# Le Service de protection radiologique des armées et la surveillance de l'exposition externe et interne aux rayonnements ionisants

Y. Lecompte, G. Gagna, F. Entine, X. Michel, A. Cazoulat, H. Hulot, P. Anziani, H. de Carbonnières, J.-C. Amabile

*Service de protection radiologique des armées (SPRA), 1 bis rue du Lieutenant Raoul Batany – 92141 Clamart Cedex.*

**Résumé**

Appui technique en radioprotection médicale de l'exploitant « Défense », le Service de protection radiologique des armées a en charge la surveillance dosimétrique de l'exposition du personnel du ministère exposé aux rayonnements ionisants. Le Laboratoire de dosimétrie et le Laboratoire de contrôle radiotoxicologique assurent cette mission. Ces deux entités sont accréditées par le Comité français d'accréditation et agréées par l'Autorité de sûreté nucléaire. La technologie mise en œuvre par le Laboratoire de dosimétrie pour la surveillance de l'exposition externe aux rayonnements X, gamma et bêta est la luminescence stimulée optiquement. La dosimétrie des rayonnements neutroniques fait appel au principe des détecteurs solide de traces nucléaire (Neutrak®). Pour la surveillance de l'exposition interne, le Laboratoire de contrôle radiotoxicologique met en œuvre une installation d'anthroporadiométrie dont les performances sont conformes aux recommandations internationales. Les analyses de radiotoxicologie sont réalisées grâce à un ensemble de chaînes de mesure permettant d'atteindre les limites de détection préconisées pour l'analyse des radionucléides émetteurs alpha, bêta et gamma dans les urines et les selles. Le Laboratoire de dosimétrie et le Laboratoire de contrôle radiotoxicologique disposent ainsi d'un plateau technique performant permettant une surveillance optimale du personnel du ministère de la Défense, dans le respect des exigences réglementaires.

Mots-clés : Anthroporadiométrie. Dosimétrie externe. Dosimétrie interne. Radiotoxicologie. Rayonnements ionisants.

**Abstract**

**THE FRENCH DEFENCE RADIATION PROTECTION SERVICE AND THE MONITORING OF THEEXTERNAL AND INTERNAL EXPOSURE TO IONIZING RADIATION.**

The French Defence Radiation Protection Service (SPRA) provides technical support for the radiation medical protection for the Ministry of Defence. They are responsible for the dosimetric monitoring of the personnel exposed to ionizing radiation. The Dosimetry Laboratory (LDOS) and the Radiotoxicological Control Laboratory (LCR) are both in charge of this mission. These two services are accredited by the French Accreditation Committee and approved by the Nuclear Safety Authority. Optically Stimulated Luminescence (OSL) is the technology implemented by the LDOS for the external monitoring of exposure to X, gamma and beta radiations. Dosimeters based on the principle of solid state nuclear track detectors (Neutrak®) are used to monitor exposure to neutron radiation. A high resolution whole-body counter, whose performances are consistent with international recommendations, is implemented by the LCR to monitor internal exposure. They also use radiochemistry methods and spectrometric measurement techniques able to achieve the suitable detection limits for the radiotoxicological analysis of alpha, beta and gamma transmitters, in urine and faeces samples. The LDOS and the LCR thus have efficient technical means to monitor proficiently the exposure to ionizing radiation of the Ministry of Defence personnel, in compliance with regulatory requirements.

Keywords : External dosimetry. Internal dosimetry. Ionizing radiation. Radiotoxicology. Whole body counting.

## Introduction

Appui technique en radioprotection médicale de l'exploitant « Défense », le Service de protection radiologique des armées (SPRA) apporte son soutien dans l'ensemble des domaines de cette discipline aux organismes du ministère mettant en œuvre des sources de rayonnements ionisants. Il a ainsi en charge la surveillance dosimétrique de l'exposition du personnel du ministère de la Défense exposé à ces rayonnements (1).

Y. LECOMPTE, pharmacien principal, praticien confirmé. G. GAGNA, médecin en chef, praticien confirmé. F. ENTINE, médecin principal, praticien confirmé. X. MICHEL, médecin en chef, praticien certifié. A. CAZOULAT, pharmacien en chef, praticien certifié responsable de spécialité. H. HULOT, ingénieur d'études et de fabrication. P. ANZIANI, médecin en chef, praticien confirmé. H. de CARBONNIÈRES, médecin chef des services hors classe, praticien certifié. J.-C. AMABILE, médecin en chef, professeur agrégé du Val-de-Grâce.

**Correspondance :** Pharmacien principal Y. LECOMPTE, Service de protection radiologique des armées (SPRA), 1 bis rue du Lieutenant Raoul Batany – 92141 Clamart Cedex.

E-mail : spra.dt@wanadoo.fr

Cette surveillance prend en compte aussi bien le risque d'exposition externe (irradiation) et interne (contamination interne), que celui lié à l'environnement immédiat du poste de travail. Elle est assurée par les laboratoires de la Division dosimétrie : respectivement le Laboratoire de dosimétrie (LDOS) pour la dosimétrie externe et le Laboratoire de contrôle radiotoxicologique (LCR) pour la dosimétrie interne et la surveillance de l'environnement du poste de travail (2). Après une présentation du cadre réglementaire et des principes généraux qui régissent la surveillance dosimétrique, les moyens mis en œuvre par ces deux laboratoires pour assurer la surveillance de l'exposition externe et interne du personnel du ministère de la Défense seront présentés.

## Cadre réglementaire et principes généraux de la surveillance dosimétrique

Afin d'éviter l'apparition des effets déterministes et de réduire à un niveau acceptable les risques d'apparition d'effets stochastiques, la radioprotection repose sur trois grands principes inscrits dans la réglementation française : la justification des activités exposant aux rayonnements ionisants, l'optimisation de ces expositions et la limitation des expositions individuelles (3). En application de ce dernier principe, le Code de la santé publique et le Code du travail fixent, respectivement, les limites réglementaires de doses individuelles admissibles pour le public et les travailleurs (tab. I) (3, 4). Ces limites s'appliquent à la somme des doses résultant, pendant une même période, de l'exposition externe et de l'exposition interne. Elles sont définies selon deux grandeurs de radioprotection : la dose équivalente à l'organe ou au tissu et la dose efficace pour l'organisme entier. Ces grandeurs, exprimées en Sievert (Sv), prennent en compte la nature (alpha, bêta, gamma ou neutrons) et l'énergie du rayonnement ainsi que la radiosensibilité des tissus.

