

mars 2013

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4311

¹⁸₉F

Fluor-18

- ▷ Émissions :
 β^+ : $E_{moyenne} = 250 \text{ keV}$; $E_{max} = 634 \text{ keV}$
 γ (photons d'annihilation) : 511 keV
- ▷ Période physique : 110 minutes
- ▷ Seuils d'exemption : 10^6 Bq , 10 Bq/g

- ▷ Organes critiques en termes de dose efficace (incorporé sous forme libre) : estomac, gonades, poumons
- ▷ Surveillance du poste de travail : mesures de débit d'équivalent de dose ambiant (radiamètre) et de contamination surfacique (contaminamètre ou frottis)
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition externe : dosimétrie passive (poitrine et extrémités), dosimétrie opérationnelle en zone contrôlée
- ▷ Surveillance individuelle de l'exposition interne : examen anthroporadiométrique (à effectuer immédiatement en cas de suspicion d'incident étant donné la courte période du fluor-18)

Le fluor est l'élément chimique le plus électronégatif et donc le plus réactif. Il fait partie de la famille des halogènes. Aux conditions normales de température et de pression, le fluor est présent sous forme de difluor, F_2 , gaz diatomique jaune pâle et toxique. Son point de fusion est de -220 °C et son point d'ébullition est -188 °C .

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le fluor-18 est produit au moyen d'un cyclotron situé en général à proximité des lieux d'utilisation.

Plusieurs réactions nucléaires permettent de produire le fluor-18. La plus utilisée est le bombardement d'une cible constituée d'eau enrichie en oxygène-18 par des protons d'énergie élevée ($> 16 \text{ MeV}$): $^{18}_8\text{O} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + ^1_0\text{n}$. Elle produit de l'ion fluorure en solution dans l'eau enrichie récupéré après piégeage sur résine.

Une autre réaction de production est le bombardement d'une cible constituée de néon-20 par des deutons d'énergie $> 8 \text{ MeV}$: $^{20}_{10}\text{Ne} + ^2_1\text{D} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + ^4_2\alpha$. Toutefois, celle-ci produit du fluor diatomique et implique l'utilisation d'un gaz fluoré non radioactif comme entraîneur.

Cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides essentiellement en sources non scellées.

L'objectif n'est pas de se substituer à la réglementation en vigueur, mais d'en faciliter la mise en œuvre en réunissant sur un support unique, pour chaque radionucléide, les informations les plus pertinentes ainsi que les bonnes pratiques de prévention à mettre en œuvre.

Ces fiches sont réalisées à l'intention des personnes en charge de la radioprotection : utilisateurs, personnes compétentes en radioprotection, médecins du travail.

Sous ces aspects, chaque fiche traite :

1. des propriétés radiophysiques et biologiques,
2. des utilisations principales,
3. des paramètres dosimétriques,
4. du mesurage,
5. des moyens de protection,
6. de la délimitation et du contrôle des locaux,
7. du classement, de la formation et de la surveillance du personnel,
8. des effluents et déchets,
9. des procédures administratives d'autorisation et déclaration,
10. du transport,
11. de la conduite à tenir en cas d'incident ou d'accident.

Propriétés radiophysiques

Le fluor-18 a une période radioactive de 110 minutes et une activité massique de $3,52 \times 10^{18}$ Bq/g.

Le fluor-18 se désintègre principalement (97 %) par émission de positons (β^+) qui ensuite sont ralentis et s'annihilent avec des électrons en émettant deux photons de même énergie dans des directions opposées. Il se désintègre également (3 %) par capture électronique suivie d'émissions de RX dont l'énergie et le rendement sont faibles et ne sont pas reportés dans le *tableau I*.

▽ Principales émissions de du fluor-18

Tableau I

Principales émissions	Énergie (keV)		Pourcentage d'émission (%)
	E_{\max}	E_{moy}	
β^+ (spectre continu)	634	250	96,7
Photons d'annihilation	511		194

▽ Filiation du fluor-18

Tableau II

Produit de filiation	Oxygène-18 (stable)
Équation	${}_{9}^{18}\text{F} \xrightarrow{\beta^+ / \text{CE}} {}_{8}^{18}\text{O}$

Propriétés biologiques

Une fois dans le sang, le fluor-18 incorporé sous forme libre se dépose sur les os d'où il disparaît rapidement par décroissance radioactive.

