

octobre 2009

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4307

³⁵₁₆S

Soufre-35

- ▷ Émetteur β^- (énergie maximale de 168 keV)
- ▷ Période physique = 87,5 jours
- ▷ Organes cibles = INHALATION : voies respiratoires ;
INGESTION : vessie (composés organiques), colon
(composés inorganiques)

- ▷ Surveillance du poste de travail : mesures de contamination surfacique (contaminamètre ou frottis)
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition externe : dosimètres non adaptés (énergie moyenne des $\beta < 100$ keV), exposition à évaluer par une étude de poste
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : analyse radiotoxicologique

Le soufre existe sous forme solide, liquide et gazeuse et se trouve dans la nature en grande quantité, rattaché à d'autres éléments sous forme de sulfures (par exemple la pyrite) et de sulfates (par exemple le gypse). Il est présent également sous forme libre, au niveau des sources d'eau chaudes, des fumerolles et plus généralement dans les gaz volcaniques. Sa forme libre est par ailleurs présente dans des minerais.

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le soufre-35 est un radionucléide artificiel: il est obtenu par réaction neutron/proton sur le chlore-35 : [³⁵Cl (n, p) ³⁵S] ou par activation du soufre-34 [³⁴S (n, γ) ³⁵S].

Propriétés radiophysiques

Période radioactive : 87,5 jours

Le soufre-35 est un émetteur β^- de faible énergie, dont le spectre continu a pour énergie maximale 168 keV et pour énergie moyenne 48,8 keV.

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

Produit de filiation	$^{35}_{17}\text{Cl}$
Équation	$^{35}_{16}\text{S} \xrightarrow{\beta^-} ^{35}_{17}\text{Cl} \text{ stable}$

Propriétés biologiques

Le soufre est supposé très soluble.

Après passage dans le sang, le comportement du soufre est indépendant de la voie d'entrée. Le modèle biocinétique de la CIPR (Commission internationale de protection radiologique) suppose une répartition corporelle homogène du soufre systémique. Le soufre inorganique est excrété rapidement (6 heures) pour 80 %, retenu avec une période biologique de 20 jours pour 15 % et avec une période de 2 000 jours pour 5 %. Le soufre organique est retenu avec une période de 140 jours. L'excrétion du soufre se fait à 90 % dans les urines et à 10 % dans les selles.

2. UTILISATIONS

Le soufre-35 est un des radionucléides les plus utilisés en recherche biologique et médicale, notamment lors de l'incorporation de méthionine soufrée pour le suivi de protéines. Les activités mises en jeu sont comprises entre 200 kBq et 200 MBq.

Le soufre-35 n'est utilisé ni dans le domaine médical, ni dans le domaine de l'industrie.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe ⁽¹⁾

Les données dosimétriques ci-après sont obtenues par le calcul, en l'absence de toute protection. Le *tableau II* donne, pour une activité de 1 MBq, le débit d'équivalent de dose à la peau \dot{H}_p (0,07), en fonction de la distance lors de la manipulation d'une source ponctuelle. Les valeurs inférieures à $1.10^{-2} \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MBq}^{-1}$ n'ont pas été reportées.

▽ Source ponctuelle

Tableau II

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv}/\text{h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
\dot{H}_p (0,07)	$2,5 \cdot 10^2$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	–
\dot{H}_p (10)	Sans objet	Sans objet	Sans objet

Remarque : Pour les solutions de soufre-35 contenues dans un flacon de verre standard rempli au tiers ou dans une seringue, les valeurs obtenues sont toutes inférieures à $10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{h}$ pour 1 MBq.

Contamination cutanée

Une contamination cutanée de 1 MBq par cm^2 délivre un débit d'équivalent de dose [\dot{H}_p (0,07)] de l'ordre de 345 mSv/h.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

▽ Doses efficaces engagées sur 50 ans à la suite d'une incorporation de 1 Bq, (DPUI) pour les travailleurs de plus de 18 ans ⁽²⁾

Tableau III

Forme	Inhalation de 1 Bq	Ingestion de 1 Bq
	Dose efficace engagée (μSv)	Dose efficace engagée (μSv)
Particulaire	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–
Disulfure de carbone	$1,2 \cdot 10^{-4}$	–
Gaz sulfureux ou vapeur de soufre	$1,2 \cdot 10^{-4}$	–
Composés inorganiques	–	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Soufre élémentaire	–	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Soufre organique	–	$7,7 \cdot 10^{-4}$

Compte tenu de la période effective du soufre-35, les doses engagées sur un an sont identiques à celles engagées sur 50 ans.