**Tableau I. Valeurs limites d'exposition aux rayonnements ionisants pour le public et les travailleurs.**

| **DOSE** en milliSieverts (mSv) sur douze mois consécutifs ou un an | **Travailleur de catégorie A** | **Travailleur de catégorie B** | **Public** |
|---|---|---|---|
| **Organisme entier** (dose efficace) | 20 | 6 | 1 |
| **Peau** (dose équivalente pour 1 $cm^2$) | 500 | 150 | 50 |
| **Cristallin** (dose équivalente) | 150 | 45 | 15 |
| **Extrémités** (dose équivalente) | 500 | 150 | / |

L'évaluation des doses susceptibles d'être délivrées au personnel lors d'expositions externes ou internes aux rayonnements ionisants est effectuée au cours de l'étude de poste par le médecin en charge de la surveillance Médico-radiobiologique (MRB) en collaboration avec la personne compétente en radioprotection (PCR). Les doses liées à l'exposition externe sont évaluées sur la base des caractéristiques des champs de rayonnements au poste de travail (nature, débit, énergie), ainsi que de la durée d'exposition et des tâches qui y sont réalisées. L'étude de poste doit également identifier, le cas échéant, le risque d'exposition interne (radionucléides en cause, modalités d'exposition). Après avis du médecin en charge de la surveillance MRB, le chef d'établissement classe le personnel en catégorie A ou B en fonction des doses susceptibles d'être reçues dans les différents postes de travail. Un suivi dosimétrique du personnel, adapté au risque d'exposition, est alors mis en place sous la responsabilité du chef d'organisme. Une Fiche d'exposition et d'aptitude des personnels exposés aux rayonnements ionisants (FEAPERI), qui tient lieu au sein du ministère de la Défense de fiche d'exposition et de fiche médicale d'aptitude, est renseignée pour chaque personnel de catégorie A et B. Cette dernière regroupe les conclusions des résultats des examens complémentaires nécessaires à la surveillance MRB (anthroporadiométrie, radiotoxicologie, hématologie, etc.) (5).

Dans le cas d'une exposition externe, le suivi dosimétrique individuel est assuré par des dosimètres passifs portés à hauteur de la poitrine. Une dosimétrie opérationnelle (dosimètres électroniques permettant d'intégrer et de lire les doses reçues en temps réel et comportant des seuils d'alarme) y est adjointe dans certaines conditions d'exposition (en zone contrôlée par exemple). Dans le cas d'exposition externe partielle (extrémités, cristallin…) des dosimètres passifs complémentaires (bagues, poignets) doivent être portés par les travailleurs exposés. Les dosimètres passifs, fournis par le SPRA, sont renvoyés après la fin de la période de port par la PCR de l'établissement au LDOS (laboratoire agréé pour ce qui concerne les établissements du ministère de la Défense) pour y être analysés. Cette analyse est mensuelle pour les travailleurs de catégorie A et trimestrielle pour les travailleurs de catégorie B. En cas de suspicion d'exposition anormale, d'incident ou d'accident radiologique, une analyse en urgence peut être réalisée (résultats sous 48 heures) (6). Pour les équipages des bâtiments à propulsion nucléaire (BPN) en situation opérationnelle, le respect des périodicités réglementaires d'envoi des dosimètres passifs au LDOS peut s'avérer impossible. Dans ce cas, chaque personnel, de catégorie A ou B, porte le même dosimètre depuis le départ en mission jusqu'à la première opportunité d'envoi (5). À l'inverse, pour les militaires engagés sur les théâtres d'opérations extérieures (OPEX), qu'ils soient de catégorie A ou B, une périodicité mensuelle est appliquée en raison des conditions particulières de travail et de relève. L'ensemble des résultats de la dosimétrie externe

est transmis par le LDOS au médecin chargé de la surveillance MRB du personnel de l'établissement concerné. Ce médecin, le chef d'établissement et la PCR sont immédiatement informés dès lorsqu'un résultat individuel de dosimétrie externe entraîne un cumul annuel glissant dépassant l'une des valeurs limites d'exposition (tab. I). En outre, lorsqu'un résultat de dosimétrie externe présente une dose inhabituelle au regard des expositions habituellement observées, une enquête est demandée par le Bureau de radioprotection médicale du SPRA. Elle doit être initiée par le médecin en charge de la surveillance MRB, en liaison avec la PCR (étude des conditions d'exposition du personnel, des conditions de port du dosimètre ou des conditions d'acheminement et de traitement du dosimètre) et doit permettre au médecin de conclure à l'attribution ou non de la dose lue (5).

Dans le cas d'un risque d'exposition interne, le suivi dosimétrique repose sur des mesures directes (anthroporadiométrie) ou des analyses indirectes (analyses radiotoxicologiques des urines ou des selles) prescrites par le médecin chargé de la surveillance MRB dont relève le personnel. La périodicité des examens est définie à partir de l'analyse du risque d'exposition interne au poste de travail (nature et modalités d'exposition, biocinétique des radionucléides en cause). En routine (surveillance systématique), la fréquence de ces examens est au minimum annuelle. Si le risque d'exposition est ponctuel ou très limité dans le temps, le protocole de surveillance peut être adapté en conséquence (surveillance particulière ou de chantier). En cas d'incident d'exposition interne (surveillance spéciale), des examens doivent être réalisés et des prélèvements débutés au plus tôt et poursuivis, en première intention, jusqu'au troisième jour suivant l'incident. Le LCR réalise l'ensemble des analyses de radiotoxicologie prescrites au profit du personnel de la Défense et dispose d'une installation d'anthroporadiométrie de référence. Trois autres installations d'anthroporadiométrie sont également mises en œuvre au sein de l'Escadrille des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (ESNLE) à Brest, de l'Escadrille des sous-marins nucléaires d'attaque (ESNA) à Toulon ainsi qu'à bord du porte-avions à propulsion nucléaire « Charles-de-Gaulle ». Les résultats des examens d'anthroporadiométrie et de radiotoxicologie sont adressés au médecin prescripteur qui a, le cas échéant, la responsabilité du calcul de la dose efficace engagée (7).

Conformément à la réglementation, les résultats de dosimétrie passive (exprimés en Sv) ainsi que les résultats des examens d'anthroporadiamétrie et de radiotoxicologie (activités exprimées, selon le cas, en Bq, Bq par litre ou Bq par échantillon) sont transmis par les laboratoires au Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (SISERI). Dans le cas de résultats d'anthroporadiométrie et de radiotoxicologie ayant donné lieu à un calcul de la dose efficace engagée, celle-ci est transmise parallèlement par le médecin ayant effectué le calcul. Le fichier national SISERI assure ainsi la centralisation et la conservation de l'ensemble des résultats des mesures individuelles de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants et les met à disposition, via un accès internet, des médecins du travail et des PCR (sous certaines conditions). La qualité et l'accessibilité de ces données par l'ensemble des acteurs de la radioprotection viennent par ailleurs d'être renforcées par l'entrée en vigueur au 1er juillet 2014 de l'arrêté du 17 juillet 2013, relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, qui confie à l'employeur (les chefs d'établissement pour le ministère de la Défense) la responsabilité de la transmission à SISERI des informations concernant chaque personnel, avant la mise en place d'un moyen de surveillance dosimétrique adapté (dosimètres ou mesures de l'exposition interne) (8).

Le LDOS et le LCR exercent chacun leur activité sous couvert d'un agrément délivré par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (6). Ces agréments sont obtenus après une accréditation délivrée par le Comité français d'accréditation (COFRAC) selon les normes NF EN ISO/CEI 17 025 (9) (pour ce qui concerne la dosimétrie externe et l'anthroporadiométrie) et NF EN ISO 15 189 (10) (pour la radiotoxicologie) et la participation à des intercomparaisons organisées par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) conformément aux prescriptions de l'arrêté du 21 juin 2013 (6). Au-delà de ces obligations réglementaires et afin de garantir la qualité des résultats, les laboratoires du SPRA participent également à des intercomparaisons internationales telles que celles organisées par l'Agence internationale à l'énergie atomique (AIEA), l'*European Radiation Dosimetry Group* (EURADOS) ou encore par l'association pour la promotion du contrôle de qualité des analyses de biologie médicale en radiotoxicologie (PROCORAD).

