

RADIOPROTECTION DES TRAVAILLEURS ET DES PATIENTS DANS L'UTILISATION DES NOUVEAUX RADIONUCLÉIDES EN MÉDECINE NUCLÉAIRE (ETUDES IRSN)

Congrès national SFRP 2023 – Session tutoriale
16 juin 2023

Lettre de saisine : CODEP-DIS-2020-013841

C. Michel, D. Célier, A. Isambert,
D. Broggio, G. Phan, H. Caplin, E. Blanchardon

IRSN, Fontenay-Aux-Roses

PSE-SANTE/SER/UEM

Contexte de la saisine

■ Nombre d'actes en MN diagnostique en forte croissance :

- +44% entre 2012 et 2017 d'après le dernier bilan IRSN ExPRI

https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_Rapport_Expri_2019.pdf

- Discipline avec l'évolution la plus forte

■ Fort développement de la MN dans le monde (thérapie et diagnostic) :

- ^{177}Lu marqué au DOTATATE (Lutathéra[®]) en routine clinique dans les SMN depuis quelques années
- Nouvelle application thérapeutique du ^{177}Lu à large échelle :
 ^{177}Lu -PSMA-617 (certains cancers de la prostate)

→ Expertise IRSN (saisine ASN) : perspectives d'utilisation clinique des nouveaux RN en MN afin d'anticiper leur arrivée en termes de radioprotection (avril 2020)

Éléments demandés dans la saisine

1) Etude bibliographique :

- RN prometteurs pour une utilisation chez l'Homme et ceux déjà utilisés en Europe ou à l'international ;
- informations disponible sur leurs différents vecteurs possibles selon les indications diagnostiques, théragnostiques et thérapeutiques ;
- données biologiques (fixation, élimination, biocinétique, etc.).

2) Perspectives d'application clinique en France

non abordé aujourd'hui

3) Mesures de RP des patients (planification individuelle du traitement) et de leur entourage le cas échéant ;

4) Mesures de RP des travailleurs :

- préparation à l'hôpital ;
- prise en charge des patients en établissement de santé ;
- hors des établissements : effluents + décès de patient (funéraire)

Partie 1 :
1^{er} rapport (1^{er} février 2021)

Partie 2 :
2^e rapport (30 juin 2021)

Partie 3 :
3^e rapport (29 octobre 2021)

Partie 4 :
4^e avis (10 janvier 2023)

PREMIERE PARTIE (Rapport février 2021)

Méthode d'expertise

- Pour établir la liste des RN prometteurs, échanges avec les parties prenantes et prise en compte des facteurs d'influence du développement d'un nouveau RN pour une utilisation clinique.
- Parties prenantes française de la MN :
 - Pôles de compétitivité : MEDICEN (Ile-de-France) et Atlanpole Biothérapies (Grand Ouest)
 - Groupements de recherche : ARRONAX (cyclotron de haute technicité, Nantes) et Institut Laue-Langevin ILL (réacteur nucléaire de recherche à haut flux, Grenoble)
 - SMN : CHRU de Nancy (développement d'une plateforme de RIV)
 - Sociétés savantes professionnelles : SFMN, SoFRA, SFPM
 - Agence du médicament/dispositifs médicaux : ANSM
- Europe :
 - Michael Lassmann, physicien médical en Allemagne et Scientific Liaison Officer de l'EANM
 - Association d'industriels : Nuclear Medicine Europe
 - Experts en MN : MEDraysintell
 - Réseau HERCA
- International : AIEA

Catégorisation des RN

Classement sur la base des échanges avec les parties prenantes et les facteurs d'influence/indicateurs identifiés :

- 1=certain (AMM en France), 2=très probable, 3=probable, 4=peu probable
- Aspect **subjectif** : avis variable selon les secteurs des parties prenantes (recherche, clinique)