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

▽ Mesures de surveillance à réaliser

Tableau IV

	Appareil de mesure	Mise en œuvre
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	Pas d'intérêt pratique	
Recherche de points de contamination	Sonde bêta	Après chaque manipulation En cas d'incident
Contamination surfacique (Bq/cm^2)	Sonde bêta ou frottis	En routine En cas d'incident
Contamination atmosphérique (Bq/cm^3)	Estimation par le calcul ou mesure sur filtre	Si le risque de contamination est avéré

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

Compte tenu de la faible énergie du rayonnement bêta émis par le soufre-35, la mesure du débit d'équivalent de dose est d'un intérêt très limité.

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

2 Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.

Mesure de la contamination surfacique (Bq/cm²)

La mesure d'une contamination surfacique peut être réalisée :

- soit directement avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm². Veiller à ce que l'appareil soit étalonné, contrôlé et adapté à la mesure du soufre-35. En cas de doute, contacter le constructeur ;
- soit par la mesure d'un taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde bêta que l'on applique sur la surface à contrôler ;
- soit indirectement par un frottis (qui est ensuite compté par une sonde bêta) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions de prélèvement. Dans tous les cas, la surface du frottis doit être égale ou inférieure à la surface du détecteur. L'utilisation 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 relative à l'évaluation de la contamination de surface.

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

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
Rd est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π)
S est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm²
K est le rendement de la mesure ou de frottis (K = 1 pour la mesure par taux de comptage, K = 0,1 par défaut pour la mesure de frottis)

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³)

Dans le domaine de la recherche, les quantités manipulées sont souvent trop faibles pour permettre une mesure. Une estimation par le calcul est nécessaire.

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 le ou les risque(s) présent(s). Il est recommandé de pratiquer une simulation de l'opération avec un colorant (exemple : fuschine) pour en maîtriser les gestes et la durée.

Pour le soufre-35, le risque prépondérant est le risque d'exposition interne.

Installation des locaux

Les locaux doivent être conçus pour la manipulation du soufre-35, être réservés à cet effet et situés à l'écart des circulations générales.

Le revêtement des sols, des murs, des plafonds et des surfaces de travail doit être en matériau lisse, imperméable, sans joint et facilement décontaminable.

Le matériel de laboratoire utilisé pour le travail avec le soufre-35 ne doit servir qu'à cette seule fonction.

Protection contre l'exposition externe

Compte tenu de sa faible énergie, le rayonnement β émis par le soufre-35 ne peut pas pénétrer dans les tissus humains au-delà de 0,3 mm. Seul le risque d'exposition à la peau, ceci à courte distance de la source, est à prendre en compte. Par ailleurs, des écrans en plexiglas doivent délimiter les zones de manipulation et de stockage des déchets. À noter cependant que, pour des activités manipulées importantes, l'absorption du rayonnement β dans les parois des récipients peut générer un rayonnement électromagnétique, dit rayonnement de freinage, susceptible d'augmenter le risque d'exposition au niveau des extrémités.

Protection contre l'exposition interne

Les équipements de protection individuelle doivent être utilisés.

Dans tous les cas, il faut :

- porter des gants jetables (souvent en vinyle), en changer toutes les 15 minutes et les ôter avant toute sortie de zone. Il est rappelé qu'après chaque manipulation, un contrôle et un lavage des mains sont nécessaires ;
- porter une blouse à manches longues, fermée ;
- porter des lunettes de protection.

Un grand nombre de composés soufrés se dégradent en produisant du SO₂ (gaz). Il convient donc d'être extrêmement prudent lors de l'ouverture d'un flacon contenant un produit marqué au ³⁵S, et de faire cette ouverture sous sorbonne pour éliminer le ³⁵SO₂ éventuellement formé. Ceci est aussi recommandé dans le cas de l'utilisation d'une centrifugeuse (ouverture des tubes sous sorbonne).