## Surveillance de l'exposition externe : le LDOS

La nature et les sources des rayonnements ionisants susceptibles d'être à l'origine d'une exposition externe des personnels sont très diverses au sein du ministère de la Défense. Les moyens de surveillance de l'exposition externe mis en œuvre par le LDOS doivent permettre la mesure d'une large gamme de rayonnements électromagnétiques (X et gamma) et/ou bêta susceptibles d'être produits par des tubes à rayons X, des sources radioactives, des accélérateurs de particules, etc., pour ce qui concerne le domaine médical (11-14) mais aussi la recherche, la construction navale et aéronautique, le déminage, la détection radar (15), les réacteurs des BPN (16) ou encore le rayonnement cosmique pour les équipages des aéronefs (17). La surveillance de l'exposition aux rayonnements neutroniques issus des réacteurs des BPN et des armes nucléaires doit également être mesurée sur une large plage d'énergie (16). Le LDOS répond ainsi à l'ensemble des besoins de surveillance de l'exposition externe du personnel de la Défense en assurant la fourniture et l'analyse de dosimètres « poitrine » et « poignet » pour la mesure des rayonnements X, gamma et bêta (soit le traitement d'environ 53 000 dosimètres par an) et de dosimètres « poitrine » pour la mesure des neutrons

thermiques, épithermiques et rapides (16 500 dosimètres par an environ). Il met également à disposition des Hôpitaux d'Instruction des Armées, lorsque l'étude de poste le justifie, des dosimètres « bague » pour la mesure des rayonnements X, gamma et bêta au niveau des doigts. La mise en place de la surveillance dosimétrique est initiée par l'envoi au laboratoire, par la PCR de l'établissement concerné, d'une Demande de surveillance dosimétrique systématique (DSDS) pour chacun des personnels suivis. Le formulaire de DSDS est disponible sur le site Intrasan du SPRA (http://www.spra.sante.defense.gouv.fr/dosi.php).

## Dosimétrie des rayonnements X, gamma et bêta

La technologie mise en œuvre par le LDOS pour la dosimétrie des rayonnements X, gamma et bêta est la luminescence stimulée optiquement (Optically Stimulated Luminescence ou OSL – Landauer Europe®, Fontenay-aux-Roses, France). La technologie OSL repose sur le principe de la mesure de l'intensité d'une émission de lumière. Le dosimètre OSL comporte quatre détecteurs de 5 mm de diamètre et de 0,3 mm d'épaisseur, constitués d'oxyde d'aluminium $Al_2O_3$ dopé au carbone. Quatre filtres (cuivre, aluminium, plastique, absence d'écran) permettent de discriminer et de mesurer spécifiquement les rayonnements X, gamma en fonction de leur gamme d'énergie ainsi que les rayonnements bêta (fig. 1). Lors d'une interaction avec un rayonnement ionisant, des charges se retrouvent piégées dans le matériau sensible des détecteurs. Durant l'analyse, les détecteurs sont stimulés par des diodes électroluminescentes (LED). Du fait de cette excitation lumineuse, les électrons piégés sont libérés en générant un phénomène de luminescence dont l'intensité est proportionnelle à la dose de rayonnement reçue par le dosimètre (18). Contrairement à d'autres techniques, la stimulation optique est non destructive et autorise une éventuelle relecture. Les dosimètres OSL détectent les rayonnements électromagnétiques (X et gamma) d'énergie comprise entre 5 keV et 40 MeV et les rayonnements bêta de 150 keV à 10 MeV. Le domaine de mesure s'étend de 0,1 mSv à 10 Sv (18). Le LDOS détient

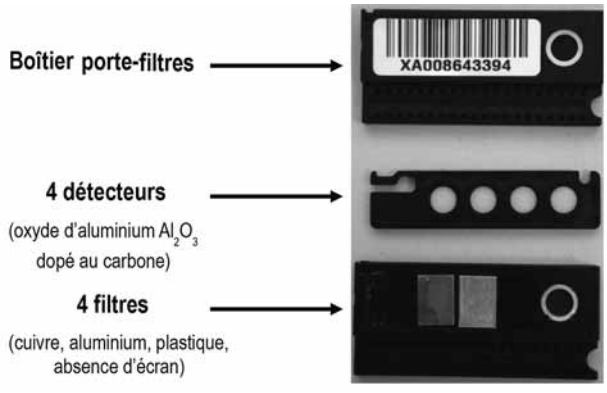



**Figure 1. Éléments constitutifs du dosimètre OSL (Landauer Europe®) employé au sein du ministère de la Défense.**

un lecteur manuel et un lecteur automatique de dosimètres OSL, ainsi qu'un appareil pour la remise à zéro des dosimètres (*annealer*). Un lecteur de dosimètres OSL portable est également destiné à être projeté sur le terrain avec les moyens d'intervention du SPRA.

## Dosimétrie de neutrons

Depuis juillet 2013, le LDOS a déployé, au sein du ministère de la Défense, le dosimètre Neutrak 144-T® (Landauer Europe®, Fontenay-aux-Roses, France) en remplacement du dosimètre NP3®. Ce dosimètre couvre une large plage d'énergie et permet la détection des neutrons thermiques, des neutrons épithermiques et des neutrons rapides. La technologie Neutrak® repose sur l'utilisation d'un détecteur solide de traces nucléaires (DSTN) constitué d'un polymère massif de Polycarbonate d'allyle diglycol (PADC ou CR39). Le dosimètre Neutrak 144-T® se décompose en deux parties. La première est équipée d'un radiateur en polyéthylène qui permet la mesure des neutrons épithermiques et rapides : l'interaction des neutrons avec les noyaux d'hydrogène du polyéthylène provoque l'émission de protons de recul qui créent des traces latentes au sein du CR39 (fig. 2). La seconde, destinée à la mesure des neutrons thermiques, contient un radiateur en Teflon® chargé au bore : l'interaction des neutrons thermiques avec le bore entraîne l'émission de particules alpha qui produisent des traces dans le CR39. Après révélation des traces latentes produites dans le CR39 par trempage dans un bain de soude concentrée (15 heures à 74 °C), la discrimination et le comptage, à l'aide d'une caméra reliée à un microscope optique, des traces sur une surface déterminée permet de déduire l'équivalent de dose reçu par le dosimètre (19). Le dosimètre Neutrak® est insensible aux rayonnements X, gamma et bêta. De taille réduite, il

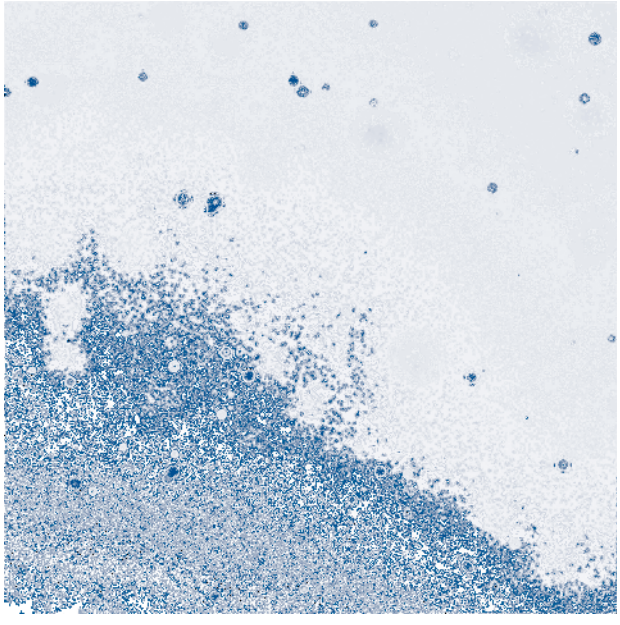


**Figure 2a. Traces latentes produites dans le polymère CR39 par une irradiation par des neutrons épithermiques et rapides (sous radiateur en polyéthylène).**

