

Temps après l'incorporation (J)	Inhalation	
	Type F	Type S
1	6,8 x 10 ⁻²	8,1 x 10 ⁻⁴
2	2,3 x 10 ⁻²	3,4 x 10 ⁻⁴
3	1,6 x 10 ⁻²	2,2 x 10 ⁻⁴
4	1,2 x 10 ⁻²	1,6 x 10 ⁻⁴
5	9,2 x 10 ⁻³	1,3 x 10 ⁻⁴
6	7,5 x 10 ⁻³	1,1 x 10 ⁻⁴
7	6,3 x 10 ⁻³	9,0 x 10 ⁻⁵
8	5,4 x 10 ⁻³	7,7 x 10 ⁻⁵
9	4,7 x 10 ⁻³	6,8 x 10 ⁻⁵
10	4,1 x 10 ⁻³	6,1 x 10 ⁻⁵

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

(11) Valeurs extraites de la CIPR 78 relative à la surveillance individuelle de l'exposition interne des travailleurs.

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 :

$$A_{J1} = 1\,400 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J2} = 500 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J3} = 300 \text{ Bq sur 24 heures}$$

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

$$I_{J1} = 1\,400 / (6,8 \times 10^{-2}) = 20,6 \text{ kBq}$$

$$I_{J2} = 500 / (2,3 \times 10^{-2}) = 21,7 \text{ kBq}$$

$$I_{J3} = 300 / (1,6 \times 10^{-2}) = 18,8 \text{ kBq}$$

L'activité incorporée est égale, en première approche, à la moyenne⁽¹²⁾ des trois valeurs de I :

$$I = 20,4 \text{ kBq}$$

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

$$E = 20,4 \times 10^3 \times 3,0 \times 10^{-2} = 600 \text{ } \mu\text{Sv}$$

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 événement significatif répondant aux critères définis dans les guides de l'ASN⁽¹³⁾ (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 doit également être 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.

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

(13) – 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, EDF, INSERM, ainsi que l'ASN 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),
- Bernard Le Guen (EDF),
- 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