

septembre 2013

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4316

33
15 **P**

Phosphore-33

- ▷ Émissions (émetteur bêta pur) :
 β^- : $E_{\text{moyenne}} = 76 \text{ keV}$; $E_{\text{max}} = 249 \text{ keV}$
- ▷ Période physique : 25,3 jours
- ▷ Seuils d'exemption : 10^8 Bq , 10^5 Bq/g

- ▷ Organes critiques en termes de dose efficace : poumon, côlon, moelle osseuse
- ▷ Surveillance du poste de travail : mesures de la contamination surfacique (contaminamètre ou frottis)
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition externe : dosimétrie passive (extrémités)
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : analyse radiotoxicologique des urines à réaliser en fonction de la fréquence d'utilisation.

Le phosphore est un solide à température ambiante. Le phosphate est de loin sa forme chimique la plus répandue. Le phosphore est également présent sous forme d'acide phosphorique. Le point de fusion du phosphore est de 44 °C et sa température d'ébullition est de 277 °C.

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le phosphore-33 est un élément radioactif artificiel. Il est produit avec un faible rendement par le bombardement neutronique de phosphore-31 (stable) ; on utilise plutôt dans les réacteurs nucléaires la réaction (n, α) sur le chlore-36 [$^{36}\text{Cl}(n,\alpha)^{33}\text{P}$] ou la réaction (n,p) sur le soufre-33 [$^{33}\text{S}(n,p)^{33}\text{P}$].

Propriétés radiophysiques

Le phosphore-33 a une période radioactive de 25,3 jours et une activité massique de $5,61 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$.

Le phosphore-33 est un émetteur β^- pur dont les caractéristiques spectrales sont résumées dans le *tableau I*.

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.*

▽ Spectre bêta du phosphore-33

Tableau I

Principales émissions	Énergie (keV)		Pourcentage d'émission (%)
	E_{max}	E_{moy}	
β^- (spectre continu)	249	76	100

▽ Filiation du phosphore-33

Tableau II

Produit de filiation	Soufre-33 (stable)
Équation	$^{33}\text{P} \xrightarrow{\beta^-} ^{33}\text{S} \text{ (stable)}$

Propriétés biologiques

Pour l'inhalation, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), à partir de données humaines et animales, retient deux types de solubilité pour le phosphore. La CIPR recommande de classer dans le type M (absorption moyenne) certains phosphates. Le type F (absorption rapide) est recommandé par défaut dans les cas non spécifiés.

Pour l'ingestion, l'absorption par le tractus gastro-intestinal de l'homme adulte est prise égale à 80% dans tous les cas.

Une fois dans le sang le phosphore-33 se dépose dans l'os (30%) et le reste du corps (55%), les 15% restants étant directement excrétés. La fraction de l'activité retenue dans l'os s'élimine avec une période de 1500 jours; pour le reste du corps, 15% s'élimine avec une période de 2 jours et 40% avec une période de 19 jours.

L'excrétion se fait principalement (90%) sous forme urinaire.

2. UTILISATIONS

Le phosphore-33 est utilisé comme une alternative au phosphore-32 en recherche en biologie moléculaire. En effet, son temps de vie plus long et surtout son spectre bêta moins énergétique ($E_{max} = 0,25$ MeV comparé à 1,7 MeV pour le phosphore-32) rendent sa manipulation plus simple en laboratoire.

Dans le domaine médical, le phosphore-33 a été employé dans le traitement des sténoses artérielles mais n'a plus actuellement d'indication.

Dans le domaine de l'industrie, il n'est pas utilisé.

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

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

▽ 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
$\dot{H}_p(0,07)$	$3,8 \times 10^0$	$1,3 \times 10^0$	$1,9 \times 10^{-1}$	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽¹⁾	Sans objet ⁽¹⁾	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$	$< 1 \times 10^{-2}$

* 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 $7,7 \times 10^5 \mu\text{Sv/h}$.