Diagnostic

RN	Imageur	Catégorie
⁶⁸ Ga	TEP	1
⁸² Rb	TEP	
⁶⁴ Cu	TEP	2
⁸⁹ Zr	TEP	
⁴³ Sc	TEP	3
⁴⁴ Sc	TEP	
⁶² Cu	TEP	
^{117m} Sn	SPECT	
¹²⁴ I	TEP	
⁷⁵ Se	SPECT	4
¹⁵² Tb	TEP	
¹⁵⁵ Tb	SPECT	
²⁰³ Pb	SPECT	

Thérapie

RN	Type	Catégorie
¹⁷⁷ Lu	β	1
²²³ Ra	α	
¹⁶⁶ Ho	β	2
²²⁵ Ac	α	
⁴⁷ Sc	β	3
⁶⁷ Cu	β	
¹⁶¹ Tb	β	
¹⁸⁸ Re	β	
²¹¹ At	α	
²¹² Bi	α	
²¹² Pb	α	
²¹³ Bi	α	
²²⁷ Th	α	
¹⁴⁹ Tb	α	4

« α » = émetteurs α ou dont un descendant est émetteur α

Données biologiques par RN

Les RN « les plus prometteurs » faisant l'objet de « fiches » (Annexes) :

- Catégories 1 et 2
- Diagnostique : ^{68}Ga , ^{82}Rb , ^{64}Cu , ^{89}Zr
- Thérapeutique : ^{177}Lu , ^{223}Ra , ^{166}Ho , ^{225}Ac

Les données biologiques pertinentes pour les questions de RP

- Caractéristiques physiques du RN, biodistribution (activité/doses aux organes), courbes de rétention, voies et courbes d'excrétion, débit de dose après administration

Fiche Lutétium 177 (slides suivantes)

- Disponibilité/fiabilité variables des données selon les RN
- Grande variabilité des données inter-patients et inter-études
- Rend difficile une prévision du nombre de jours d'hospitalisation (thérapie)