Sous réserve de manipuler des formes peu volatiles de faible activité, telles que des molécules marquées, et de démontrer dans l'étude de poste que le risque de contamination atmosphérique est inexistant, il peut être admis d'utiliser le soufre-35 sur paillasse.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLES DES LOCAUX

Délimitation des locaux ⁽³⁾

Dans le cas d'une utilisation exclusive de soufre-35, la délimitation des locaux prendra en compte le risque d'exposition interne lié aux sources manipulées et stockées.

Concernant la production de soufre-35, la délimitation des

³ Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites.

locaux prendra en compte l'ensemble des risques d'exposition externe et interne.

Sous réserve de la présence d'une signalétique adaptée, il est possible de limiter les zones réglementées à une partie du local dans lequel le soufre-35 est manipulé.

D'une manière générale, dans le domaine de la recherche, les activités utilisées sont relativement faibles : les zones de travail (postes de travail) sont classées en zones surveillées (très rarement en zones contrôlées). La zone surveillée peut être temporaire (le temps de la manipulation) sous réserve d'un contrôle strict de non-contamination et de la traçabilité de ce contrôle. Les activités nécessitant un classement en zones surveillées sont regroupées géographiquement.

Par exemple, lors de la première ouverture d'un flacon de solution de soufre-35, la sorbonne est délimitée comme zone contrôlée ou zone surveillée en fonction de l'activité utilisée.

Contrôles ⁽⁴⁾

L'arrêté du 26 octobre 2005 précise tous les contrôles qui doivent être effectués. Parmi ces contrôles, on retiendra plus particulièrement ceux relatifs à l'utilisation du soufre-35.

Le contrôle de la contamination surfacique doit être réalisé après chaque manipulation et en cas d'incident sur les surfaces,

4 Arrêté du 26 octobre 2005 définissant les modalités de contrôle de radioprotection en application des articles R. 4452-12, R. 4452-14 à R. 4452-16 du code du travail et R. 1333-44 du code de la santé publique.

matériels, écrans, mains. En sus des contrôles de routine des enceintes et des systèmes d'extraction, ces enceintes ventilées et leurs filtres doivent également être contrôlés au moins une fois par an.

Des contrôles atmosphériques peuvent être pertinents dans le cas de manipulations de soufre-35 sous forme gazeuse.

Par ailleurs, après toute manipulation et en sortie de zone réglementée, un contrôle de non-contamination corporelle et vestimentaire doit être réalisé de manière systématique.

Les appareils de mesure utilisés doivent être vérifiés au moins annuellement (et avant utilisation s'ils n'ont pas été utilisés depuis plus d'un mois).

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL EXPOSÉ

Classement

Contrairement à la délimitation des zones de travail qui est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé par une étude de poste.

L'évaluation de la dose prévisionnelle annuelle, prenant en compte les expositions externe et interne aux différents postes

Tableau V

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER ET DES EXTRÉMITÉS Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 h

	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
Zone non réglementée <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 $E < 7,5 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée verte $E < 25 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée jaune $E < 2 \text{ mSv}$	Zone contrôlée orange $E < 100 \text{ mSv}$	Zone rouge dite zone interdite $E > 100 \text{ mSv}$

Tableau VI

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

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

occupés, permet de classer les travailleurs exposés en deux catégories, A et B. Ce 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. Les niveaux de référence sont fournis au [tableau VII](#).

Ainsi, les travailleurs susceptibles de recevoir dans les conditions normales de travail une dose efficace supérieure à 6 mSv/an ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition fixées pour les mains ou le cristallin sont classés en catégorie A. Les travailleurs exposés ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

▽ Critères de classement des travailleurs exposés

Tableau VII

	Dose efficace	Dose équivalente mains, avant-bras, pieds, chevilles	Dose équivalente à tout cm ² de la peau
Travailleurs exposés de catégorie A	> 6 mSv sur 12 mois consécutifs	> 150 mSv	> 150 mSv
Travailleurs exposés de catégorie B	≤ 6 mSv sur 12 mois consécutifs	≤ 150 mSv	≤ 150 mSv

Formation du personnel

Tous les personnels susceptibles d'intervenir en zone réglementée doivent bénéficier d'une formation à la radioprotection renouvelée tous les trois ans et organisée par le chef d'établissement, portant sur les risques d'expositions externe et interne, sur les procédures générales de radioprotection en vigueur ainsi que sur les règles de protection contre les rayonnements ionisants.

