

Fontenay-aux-Roses, le 29 octobre 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00175

Objet : **Demande d'expertise concernant l'utilisation de nouveaux radionucléides en médecine nucléaire pour des actes à visées diagnostique, théranostique ou thérapeutique. Troisième partie**

Réf. : [1] Lettre CODEP-DIS-2020-n°013841 du 21 avril 2020
[2] Avis IRSN N° 2021-00016 du 1^{er} février 2021
[3] Avis IRSN N° 2021-00117 du 30 juin 2021
[4] Avis IRSN N° 2015-00110 du 31 mars 2015
[5] Livre Blanc sur la surveillance radiologique des expositions des travailleurs (juin 2015)

Par lettre citée en première référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) une expertise sur les nouveaux radionucléides en médecine nucléaire et l'impact de ces derniers en termes de radioprotection afin d'anticiper leur arrivée sur le marché français. En effet, la médecine nucléaire connaît depuis quelques années une forte évolution dans le monde, tant dans ses applications diagnostiques que thérapeutiques. En particulier, l'arrivée attendue sur le marché du ¹⁷⁷Lu - PSMA - 617 pour le traitement de certains cancers de la prostate pourrait conduire à un plus large recours à la radiothérapie interne vectorisée (RIV) et ouvrir la voie à d'autres médicaments radiopharmaceutiques (MRP).

Un premier avis de l'IRSN, cité en deuxième référence, a été rendu à l'ASN en février 2021 afin de répondre aux deux premiers volets de la saisine [1], à savoir :

- réaliser une étude bibliographique concernant les nouveaux radionucléides prometteurs pour une utilisation chez l'Homme, rassemblant leurs différents vecteurs possibles et les données biocinétiques pertinentes pour des questions de radioprotection selon les applications diagnostiques ou thérapeutiques ;
- indiquer les perspectives d'utilisation de ces nouveaux radionucléides dans les services de médecine nucléaire français.

Un deuxième avis de l'IRSN, cité en troisième référence, a été rendu à l'ASN en juin 2021 afin de répondre au troisième volet de la saisine [1], qui concerne les mesures de radioprotection des patients dans le contexte d'une utilisation thérapeutique (planification individuelle du traitement), et de leur entourage.

Dans la continuité de ces deux avis, le présent avis concerne les problématiques de radioprotection :

- des travailleurs à l'hôpital, qui manipulent les radionucléides et prennent en charge les patients ;

- des transporteurs sanitaires des patients après administration d'un MRP. Ce sujet est traité à la demande de l'ASN intervenue lors d'échanges avec l'IRSN en cours d'expertise ;
- des travailleurs dans les systèmes d'assainissement potentiellement exposés aux effluents radioactifs.

Le sujet de la radioprotection des travailleurs qui prennent en charge les dépouilles radioactives, également identifié dans la saisine [1], fera l'objet d'un avis ultérieur de la part de l'IRSN.

1. RADIOPROTECTION DES TRAVAILLEURS A L'HOPITAL

1.1. ANALYSE DES DONNEES DISPONIBLES POUR LES NOUVEAUX RADIONUCLEIDES CONCERNANT LA RADIOPROTECTION DES TRAVAILLEURS A L'HOPITAL

1.1.1. Suivi des travailleurs en France

Les effectifs de travailleurs en médecine nucléaire suivis pour l'exposition externe sont, d'après le bilan IRSN 2020 des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants, et le recensement réalisé par la Société française de médecine nucléaire (SFMN) dans son enquête nationale annuelle de 2019, du même ordre de grandeur, à savoir quelques milliers de travailleurs. Ainsi, en France, la couverture du suivi dosimétrique externe pour ces travailleurs semble globalement satisfaisante.