Exemple ^{177}Lu - Rétention : variabilité inter-études

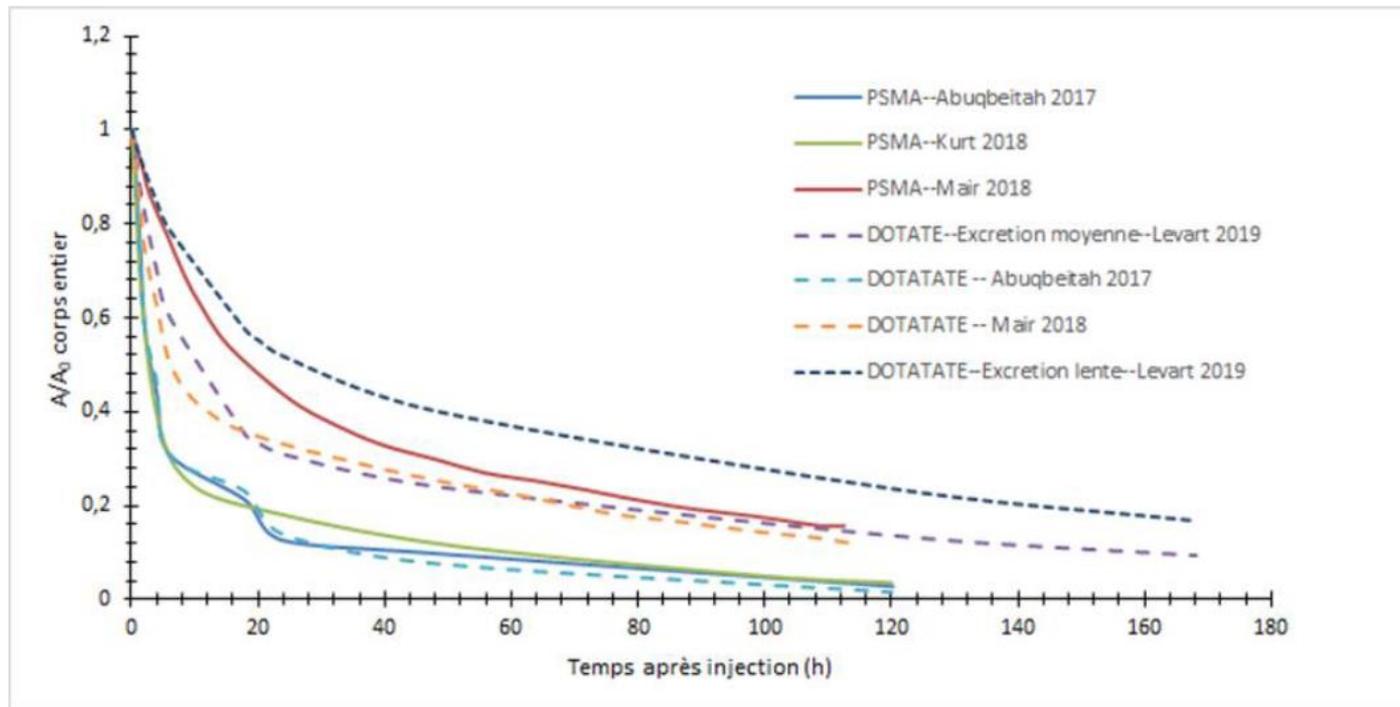
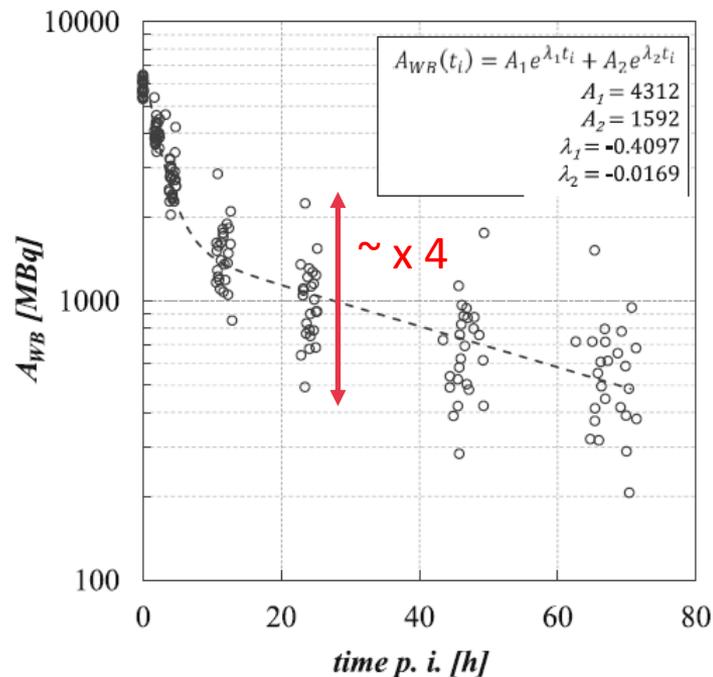


Figure 12 : Fraction d'activité retenue dans le corps entier d'après diverses sources

Exemple ^{177}Lu - Rétention : variabilité inter-patients

^{177}Lu -PSMA-617



Kurth et al., EJNMMI Res.8(1):32, 2018

Remarques sur les données biologiques

- Les dossiers de demande d'AMM réalisés par les laboratoires pharmaceutiques contiennent peu de données biologiques de RP patient, ou peu exploitables
- Ces données sont majoritairement présentes dans des articles publiés, analysés par l'IRSN
- En général, ces données sont obtenues après l'obtention de l'AMM (parfois en phase III des essais cliniques)
- En général, dans les essais cliniques :
 - prescription en activité fixe (MBq ou MBq/kg) donc traitement non personnalisé en termes de doses absorbées (cible/organes à risques)
 - absence d'études de la relation dose-réponse
- Manque de données → Difficultés pour le premier SMN souhaitant utiliser un nouveau RN

DEUXIEME PARTIE : RP des patients/entourage (Rapport juin 2021)

RP de l'entourage (après RIV)

Principe du calcul de dose à l'entourage :

- débit de dose autour du patient à sa sortie, et sa décroissance au fil du temps
- scénario d'exposition (fréquence, durée, distance des contacts)

Mise au point par l'IRSN d'une méthode de calcul de dose à l'entourage :