Une attention particulière doit être portée à la formation des travailleurs temporaires et des nouveaux entrants. Une formation (ou information) spécifique doit aussi être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale du personnel

Les points clés sont les suivants :

- surveillance médicale renforcée, au moins annuelle, s'appuyant sur une fiche individuelle d'exposition établie par l'employeur avec l'aide du médecin du travail (copie dans le dossier médical) ;
- carte individuelle de suivi médical (contacter l'IRSN : www.siseri.com) ;
- attestation d'exposition professionnelle établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche individuelle d'exposition.

Aucune femme enceinte ne peut être affectée à un poste impliquant un classement en catégorie A. 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 (limite absolue). En cas d'allaitement, tout risque de contamination doit être exclu.

5 Arrêté du 23 juillet 2008 portant homologation de la décision n° 2008-DC-0095 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 29 janvier 2008 fixant les règles techniques auxquelles doit satisfaire l'élimination des effluents et des déchets contaminés par les radionucléides, ou susceptibles de l'être du fait d'une activité nucléaire, prise en application des dispositions de l'article R. 1333-12 du code de la santé publique.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition interne

Elle est évaluée par analyse radiotoxicologique urinaire (mesure indirecte). En cas d'utilisation régulière de soufre-35, la fréquence optimale des analyses est de 7 jours (norme NF ISO 20553, juillet 2006) en fonction des risques de contamination. Dans le cas d'une utilisation ponctuelle, l'examen doit avoir lieu après chaque manipulation.

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.

Exposition externe

La dosimétrie passive « corps entier » n'est pas justifiée, compte tenu de la faible énergie moyenne du rayonnement β du soufre-35. Si des activités importantes sont manipulées, l'absorption du rayonnement β dans les parois des récipients peut générer un rayonnement électromagnétique, dit rayonnement de freinage, susceptible de présenter un risque notamment au niveau des extrémités. De ce fait, des mesures de débit de dose doivent être réalisées au contact des parois des récipients. Si le résultat de la mesure est significatif, une dosimétrie des extrémités est alors recommandée lors des manipulations.

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement a le devoir de mettre en œuvre un plan de gestion individualisé définissant les modalités de tri, de conditionnement, de stockage, de contrôle et d'élimination des effluents et des déchets produits ⁽⁵⁾. L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

La période radioactive du soufre-35 étant inférieure à 100 jours, les déchets et les effluents produits peuvent faire l'objet d'une gestion et d'une élimination locales sans qu'il y ait de prise en charge obligatoire par l'ANDRA.

Déchets solides

Les déchets sont déposés dans des poubelles en plexiglas d'une épaisseur recommandée de 1 cm et recouvertes d'une mince protection de plomb, dont l'ouverture doit pouvoir se faire à l'aide du pied.

L'entreposage des déchets solides doit s'effectuer dans un local dédié. Leur élimination peut commencer après une mise en décroissance de dix fois la période radioactive, soit 875 jours, à condition que l'activité résiduelle mesurée ne dépasse pas deux fois le bruit de fond.

Effluents liquides

Les effluents liquides peuvent être éliminés par l'ANDRA.

Si l'élimination des effluents liquides est réalisée par le réseau d'assainissement public, elle ne peut se faire qu'après une mise

en décroissance d'au moins dix fois la période radioactive, soit 875 jours, à condition que l'activité volumique résiduelle soit inférieure à 10 Bq/l. Dans les laboratoires de recherche, l'élimination suit la filière de déchets adaptée aux autres risques.

