

juin 2014

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4320

239
94 Pu

Plutonium-239

- ▷ Émissions principales :
 α : $E_{\text{moyenne}} = 5,1 \text{ MeV}$
- ▷ Période physique : $2,41 \times 10^4$ ans
- ▷ Seuils d'exemption : 10^4 Bq , 1 Bq/g

- ▷ Organes critiques en termes de dose efficace : poumon, côlon, moelle osseuse, surface osseuse, foie
- ▷ Surveillance du poste de travail : mesures de la contamination surfacique et atmosphérique
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : analyse radiotoxicologique des selles et éventuellement des urines à réaliser en fonction de la fréquence de manipulation

Cette fiche vise plus spécifiquement les activités de recherche mettant en œuvre le plutonium-239 à l'état isolé. Dans l'industrie civile, le plutonium-239 est rarement seul et de ce fait le travailleur est exposé à un mélange constitué de différents isotopes du plutonium et d'autres transuraniens. Ceci n'est pas pris en compte dans cette fiche.

Le plutonium se présente sous la forme d'un métal dur et argenté de masse volumique élevée (selon la structure cristalline de 16 à 20 g/cm^3) qui ressemble au plomb ou à l'étain. Le plutonium métal est attaqué par les acides mais résiste aux composés alcalins. Ses points de fusion et d'ébullition sont respectivement de 640°C et de $3\,228^\circ\text{C}$. Il se transforme au contact de l'air en oxyde de plutonium (PuO_2) et peut alors s'enflammer. Les composés les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie sont les nitrates, les fluorures, les oxydes, ainsi que des complexes organiques.

Compte tenu de la forte radiotoxicité du plutonium, un confinement maximum des matières radioactives doit être recherché (en cas de rupture du confinement, la principale voie d'exposition pour le travailleur est la contamination par inhalation, la contamination cutanée ou par blessure). Des moyens de détection sont mis en place à différents niveaux pour contrôler l'efficacité des barrières de confinement et, *in fine*, garantir la protection des travailleurs.

Le plutonium fait partie des matières nucléaires relevant du code de la défense, auxquelles s'appliquent des règles de gestion spécifiques et qui font l'objet de contrôles extrêmement rigoureux à la fois aux niveaux international et national.

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. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Tous les isotopes du plutonium sont radioactifs. Le plutonium-239 est en quasi-totalité d'origine artificielle. C'est un des composés du cycle aval du combustible nucléaire. Il est produit par l'irradiation de l'uranium par des neutrons. Il peut toutefois se retrouver naturellement à l'état de traces dans des minerais d'uranium.

Propriétés radiophysiques

Le plutonium-239 a une période radioactive de $2,41 \times 10^4$ ans et une activité massique de $2,30 \times 10^9$ Bq/g.

Le plutonium-239 se désintègre par émission de particules alpha. Cette transition nucléaire (désintégration) est accompagnée par l'émission d'électrons et de rayonnements X et γ . Les données du *tableau I* concernent les principales émissions dont le pourcentage est supérieur à 1% et l'énergie est supérieure à 1 keV.

▽ Principales émissions du du plutonium-239 **Tableau I**

Principales émissions	Énergie (keV)	Pourcentage d'émission (%)
Alpha	5106	12
	5144	17
	5157	71
Électrons	1,3-3,0	27
	8,7-10,3	16
	13-13,6	6,2
	29,9-34,5	6,0
	46-48	2,0
X	3-5	1,5
	13,4-13,6	1,7
	15,7-18,2	2,0
Gamma	(Toutes les émissions ont des intensités inférieures à 1%)	

La filiation du plutonium-239 compte 11 descendants émetteurs alpha et bêta avant d'atteindre le plomb-207 stable. Le premier descendant étant l'uranium-235 de période radioactive environ 30 000 fois plus longue que celle du plutonium-239, les conséquences, en termes de radioprotection, liées à la contribution des produits de filiation du plutonium-239 ne sont pas traitées dans cette fiche (*tableau II*).