Étant donné son utilisation en médecine nucléaire, c'est le vecteur chimique auquel il est attaché avant d'être incorporé qui détermine son comportement biocinétique. Ceci implique une évaluation spécifique qui pourra s'inspirer des informations fournies par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)⁽¹⁾. La CIPR indique en particulier que sous la forme FDG (fluoro-deoxy-D-glucose), le fluor-18 se distribue dans le cœur (4 %), le cerveau (8 %), le foie (5 %), le poumon (3 %), dans lesquels la rétention est permanente, et pour les 80 % restants dans les autres organes et tissus. 25 % de l'activité injectée est excrétée par voie urinaire selon des périodes biologiques de 12 minutes (25 %) et de 1,5 heure (75 %).

2. UTILISATIONS

Le fluor-18 est très utilisé en médecine nucléaire : il est employé comme marqueur (${}^{18}\text{F}$ -FDG). L'émission des deux photons d'annihilation qui suit l'émission β^+ permet de suivre

la consommation de FDG par tomographie par émission de positons (ou TEP) qui est le reflet de la consommation en glucose des tissus. Cette application a fait l'objet d'une fiche spécifique⁽²⁾.

Des traceurs fluorés destinés à étudier des fonctions tumorales sont en cours d'évaluation clinique, par exemple la ${}^{18}\text{F}$ -fluorothymidine (FLT).

Le fluor-18 est utilisé en recherche préclinique. Il n'est pas utilisé dans l'industrie.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe

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

Les *tableaux III, IV et V* donnent, pour une activité de 1 MBq le débit d'équivalent de dose, exprimé en $\mu\text{Sv/h}$, en fonction de la distance, dans différentes configurations. Les grandeurs $\dot{H}_p(0,07)$ et $\dot{H}_p(10)$ correspondent respectivement aux débits d'équivalent de dose à la peau et au corps entier ; ils ont été calculés avec un code Monte-Carlo (MCNPX).

▽ Source ponctuelle

Tableau III

	Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		
	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	$2,1 \times 10^3$	$2,2 \times 10^2$	$4,2 \times 10^0$
$\dot{H}_p(10)$	$1,7 \times 10^1$	$1,9 \times 10^0$	$1,7 \times 10^{-1}$

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

Tableau IV

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

▽ Seringue en polyéthylène pleine

Tableau V

	Débit d'équivalent de dose au contact en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq		Débit d'équivalent de dose en $\mu\text{Sv/h}$ pour 1 MBq (seringue de 5 mL ^{**})		
	Seringue 2 mL [*]	Seringue 5 mL ^{**}	À 10 cm	À 30 cm	À 100 cm
$\dot{H}_p(0,07)$	1×10^4	$2,9 \times 10^3$	$1,6 \times 10^1$	$1,8 \times 10^0$	$1,7 \times 10^{-1}$
$\dot{H}_p(10)$	Sans objet ⁽³⁾	Sans objet ⁽³⁾	$1,7 \times 10^1$	$1,9 \times 10^0$	$1,7 \times 10^{-1}$

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

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

(2) Pour plus d'informations, se référer à la fiche *Médecine nucléaire. Diagnostic in vivo. TEP-TDM ou TEP au fluor-18 et autres émetteurs de positons*, coll. « Radioprotection : secteur médical », FR 6.

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

Contamination cutanée

Un dépôt uniforme sur la peau de 1 MBq par cm² délivre un débit d'équivalent de dose à la peau [H_p (0,07)] égal à 1,4 x 10⁶ µSv/h.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

Le *tableau VI* donne les valeurs de dose efficace engagée en µSv correspondant à une activité de 1 Bq de fluor-18 incorporée sous forme libre.