Les cuves d'entreposage sont équipées de dispositifs de mesure de niveau et de prélèvement. Elles peuvent fonctionner alternativement en remplissage et en entreposage de décroissance. Un dispositif permet la transmission de l'information du niveau de remplissage des cuves vers un service où une présence est requise 24 heures sur 24. Ces cuves sont installées dans un local indépendant, ventilé et fermé à clé, muni d'un détecteur de liquide en cas de fuite. Elles doivent répondre aux caractéristiques suivantes :

- constituées d'un matériau facilement décontaminable (béton nu à proscrire) ;
- situées au-dessus d'un cuvelage de sécurité permettant la rétention de liquide en cas de fuite – ce cuvelage doit être muni d'un capteur de fuite.

En sortie de site, l'activité des effluents est surveillée par un bilan sur 8 heures tous les 4 jours ou par un contrôle en continu au moyen d'un détecteur approprié.

Effluents gazeux

Ils sont captés sur des filtres qui doivent être contrôlés puis traités avec les déchets radioactifs solides.

Après décroissance, les déchets et les effluents doivent être éliminés selon la filière appropriée en fonction de leur nature (banale, chimique, biologique...).

9. PROCÉDURES ADMINISTRATIVES D'AUTORISATION ET DE DÉCLARATION

Application à des fins de recherche biomédicale

La détention et l'utilisation de soufre-35 sont soumises à autorisation préalable prise au titre du code de la santé publique et délivrée par l'ASN, quelles que soient les activités détenues et manipulées.

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 10^8 Bq (activité totale) ou à 10^5 Bq/g (activité massique).

Application non médicale conduite dans un établissement 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 délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^8 Bq (activité totale) ou à 10^5 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 100 MBq et 10^6 MBq. L'autorisation ICPE est requise au-delà de 10^6 MBq. Elle est délivrée par le préfet du département.

Application non médicale conduite dans un établissement industriel produisant du soufre-35

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

10. TRANSPORTS SUR LA VOIE PUBLIQUE

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses. Pour le soufre-35, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10^5 Bq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 10^8 Bq, la réglementation ne s'applique pas.

Si ces deux seuils sont dépassés, le transport est soumis aux exigences des règlements applicables ; pour les transports par route, rail, voie fluviale, mer ou air, des arrêtés français rendent applicables les règlements ADR⁽⁶⁾, RID⁽⁷⁾, ADN⁽⁸⁾ ou ADN⁽⁹⁾, IMDG⁽¹⁰⁾ ou les instructions techniques de l'OACI⁽¹¹⁾, respectivement. Tous ces règlements sont compatibles entre eux pour faciliter les transports multimodaux.

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. 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 soufre-35, A2 vaut 3 TBq.

▽ Classement des colis selon l'activité du contenu

Tableau VIII

Type de colis	Activité de soufre-35 contenu	Exigences de conception du colis
Colis excepté	< 3 GBq (< A2/1 000)	Faibles : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en l'absence d'incident.
Colis de type A	< 3 TBq (< A2)	Moyennes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'incident mineur (choc de manutention, pluie, etc.).
Colis de type B	> 3 TBq (> A2)	Fortes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'accident sévère (collision, incendie, submersion).

6 ADR : accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route

7 RID : Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses

8 ADN : Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures

9 ADN^R : Règlement pour le transport de matières dangereuses sur le Rhin

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 des étiquettes apposées au colis, l'indice de transport et le débit de dose

Tableau IX

Indice de transport (IT) ⁽¹²⁾	Débit de dose (DDD) en tout point de la surface externe	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 ⁽¹³⁾	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.

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 ;
- contacter, si nécessaire, l'IRSN pour un appui technique (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

10 IMDG : Code maritime international des matières dangereuses, Organisation maritime internationale

11 Instructions techniques de l'OACI : Instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses, Organisation de l'aviation civile internationale

12 IT = intensité de rayonnement maximale à 1 m de tout point situé à la surface du colis (en mSv/h) × 100 × k où k est un coefficient qui dépend de la géométrie du colis avec k = 1 pour les colis dont la plus grande section est de 1 m².

13 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, si des dispositions sont prises pour immobiliser le colis à l'intérieur de l'enceinte du véhicule et s'il n'y a pas d'opérations de chargement/ déchargement entre le début et la fin de l'expédition.