▽ Filiation du plutonium-239 **Tableau II**

Produits de filiation	Uranium-235 ... Plomb-207 (stable)
Équations	${}^{239}_{94}\text{Pu} \xrightarrow{\alpha} {}^{235}_{92}\text{U} \dots {}^{207}_{82}\text{Pb}$

Propriétés biologiques

Comme en général pour les actinides, les composés du plutonium sont plus ou moins solubles.

Pour l'inhalation, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), à partir de données humaines et animales, retient deux types de solubilité pour le plutonium-239. Le type S (absorption sanguine lente) est recommandé pour les oxydes. Le type M (absorption sanguine moyenne) est recommandé par défaut dans les cas non spécifiés.

Le plutonium est peu transférable. Après ingestion d'une quantité de plutonium-239, 0,001 à 0,05% (selon sa solubilité) est absorbé dans la circulation sanguine. La CIPR considère que l'absorption par le tractus gastro-intestinal est égale à 0,01% pour les nitrates plus solubles que les oxydes.

Une fois transféré au sang, les principaux sites biologiques de fixation sont le squelette et le foie. L'évolution dans le temps de ces rétentions met en jeu le recyclage, dans le compartiment sanguin, de l'activité éliminée de ces organes. La période de rétention moyenne depuis le squelette est d'au moins 50 ans.

Le plutonium-239 est excrété par voie urinaire et fécale dans des proportions qui dépendent de sa forme physico-chimique.

2. UTILISATIONS

Les différents isotopes du plutonium sont produits à partir de l'uranium dans les réacteurs nucléaires. Le plutonium produit peut être utilisé dans un mélange d'oxydes pour faire du combustible nucléaire appelé « MOX »⁽¹⁾. Le MOX qui réclame une attention particulière n'est pas traité spécifiquement dans cette fiche.

En France, mis à part dans les réacteurs à eau pressurisée des centrales EDF, le plutonium se rencontre dans les usines de fabrication et de recyclage du combustible nucléaire, dans les réacteurs expérimentaux, dans les laboratoires de recherche ainsi que dans le domaine de la défense.

Étant une matière fissile, le risque de criticité (initiation d'une réaction en chaîne produisant un très fort flux de neutrons – cf. accident de Tokai Mura en 1999) avec le plutonium-239 est à considérer (à titre indicatif : 500 g de plutonium-239 mélangés à de l'eau dans un volume sphérique peuvent suffire) ; ce risque nécessite des dispositions particulières et n'est pas abordé dans cette fiche.

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

(1) Mélange d'oxydes (*Mixed OXides* en anglais).

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). Les valeurs inférieures à $1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$ n'ont pas été reportées (inférieures au bruit de fond naturel).

▽ 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
$\dot{H}_p(0,07)$	$1,1 \times 10^{-1}$	$6,6 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	$7,5 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

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

▽ 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
$\dot{H}_p(0,07)$	$6,7 \times 10^1$	$2,9 \times 10^1$	$2,0 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽²⁾	Sans objet ⁽²⁾	$6,5 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

* 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 $1,8 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$.

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.

▽ Doses efficaces engagées à la suite d'incorporation de 1 Bq (DPUI) pour les travailleurs de plus de 18 ans pour l'inhalation et l'ingestion (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	M	$3,2 \times 10^1$	5×10^{-4}	$2,5 \times 10^{-1}$
			1×10^{-4}	$5,3 \times 10^{-2}$
Oxydes	S	$8,3 \times 10^0$	1×10^{-5}	$9,0 \times 10^{-3}$

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

Le facteur f_1 indique quelle fraction de la radioactivité présente dans l'intestin grêle passe dans le sang. Il caractérise l'absorption gastro-intestinale des composés. Dans le cas du plutonium-239, il est pris égal à 5×10^{-4} pour les composés les plus solubles et à 1×10^{-5} pour les composés les moins solubles ; la valeur 1×10^{-4} est recommandée pour les nitrates plus solubles que les oxydes.