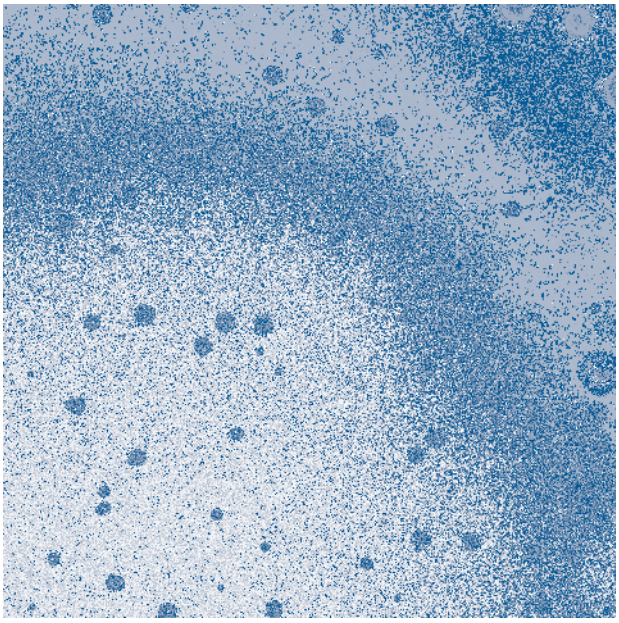


**Figure 2b. Traces latentes produites dans le polymère CR39 par une irradiation par des neutrons thermiques (sous radiateur en Teflon® chargé au bore).**

s'insère dans le même boîtier que le dosimètre OSL (figure 3). Les dosimètres Neutrak 144-T® mesurent les neutrons épithermiques et rapides d'énergie comprise entre 40 keV et 14 MeV et les neutrons thermiques d'énergie inférieure à 0,5 eV. Le domaine de mesure validé s'étend de 0,1 mSv à 20 mSv (19).

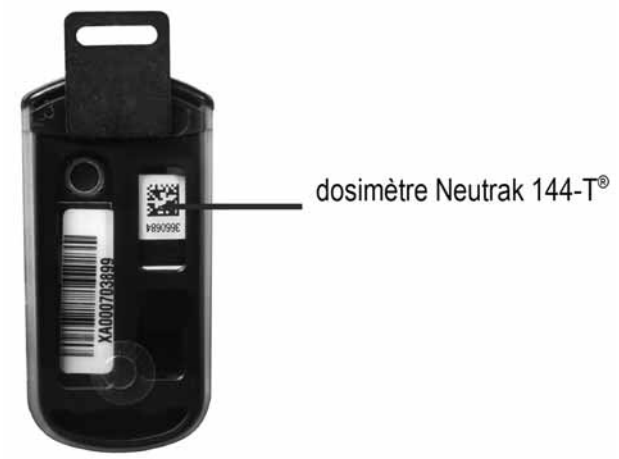



**Figure 3. Vue arrière d'un boîtier contenant un dosimètre OSL et équipé d'un dosimètre Neutrak 144-T® (de couleur jaune).**

## Surveillance de l'exposition interne : le LCR

À l'image du risque d'exposition externe, le risque de contamination interne par des radionucléides peut avoir, au sein du ministère de la Défense, des origines très diverses. Il concerne les radionucléides contenus dans les réacteurs des BPN : combustible (uranium) et produits de fission (césium 137, iode 131, strontium 90 par exemple) ou d'activation (cobalt 60) ; les radionucléides entrant dans la composition de l'arme nucléaire (plutonium 239, américium 241, tritium) et également les radionucléides employés dans l'industrie de l'armement pour leurs propriétés mécaniques (uranium appauvri (20), thorium (21)) ou encore pour la constitution de peinture luminescente (tritium, radium 226) ou de système de détection. Cette diversité impose au LCR de disposer des techniques radiochimiques et des moyens de détection spécifiques pour être en mesure d'analyser l'ensemble de ces radionucléides dans les matrices biologiques.

### *Spécificités de la surveillance de l'exposition interne*

Une contamination interne résulte de l'incorporation de radionucléides par inhalation, par ingestion, par l'intermédiaire d'une lésion cutanée (blessure ou brûlure), par voie oculaire ou, pour certains radionucléides (le tritium sous forme vapeur par exemple), par pénétration transcutanée. Selon leurs propriétés physicochimiques, les radionucléides sont transférés depuis ces portes d'entrée vers le compartiment sanguin. Ils sont distribués par l'intermédiaire de la circulation sanguine et du système lymphatique pour se répartir de façon homogène dans l'ensemble de l'organisme (cas du tritium) ou pour se concentrer dans un ou plusieurs organes au niveau desquels leur toxicité radiologique voire chimique va se manifester (la thyroïde pour l'iode, le tissu osseux pour les alcalino-terreux, le foie, le rein et le tissu osseux pour les actinides par exemple). Parallèlement à sa décroissance radioactive, chaque radionucléide est éliminé, suivant le métabolisme de l'isotope stable correspondant ou de l'élément présentant des propriétés chimiques identiques, essentiellement par voie urinaire et fécale (fig. 4).

Selon les conditions d'exposition au poste de travail et les caractéristiques physicochimiques et biocinétiques des radionucléides en cause, la surveillance de l'exposition interne repose sur la prescription médicale d'examens d'anthroporadiométrie et/ou d'analyses radiotoxicologiques (des urines et/ou des selles). Ces analyses sont également utiles dans le suivi de l'efficacité des traitements mis en place en cas de contamination interne avérée. Les formulaires de prescription de ces examens et les modalités de prélèvements sont accessibles sur le site Intrasan du SPRA (http ://www.spra.sante.defense.gouv.fr/lcr.php). L'anthroporadiométrie permet d'identifier et de quantifier *in vivo* les radionucléides présents dans l'ensemble de l'organisme (mesure corps entier) ou dans un organe cible spécifique de la distribution du radionucléide (poumons ou thyroïde par exemple). Le résultat est exprimé en activité (Bq) et se rapporte à la date de mesure. Rapide et sensible, cet examen ne détecte cependant que les radionucléides émetteurs gamma d'intensité et d'énergie suffisamment élevées (généralement > 100 keV) et n'est pas adapté aux émetteurs alpha ou bêta purs pour lesquels seules les analyses radiotoxicologiques dites « *in vitro* » sont pertinentes. Les analyses radiotoxicologiques des urines permettent d'identifier et de déterminer l'activité des