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

Tableau VI

Inhalation de 1 Bq (par défaut aérosol de 5 µm)		Ingestion de 1 Bq
Type	Dose efficace engagée (µSv)	Dose efficace engagée (µSv)
F	5,4 x 10 ⁻⁵	4,9 x 10 ⁻⁵
M	8,9 x 10 ⁻⁵	
S	9,3 x 10 ⁻⁵	

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

- tous les composés sont caractérisés par un facteur d'absorption gastro-intestinale f₁ (qui indique quelle fraction de la radioactivité présente dans l'intestin grêle passe dans le sang) égal à 1 ;
- les organes critiques (contribution à la dose efficace > 10%) sont les suivants :
 - après inhalation, type F : estomac (13%),
 - après inhalation, type M et S : estomac (14%), poumons (29%),
 - après ingestion : estomac (67%), gonades (12%).

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 fluor-18.

En cas de suspicion de contamination, toutes les mesures doivent être réalisées rapidement en raison de la très courte période du fluor-18.

▽ Techniques de surveillance à réaliser

Tableau VII

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

Mesure du débit de dose ambiant (µSv/h)

La mesure du débit d'équivalent de dose s'effectue au moyen d'un radiamètre équipé d'une sonde γ/X.

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

Elle 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 fluor-18. En cas de doute, contacter le constructeur. On peut aussi évaluer une contamination surfacique à partir du taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde bêta, gamma/X placée au plus près de la surface à contrôler ;
- soit indirectement par un frottis à l'aide d'une compresse (dont le taux de comptage est mesuré avec une sonde bêta, gamma ou X dont la surface est supérieur ou égale à celle de la compresse) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions de prélèvement. La technique du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur précise 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⁽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 4π)
 - S** est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm²
 - K** est un facteur correctif, égal à 1 si c'est une mesure du taux de comptage fourni par la sonde, égal à 0,1 si c'est une mesure de frottis

(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 ».

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

La recherche de petits foyers de contamination est réalisée avec les mêmes techniques moyennant l'utilisation de sondes de petites tailles.

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³)

Un système de mesure équipé d'un filtre comportant un piège à charbon permet de mesurer en continu l'évolution d'une éventuelle contamination atmosphérique. Les bouches de prélèvement se situent au plus proche des postes de travail. L'appareil est situé à l'extérieur du local ou de la zone où le risque de contamination existe.

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.

Installation des locaux

Les locaux dédiés à la manipulation du fluor-18 sont conçus en tenant compte de la forme sous laquelle il se trouve :

- les locaux sont réservés à la manipulation de substances radioactives et situés à l'écart des circulations générales. L'épaisseur des parois est déterminée en tenant compte de l'émission des photons de 511 keV ;
- les locaux, mis en dépression, bénéficient d'une ventilation indépendante du système général de ventilation dont le renouvellement d'air est adapté à la volatilité des molécules marquées ;
- le revêtement des sols, des murs, des plafonds et des surfaces de travail doit être en matériau lisse, imperméable, sans joint et facile à décontaminer ;
- les 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 (contenants, cuves...);
- 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.

L'application du fluor-18 en médecine nucléaire (TEP au fluor-18) est l'objet d'une fiche dédiée⁽²⁾. On notera en particulier que :

- la préparation de la seringue et la mesure de l'activité sont réalisées dans des enceintes plombées adaptées au

fluor-18 assurant une protection en adéquation avec le zonage radiologique des locaux les accueillant ;

- les parois des boxes d'injection sont spécialement plombées ;
- les locaux sont organisés afin que le trajet du patient injecté entre le box d'injection, la salle d'examen et les toilettes soit le plus court possible ; les boxes d'injection se trouvent à proximité de la pièce de la caméra TEP et de la radiopharmacie (il est recommandé que la radiopharmacie soit adjacente aux boxes d'injection) ;
- le ¹⁸F-FDG non encore utilisé est stocké dans des pots plombés, le cas échéant placés dans des armoires de stockage elles-mêmes plombées.

Protection contre l'exposition externe

Trois actions majeures permettent de se protéger contre les risques d'exposition externe :

- diminuer le temps d'exposition aux rayonnements. En médecine nucléaire, il importe de limiter le temps de présence auprès d'un patient qui devient après injection du radiopharmaceutique une source de rayonnement énergétique de 511 keV ;
- s'éloigner de la source de rayonnements. Lors de la manipulation de fluor-18, il est recommandé d'utiliser des pinces ;
- interposer un ou plusieurs écrans entre la source de rayonnements et les personnes (*tableau VIII*).