En revanche, concernant l'exposition interne, le suivi par des examens anthroporadiométriques ou des analyses radiotoxicologiques n'est pas systématique dans les services de médecine nucléaire. Cette surveillance, prescrite par les médecins du travail en relation avec les conseillers en radioprotection, est nécessaire pour les travailleurs classés dès lors que ceux-ci sont susceptibles d'être exposés à un risque de contamination interne (articles R.4451-64 et 65 du code du travail). **L'IRSN rappelle que le sujet de la surveillance de l'exposition interne a fait l'objet d'un livre blanc [5] paru en 2015 sous l'égide de la direction générale du travail et de l'ASN avec la collaboration de l'IRSN et estime que les recommandations qui ont formulées dans ce document pourraient utilement être considérées pour les nouveaux radionucléides.**

Il convient de noter que, dans le secteur des installations nucléaires de base, les médecins du travail ont l'obligation de suivre une formation spécifique à la radioprotection. En revanche, l'obligation ne s'applique pas aux médecins du travail qui effectuent le suivi médical des travailleurs en médecine nucléaire. **L'IRSN suggère de s'assurer que la formation des médecins du travail, concernant les risques d'exposition interne spécifiques à la médecine nucléaire, est suffisante, et, si nécessaire, de la renforcer. Des guides proposant des recommandations à destination des médecins du travail pourraient aussi être utiles en pratique.**

1.1.2. Enquête auprès de services de médecine nucléaire français

Au cours de l'été 2021, l'IRSN a réalisé une enquête auprès de 15 services de médecine nucléaire français utilisant des nouveaux radionucléides, en vue de recenser les problématiques nouvelles en matière de radioprotection des travailleurs à l'hôpital apparues lors de l'utilisation de ces nouveaux radionucléides. Les 12 réponses reçues ont permis à l'IRSN d'identifier plusieurs sujets d'intérêt :

- pour les MRP au ^{177}Lu , la contamination atmosphérique, en situation normale, semble rester à des niveaux très faibles ;
- plusieurs services ont mentionné rencontrer des difficultés pour la détection des radionucléides émetteurs alpha, en l'occurrence le ^{223}Ra (dans le cadre, par exemple, de la gestion des déchets). En 2015, suite à une étude comparative réalisée par deux services de médecine nucléaire, l'IRSN a émis un avis [4] sur la détection des contaminations surfaciques au ^{223}Ra . Cet avis recommandait la recherche de ces contaminations par détection des émissions alpha (sonde alpha ou mode alpha d'une sonde

polyvalente). Une étude du même type pourrait être réalisée lorsque le ^{225}Ac commencera à être utilisé dans les services de médecine nucléaire ;

- certains services de médecine nucléaire sont confrontés à des difficultés en matière de gestion des déchets et effluents contaminés par le ^{177}Lu , du fait de la présence de l'impureté à vie longue $^{177\text{m}}\text{Lu}$;
- des problématiques peuvent se poser pour l'utilisation du ^{166}Ho . En effet, l'exposition des opérateurs manipulant le flacon n'est pas négligeable malgré la protection utilisée, et les débits de dose autour du patient peuvent atteindre $35 \mu\text{Sv/h}$ pouvant conduire à une hospitalisation en chambre radioprotégée ;
- en marge des problématiques portant sur la radioprotection des travailleurs, certains services ont mentionné l'absence de laboratoire accrédité par le comité français d'accréditation (COFRAC) pour l'étalonnage des activimètres pour la plupart des nouveaux radionucléides. Les services de médecine nucléaire sont amenés à réaliser leur propre étalonnage en interne via différentes méthodes.

1.1.3. Analyse des documents transmis par l'ASN

Au cours de l'expertise, des documents relatifs à certains nouveaux radionucléides (^{82}Rb , ^{64}Cu , ^{89}Zr , ^{166}Ho et ^{177}Lu) ont été transmis à l'IRSN par l'ASN. Ils sont principalement issus de dossiers de demande d'autorisation, ainsi que de descriptifs d'essais cliniques, protocoles de traitement et fichiers de mesures. De l'analyse de ces documents, il ressort que les informations relatives à la radioprotection des travailleurs y sont succinctes et le plus souvent théoriques (expositions prévisionnelles). Ainsi, à partir de ces seules données, il est difficile de pouvoir identifier si des problématiques particulières de radioprotection des travailleurs se posent.