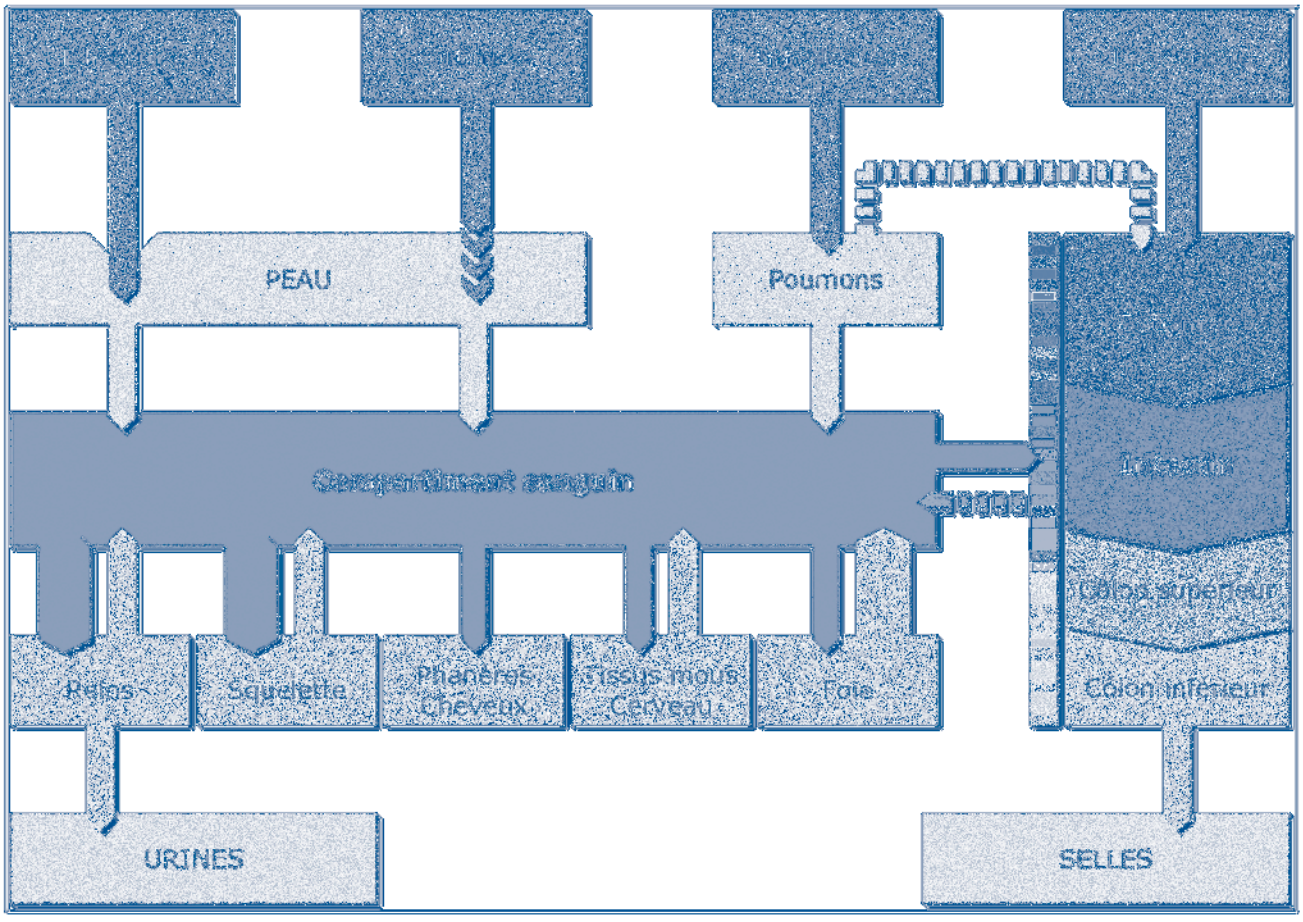



**Figure 4. Voies de contamination interne et devenir des radionucléides dans l'organisme : exemple de l'uranium, d'après Cazoulat et al. (20).**

émetteurs alpha, bêta ou gamma (22). Afin de déterminer l'activité totale excrétée dans les urines par unité de temps et compte tenu des volumes de prise d'essai nécessaires à l'obtention des limites de détection (LD) recommandées par la publication 78 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR 78 : « Surveillance individuelle de l'exposition interne des travailleurs »), les analyses sont réalisées sur des prélèvements d'urine de 24 heures (23). Le résultat en activité se rapporte à la date de fin de prélèvement et est exprimé en Bq par échantillon ou en Bq par litre. L'analyse radiotoxicologique des selles est quant à elle plus particulièrement adaptée à la détection des composés insolubles émetteurs alpha (oxydes d'uranium et de plutonium par exemple) dans le cas d'une contamination par ingestion ou encore par inhalation. En effet, dans ce dernier cas, les particules insolubles inhalées (notamment si leur diamètre est supérieur à 10 µm) sont transférées sous l'effet du mécanisme d'épuration mucociliaire, via le carrefour aéro-digestif, vers le tube digestif et excrété dans les selles. Le prélèvement des selles de 24 heures doit être réalisé immédiatement après l'exposition et répété sur trois jours consécutifs, compte tenu de la variabilité de l'excrétion fécale (24). La mise en place d'un traitement décorporant dans le cas d'un incident de contamination (administration de DTPA – acide diéthylene-triamine-penta-acétique – en cas de contamination par le plutonium ou l'américium par exemple) peut conditionner la technique à utiliser par le laboratoire et doit être spécifiée sur la prescription d'analyse (25). Le résultat en activité se rapporte à la date de fin de prélèvement et est exprimé en Bq par échantillon.

En cas de contamination interne avérée (mise en évidence d'un radionucléide à une activité supérieure à la LD de la technique d'analyse mise en œuvre), le calcul de la dose délivrée par le radionucléide à l'organisme entier (dose efficace, exprimée en Sievert, Sv) va permettre d'en évaluer les conséquences sanitaires (24). Réglementairement, ce calcul est réalisé sur une période de 50 ans après l'exposition (dose efficace engagée : $E_{50}$) (7). À partir d'un résultat de mesure anthropo-radiométrique ou d'analyse radiotoxicologique, la détermination de l'activité incorporée puis de la dose efficace engagée associée repose sur l'application de modèles biocinétiques et dosimétriques complexes (24, 26). Ces modèles, spécifiques de chaque radionucléide, prennent en compte l'ensemble des paramètres du scénario d'exposition : date, modalités d'incorporation (voie et caractère aigu ou chronique de la contamination), caractéristiques physicochimiques du radionucléide

en cause (granulométrie, solubilité). Les calculs peuvent être estimés à partir des fonctions de rétention ou d'excrétion en fonction du temps fourni par les annexes de la CIPR 78 (23) et des coefficients de dose efficace engagée par unité d'incorporation h(g) (également nommés DPUI) définis dans les annexes de l'arrêté du 1er septembre 2003 (7). Des logiciels spécialisés peuvent inclure un plus grand nombre de paramètres et affiner les calculs de dose (par exemple : MONDAL® Ver.3.01, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japon).