Selon la modélisation de la CIPR⁽³⁾, les organes contribuant principalement à la dose efficace (contribution $\geq 10\%$) sont les suivants :

- après inhalation, type M : foie (33%), moelle osseuse (18%), surface osseuse (31%) ;
- après inhalation, type S : poumons (67%), foie (12%), surface osseuse (11%) ;
- après ingestion de composés non spécifiés et de nitrates ($f_1 = 5 \times 10^{-4}$ et 1×10^{-4}) : foie (33%), moelle osseuse (18%), surface osseuse (32%) ;
- après ingestion d'oxydes ($f_1 = 1 \times 10^{-5}$) : foie (19%), moelle osseuse (10%), surface osseuse (18%), côlon (44%).

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.

Exposition interne due à une contamination chronique

Selon la CIPR, l'incorporation chronique est considérée comme une succession d'incorporations 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 au plutonium-239.

▽ Techniques de surveillance

Tableau VII

	Appareil de mesure
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	Sonde α ou frottis ou contaminamètre
Recherche de petits foyers de contamination	Sonde α
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	Mesure par prélèvement sur filtre

La mesure du débit d'équivalent de dose ambiant (mSv/h) est sans intérêt pour le plutonium-239 à l'état isolé, sa désintégration alpha ne s'accompagnant que de rayonnements X et γ de faibles énergie et intensité (*tableau I*) conduisant à des faibles débits de dose (*tableau III*).

(3) Cette modélisation en cours de révision devrait conduire à une modification des coefficients de dose, notamment pour le colon.

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

La mesure d'une contamination surfacique en plutonium-239 peut être réalisée :

- soit directement à partir du taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde α placée au plus près de la surface à contrôler (< 5 cm), celle-ci étant maintenue sèche. On peut également mesurer la contamination surfacique en plutonium-239 avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm². Veiller à ce que l'appareil soit adapté à la mesure du plutonium-239. En cas de doute, contacter le constructeur ;
- soit indirectement par frottis (dont le taux de comptage est mesuré avec une sonde de surface supérieure ou égale à celle du frottis) 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 % comme 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 4 π)
 - 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 (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)

La manipulation du plutonium-239 se faisant toujours en atmosphère confinée, la mesure de la contamination atmosphérique doit être réalisée pour contrôler l'efficacité des barrières de confinement. Un système de mesure en continu équipé d'un filtre permet de détecter une éventuelle contamination atmosphérique et d'en mesurer l'évolution. Les points de prélèvement sont situés au plus proche des postes de travail.

5. MOYENS DE PROTECTION

Le choix des moyens de protection repose sur une analyse préalable de l'intervention à réaliser (ou des protocoles expérimentaux) afin d'identifier 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.

Compte tenu de la radiotoxicité élevée du plutonium-239, il est primordial de se prémunir contre le risque de contamination interne.

Installation des locaux

Les locaux dans lesquels le plutonium-239 est manipulé sont réservés à ces activités et situés à l'écart des circulations générales :

- le revêtement des sols et des surfaces de travail est en matériau lisse, imperméable, sans joint et facile à décontaminer ;
- toutes les manipulations doivent être impérativement réalisées dans des enceintes confinées. Celles-ci doivent être équipées d'un système de ventilation indépendant avec filtres. Elles doivent être installées dans des locaux mis en dépression qui bénéficient d'une ventilation indépendante du système général de ventilation ;
- 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 liquides contaminés sont clairement identifiés et comportent des robinets à commande non manuelle.

Le cas échéant, le transfert de matières radioactives d'un local à l'autre se fait à l'aide d'un dispositif adapté évitant le risque de dispersion.

Protection contre l'exposition interne

Afin de limiter les risques d'exposition interne, la manipulation du plutonium-239 se fait dans des enceintes confinées, hottes ou boîtes à gants ventilées selon l'activité manipulée, maintenues sous atmosphère inerte.

Les équipements de protection individuelle sont néanmoins nécessaires :

- gants jetables en complément de ceux de la boîte à gants qui sont adaptés à la manipulation du plutonium. Il est rappelé qu'après chaque manipulation, un contrôle et un lavage des mains sont nécessaires ;

(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 ».