Les gants utilisés pour éviter les risques de contamination cutanée ne constituent pas une protection efficace des mains contre l'exposition externe aux rayonnements X et γ . Cette remarque générale est particulièrement pertinente pour un émetteur β^+ dont l'utilisation entraîne une exposition externe aux photons d'annihilation.

Pour le fluor-18, des écrans de verre d'épaisseur égale à 0,9 mm ou de plexiglas d'épaisseur égale à 1,7 mm permettent d'arrêter les rayonnements β . Cependant, s'agissant d'un émetteur β^+ , c'est l'atténuation des photons d'annihilation qui est pénalisante en déterminant le dimensionnement des écrans nécessaires. Les épaisseurs d'écran renseignées au *tableau VIII* ont été évaluées en termes de diminution de débit de dose.

▽ *Caractéristiques des écrans permettant de diminuer le débit de dose lié au fluor-18* Tableau VIII

	Épaisseur d'eau	Épaisseur d'acier	Épaisseur de plomb
Diminution d'un facteur 10 du débit de dose	560 mm	67 mm	16 mm
Diminution d'un facteur 2 du débit de dose	280 mm	29 mm	6 mm

Dans les laboratoires de production de fluor-18, les solutions mères sont produites en cellule plombée de façon majoritairement automatique et transportées dans des conteneurs plombés.

Dans les services de médecine nucléaire, le ¹⁸F est utilisé sous forme FDG dans une boîte à gants plombée en utilisant des pinces ou dans des systèmes automatisés pour limiter l'exposition des extrémités. Les chariots transportant des seringues doivent être plombés.

Lors des injections au patient de ^{18}F -FDG, le système d'injecteur automatique est à privilégier. En cas d'injection manuelle, il est recommandé d'utiliser un embout en tungstène afin de protéger le pouce. Pour injecter et retirer la perfusion du patient, l'utilisation d'un paravent est nécessaire.

Pour les activités dans lesquelles à l'œil est situé à proximité de la source (10 à 20 cm), le port de lunettes de protection est recommandé.

La mise en place d'une poubelle plombée proche du box d'injection afin de pouvoir jeter la seringue après son utilisation est recommandée.

Protection contre l'exposition interne

Par principe, la manipulation du fluor-18 se fait dans des enceintes plombées renforcées et les locaux sont ventilés en dépression de manière indépendante des autres locaux.

Pour limiter le risque d'exposition interne, notamment lors d'incidents, les équipements de protection individuelle suivants sont utilisés :

- gants jetables : les gants constituent une barrière contre la contamination cutanée (pas contre l'irradiation). Il est rappelé qu'après chaque manipulation, un contrôle et un lavage des mains sont nécessaires ;
- blouse (tunique à manches longues) ;
- lunettes de protection.

Lorsque ce principe ne peut être respecté et notamment en médecine nucléaire lors des injections au patient, les mesures de prévention et de vigilance vis-à-vis d'une éventuelle dispersion sont renforcées.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLE DES LOCAUX

Les locaux dans lesquels sont utilisés du fluor-18 ainsi que les locaux attenants à ceux-ci sont délimités comme des zones contrôlées, surveillées ou non réglementées en fonction de l'activité utilisée et des dispositions de protection et de confinement mises en œuvre.

Les locaux concernés sont, dans la mesure du possible, regroupés géographiquement.

En médecine nucléaire, le classement des locaux dans lesquels le fluor-18 est susceptible d'être manipulé régulièrement est décrit dans une fiche dédiée⁽²⁾.

Délimitation des zones réglementées

Le zonage des locaux est justifié et formalisé dans chaque cas sous forme d'un document à conserver (à joindre au document unique relatif aux risques professionnels). Il est formalisé par l'affichage de panneaux conformes aux dispositions réglementaires en vigueur.

Toute mesure appropriée est prise pour empêcher l'accès non autorisé aux zones où les sources radioactives sont utilisées ou entreposées.

Le zonage repose sur une évaluation des risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et stockées (*tableaux IX et X*).