Pour les nouveaux radionucléides les plus utilisés actuellement et disposant d'une autorisation de mise sur le marché (e.g. ^{177}Lu et ^{68}Ga), l'IRSN recommande que soient réalisées des mesures dans les services utilisateurs afin d'améliorer la connaissance des doses susceptibles d'être reçues par les travailleurs à l'hôpital et des problématiques de radioprotection rencontrées en pratique. Pour les nouveaux radionucléides dont l'utilisation en clinique vient juste de débuter (e.g. ^{166}Ho), l'IRSN suggère de favoriser au maximum, dans la mesure du possible, la réalisation de mesures lors de la prise en charge des patients dans les quelques services autorisés. En tout état de cause, il apparaît important que l'ensemble des informations soit partagé.

1.1.4. Conclusion de l'analyse des données disponibles pour les nouveaux radionucléides, concernant la radioprotection des travailleurs à l'hôpital

A la connaissance de l'IRSN, les données disponibles concernant la radioprotection des travailleurs en lien avec l'utilisation de nouveaux radionucléides sont peu nombreuses. Certains nouveaux radionucléides sont utilisés dans les services de médecine nucléaire depuis très peu de temps et sont encore au stade d'essais cliniques, les données les concernant sont donc d'autant plus rares. L'IRSN souligne ainsi l'importance de la réalisation de mesures en conditions réelles, ainsi que du partage d'informations et du retour d'expérience concernant les questions de radioprotection des travailleurs entre les services de médecine nucléaire pionniers dans l'utilisation des nouveaux radionucléides et qui ont ainsi acquis une certaine expérience. Cette expérience pourrait être bénéfique pour les nouveaux services qui souhaitent commencer à les utiliser.

Par ailleurs, l'IRSN souhaite attirer l'attention sur le fait que, si l'utilisation de certains radionucléides thérapeutiques se développe fortement (e.g. ^{177}Lu -PSMA-617), les doses reçues par les travailleurs sont susceptibles d'augmenter, puisque ces doses sont en général plus élevées en thérapie qu'en diagnostic. De plus, en cas de personnalisation des activités administrées, l'exposition des travailleurs (extrémités et corps entier) pourraient augmenter du fait de manipulations plus nombreuses, aujourd'hui limitées par l'injection de flacons entiers de médicaments radiopharmaceutiques. Pour ces raisons, afin de limiter l'augmentation de l'exposition, et ainsi de maîtriser les doses reçues par les travailleurs, il apparaît nécessaire que les constructeurs d'équipements de préparation/injection et les fournisseurs des MRP/DMIA (dispositif médical implantable actif) développent des modes de préparation et d'administration automatisés qui permettent de manipuler le moins possible ces nouveaux radionucléides thérapeutiques. Une autre solution qui pourrait être étudiée par les

fournisseurs de MRP/DMIA serait de fournir des flacons dont l'activité est adaptée à chaque patient (activité précise choisie par le service ou bien activités forfaitaires).

1.2. SURVEILLANCE DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS EN MEDECINE NUCLEAIRE

1.2.1. Capacité de mesure des dosimètres externes actuels pour les nouveaux radionucléides

Au vu des propriétés physiques des huit radionucléides prometteurs identifiés par l'IRSN [2] et des performances des dosimètres externes (corps entier et extrémités) des trois principaux fournisseurs dans le milieu médical (IRSN, LANDAUER et DOSILAB) utilisant les technologies par radio photo luminescence (RPL), lumière stimulée optiquement (OSL) et thermoluminescence (TLD), les dosimètres externes actuels sont en capacité de mesurer les doses reçues par les travailleurs en médecine nucléaire dans un objectif de surveillance dosimétrique réglementaire.

1.2.2. Limites de détection en anthroporadiométrie et radiotoxicologie pour les nouveaux radionucléides

Les performances des différentes méthodes de surveillance de l'exposition interne (anthroporadiométrie/radiotoxicologie) varient suivant les radionucléides. Pour les huit radionucléides précités, les limites de détection ont été déterminées pour les installations du laboratoire de biologie médicale et d'anthroporadiométrie (LBMA) de l'IRSN, qui est le seul¹ à réaliser ces mesures en France pour les travailleurs de médecine nucléaire. Les limites sont présentées en annexe 1 ci-après.