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

	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	$1,4 \times 10^{-4}$	0,8	$2,4 \times 10^{-4}$
Certains phosphates	M	$1,3 \times 10^{-3}$		

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

Dans les calculs de DPUI ci-dessus :

- tous les composés sont caractérisés par un facteur d'absorption gastro-intestinale f_1 (qui indique quelle fraction de la radioactivité de l'intestin grêle passe dans le sang) égal à 0,8 ;
- les organes critiques (contribution à la dose efficace $\geq 10\%$) sont les suivants :
 - après inhalation, type F : moelle osseuse (24 %), côlon (17 %),
 - après inhalation, type M : poumons (92 %),
 - après ingestion : côlon (33 %), moelle osseuse (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.

Étant donné la période du phosphore-33, 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 au phosphore-33.

Techniques de surveillance	Tableau VII
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm ²)	Appareil de mesure Sonde β ou frottis ou contaminamètre
Recherche de petits foyers de contamination	Sonde β

La mesure du débit d'équivalent de dose ambiant (mSv/h) est sans intérêt pour le phosphore-33, émetteur bêta pur de relativement faible énergie pour lequel $\dot{H}_p(10)$ est dans tous les cas $< 0,01 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ par MBq ([tableaux III-V](#)). La mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³) peut être réalisée à partir d'un prélèvement sur filtre.

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

La mesure d'une contamination surfacique en phosphore-33 peut-être réalisée :

- soit directement à partir du taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde β placée au plus près de la surface à contrôler. On peut aussi évaluer une contamination surfacique avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm². Veiller à ce que l'appareil soit étalonné, contrôlé et adapté à la mesure du phosphore-33. En cas de doute, contacter le constructeur ;

- soit indirectement par frottis à l'aide d'une compresse (dont le taux de comptage est mesuré avec une sonde β dont la surface est supérieure ou égale à celle de la compresse) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions du prélèvement. La technique du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur précise de rendement. Dans le cas où celui-ci ne peut pas être évalué, il est suggéré de retenir la valeur de 10% tel qu'indiqué dans la norme NF-ISO 7503-1⁽²⁾.

Relation entre le taux de comptage et l'activité surfacique	
$A_s = \frac{n}{Rd \times S \times K}$	
où	<p>A_s est l'activité surfacique en Bq/cm²</p> <p>n est le taux de comptage en impulsions par seconde après soustraction du bruit de fond</p> <p>Rd est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π)</p> <p>S est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm²</p> <p>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</p>

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.

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 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 et en maîtriser les gestes et la durée.

Installation des locaux

Les locaux sont réservés à la manipulation de sources non-scellées 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 ;
- 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 ;

(2) Norme ISO 7503-1:1998 : « Évaluation de la contamination de surface. Partie 1 : Émetteurs bêta (énergie bêta maximale supérieure à 0,15 MeV) et émetteurs alpha ».

- 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...).

Dans un laboratoire, le transfert d'une source d'un local à l'autre se fait à l'aide d'un dispositif adapté évitant le risque de dispersion.

Protection contre l'exposition externe

Trois actions majeures permettent de se protéger contre les risques d'exposition externe qui pour le phosphore-33 ne concernent pas l'exposition du corps entier vu les faibles valeurs de $H_p(10)$ (tableaux III-V) :

- diminuer le temps d'exposition aux rayonnements ;
- s'éloigner de la source de rayonnements ;
- interposer un ou plusieurs écran(s) entre la source de rayonnements et les personnes.

Par comparaison au phosphore-32 de spectre plus énergétique, il faut moins de 1 mm de polyéthylène pour arrêter le rayonnement bêta émis par le phosphore-33 ; de plus, la quantité de rayonnement de freinage produite est environ 6^{-10} fois moindre. L'optimisation des écrans, qui en général relève d'une évaluation au cas par cas en tenant compte à la fois de la géométrie de la source et des impératifs pratiques, peut être négligée dans la plupart des utilisations en laboratoire. À titre indicatif, l'exemple de la seringue de 5 mL montre que le phénomène existe, mais que les débits de dose correspondants, qui sont dans ce cas uniquement dus à des rayonnements de freinage produits dans le contenu la seringue et sa paroi, sont faibles (tableau V).