Tableau IX

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER

Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 heure
et, pour ce qui concerne les zones spécialement réglementées, débit d'équivalent de dose (DDD)

Zone non réglementée	Zones réglementées		Zones spécialement réglementées		
	Zone surveillée gris-bleu	Zone contrôlée verte	Zone contrôlée jaune	Zone contrôlée orange	Zone interdite rouge
<ul style="list-style-type: none"> ■ Dose efficace susceptible d'être reçue par un travailleur $E < 80 \mu\text{Sv}/\text{mois}$ ■ Contrôle de l'état de propreté radiologique si risque de contamination dans les zones réglementées attenantes 	$E < 7,5 \mu\text{Sv}$	$E < 25 \mu\text{Sv}$	$E < 2 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 2 \text{ mSv}/\text{h}$	$E < 100 \text{ mSv}$ et $\text{DDD} < 100 \text{ mSv}/\text{h}$	$E > 100 \text{ mSv}$ ou $\text{DDD} > 100 \text{ mSv}/\text{h}$

Tableau X

EXPOSITION DES EXTRÉMITÉS (MAINS, PIEDS, CHEVILLES ET AVANT-BRAS)

Dose équivalente (H) susceptible d'être reçue en 1 heure

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

Contrôles

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

▽ Contrôles réglementaires

Tableau XI

	Mise en œuvre
Mesure de débit d'équivalent de dose ambiant ($\mu\text{Sv/h}$)	En continu ou au moins mensuelle
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm^2)	
Mesure de contamination atmosphérique (Bq/m^3)	

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

- la mesure régulière du débit d'équivalent de dose ambiant ;
- la vérification régulière de la contamination surfacique, après chaque manipulation et en cas d'incident sur les paillasses, matériels, protège-seringues, écrans, sols... ;
- la vérification régulière de l'état radiologique de la boîte à gants ou hotte ventilée et de son filtre ; le rythme des contrôles sera adapté à la fréquence des manipulations ;
- la mesure de la contamination atmosphérique en continu au niveau de chaque poste de travail si un risque de contamination atmosphérique est identifié ou en cas de dispersion accidentelle ;
- la vérification de la non-contamination corporelle externe de manière systématique après toute manipulation et en sortie de zone.

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL

Classement

Tandis que la délimitation des zones de travail est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé par l'étude des postes de travail.

L'évaluation de la dose prévisionnelle (organisme entier et cristallin, peau, extrémités si nécessaire) annuelle, prenant en compte les expositions externe et interne aux différents postes occupés, permet de classer les travailleurs exposés en deux catégories, A et B. Les travailleurs pour lesquels la dose prévisionnelle dans les conditions habituelles de travail ou en cas de situation incidentelle raisonnablement prévisible dépasse la limite réglementaire pour le public sont considérés comme étant exposés aux rayonnements ionisants. Leur classement n'est pas fondé sur l'affectation habituelle ou non en zone réglementée (surveillée ou contrôlée) mais sur un niveau de dose susceptible d'être atteint.

Parmi les travailleurs exposés, ceux susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv/an ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition fixées pour les extrémités, la peau ou le cristallin sont classés en catégorie A (*tableau XII*) ; ceux ne relevant pas de la catégorie A sont classés en catégorie B.

En médecine nucléaire dans le cas de la TEP, le classement proposé pour les manipulateurs et les infirmiers est A en cas de manipulation de sources.

De plus, aucune femme enceinte ni aucun étudiant ou apprenti de moins de dix-huit ans ne peut être affecté(e) à un poste impliquant un classement en catégorie A.

▽ Critères de classement des travailleurs exposés **Tableau XII**

	Dose efficace corps entier	Dose équivalente mains, avant-bras, pieds, chevilles	Dose équivalente à tout cm^2 de la peau	Dose équivalente au cristallin
Travailleurs exposés de catégorie A	> 6 mSv sur 12 mois consécutifs	> 150 mSv	> 150 mSv	> 45 mSv
Travailleurs exposés de catégorie B	\leq 6 mSv sur 12 mois consécutifs	\leq 150 mSv	\leq 150 mSv	\leq 45 mSv

Formation du personnel

Tous les personnels, classés ou non, devant intervenir en zone réglementée doivent bénéficier d'une formation à la radioprotection, renouvelée au moins tous les trois ans et organisée par l'employeur, portant sur les risques d'exposition externe et interne, sur les procédures générales de radioprotection en vigueur ainsi que sur les règles de protection contre les rayonnements ionisants.