## *Moyens analytiques du laboratoire de contrôle radiotoxicologique*

### Anthroporadiométrie

L'anthroporadiométrie consiste à identifier et mesurer l'activité des radionucléides émetteurs X et gamma incorporés en détectant leurs rayonnements *in vivo*. Il s'agit d'une technique spectrométrique. De par les propriétés électromagnétiques des rayonnements X et gamma (faible atténuation par la matière), ces radionucléides peuvent directement être détectés à l'extérieur de l'organisme. Les détecteurs de référence employés pour la mesure de ces rayonnements sont les détecteurs à semi-conducteurs au germanium hyper pur (GeHP). Le principe de ces détecteurs repose sur l'augmentation temporaire de la conductivité des semi-conducteurs résultant de leur interaction avec les rayonnements X et gamma. Les spectres obtenus couvrent une large gamme d'énergies (15 à 2000 keV) et présentent une excellente résolution (largeur des pics à mi-hauteur inférieure à 4 keV selon la gamme d'énergies mesurée) ce qui permet l'indentification et la mesure de l'activité de plusieurs radionucléides simultanément. Afin de réduire le bruit de fond thermique, les semi-conducteurs GeHP doivent être refroidis en permanence (azote liquide ou système cryoélectrique) lors de leur utilisation (27). L'installation d'anthroporadiométrie du LCR (fig. 5) est équipée de deux détecteurs GeHP (type p) d'une surface de 80 mm et d'une épaisseur de 31 mm (modèle BE5030P, Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France) refroidis par système cryoélectrique. Installés sur des bras articulés, la position des détecteurs est adaptée en fonction de la mesure souhaitée : corps entier (activité systémique, du tractus gastrointestinal et des voies respiratoires) ou organes cibles (poumons pour l'analyse des isotopes radioactifs du cobalt ou thyroïde pour ceux de l'iode par exemple). Pour s'affranchir du bruit de fond cosmique et tellurique, les détecteurs sont installés au sein d'une enceinte blindée (constituée d'une épaisseur de 10 cm d'acier et de 8 mm de plomb bas bruit de fond, recouverte de 1 mm d'acier inoxydable) dans laquelle l'examen est réalisé. L'étalonnage en énergie et en efficacité de ce type d'installation est réalisé à l'aide de fantômes anthropomorphes de référence dans lesquels des sources de radionucléides sont disposées (fantôme de Schmier, "Igor" et "Bomab" par exemple). L'examen est effectué en position allongée. Le temps d'acquisition du spectre est de 30 minutes. L'analyse et la déconvolution du spectre, à l'aide d'un logiciel de la suite GENIE 2000® (Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France), permet l'identification des radionucléides en fonction de l'énergie de leurs raies d'émission X et/ou gamma caractéristiques et d'en déterminer l'activité par l'intégration de la surface de ces raies. L'installation du LCR atteint les LD préconisées par les recommandations internationales (23, 28) (tab. II) et répond aux exigences de la norme NF S92-501 pour les mesures anthropo-radiométriques « Corps entier » des émissions gamma d'énergie supérieure à 100 keV (29).



**Figure 5. Installation d'anthroporadiométrie du LCR.**

**Tableau II. Limites de détection (LD)* obtenues pour la mesure d'un patient en géométrie « corps entier » avec l'installation d'anthroporadiométrie du LCR (détecteurs germanium hyperpur, enceinte blindée).**

| Radionucléide | LD *a posteriori* (Bq) | Limite de détection recommandée (Bq) (1) |
|---|---|---|
| $^{60}$Co | 23 | 50 |
| $^{134}$Cs | 28 | 50 |
| $^{137}$Cs | 38 | 50 |
| $^{214}$Bi | 171 | 200 |
| $^{214}$Pb | 160 | 200 |
| $^{226}$Ra | 849 | 1000 |

* Limites de détection recommandées par la publication 78 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR 78).

DOSSIER

## Analyse des radionucléides émetteurs gamma dans les urines

Selon les radionucléides en cause, les modalités d'exposition ou encore le délai écoulé depuis une éventuelle contamination, l'analyse des radionucléides émetteurs gamma dans les urines par spectrométrie gamma peut compléter voire s'avérer plus sensible que l'anthroporadiométrie (23). Pour une matrice liquide telle que l'urine, la faible atténuation des rayonnements gamma par la matière permet l'analyse des radionucléides émetteurs gamma sans traitement chimique préalable de l'échantillon. Après homogénéisation du prélèvement, la prise d'essai (500 mL) est introduite pour la mesure dans un conditionnement en polyéthylène à usage unique de géométrie standardisée (26, 27). L'analyse s'effectue à l'aide d'un détecteur à semi-conducteur au GeHP dans une enceinte blindée. Le LCR dispose de deux chaînes de mesure de spectrométrie gamma chacune dotées d'un passeur d'échantillons. La première est un modèle ATEA équipé d'un détecteur coaxial GeHP (cristal de type n d'un diamètre de 58 mm et de 63 mm d'épaisseur : modèle GR4018, Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France) refroidi par système cryoélectrique et placé dans une enceinte de 15 cm de plomb recouverte d'un chemisage intérieur de 3 mm de cadmium et de 3 mm de cuivre. La seconde est un modèle SAGA équipé d'un détecteur coaxial GeHP (cristal de type n d'un diamètre de 54,5 mm et de 50 mm d'épaisseur : modèle GR3018, Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France) refroidi par azote liquide et placé dans une enceinte de 7 cm de plomb recouverte de 2 mm de cuivre. Le tableau III ci-après donne des LD couramment obtenues par le laboratoire pour l'analyse de quelques émetteurs gamma dans l'urine.

## Analyse des radionucléides émetteurs bêta dans les urines

De nombreux radionucléides émetteurs bêta sont aussi émetteurs gamma et peuvent être analysés par spectrométrie gamma avec des LD satisfaisantes. C'est le cas par exemple du $^{137}$Cs et $^{60}$Co (30). En revanche, pour les radionucléides émetteurs bêta purs, la technique de référence en radiotoxicologie est la scintillation liquide. Dans cette technique, l'échantillon est directement mélangé avec un liquide scintillant dans un flacon en polyéthylène ou en verre. Les liquides scintillants sont composés d'un solvant aromatique (toluène, cumène ou xylène par exemple) et de deux solutés scintillants : un soluté primaire (2,5 diphényloxazole – PPO par exemple) et un soluté secondaire (2,2' p-phénylène-bis-5-phényloxazole – POPOP par exemple). L'énergie cinétique des particules bêta émises par le radionucléide est transférée aux molécules de solvant et entraîne leur excitation. L'énergie d'excitation du solvant est transmise aux molécules de soluté primaire puis aux molécules de soluté secondaire. En se désexcitant, les molécules de soluté secondaire restituent leur énergie d'excitation sous forme de photons lumineux détectés par deux ou trois photomultiplicateurs en coïncidence (27, 31). Le LCR exploite deux appareils de scintillation liquide double coïncidence PACKARD Tri-carb® 2560 TR/XL et WALLAC GUARDIAN® (Perkin Elmer®, Villebon-sur-Yvette, France) ainsi qu'un appareil à triple coïncidence HIDEX® 300 SL (ScienceTec®, Villebon-sur-Yvette, France). Du fait de la distribution continue de l'énergie des particules bêta émises, la discrimination et l'identification spectro-métrique d'un mélange de plusieurs radionucléides émetteurs bêta sont peu aisées. L'extraction spécifique du radionucléide d'intérêt de la matrice est donc indispensable (30). Afin d'éliminer les