- tenue de travail adaptée à la quantité manipulée ;
- lunettes de protection, voire masque de protection respiratoire à portée de main. Ces dispositifs de protection respiratoire doivent être envisagés en fonction de l'analyse des risques au poste de travail tenant compte des conditions de manipulation (contraintes mécaniques, forme physico-chimique des composés, etc.).

Protection contre l'exposition externe

Sauf en cas de contamination cutanée, le risque d'exposition externe est faible pour le plutonium-239 (voir chapitre 3).

On se contente ici de rappeler les dispositions générales pour se protéger contre les risques d'exposition externe (diminuer le temps d'exposition, s'éloigner de la source). Il est recommandé d'éviter l'utilisation de matériaux de faible numéro atomique (lithium, béryllium, bore) qui, sous l'effet des particules alpha émises par les noyaux de plutonium-239, peuvent générer un flux de neutrons.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLE 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 lesquels du plutonium-239 est entreposé et manipulé.

Délimitation des zones réglementées

Le zonage 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 dans lesquelles les sources radioactives sont entreposées et utilisées.

La délimitation des locaux doit prendre en compte les risques d'exposition liés aux sources manipulées et entreposées (*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)

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

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

	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
Zone non réglementée 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 réalisés sous la responsabilité de l'employeur (interne) sont présentés dans le **tableau X**; les appareils de mesure recommandés pour réaliser ces contrôles sont donnés au **tableau VII**.

▽ Contrôles réglementaires

Tableau X

	Mise en œuvre
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm ²)	En continu ou au moins mensuelle
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m ³)	

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

- la vérification régulière de la contamination surfacique après chaque manipulation et en cas d'incident sur les matériels, 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 est adapté à la fréquence des manipulations ;
- la mesure de la contamination atmosphérique en continu à 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, incluant les situations incidentelles raisonnablement prévisibles, 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 (la limite annuelle de dose

efficace étant 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⁽⁵⁾) sont classés par l'employeur en catégorie A après avis du médecin du travail (**tableau XI**), ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

De plus, la femme enceinte, l'étudiant ou l'apprenti de moins de dix-huit ans ne peuvent être affectés 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 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 du plutonium-239 et aux procédures particulières 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 :

- la surveillance médicale est renforcée pour les travailleurs classés en catégorie A et B, avec en catégorie A une surveillance au moins une fois par an ;
- le médecin du travail peut choisir de prescrire 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. Toutefois il est nécessaire de souligner que compte tenu de l'importance du transfert materno-fœtal et du coefficient de dose par unité d'incorporation, la limite de dose au fœtus de

(5) Attention : La valeur limite actuelle de 150 mSv/an devrait être abaissée à 20 mSv/an suite à la révision des normes de base européennes (directive 2013/59/EURATOM).

1 mSv peut être très rapidement atteinte. Le respect de cette exigence sera en outre difficile à contrôler compte tenu de la durée nécessaire pour réaliser les mesures et de la limite de détection du plutonium. En pratique, il est déconseillé de laisser une femme enceinte à ce poste de travail ;

- il est 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 interne

La surveillance dosimétrique des travailleurs exposés nécessite la connaissance de la forme physico-chimique du plutonium.

Le niveau d'exposition interne est évalué, par analyse radiotoxicologique des selles et éventuellement des urines (prélèvement sur 24 heures). L'analyse des selles est d'autant plus indiquée que la solubilité du composé est faible.

Dans le cas de manipulation régulière de plutonium-239, l'ISO (International Standard Organisation) recommande de ne pas dépasser 180 jours entre deux examens pour une incorporation par inhalation quel que soit le type (M ou S)⁽⁶⁾.

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

Par ailleurs, les renseignements fournis par mesure de l'atmosphère au poste de travail sont utiles pour estimer l'incorporation ou au moins la caractériser.

Suivant l'ensemble des résultats disponibles, le médecin du travail demande des contrôles ultérieurs pour suivre l'évolution du niveau de l'exposition interne ; il analyse les circonstances de l'exposition avec l'appui de la personne compétente en radioprotection (PCR).