La formation est adaptée aux risques spécifiques du fluor-18 et aux procédures particulières de radioprotection touchant au poste de travail occupé ainsi qu'aux règles de conduite à tenir en cas de situation anormale.

Une attention particulière doit être portée à la formation des travailleurs temporaires, des nouveaux entrants et des femmes en âge de procréer. Une formation spécifique peut être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale des travailleurs exposés

Les points importants sont les suivants :

- la surveillance médicale doit être renforcée pour les travailleurs exposés classés en catégorie A et B, avec en catégorie A une surveillance au moins une fois par an⁽⁵⁾ ;
- le médecin du travail a un libre choix de prescription des examens complémentaires ;

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

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

Dosimètre passif individuel :

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

Dosimètre opérationnel [avec mesure de $\dot{H}_p(0,07)$ et $\dot{H}_p(10)$] pour toute opération en zone contrôlée, quelle que soit la catégorie du travailleur.

La dosimétrie des extrémités (de type bague) est fortement recommandée pour toute manipulation (préparation, injection...) de source de fluor-18. Elle est obligatoire lorsque la dose équivalente est susceptible de dépasser 50 mSv/an.

Exposition interne

Compte tenu de la courte période du fluor-18, un programme de surveillance systématique de la contamination interne en routine ne peut pas être recommandé comme pour d'autres radionucléides⁽⁶⁾. Une étude des conditions de travail ponctuelle peut être mise en œuvre sur site grâce aux moyens mobiles de l'IRSN (surveillance de contrôle de la norme).

Des mesures de contamination surfacique à l'aide d'une sonde bêta, gamma/X sur les personnes après toute manipulation, ou à défaut en fin de journée de travail, sont recommandées pour détecter toute situation anormale. En cas de mesure positive, se reporter à la partie 11 de la présente fiche (conduite à tenir en cas d'incident/accident).

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement a l'obligation de mettre en œuvre un plan de gestion individualisé définissant les modalités de tri, de conditionnement, d'entreposage, de contrôle et d'élimination des effluents et des déchets produits (voir dispositions réglementaires en vigueur). L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

La période radioactive du fluor-18 étant inférieure à 100 jours, les déchets et les 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 et liquides

Les déchets sont déposés dans des poubelles spécifiques dont l'ouverture doit pouvoir se faire à l'aide du pied. Elles doivent être plombées si l'activité des déchets le requiert. Les déchets sont ensuite stockés dans un local réservé pendant au moins 10 périodes radioactives, soit, pour le fluor-18, environ 20 heures. 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 de cuves d'entreposage 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'entreposages 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 muni d'un capteur de fuite.

Le contenu de ces systèmes d'entreposage 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.

Les systèmes de filtration des boîtes à gant ou hottes ventilées doivent être contrôlés selon une périodicité définie par le plan de gestion des déchets et effluents radioactifs de l'établissement.

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

La détention et l'utilisation du fluor-18 concernent les cas d'application ci-dessous.

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

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

La détention et l'utilisation du fluor-18 sont soumises à autorisation préalable prise au titre du code de la santé publique et délivrée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), quelles que soient les activités détenues et manipulées.

Application non médicale conduite dans un établissement industriel produisant de fluor-18

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

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

Une autorisation préalable délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^6 Bq (activité totale) ou à 10 Bq/g (activité massique).

Cette application concerne les organismes de recherche.

10. TRANSPORTS ROUTIERS

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses (matières radioactives : classe 7). Pour le fluor-18, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10 Bq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 10^6 Bq, cette réglementation ne s'applique pas.

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

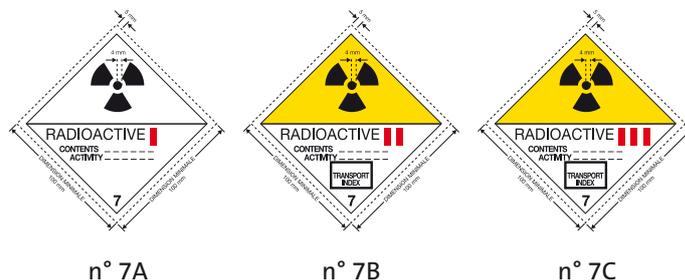
L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans ces règlements. En particulier, le choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée (tableau XIII). Un niveau d'activité de référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le fluor-18, A2 vaut 0,6 TBq.