- 1- choix parmi les scénarios et méthodes de calcul publiés
- 2- amélioration du modèle de décroissance du débit de dose
mono-exponentiel → bi-exponentiel (plus adaptés pour des traitements ambulatoires)
- 3- vérification des résultats par calculs tests

Calcul des doses susceptibles d'être reçues

→ durées de restriction des contacts

RP de l'entourage (après RIV)

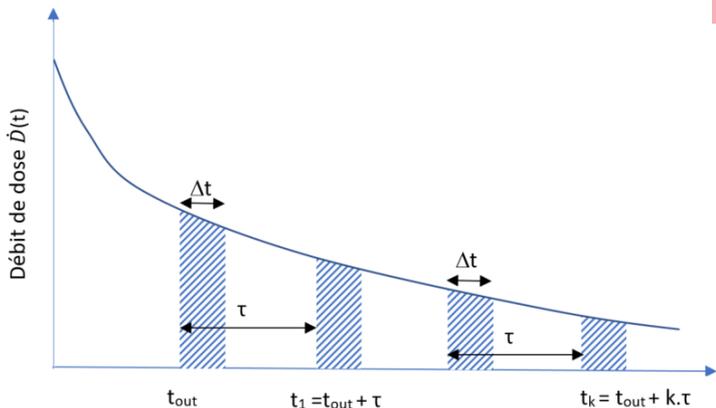
Calcul sur le modèle bi-exponentiel :

$$D_{bi} = \frac{\dot{D}_{out} k_d}{(f_r e^{-\lambda_r t_{out}} + f_l e^{-\lambda_l t_{out}})} \left(\frac{f_r}{\lambda_r} \frac{1 - e^{-\lambda_r \Delta t}}{1 - e^{-\lambda_r \tau}} e^{-\lambda_r t_{out}} e^{-\lambda_r d_{res}} + \frac{f_l}{\lambda_l} \frac{1 - e^{-\lambda_l \Delta t}}{1 - e^{-\lambda_l \tau}} e^{-\lambda_l t_{out}} e^{-\lambda_l d_{res}} \right)$$

Fixée par la rétention « enveloppe » et la date de sortie : connu

Normalisation par la mesure du débit de dose

Corrige de l'effet de distance



RP de l'entourage (après RIV)



Résultats dépendant fortement des paramètres d'entrée :

Biocinétique (modèle de décroissance considéré), scénarios d'exposition, contrainte de dose (par administration/traitement global), débit de dose initial...

Exemple : influence du modèle de décroissance du débit de dose

Scénario : enfant 0-2 ans, 9 h à 0,1 m (Carlier [70])			
Contrainte de dose : 1 mSv			
Sortie du patient : 48 heures après administration de $I^{131}I$			
Débit de dose à 1 m au moment de la sortie : 20 μ Sv/h à 1 m			
Calcul de k_d suivant le modèle en 1/d			
Durées arrondies à la valeur entière supérieure			
Paramètres biocinétiques : périodes effectives et fractions	Référence	Dose sans restriction de contact (mSv)	Durée de restriction de contact (j)
16 h (100%)	Carlier [70]	2,3	1
12,8 h (98%) 47,6 h (2%)	Liu [82] (périodes moyennes)	2,4	1
15,7 h (98%) 120,3 h (2%)	Liu [82] (95 ^e centiles)	3,6	4

RP de l'entourage (après RIV)

Application de la méthode de calcul : ^{177}Lu et ^{166}Ho

Ordres de grandeur à considérer **en fonction des paramètres d'entrée retenus** :

Période de restriction	^{177}Lu	^{166}Ho
Adultes	Une dizaine de jours	Quelques jours
Enfants	Une quinzaine de jours	Environ une semaine

Paramètres d'entrée :

^{177}Lu	^{166}Ho
15 $\mu\text{Sv/h}$	60 $\mu\text{Sv/h}$ (valeur prudente)
Contraintes de doses de 3 mSv (adultes) et 1mSv (enfants) (4 administrations pour ^{177}Lu et 1 administration pour ^{166}Ho)	