Exposition externe

Le risque d'exposition externe n'est à considérer que lorsqu'il y a une contamination cutanée.

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

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

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

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

Pour la détention et l'utilisation de plutonium-239 (application non médicale) :

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) accorde les autorisations et reçoit les déclarations. L'autorisation est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^4 Bq et si la concentration d'activité est égale ou supérieure à 1 Bq/g dans la limite d'une tonne (*tableau XII*).

▽ Régime d'autorisation ou de déclaration du code de la santé publique pour le plutonium-239

Tableau XII

Quantité	Concentration	
	< 1 Bq/g	≥ 1 Bq/g
< 10^4 Bq	Exemption*	Exemption
≥ 10^4 Bq	Exemption*	Autorisation requise

* Pour autant que les masses des substances mises en jeu soient au plus égales à 1 tonne.

Cependant, si une activité nucléaire relève du régime des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) pour une autre rubrique de la nomenclature, la déclaration auprès du préfet du département est imposée lorsque l'activité détenue est égale ou supérieure à 10^4 Bq pour le plutonium-239. À partir de 10^8 Bq (seuil d'exemption x 10^4), l'autorisation est requise.

De plus, quelle que soit l'application : au titre de la réglementation sur la protection et le contrôle des matières nucléaires relevant du code de la défense, la détention de plutonium est soumise à déclaration à partir de 1 g ; à partir de 3 g elle est soumise à autorisation du ministre de la Défense pour les matières nucléaires destinées aux besoins de la défense et du ministre chargé de l'énergie pour les matières destinées à tout autre usage. À noter que dès lors qu'une matière nucléaire est soumise à autorisation, toute autre matière nucléaire également détenue par le titulaire est soumise aux mêmes exigences quelle que soit sa quantité.

(6) 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 plutonium-239, cette réglementation ne s'applique pas si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 1 Bq/g ou si l'activité totale est inférieure à 10⁴ Bq.

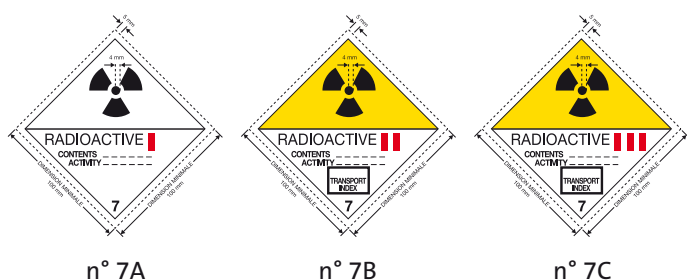
Si les deux seuils d'activité massique et d'activité par envoi sont dépassés, le transport est soumis aux dispositions réglementaires en vigueur, soulignant ici que le plutonium-239 est un radionucléide fissile.

Se référant au règlement de transport des matières radioactives⁽⁷⁾, 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 les règlements applicables aux transports. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée. Un niveau d'activité de référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis.

Le plutonium-239 étant un émetteur alpha, 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 0,4 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 d'équivalent de dose mesurés autour du colis (*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)

Tableau XIII

Indice de transport (IT) ⁽⁸⁾	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 ⁽⁹⁾	III – JAUNE et transport exclusif

(7) Règlement de transport des matières radioactives, normes de sûreté de l'AIEA en vigueur.

Au titre de la réglementation des matières nucléaires relevant du code de la défense, des mesures supplémentaires sont prises pour assurer une protection physique appropriée à partir de 3 g.

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.
- Avertir le personnel et si nécessaire le faire évacuer de la zone.
- 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, délimiter et baliser un périmètre de sécurité. La détection du plutonium-239 est réalisée par la mesure de la contamination surfacique.
- Décontaminer de l'extérieur vers l'intérieur avec du matériel jetable. Si les surfaces sont contaminées, il est recommandé d'utiliser des détergents de laboratoire exemple : TFD 4, FDK...
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde, frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

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

(8) 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 ne dépasse pas 1 m².

(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.