Protection contre l'exposition interne

La manipulation du phosphore-33 se fait sous hottes ou boîtes à gants ventilées suivant l'activité manipulée. Lorsque cette pratique ne peut être mise en œuvre, les mesures de

prévention et la vigilance vis-à-vis d'une éventuelle dispersion sont renforcées.

Lors de la manipulation de phosphore-33, 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

Dans la mesure où l'utilisation et l'entreposage sont réalisés en boîte à gants ou équipement équivalent (hotte ventilée récente), seuls ces équipements de travail font l'objet d'une délimitation tenant compte du risque d'exposition des extrémités. Le plus souvent il s'agira d'une zone surveillée.

Dans le cas contraire, cette délimitation s'appliquera au local.

Cette démarche s'entend pour les locaux où seul le phosphore-33 est 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 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 (tableau VIII).

Compte tenu du radionucléide et des activités généralement manipulées, la zone sera délimitée «zone surveillée» en se référant à l'exposition des extrémités (mains, pieds, chevilles et avant-bras).

Tableau VIII

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 non réglementée	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
Pas de valeur affichée	H < 0,2 mSv	H < 0,65 mSv	H < 50 mSv	H < 2,5 Sv	H > 2,5 Sv

Contrôles

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

▽ Contrôles réglementaires

Tableau IX

	Mise en œuvre
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm ²)	Au moins mensuelle

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 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 est 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⁽³⁾) sont classés en catégorie A après avis du médecin du travail (*tableau X*), ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

De plus, la femme enceinte et l'étudiant ou 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 X

	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 phosphore-33 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 :

- 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⁽⁴⁾ ;
- le médecin du travail a un libre choix de prescription des examens complémentaires ;

(3) 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.

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

- en cas de grossesse, il appartient au médecin du travail d'évaluer si la femme enceinte peut rester au poste de travail ; la dose de l'enfant à naître reste dans tous les cas, inférieure à 1 mSv entre la déclaration de grossesse et l'accouchement ;
- il est par ailleurs interdit d'affecter ou de maintenir une femme allaitante à un poste de travail comportant un risque d'exposition interne à des rayonnements ionisants ;
- la carte individuelle de suivi médical est remise par le médecin du travail (contacter l'IRSN : www.siseri.com) ;
- l'attestation d'exposition professionnelle est établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche individuelle d'exposition aux rayonnements ionisants.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

Seule la dosimétrie passive des extrémités (de type bague) est recommandée pour toute manipulation de source de phosphore-33, en tout état de cause, obligatoire lorsque la dose équivalente est susceptible de dépasser 50 mSv par an :

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

Exposition interne

L'exposition interne est évaluée par analyse radiotoxicologique des urines (prélèvement sur 24 heures). Elle est réalisée rapidement après manipulation.

Dans le cas de manipulation régulière de phosphore-33, l'ISO (International Standard Organisation) recommande de ne pas dépasser 30 jours entre deux examens urinaires pour une incorporation par inhalation de type F⁽⁵⁾.

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

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

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement 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...).

Le phosphore-33 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 en PMMA dont l'ouverture se fait à l'aide du pied. Ils sont ensuite entreposés dans un local réservé pendant au moins dix périodes radioactives, soit pour le phosphore-33 au moins 260 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 systèmes ne pourra être rejeté dans le réseau d'assainissement qu'après avoir vérifié que l'activité volumique résiduelle est inférieure à 10 Bq/L.

Effluents gazeux

Les effluents gazeux 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 SCELLÉES ET NON SCELLÉES)

La détention et l'utilisation de phosphore-33 concernent les organismes de recherche.

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

Une autorisation 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 10⁸ Bq (activité totale) ou à 10⁵ Bq/g (activité massique).

(5) 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 phosphore-33, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10^5 Bq/g ou si l'activité totale est inférieure à 10^8 Bq, cette réglementation ne s'applique pas.

Si les deux seuils d'activité massique et d'activité par envoi 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.

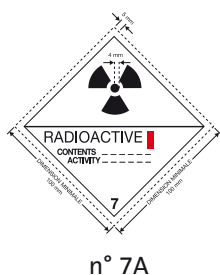
L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans les règlements applicables aux transports. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée (tableau XI). Un niveau d'activité de référence dit «A2» permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le phosphore-33, A2 vaut 1 TBq.