Suite au traitement de cette partie 2

- Logiciel de calcul IRSN pour la RP de l'entourage utilisé initialement pour le ^{177}Lu et l' ^{166}Ho a été complété avec d'autres thérapies disponibles (^{131}I , ^{90}Y)
- Publication (libre accès) : Journal of Radiological Protection (SRP Society of Radiological Protection), accompagné du calculateur Excel (matériel supp.) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/acc4d1>
- GT radioprotection de la SFMN
 - Pas de réunion pendant la période COVID
 - Redémarrage en mars 2022 (réunion brève), première journée complète de réunion le 14 déc. 2022
 - Avant la période COVID, travail depuis plusieurs années du GT sur un calculateur développé par la SFPM et la SFMN
 - Déploiement en cours du logiciel SFPM-SFMN (validé le 24 mars 2023)
- Prochaine réunion du GT 28/6 pour présenter le calculateur IRSN
- Souhait du GT à terme de converger vers un unique logiciel

TROISIEME PARTIE : RP des travailleurs (sauf décès patient) (Rapport octobre 2021)

1. Travailleurs des établissements de santé

Effectifs et doses en MN (France) : exposition externe

■ Bilan IRSN de l'exposition des travailleurs le plus récent (2020) :

- ~ 7100 travailleurs suivis (dosimètres à lecture différée, corps entier)
- ~ 0,7 mSv (dose moyenne) sur l'effectif exposé, ~4200 travailleurs reçoivent une dose inférieure au seuil d'enregistrement (50 μ Sv) , ~2100 entre ce seuil et 1 mSv

■ Enquête nationale SFMN la plus récente (2019) :

- Toutes professions : quelques milliers, même ordre de grandeur que le bilan IRSN pour l'exposition externe

→ En France, la couverture du suivi de l'exposition externe semble globalement satisfaisante

Effectifs et doses en MN (France) : exposition interne

■ En surveillance de contrôle de l'exposition interne, en 2020 :

- anthroporadiométrie (ATP) : 288 travailleurs
- radiotoxicologie (RTX) urinaire : 532 travailleurs
- moins de 1000 travailleurs au total

VS

■ Enquête nationale SFMN 2019 :

- ~1500 ETP manipulateurs => la surveillance interne n'est pas systématiquement mise en œuvre dans les SMN alors que les manipulateurs sont exposés au risque de contamination

→ S'interroger sur la surveillance de l'exposition interne en MN en France, surtout du fait de l'utilisation croissante des nouveaux RN

→ S'assurer que la formation des médecins du travail (prescripteurs des ATP/RTX) aux risques d'exposition interne spécifiques en MN est suffisante et la renforcer si nécessaire. Proposer des guides pratiques à destination des médecins du travail ?

Enquête auprès de 15 SMN français (été 2021)

- Objectif : recenser les problématiques nouvelles spécifiques aux nouveaux RN sur la RP des travailleurs
- Sélection des SMN : sur la base des nouveaux RN cités dans leur autorisation ASN
- Contenu :
 - Mesure des rayonnements
 - Suivi de l'exposition externe/interne
 - Contamination des travailleurs/locaux
 - Besoins de R&D en RP des travailleurs

Enquête auprès de 15 SMN français (été 2021)

Éléments d'intérêts identifiés :

- ^{177}Lu : la contamination atmosphérique semble rester à des niveaux très faibles (situation normale)
- difficultés de détection des émetteurs alpha (actuellement ^{223}Ra) dans les SMN. Une étude comparative par 2 SMN a conduit à un avis IRSN en 2013 sur la détection des contaminations surfaciques pour le ^{223}Ra . Reconduire cette étude pour l' ^{225}Ac lorsqu'il sera utilisé dans les SMN français ?
- ^{166}Ho : l'exposition lors de la manipulation du flacon n'est pas négligeable malgré la protection prévue, les débits de dose autour du patient peuvent atteindre 35 $\mu\text{Sv/h}$ pouvant conduire à une hospitalisation en chambre RIV
- déchets solides/effluents contaminés au ^{177}Lu : difficultés de gestion dues à la part métastable $^{177\text{m}}\text{Lu}$
- en RP **patient**, pour l'étalonnage des activimètres pour la plupart des nouveaux RN, absence de laboratoire accrédité COFRAC → étalonnages réalisés en interne (différentes méthodes)