1.2.3. Evaluation dosimétrique à partir des mesures radiotoxicologiques ou anthroporadiométriques pour les nouveaux radionucléides en cas d'incident

En cas de contamination par inhalation de radionucléides sous forme de chlorure, l'activité conduisant à une dose efficace engagée de 1 mSv et la durée pendant laquelle une contamination de cet ordre serait détectable, par des mesures anthroporadiométriques et radiotoxicologiques au LBMA, ont été déterminées à partir des données fournies par les publications 137 et 141 de la CIPR, la norme NF ISO 16637, et les limites de détection des techniques anthroporadiométriques et radiotoxicologiques. Le tableau de l'annexe 2 du présent avis regroupe ces informations, pour les quatre radionucléides thérapeutiques prometteurs (considérés par défaut sous forme de chlorure) identifiés par l'IRSN.

2. RADIOPROTECTION DES TRANSPORTEURS SANITAIRES

2.1. ENQUETE IRSN

Dans l'enquête IRSN précitée, l'IRSN a interrogé les services sur les précautions particulières de radioprotection prises concernant les transporteurs sanitaires et sur la réalisation d'une estimation de la dose efficace reçue lors des trajets. Dix des 12 services ayant répondu ont indiqué ne pas prendre de précautions particulières en termes de radioprotection pour les transporteurs sanitaires et ne pas réaliser d'estimation de dose reçue par ces personnes.

2.2. EVALUATION DE L'EXPOSITION DES TRANSPORTEURS SANITAIRES

L'IRSN a réalisé des estimations de l'exposition d'un transporteur sanitaire effectuant un trajet avec un patient après un acte de médecine nucléaire diagnostique ou thérapeutique, à partir de débits d'équivalent de dose autour du patient publiés dans la littérature et des activités moyennes administrées aux patients. Ces estimations

¹ A l'exception du Service de protection radiologique des armées qui suit moins de 10 travailleurs pour l'exposition interne

montrent que, pour un trajet, les expositions liées à des actes thérapeutiques (de 7 à 25 μSv environ pour un trajet d'une heure, selon les radionucléides) sont plus élevées que celles associées aux examens diagnostiques (de 4 à 10 μSv environ pour un trajet d'une heure, selon les radionucléides) mais restent dans tous les cas très inférieures à la limite de dose réglementaire pour le public. Pour que l'exposition d'un transporteur atteigne la valeur limite annuelle d'exposition du public (1 mSv), une répétition de transports de patients de médecine nucléaire est donc nécessaire : près d'une centaine de trajets d'une heure avec des patients de TEP (tomographies par émission de positons) par exemple.

En tenant compte de la fréquence des différents types d'actes, et en considérant un recours au transport sanitaire similaire quel que soit le type d'acte, il apparaît que les actes diagnostiques (scintigraphies et tomographie d'émission de positons (TEP)), du fait de leur nombre, représentent une source d'exposition plus importante que les actes thérapeutiques. Même en considérant une forte augmentation de l'utilisation du ^{177}Lu en thérapie et du ^{68}Ga en diagnostic, leur impact semble marginal comparé aux actes diagnostiques courants.

Dans leurs réponses à l'enquête de l'IRSN précitée, deux services de médecine nucléaire ont indiqué envisager de travailler sur ce sujet. Des études préliminaires visant à estimer le nombre de transports de patients de médecine nucléaire susceptibles d'être réalisés par un même transporteur pourraient être utiles pour affiner les estimations de l'IRSN.

3. RADIOPROTECTION DES TRAVAILLEURS DANS LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT (GESTION DES EFFLUENTS)

Le logiciel CIDRRE (calcul d'impact des déversements radioactifs dans les réseaux) permet d'estimer la dose efficace susceptible d'être reçue par les travailleurs des systèmes d'assainissement, à savoir les égoutiers, les personnels des stations de traitement des eaux usées (STEU) et ceux de la filière de valorisation des boues. Pour les huit radionucléides prometteurs identifiés par l'IRSN, les coefficients de dose efficace calculés par l'IRSN, à intégrer dans CIDRRE, pour une activité rejetée par l'établissement de 1 Bq/an diluée dans 1 m³/an d'eau usée déversée par l'établissement (pour les égoutiers) ou traitée par la STEU (pour les travailleurs de la STEU et de la filière de valorisation des boues) sont présentés dans l'annexe 3 ci-après. Pour le cas du ^{177}Lu , du fait de son utilisation croissante en médecine nucléaire, la prise en compte de sa biocinétique et de sa répartition eau-boue a permis d'obtenir une estimation des coefficients de dose plus précise. En termes de coefficients de dose, la valeur pour le ^{177}Lu est inférieure d'un facteur 2 à 10 par rapport à l' ^{131}I selon les catégories de travailleurs des systèmes d'assainissement. Cependant, l'impact radiologique réel du ^{177}Lu dépendra des activités déversées dans les systèmes d'assainissement.