Contamination des locaux et/ou du matériel

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée à l'aide d'une sonde bêta, délimiter et baliser un périmètre de sécurité. Il est à noter que l'utilisation de solutions colorées lors des manipulations faisant intervenir des radio-isotopes est recommandée afin de pouvoir détecter visuellement la contamination du poste de travail.
- Confiner le déversement ou la fuite (produits absorbants).
- Avertir le personnel et éventuellement le faire évacuer.
- Décontaminer de l'extérieur vers l'intérieur avec du matériel jetable. Si les surfaces sont contaminées, il est conseillé d'utiliser des détergents de laboratoire. Le cas échéant, il est possible d'utiliser des solvants spécifiques au type de molécules contaminantes.
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde, frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

Les personnes intervenant au cours de la décontamination doivent porter, *a minima*, des gants, une blouse fermée et des surbottes. Si un risque de contamination atmosphérique est avéré, le port d'un appareil respiratoire filtrant, voire d'une tenue complète étanche, est recommandé.

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

Expositions externe et interne d'une personne

Exposition externe due à une source distante

Sans objet.

Contamination cutanée

- Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures, les sécrétions nasales (mouchage).
- 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 l'efficacité de la décontamination.
- Si une contamination cutanée persiste, le médecin du travail pourra mettre en place un pansement étanche sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.
- Réaliser une analyse radiotoxicologique des urines.

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 pendant 10 minutes.
- Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.
- Réaliser une analyse radiotoxicologique des urines.

Contamination interne

Toute contamination cutanée ou oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une 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 ;
- procéder au recueil des urines sur 24 heures de la personne concernée et faire réaliser un examen radiotoxicologique urinaire.

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

Les traitements d'urgence envisageables à la suite d'une contamination interne par le soufre radioactif sont l'administration de thiosulfate de sodium ou de sulfate de magnésium. Ces traitements ne peuvent se faire que sous contrôle médical.

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée

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

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

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 t après la contamination

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

DPUI = dose par unité d'incorporation

Exemple numérique : inhalation de soufre-35 sous forme particulière de type F

L'analyse des urines des 24 heures prélevées dans les trois jours suivant la contamination donne les résultats ci-après :

$$A_1 = 2,9 \cdot 10^3 \text{ Bq sur 24 h}$$
$$A_2 = 260 \text{ Bq sur 24 h}$$
$$A_3 = 43 \text{ Bq sur 24 h}$$

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 :

- Bernard Aubert (IRSN),
- Alain Biau (IRSN),
- Jean-Michel Deligne (IRSN),
- Laurent Donadille (IRSN),
- Denis-Jean Gambini (AP-HP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St-Germain),
- Alain Rannou (IRSN),
- Françoise Roussille (INSERM),
- Gilles Sert (IRSN),
- Jean-Pierre Servent (INRS).

Le **tableau X** donne l'excrétion urinaire journalière mesurée au jour t, en Bq par Bq inhalé (5 μm) et ingéré, pour le soufre-35. Ces valeurs de F(t) ont été évaluées au moyen du logiciel IMBA Professional (Health Protection Agency, Grande-Bretagne).

▽ Excrétion urinaire mesurée au jour j, en Bq par Bq incorporé, pour le soufre-35 inorganique **Tableau X**

Temps en jour après l'incorporation	Inhalation (5 μm) Type F	Ingestion
1	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$
2	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$
3	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$
4	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
5	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
6	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
7	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
8	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
9	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
10	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Évaluation de l'activité incorporée sur la base des mesures d'excrétion à J 1, J 2 et J 3 :

$$I = 2,9 \cdot 10^3 / 2,9 \cdot 10^{-1} = 1,0 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

$$I = 260 / 2,9 \cdot 10^{-2} = 8,97 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

$$I = 43 / 3,5 \cdot 10^{-3} = 1,23 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$I = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

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

$$E = 1,04 \cdot 10^4 \times 1,1 \cdot 10^{-3} = 11,5 \text{ } \mu\text{Sv}$$

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 accident ou incident significatif doit être déclaré, dans les meilleurs délais auprès de la division territoriale compétente de l'ASN ou sur le serveur de l'ASN selon les dispositions en vigueur ⁽¹⁴⁾.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail doit également être prévenu.

14 Guide ASN/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.



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