▽ Classement des colis selon l'activité en phosphore-33 (exemple de contenu liquide) **Tableau XI**

Type de colis	Activité mise en jeu pour le phosphore-33	Caractéristiques imposées au colis
Colis exceptés	< 1 GBq (< A2/1000)	Pas de normes de résistance
Colis de type A	< 1 TBq (< A2)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	> 1 TBq (> A2)	Étanche et blindé

Le phosphore-33 étant un émetteur bêta, 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/cm^2 en moyenne sur 300 cm^2 .

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. Pour le P-33, cette signalisation est effectuée par l'étiquette 7A (débit d'équivalent de dose en tout point de la surface $\leq 5 \mu\text{Sv/h}$) représentée ci-dessous.



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

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).

Contamination des locaux et/ou du matériel

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée, délimiter et baliser un périmètre de sécurité. La détection du phosphore-33 est réalisée par la mesure de la contamination surfacique au moyen d'un contaminamètre ou d'une sonde β .
- Confiner le déversement ou la fuite.
- Avertir le personnel et éventuellement le faire évacuer.
- 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 (exemples : TFD 4, FDK...).
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde β , frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

Dans le cas d'une dispersion de phosphore-33, il est recommandé d'interdire l'accès du local. L'interdiction est maintenue pendant toute la durée de la dispersion.

Il est conseillé d'évaluer la quantité dispersée à partir de l'activité de la source mère puis de déterminer le temps nécessaire avant la levée de l'interdiction d'accès après décroissance radioactive.

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

Les personnes intervenant dans des locaux suspectés ou avérés contaminés doivent porter, *a minima*, des gants, une surtenuie et des surbottes (étanches en cas de déversement de liquide).

Exposition externe et interne d'une personne

Pour le phosphore-33 d'énergie bêta relativement faible, seuls les risques de contamination cutanée et d'exposition interne sont considérés dans ce chapitre dédié aux situations incidentelles et accidentelles.

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 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, un pansement étanche peut être placé sur la zone concernée 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 cutanée d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

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

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 sur une période de 24 heures pour examen par l'IRSN ou par un organisme agréé.

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

Le traitement d'urgence doit être effectué sous contrôle médical (le plus tôt possible et de préférence dans les 2 heures qui suivent la contamination). Le traitement préconisé consiste en l'administration de phosphate disodique (phosphore oligosol). Contacter l'IRSN pour plus d'information (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée (ingestion de phosphore-33)

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 XII* présente les valeurs d'excrétion urinaire évaluées au moyen du logiciel IMBA Professional (Health Protection Agency – GB) et des modèles de la CIPR.

▽ Valeurs d'excrétion urinaire, en Bq par Bq incorporé, pour l'ingestion de phosphore-33

Tableau XII

Temps après l'incorporation (j)	Excrétion urinaire journalière
1	$8,70 \times 10^{-2}$
2	$5,40 \times 10^{-2}$
3	$3,33 \times 10^{-2}$
4	$2,37 \times 10^{-2}$
5	$1,81 \times 10^{-2}$
6	$1,44 \times 10^{-2}$
7	$1,18 \times 10^{-2}$
8	$9,90 \times 10^{-3}$
9	$8,50 \times 10^{-3}$
10	$7,43 \times 10^{-3}$

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 :

$$A_{J1} = 2\,200 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J2} = 1\,050 \text{ Bq sur 24 heures}$$

$$A_{J3} = 765 \text{ Bq sur 24 heures}$$

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

$$I_{J1} = 2\,200 / (8,70 \times 10^{-2}) = 2,5 \times 10^4 \text{ Bq}$$

$$I_{J2} = 1\,050 / (5,40 \times 10^{-2}) = 1,9 \times 10^4 \text{ Bq}$$

$$I_{J3} = 765 / (3,33 \times 10^{-2}) = 2,3 \times 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$I = 2,2 \times 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$E = (2,2 \times 10^4) \times (2,4 \times 10^{-4}) = 5,3 \text{ } \mu\text{Sv}$$

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⁽⁷⁾ (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.

(7) – 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