Analyse des documents transmis par l'ASN pour les nouveaux RN

Documents transmis :

- Principalement issus de dossiers de demande d'autorisation, et également de protocoles d'essais cliniques/traitement, fichiers de calculs/mesures, etc.
- Concernent : ^{82}Rb , ^{64}Cu , ^{89}Zr , ^{166}Ho , ^{177}Lu

Informations succinctes sur la RP travailleurs :

- Souvent des calculs théoriques basés sur des hypothèses restant à vérifier (car RN non encore manipulés dans le SMN)
- Peu de mesures en conditions réelles (*e.g.* débits de dose autour d'un flacon/patient)

Conclusion de l'analyse

- Manque de données en RP des travailleurs → difficile d'identifier des problématiques
- Lors de la demande d'autorisation ASN, il est normal que les SMN aient uniquement données théoriques/calculs
- Besoin de réaliser des mesures en conditions réelles (prise en charge de patients), surtout pour les RN tout nouveaux
- Besoin de mettre en commun ces données entre SMN pionniers puis les diffuser aux autres SMN qui vont les utiliser
- Risque d'augmentation des doses des travailleurs du fait de l'utilisation croissante des nouveaux MRP/DMIA thérapeutiques :
 - Pour les industriels : développer des systèmes automatiques de préparation/administrations
 - Pour les fournisseurs de MRP/DMIA : pour éviter les manipulation en radiopharmacie, être en capacité de fournir l'activité adaptée à chaque patient (différents niveaux d'activités forfaitaires ou une activité précise)

2. Travailleurs des systèmes d'assainissement (effluents radioactifs)

CIDRRE : calcul d'impact des déversements radioactifs dans les réseaux

- Logiciel IRSN d'estimation de dose efficace (enveloppe) des travailleurs des systèmes d'assainissement (égoutiers, station de traitement des eaux usées (STEU), filière valorisation des boues) à partir des coefficients de dose pour chaque RN.

<https://cidrre.irsn.fr/>

- Objectif : s'assurer du respect de la limite de 1 mSv (public)
- Calcul pour un SMN donné (=méthode « semi-générique »), renseigner :
 - Activité administrée (MBq/an pour chaque RN)
 - Volume d'eau usée rejetée par l'établissement (m³/an)
 - Volume d'eau entrant dans la station de traitement des eaux usées (m³/jour)

CIDRRE : détermination des coefficients

- Calcul des coefficients pour les 8 nouveaux RN prometteurs (+ tous les autres) pour la méthode semi-générique
- Utilisation croissante du ^{177}Lu → Ajuster le coefficient :
 - Prise en compte de la répartition eau-boue : 50/50 (par défaut, 100% dans les boues)
 - Prise en compte de la biocinétique moyenne d'un patient d'après la fiche ^{177}Lu (rapport février 2021)
$$\text{Rétention } (t) = 0,51 \exp(-0,3t) + 0,49 \exp(-0,01t) \text{ (décroissance physique+biologique)}$$
 - 3 cas : sans cuves, hospitalisation 6h avec cuves, hospitalisation 24h avec cuves

CIDRRE : résultats pour les nouveaux RN

Pour 1 Bq/an rejeté dans 1m³/an d'eaux usées :

- déversées par l'établissement pour les **égoutiers**
- traitées par la STEU pour les **travailleurs de la STEU** et de la filière de **valorisation des boues**

Radionucléide	Egoutier		STEU	STEU	Evacuation	Epandage
	émérgé	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