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

Tableau XIII

Type de colis	Activité de ^{18}F contenue	Caractéristiques du colis
Colis excepté	$< 6 \times 10^{-2}$ GBq ($< \text{A2}/10\,000$)	Peu résistant
Colis de type A	$< 0,6$ TBq ($< \text{A2}$)	Conçu pour résister à des accidents mineurs de manutention
Colis de type B	$> 0,6$ TBq ($> \text{A2}$)	Étanche et blindé

L'expéditeur est également responsable de la signalisation des colis qui est destinée à limiter les risques d'exposition des personnes du public ou des travailleurs en cours de transport. Cette signalisation est effectuée par l'une des étiquettes 7A, 7B ou 7C représentées ci-dessous, choisie en fonction des débits de dose mesurés autour du colis.



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

Tableau XIV

Indice de transport (IT) ⁽⁷⁾	Débit d'équivalent de dose en tout point de la surface	Étiquette
0	$\text{DDD} \leq 5 \mu\text{Sv/h}$	I – BLANCHE
Plus de 0 mais pas plus de 1	$5 \mu\text{Sv/h} < \text{DDD} \leq 500 \mu\text{Sv/h}$	II – JAUNE
Plus de 1 mais pas plus de 10	$500 \mu\text{Sv/h} < \text{DDD} \leq 2 \text{mSv/h}$	III – JAUNE
Plus de 10	$2 \text{mSv/h} < \text{DDD} \leq 10 \text{mSv/h}^{(8)}$	III – JAUNE et transport exclusif

11. CONDUITE À TENIR EN CAS D'INCIDENT/ACCIDENT

Le traitement de l'urgence vitale médico-chirurgicale prime sur toute action de décontamination.

Sans préjudice de ce principe général, la conduite à tenir en cas d'incident/accident implique de hiérarchiser les actions dès la découverte de l'événement, pour caractériser le risque de contamination des locaux et/ou du matériel, évaluer l'exposition d'une personne, et enfin déclarer l'événement.

Étant donné sa faible période, toute exposition incidentelle ou accidentelle à du fluor-18 impose une grande réactivité.

Dès la découverte de l'événement :

- Suivre les consignes affichées en tenant compte des circonstances de l'incident et des activités mises en jeu.

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

(8) L'intensité en tout point de la surface externe ne peut dépasser 2 mSv/h que si le véhicule est équipé d'une enceinte qui, dans les conditions de transport de routine, empêche l'accès des personnes non autorisées à l'intérieur de l'enceinte, des dispositions sont prises pour immobiliser le colis à l'intérieur de l'enceinte du véhicule et il n'y a pas d'opérations de chargement/déchargement entre le début et la fin de l'expédition.

- 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

S'il s'agit d'une contamination de surface

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée, délimiter et baliser un périmètre de sécurité. La détection du fluor-18 peut être réalisée au moyen d'un radiamètre équipé d'une sonde γ/X .
- 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 en utilisant des détergents de laboratoire (exemples : TFD 4, FDK...).
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde γ/X , frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

S'il s'agit d'une contamination atmosphérique

- Faire évacuer le personnel présent dans le local, si cela n'a pas déjà été fait.
- Apposer les premiers balisages de sauvegarde.
- Évaluer rapidement le niveau et le caractère de l'incident (relevé les valeurs indiquées par l'appareil de contrôle atmosphérique, estimer la concentration dans l'air du radionucléide).

Dans le cas d'une dispersion de fluor-18, il est recommandé d'interdire l'accès du local et d'attendre le renouvellement de l'air. L'interdiction doit être maintenue pendant toute la durée de la dispersion. Après l'arrêt, il est conseillé d'évaluer la quantité dispersée à partir de l'activité de la source mère puis de déterminer le temps nécessaire à la décroissance.