Les personnes intervenant dans des locaux suspectés ou avérés contaminés portent, *a minima*, des gants, une surtenuie et des surbottes (étanches en cas déversement de liquide); dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires est recommandé.

Exposition externe et interne d'une personne

Le suivi dosimétrique des travailleurs contaminés nécessite la connaissance de la forme physico-chimique du plutonium.

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.
- Procéder à la décontamination par un lavage à l'eau savonneuse de préférence (ou un produit équivalent non abrasif) sans irriter la peau 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, il est nécessaire de laver la peau avec une solution de DTPA (acide diéthylènetriamine penta-acétique) suivi si nécessaire d'un pansement occlusif placé sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et de faciliter l'élimination du radionucléide.

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

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

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

Contamination oculaire

- Laver abondamment sous l'eau à température ambiante.
- 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

Il est nécessaire de :

- déterminer l'activité manipulée et les autres isotopes et actinides présents ;
- apprécier les conditions et le niveau de contamination, le cas échéant en cas d'inhalation, en utilisant les informations disponibles provenant de la mesure de l'air ambiant autour du travailleur ou de la réponse d'un appareil de prélèvement individuel porté par le travailleur ;
- faire débiter immédiatement les prélèvements des selles (sur une période de 72 heures) et des urines (sur une période de 24 heures) pour examen par l'IRSN ou par un organisme agréé ; en outre, des prélèvements pour analyse du mucus nasal sont recommandés.

L'analyse radiotoxicologique implique classiquement une séparation radiochimique suivie d'une spectrométrie alpha de haute résolution.

Pour quantifier l'excrétion du plutonium après inhalation de composés moyennement transférables, les analyses radiotoxicologiques des urines et de selles conviennent l'une et l'autre. L'analyse des selles est indispensable si les composés sont ou risquent d'être insolubles.

En cas de contamination avérée ou suspectée, effectuer si possible une mesure anthroporadiométrique.

Si le résultat est positif, le médecin du travail demande des mesures 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). Le traitement préconisé est l'administration intra veineuse de DTPA. Contacter l'IRSN pour plus d'information (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63). On note que l'administration de DTPA ne traite que le plutonium, pas l'uranium dans le cas d'une exposition accidentelle au MOX.

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée (inhalation de plutonium-239 sous forme particulaire (5 µm), type M)

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

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

Avec :

E = dose efficace engagée

I = activité incorporée lors 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 pour 1 Bq incorporé

DPUI = dose efficace engagée par unité d'incorporation

Le **tableau XIV** présente les valeurs d'excrétion urinaire évaluées par la CIPR qui sont utilisées pour interpréter les valeurs d'activités mesurées.

▽ Valeurs d'excrétion urinaire, en Bq par Bq incorporé, pour l'inhalation de plutonium-239 sous forme particulaire (5 µm) de types M

Tableau XIV

Temps après l'incorporation (J)	Excrétion urinaire journalière
1	$2,30 \times 10^{-4}$
2	$1,30 \times 10^{-4}$
3	$7,80 \times 10^{-5}$
4	$5,30 \times 10^{-5}$
5	$3,90 \times 10^{-5}$
6	$3,00 \times 10^{-5}$
7	$2,40 \times 10^{-5}$
8	$2,00 \times 10^{-5}$
9	$1,70 \times 10^{-5}$
10	$1,50 \times 10^{-5}$

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 :

$$A_{J1} = 0,032 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J2} = 0,015 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J3} = 0,010 \text{ Bq sur 24 heures}$$

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

$$I_{J1} = 0,032 / (2,3 \times 10^{-4}) = 1,4 \times 10^2 \text{ Bq}$$

$$I_{J2} = 0,015 / (1,3 \times 10^{-4}) = 1,2 \times 10^2 \text{ Bq}$$

$$I_{J3} = 0,010 / (7,8 \times 10^{-5}) = 1,3 \times 10^2 \text{ Bq}$$

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

$$I = 1,3 \times 10^2 \text{ Bq}$$

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

$$E = 32 \times (1,3 \times 10^2) = 4160 \text{ µSv}$$

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⁽¹⁰⁾ (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.

(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.

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).



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