⇒ CIDRRE mis à jour
en mars 2022

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

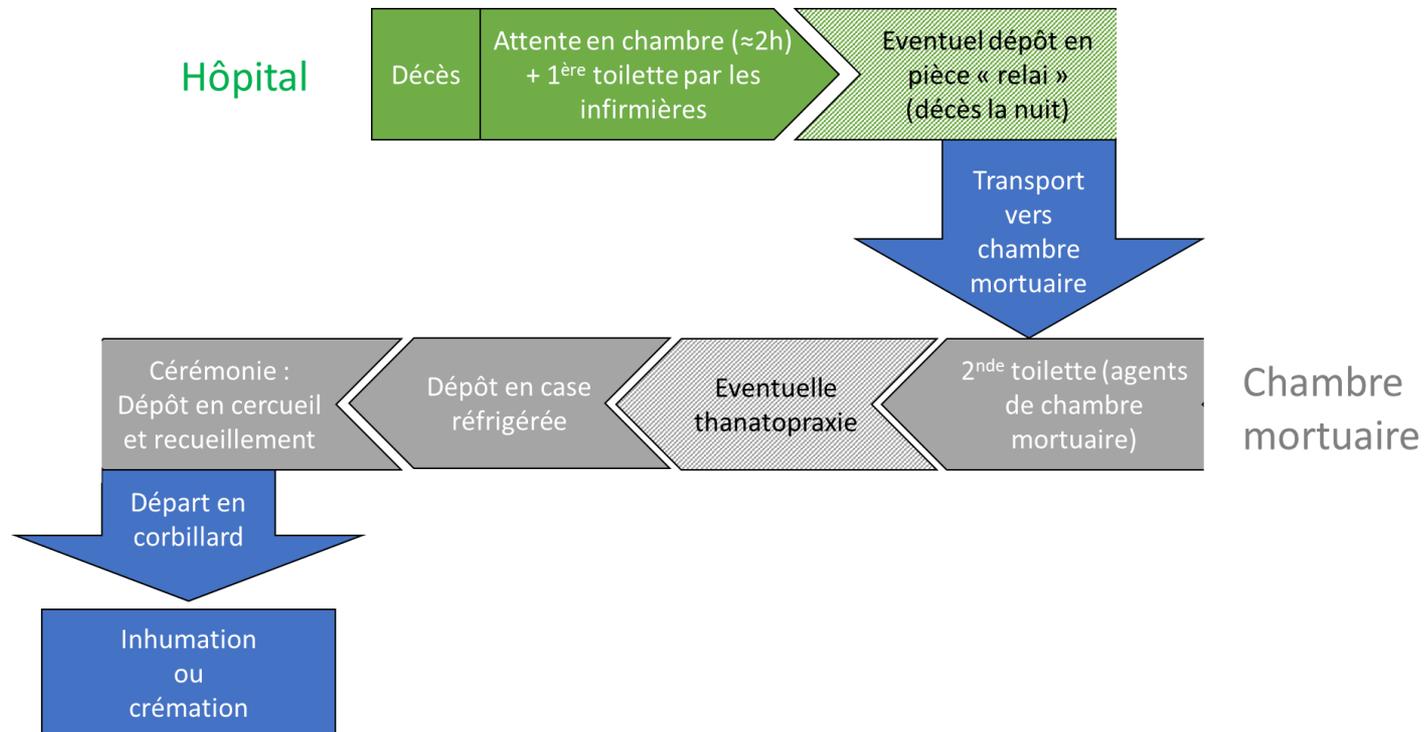
Les valeurs inférieures à 1,0E-15 μSv/an sont remplacées par zéro.

QUATRIEME PARTIE :

RP des travailleurs du funéraire (décès d'un patient) (avis janvier 2023)

1. Transport avant la mise en bière et soins au corps

Prise en charge d'un patient décédé (cas d'un CLCC visité)



Méthode et hypothèses de calcul

Opérations	Durée (h)	Distance patient décédé-opérateur (cm)
Transport avant la mise en bière	1	50
Soins au corps	2	50

→Durée/distance : valeurs considérées comme raisonnablement pénalisantes par les professionnels du secteur funéraire (GT dépouilles) et confirmées lors de la visite de la chambre mortuaire (CLCC)