4. CONCLUSION

De l'expertise réalisée, l'IRSN retient que, s'agissant de la radioprotection des travailleurs à l'hôpital en lien avec les nouveaux radionucléides, les données disponibles sont rares, principalement théoriques, et qu'il y a besoin d'enrichir ces données. Une recommandation en ce sens est formulée dans le présent avis, ainsi que celle de favoriser leur partage entre les services de médecine nucléaire. Concernant les transporteurs sanitaires, les estimations de l'IRSN montrent que, pour un trajet, les doses reçues restent très inférieures à la valeur limite d'exposition du public. Pour que l'exposition d'un transporteur atteigne la valeur limite annuelle d'exposition du public, selon les estimations de l'IRSN, une centaine de transports de patients de tomographie d'émission de positons (TEP) est nécessaire. En tenant compte de la fréquence des différents types d'actes, et en considérant un recours au transport sanitaire similaire quel que soit le type d'acte, il apparaît que les actes diagnostiques (scintigraphies et TEP), du fait de leur nombre, représentent une source d'exposition plus importante que les actes thérapeutiques. L'impact associé aux nouveaux radionucléides semble toutefois marginal comparé aux actes diagnostiques courants. Des études préliminaires visant à estimer le nombre de transports susceptibles d'être réalisés par un même transporteur sanitaire pourraient être utiles pour affiner les estimations de l'IRSN.

Enfin, s'agissant des travailleurs dans les systèmes d'assainissement, l'IRSN présente des valeurs de coefficients de dose efficace, à intégrer dans CIDRRE, pour les huit radionucléides prometteurs identifiés par l'IRSN. L'impact radiologique réel de ces nouveaux radionucléides dépendra des activités déversées dans les systèmes d'assainissement.

IRSN
Le Directeur général
Par délégation

Alain RANNOU
Directeur adjoint de la Santé

ANNEXE 1 : LIMITES DE DETECTION PAR ANTHROPORADIOMETRIE ET RADIOTOXICOLOGIE AU LABORATOIRE DE BIOLOGIE MEDICALE ET D'ANTHROPORADIOMETRIE DE L'IRSN

	Radiotoxicologie urines ou selles	Anthroporadiométrie		
Radionucléide	LD RTX	LD ATP		Commentaires
		LMA camions- labo sur site	Chambre fixe Vésinet	
⁶⁸ Ga	Du fait de la période trop courte (68 min), la mesure RTX n'est pas réalisée.	CE 20' : 2719 Bq	CE 20' : 38 Bq	La mesure ATP est réalisée en routine dans les LMA (laboratoires mobiles d'anthroporadiométrie)
⁸² Rb				Emetteur β/γ mais période très courte (75 s). Il est possible d'interpréter la mesure en présence d'impuretés de ⁸² Sr (le ⁸² Rb se met à l'équilibre séculaire avec le ⁸² Sr)
¹⁷⁷ Lu	9 Bq/L (urines) : spectrométrie gamma	CE 20' : 833 Bq	CE 20' : 295 Bq	Les mesures RTX et ATP sont réalisées en routine
²²³ Ra	1 Bq/g (selles) : spectrométrie gamma			La RTX est à privilégier. L'ATP est <i>a priori</i> possible
⁶⁴ Cu	6,2 Bq/L (urines) : spectrométrie gamma		CE 20' : 6349 Bq	RTX : des analyses ont déjà été réalisées ATP : la mesure est possible
⁸⁹ Zr	1,5 Bq/L (urines) : spectrométrie gamma	CE 20' : 89 Bq	CE 20' : 23 Bq	RTX : des analyses ont déjà été réalisées ATP : la mesure est possible
¹⁶⁶ Ho	19 Bq/L (urines) : spectrométrie gamma		CE 20' : 512 Bq	RTX : des analyses ont déjà été réalisées ATP : la mesure est possible
²²⁵ Ac	1 Bq/g (selles) : spectrométrie gamma			Estimation d'une LD pour une mesure 8 jours après le recueil, du fait des délais de transport/calcination/mise en solution des selles. La RTX est à privilégier L'ATP est <i>a priori</i> possible