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

Les personnes intervenant dans des locaux suspectés ou avérés contaminés doivent porter, *a minima*, des gants, une surtenue et des surbottes ; dans le doute, un appareil de protection des voies respiratoires filtrant adapté (avec couche de charbon actif) est recommandé.

Exposition externe et interne d'une personne

Exposition externe

- Relevé la dosimétrie opérationnelle. Le cas échéant, la comparer avec les résultats des dosimètres des autres personnels présents.
- Réaliser une première investigation en vérifiant le débit de dose de la source et le temps de présence des personnels impliqués.

- Si l'exposition est avérée ou en cas de doute, transmettre les dosimètres passifs pour exploitation en urgence.

En cas de dispersion accidentelle (bris d'un flacon par terre par exemple), des éléments (surface du dépôt, distance la plus courte entre le dépôt et la peau, temps d'exposition, épaisseurs d'écrans éventuels) peuvent être utiles à recueillir en vue d'une reconstitution dosimétrique.

Contamination cutanée

- Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures, les sécrétions nasales (mouchage).
- Faire ôter les vêtements contaminés.
- Procéder à la décontamination par un lavage à l'eau savonneuse de préférence (ou un produit équivalent non abrasif) sans frotter afin de ne pas favoriser le passage transcutané du contaminant.
- Contrôler après la décontamination et, si nécessaire, recommencer la procédure.
- Si une contamination cutanée persiste, le médecin du travail peut mettre en place un pansement étanche sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

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

Toute contamination cutanée d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

Contamination oculaire

- Laver abondamment sous l'eau à température ambiante.
- Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.

Toute contamination oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne (voir dispositions à prendre ci-après).

Contamination interne

Cette situation impose l'intervention immédiate de la PCR et du médecin du travail qui, si nécessaire, feront appel à un service spécialisé ou à l'IRSN.

Il est recommandé de :

- déterminer l'activité manipulée ;
- procéder dans la journée à une mesure anthroporadiométrique dans un laboratoire agréé s'il est situé à proximité ou à l'aide des moyens mobiles de l'IRSN. Des prélèvements nasaux sont recommandés pour analyse du mucus nasal.

Compte tenu de la faible période du fluor-18, il n'y a pas de traitement d'urgence utilisant un antidote à mettre en place.

Évaluation de la dose efficace engagée

Le calcul de la dose efficace engagée s'effectue à partir de l'activité incorporée évaluée sur la base des résultats de la mesure anthroporadiométrique ou de l'analyse radiotoxicologique qui existent ainsi que des données de rétention ou d'excrétion qui sont jugées les mieux adaptées. Dans le cas du fluor-18, étant donné sa courte période, les actions doivent être réalisées très rapidement avec l'aide d'un laboratoire proche et des experts de l'IRSN.

Une fois l'activité incorporée évaluée au mieux, la dose efficace engagée est obtenue en tenant compte du mode d'incorporation (voir partie 3).

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 (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⁽⁹⁾.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail est également prévenu, ainsi que l'IRSN, qui pourra apporter son support au médecin du travail.

Tout incident ou accident intervenant lors d'un transport (notamment en cas de perte ou détérioration du colis) est signalé à l'ASN, au préfet compétent et à l'IRSN.

(9) – Guide n° 11 de l'ASN (ex. DEU/03) relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection hors installations nucléaires de base et transports de matières radioactives.

– Guide ASN relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux INB et au TMR.

Cette fiche a été élaborée par un groupe de travail animé par l'INRS et l'IRSN auquel ont participé des experts de l'AP-HP, CEA, CH de Poissy-St-Germain, CNRS, INSERM et la DGT.

Les experts qui ont plus particulièrement contribué à cette fiche sont :

- Marc Ammerich (CEA),
- Patricia Frot (INSERM),
- Denis-Jean Gambini (AP-HP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St-Germain),
- Thierry Lahaye (DGT),
- Patrick Moureaux (INRS),
- Pascal Pihet (IRSN),
- Alain Rannou (IRSN),
- Éric Vial (IRSN).



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • Tél. 01 40 44 30 00 • www.inrs.fr • info@inrs.fr



Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
31, avenue de la Division-Leclerc 92260 Fontenay-aux-Roses
Tél. 01 58 35 88 88 • www.irsn.fr