**Tableau III. Limites de détection (LD) obtenues par le LCR pour l'analyse radiotoxicologique urinaire de radionucléides d'intérêt dans le cadre de la surveillance de l'exposition interne du personnel du ministère de la Défense.**

| Radionucléide | Émissions | Technique de mesure | Temps de comptage | Prise d'essai (mL) | Limite de détection (Bq/L) | Limite de détection recommandée (Bq/L) (1) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{60}$Co | bêta, gamma | spectrométrie gamma | 3 à 5 h | 500 | $8.10^{-1}$ | 1 |
| $^{137}$Cs | bêta, gamma | | | | $9.10^{-1}$ | 1 |
| $^{3}$H | bêta | scintillation liquide (passage sur charbon actif préalable) | 100 min. | 8 | $1,7.10^{1}$ | $1,0.10^{2}$ |
| $^{90}$Sr | bêta | scintillation liquide (précipitation, minéralisation, extraction spécifique) | 30 min. | 250 | $3.10^{-1}$ | 1 |
| $^{241}$Am | alpha | spectrométrie alpha (précipitations, minéralisation, extraction spécifique) | 45 h | 500 | $1.10^{-3}$ | $1.10^{-3}$ |
| $^{239+240}$Pu (2) | alpha | | | | $1.10^{-3}$ | $1.10^{-3}$ |
| $^{234}$U | alpha | | | | $6,7.10^{-3}$ | $1.10^{-2}$ |
| $^{235}$U | alpha | | | | $1,2.10^{-2}$ | |
| $^{238}$U | alpha | | | | $1,4.10^{-2}$ | |
| $^{232}$Th | alpha | | | | $1.10^{-2}$ | $1.10^{-2}$ |

* Détermination $^{239+240}$Pu impossible en spectrométrie alpha, compte tenu de leurs énergies respectives : 5 155,8 et 5 168,3 KeV.

interactions spectrométriques avec son descendant l'yttrium 90, lui-même émetteur bêta (énergie maximale $E_{max}$ = 2 284 keV), l'analyse du strontium 90 ($E_{max}$ = 546,2 keV) dans l'urine nécessite une séparation spécifique par extraction solide-liquide à l'aide d'une phase stationnaire de type éther-couronne : le 4,4'(5')-di-t-butylcyclohexano-18-crown-6 (Résine SR®, TrisKem international, Bruz, France). Par ailleurs, certains constituants de la matrice peuvent interférer avec les phénomènes de scintillations selon deux mécanismes d'affaiblissement lumineux (ou « quenching ») : absorption de l'énergie de la particule bêta ou de l'énergie d'excitation des molécules scintillantes par des composés non scintillants de la matrice (« quenching chimique ») d'une part, ou absorption ou diffusion par des composés colorés présents dans la matrice (« quenching couleur ») d'autre part (27). Le dosage du tritium urinaire, émetteur bêta pur de faible énergie ($E_{max}$ = 18,62 keV), requiert un traitement préalable de l'échantillon par du charbon actif pour s'affranchir notamment du quenching couleur. Cette technique employée par le LCR permet d'atteindre pour ce radionucléide une LD plus basse que celle recommandée par la CIPR 78 (23) et de mettre en évidence des expositions à de faibles niveaux d'activité (tab. III). Hormis ces méthodes spécifiques, le LCR met aussi en œuvre une technique de dépistage urinaire non spécifique d'une contamination par les émetteurs bêta. Celle-ci repose sur la précipitation des alcalino-terreux par les oxalates, un dépôt en couche mince sur coupelle et mesure par comptage bêta global d'une heure sur compteur proportionnel (type multidétecteur IN20, Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France). Cet indice « bêta total urinaire » permet de détecter la présence d'émetteurs bêta dans les urines d'énergie $E_{max}$ supérieure à 150 keV. L'interprétation de ce paramètre doit tenir compte de la présence du potassium 40, isotope naturel émetteur bêta ($E_{max}$ = 1 311,6 keV).

### Analyse des radionucléides émetteurs alpha dans les urines et les selles

Même si certains émetteurs alpha présentent des émissions gamma, celles-ci sont d'énergie et d'intensité trop faibles pour être mesurées par spectrométrie gamma avec une sensibilité suffisante. La spectrométrie alpha à l'aide de semi-conducteurs au silicium passivés, constitue la technique radiométrique de référence pour l'identification et la détermination de l'activité des émetteurs alpha dans les urines et dans les selles (27, 30, 32). Le LCR dispose de 11 chambres de mesure équipées de semi-conducteurs PIPS (Passivated Implanted Planar Silicium) d'une surface de 900 $mm^2$ (Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France). Compte tenu du faible parcours des particules alpha dans la matière, la distance entre le détecteur et la source mesurée doit être minimale et la chambre de mesure placée sous vide d'air ($2.10^{-1}$ mBar). D'autre part, les radionucléides doivent être séparés de la matrice et concentrés de manière à obtenir une source de très faible épaisseur afin de limiter les phénomènes d'auto-absorption des rayonnements alpha. En plus de réduire l'efficacité de comptage et la sensibilité de la mesure, ces derniers affectent la résolution en énergie du spectre généralement comprise entre 20 et 30 keV. Cette résolution s'avère insuffisante pour discriminer et quantifier chaque radionucléide d'un mélange et impose leur séparation chimique spécifique pour lever les interférences en énergie (27, 30). Après préconcentration par précipitation des phosphates et minéralisation en four à micro-ondes (en milieu acide nitrique concentré et peroxyde d'hydrogène) de la prise d'essai (500 mL), les actinides sont coprécipités par les phosphates en présence de fer. La séparation des radionucléides d'intérêt est obtenue par l'utilisation en cascade de colonnes d'extraction solide-liquide contenant des phases stationnaires spécifiques : résines échangeuses d'anions pour le plutonium (TEMEX® AG1X8, BIORAD®, Marnes-la-coquette, France) (33) et le thorium (TEVA®, TrisKem international, Bruz, France) (34), oxyde octylphényl-N,N-di-isobutylcarbamoyl-phosphine (CMPO) pour l'uranium (32, 35), l'américium et le curium (TRU®, TrisKem international, Bruz, France) (36). La préparation de la source est effectuée, pour chacun des radionucléides extraits, par coprécipitation par le fluorure de lanthane (27). La préparation des échantillons et la séparation des différents radionucléides d'intérêt nécessitent six à sept jours de manipulations. De plus, du fait des périodes particulièrement longues des radionucléides alpha, les temps de comptage nécessaires pour atteindre les LD requises par la CIPR 78 sont de 45 heures (23, 30). Le tableau III illustre les LD obtenues pour l'analyse par spectrométrie alpha de quelques émetteurs alpha dans l'urine. En plus de ces méthodes spécifiques, le LCR met aussi en œuvre une technique de dépistage urinaire non spécifique d'une contamination par les émetteurs alpha appartenant au groupe des actinides (uranium, thorium, plutonium ou américium). Cette technique plus rapide repose sur une préconcentration, une minéralisation (par l'acide nitrique concentré et le peroxyde d'hydrogène), une calcination en four à moufle et la précipitation des actinides d'intérêt par les phosphates. La source préparée par coprécipitation (flurorure de lanthane) est analysée par comptage alpha global de quinze heures sur compteur proportionnel (type multidétecteur IN20, Canberra®, Montigny-le-Bretonneux, France). Cet indice « alpha total urinaire » permet de détecter la présence des actinides précités dans les urines.