Légende : LD : Limite de détection ; CE 20' : Anthroporadiométrie corps entier avec un temps de comptage de 20 minutes ; RTX : radiotoxicologie ; ATP : anthroporadiométrie

ANNEXE 2 : DONNEES CONCERNANT LA CONTAMINATION INTERNE DES TRAVAILLEURS EN MEDECINE NUCLEAIRE

Cas de contamination d'un travailleur par inhalation d'un radionucléide considéré par défaut sous forme de chlorure : Activité conduisant à une dose efficace engagée de 1 mSv et durée pendant laquelle une contamination de cet ordre serait détectable

Radionucléide	Activité inhalée entraînant une dose efficace engagée de 1 mSv	Durée, après l'incident, pendant laquelle une contamination entraînant une dose efficace engagée de 1 mSv serait détectable
²²³ Ra	560 Bq	Radiotoxicologie des selles : 5 jours Anthroporadiométrie : 24 h
¹⁷⁷ Lu	4,8 MBq	10 jours quelle que soit la technique au LBMA (IRSN)
¹⁶⁶ Ho	3,1 MBq	Anthroporadiométrie : 9 jours Radiotoxicologie urinaire : 5 jours
²²⁵ Ac	556 Bq	Radiotoxicologie des selles : 5 jours

Il convient de noter que les valeurs mentionnées dans ce tableau s'appliquent à la forme du radionucléide avant marquage, la CIPR ne proposant pas de type d'absorption par inhalation pour les médicaments radiopharmaceutiques. Aussi, la dose interne reçue par un travailleur en médecine nucléaire, notamment lors d'un incident, est souvent évaluée de façon approximative, selon la forme du radionucléide incorporé. Dans le cas d'une contamination avec la forme soluble du type chlorure (par exemple le chlorure de ²²³Ra administré aux patients), les incertitudes sont réduites.

ANNEXE 3 : COEFFICIENTS DE DOSE EFFICACE RECUE PAR LES TRAVAILLEURS DES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT

Coefficients de dose efficace reçue par les travailleurs pour une activité de 1 Bq/an rejetée dans 1 m³/an d'eaux usées déversées par l'établissement (égoutiers) ou traitées par la STEU (travailleurs de la STEU et de la filière de valorisation des boues).

Radionucléide	Egoutier		STEU	STEU	Evacuation	Epandage
	émergé	immergé	file eaux	file boues	des boues	des boues
Dose totale annuelle (μSv/an)						
⁶⁴ Cu	3,5E-06	1,1E-05	1,2E-05	1,3E-03	7,0E-06	1,9E-06
⁶⁸ Ga	1,7E-05	5,3E-05	1,1E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
⁸² Rb	2,0E-05	6,2E-05	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
⁸⁹ Zr	2,2E-05	6,6E-05	8,6E-05	2,3E-01	1,0E-01	8,1E-02
¹⁶⁶ Ho	4,8E-07	1,6E-06	1,8E-06	1,5E-03	1,3E-04	6,8E-05
²²³ Ra+	7,1E-06	1,8E-05	2,8E-05	9,2E-01	7,2E-01	3,7E-01
²²⁵ Ac+	4,2E-06	1,3E-05	1,7E-05	1,6E-01	1,2E-01	7,9E-02
¹⁷⁷ Lu sans cuve	3,9E-07	1,4E-06	1,5E-06	2,9E-03	1,9E-03	1,7E-03
¹⁷⁷ Lu hospitalisation 6h avec cuves	2,4E-07	8,9E-07	9,7E-07	1,8E-03	1,2E-03	1,1E-03
¹⁷⁷ Lu hospitalisation 24h avec cuves	1,5E-07	5,3E-07	5,8E-07	1,1E-03	7,2E-04	6,4E-04

Pour les radionucléides suivis du signe « + », la dose tient compte des descendants à l'équilibre séculaire.

Les valeurs inférieures à 1,0E-15 μSv/an sont remplacées par zéro.