## Conclusion

Le LDOS et le LCR disposent d'un plateau technique performant et détiennent les accréditations et les agréments permettant d'assurer, dans le respect des exigences réglementaires, une surveillance optimale du personnel du ministère de la Défense. Les méthodes développées et les technologies mises en œuvre sont adaptées à la grande variété des risques d'exposition externe et interne aux rayonnements ionisants rencontrés au sein de la Défense. Elles prennent en compte, lorsque cela est nécessaire, les contraintes opérationnelles des forces afin de garantir une surveillance efficace. Les laboratoires de la Division dosimétrie contribuent ainsi pleinement à la mission d'expert technique en radioprotection médicale de l'exploitant « Défense » dévolue au SPRA.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


1. Arrêté du 10 janvier 2005 relatif aux attributions du service de protection radiologique des armées.
2. Instruction n°1379/DEF/DCSSA/PC/ERS du 14 mars 2013 relative à l'organisation et au fonctionnement du service de protection radiologique des armées.
3. Décret n°2001-215 du 8 mars 2001 modifiant le décret n°66-450 du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants.
4. Décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants.
5. Instruction n°4916/DEF/CAB du 30 mars 2009, modifiée le 31 décembre 2010, relative aux dispositions communes en matière de protection radiologique du personnel du ministère de la Défense.
6. Arrêté du 21 juin 2013 relatif aux conditions de délivrance du certificat et de l'agrément pour les organismes en charge de la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants.
7. Arrêté du 1er septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.
8. Arrêté du 17 juillet 2013 relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.
9. Norme NF EN ISO/CEI 17025 (septembre 2005) — Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.
10. Norme NF EN ISO 15189 (décembre 2012) — Exigences concernant la qualité et la compétence des laboratoires d'analyses de biologie médicale.
11. Abou Anoma G, Michel X, Breton D, Schoulz D, Pennacino I, Amabile JC, et al. Cardiologie interventionnelle : évaluation de l'exposition aux rayonnements ionisants et zonage radiologique. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 2012 ; 73 (6) : 849-59.
12. Wassilieff S, Cazoulat A, Bohand S, Merat F, Gontier E, Gagna G, et al. Évaluation de l'exposition interne aux rayonnements ionisants du personnel du service de médecine nucléaire du Val-de-Grâce. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 2012 ; 73 (6) : 860-7.
13. Aupée O, Rizzo-Padoin N, Le Garlantezec P, Bohand X, Foehrenbach H, Laroche P. Aspects pratiques de radioprotection en radiopharmacie. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 2009 ; 70 (4) : 385-94.
14. Gagna G, Gauron C, Amabile JC, Laroche P. Exposition radiologique de l'équipe opératoire au cours de curiethérapies de prostate par implants permanents d'iode 125. Radioprotection 2011 ; 46 (02) : 189-208.
15. Michel X, Schoulz D, Abou Anoma G, Cazoulat A, Amabile JC, Laroche P. Exposition radiologique des personnels affectés aux opérations de maintenance de radar de surveillance aérienne. Radioprotection 2013 ; 48 (01) : 79-96.
16. Laroche P, Rousset J, Amabile JC, Roé H. Surveillance dosimétrique : résultats des équipages des forces sous-marines de 1989 à 1999. Radioprotection 2001 ; 36 (03) : 317-27.
17. Amabile JC, Castagnet X, De Carbonnières H, Laroche P. Exposition au rayonnement cosmique : surveillance du personnel de l'Armée de l'air navigant sur E-3F. Radioprotection 2007 ; 42 (02) : 197-210.
18. Ken K. Optically stimulated luminescence dosimeters. Health Physics 2001 ; 81 (2) : 108-9.
19. Bedogni R, Fantuzzi E. A personal neutron monitoring system based on CR-39 recoil proton track detectors : assessment of Hp (10) using image process algorithms. Radiat Prot Dosimetry 2002 ; 101 (1-4) : 183-6.
20. Cazoulat A, Bérard P, Laroche P. Risques liés à l'uranium appauvri en isotope 235. in Encyclopédie médico-chirurgicale — Pathologie professionnelle et de l'environnement. Paris : Elsevier Masson SAS ; 2012. 16-008-U-20.
21. Laroche P, Cazoulat A, Schoulz D, Gérasimo P. Le thorium 232, cet élément oublié de la radioprotection. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 1998 ; 59 (7) : 469-79.
22. Oeh U, Andrasi A, Bouvier-Capely C, De Carlan L, Fischer H, Franck D, et al. Implementation of bioassay methods to improve assessment of incorporated radionuclides. Radiat Prot Dosimetry 2007 ; 125 (1-4) : 444-8.
23. International Commission on Radiological Protection. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers. Publication 78. Oxford : Elsevier science ; 1997.
24. Société française de médecine du travail. Surveillance médico-professionnelle de l'exposition interne aux radionucléides en Installations Nucléaires de Base. Monts : Présence graphique ; 2011.
25. Laroche P, De Carbonnières H, Castagnet X. Risque radiologique : prise en charge médicale des victimes d'accidents radiologiques. In Encyclopédie médico-chirurgicale – Médecine d'urgence. Paris : Elsevier Masson SAS ; 2007. 25-030-H-60.
26. Blanchardon E, Flüry-Herard A, Paquet F. Les méthodes et les limites de la dosimétrie après contamination interne. Radioprotection 2007 ; 42 (4) : 501-17.
27. Lehto J, Hou X. Radionuclides and their radiometric measurement. in : Lehto J, Hou X, ed. Chemistry and analysis of radionuclides. Weinheim : Wiley-VCH ; 2011. 1-24.
28. Castellani CM, C. Hurtgen C, Blanchardon E, Berard P, Giussani A, Lopez MA. IDEAS Guidelines (Version 2) for the Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data Dosimetry ». Braunschweig : EURADOS ; 2013.
29. Norme NF S92-501 (mars 2013) – Laboratoire de biologie médicale – Mesures anthroporadiométriques – Corps entier – Mesures des émissions gamma d'énergie supérieure à 100 keV.
30. Hou X, Roos P. Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples. Anal Chim Acta 2008 ; 608 (2) : 105-39.
31. Cassette P. Mesures de radioactivité par scintillation liquide. In Méthodes nucléaires d'analyse. Paris : Techniques de l'Ingénieur ; 2004. P2552.
32. Berard P, Montegue A, Briot F, Harduin JC. PROCORAD's international intercomparisons highlight the evolution of techniques used to determine uranium in urine. Radiat Prot Dosimetry 2003 ; 105 (1-4) : 447-50.
33. Li C, Lariviere D, Kiser S, Moodie G, Falcomer R, Elliot N, et al. Method intercomparison for the analysis of 239/240Pu in human urine. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 2008 ; 23 (4) : 521-6.
34. Eikenberg J, Bajo S, Zumsteg I, Ruethi M, Beer H. Separation and measurement techniques for the determination of 228Th, 230Th and 232Th in various matrices. Radiat Prot Dosimetry 2001 ; 97 (2) : 127-31.
35. Manickam E, Sdraulig S, Tinker R. Method design and validation for the determination of uranium levels in human urine using high-resolution alpha spectrometry. J Environ Radioact 2008 ; 99 (3) : 491-501.
36. Maxwell SL, Jones VD. Rapid determination of actinides in urine by inductively coupled plasma mass spectrometry and alpha spectrometry : a hybrid approach. Talanta. 2009 ; 80 (1) : 143-50.