- Critère de dose efficace : 300 μSv /opération (pour s'assurer d'être en dessous de valeur de 1 mSv/an, notamment dans le cas (rare) où une telle situation se reproduirait une ou deux fois dans l'année)
- RN thérapeutiques considérés : Lu-177, Ra-223, Ho-166 et Ac-225 (cat. 1 et 2 = les « plus prometteurs »)
- Activités administrées, constantes de débit d'équivalent de dose et périodes effectives : issues de la littérature (valeurs raisonnablement pénalisantes)
- Calculs :
 - Dose efficace = débit d'équivalent de dose (DeD) x durée
 - DED calculé à partir de : activité, constante de DeD, distance, période effective (décroissance avant le décès) et période physique (décroissance après le décès), durée administration-décès, durée décès-prise en charge :

$$\dot{H}^*(10) = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} \cdot e^{-\frac{\ln(2) \cdot t_1}{T_{\text{eff}}}} \cdot e^{-\frac{\ln(2) \cdot t_2}{T_{\text{phy}}}}$$

- Inversion du calcul, en utilisant le critère de dose, pour déterminer si le patient décédé peut être prise en charge immédiatement ou non

Résultats (soins/transport)

Les soins/le transport peuvent être réalisés immédiatement pour :

- Ra-223 (traitement palliatif des métastases osseuses)
- Ac-225-PSMA (cancers métastatiques de la prostate)

→ correspond au critère « inférieur à 150 $\mu\text{Sv/h}$ à 50 cm du corps »

Cas où les soins/le transport ne peuvent pas être réalisés immédiatement :

MRP/DMIA	Délai d'attente nécessaire pour réaliser le transport (hyp : décès immédiat après l'administration)	Délai d'attente nécessaire pour réaliser les soins (hyp : décès immédiat après l'administration)	Délai entre administration et décès permettant de réaliser les opérations funéraires immédiatement
Lu-177-DOTATATE	immédiat	4 j	0,5 j
Lu-177-PSMA	immédiat	4 j	1 j
Ho-166 microsphères	1 j	2 j	1,3 j
I-131 iodure (3,7 GBq)	11 j	19 j	2,1 j
I-131 MIBG (7,4 GBq)	19 j	27 j	6,6 j

Durées compatibles avec les délais réglementaires
(transport < 2 j / soins < 6 j)

2. Travailleurs des crématoriums

Méthode et hypothèses de calcul

- Visites effectuées dans 3 crématorium pour comprendre les opérations effectuées selon le type de système de filtration des fumées (petit vs grand conteneur)
- Sur la base de ces visites, évaluations des doses susceptibles d'être reçues par le personnel du crématorium (externe + interne), en utilisant différents scénarios réalistes et des hypothèses conservatives
- Personnel : technique (en charge des crémation) + administratif (bureau) + technicien externe (maintenance grand conteneur)
- Protections prises en compte : murs + EPI
- RN thérapeutiques considérés : Cu-67, Y-90, In-111, I-131, Sm-153, Ho-166, Er-169, Lu-177, Re-186, Re-188, At-211, Pb-212, Bi-212, Bi-213, Ra-223, Ac-225
- Hypothèse la plus conservatrice : décroissance effective non prise en compte => Activité administrée au patient

Résultats et recommandations (1/2)

- Pour la grande majorité des RN étudiés, peu d'enjeu de RP : plus de 300 μSv seulement dans quelques cas particuliers et seulement pour l'I-131, l'Ac-225 et l'In-111 (thérapeutique)
- Pour réduire l'exposition, l'IRSN recommande :
 - pour les patients traités par I-131, d'augmenter autant que possible le délai décès-crémation, en respectant les réglementations nationales et avec l'accord de la famille. En 2018, l'IRSN recommandait un délai de 2 semaines, encore applicable du fait de ces résultats mis à jour
 - que tout soit fait pour informer le crématorium du caractère radioactif, afin qu'il puisse mettre en place les mesures appropriées pour réduire l'exposition
- Les règles de prévention des risques déjà appliquées (e.g. port de gants, masque FFP3, etc.), concourent également à la RP

Résultats et recommandations (2/2)

En complément, l'IRSN recommande aux opérateurs des crématorium :

- de vider le filtre (petit conteneur) ou la trémie (grand conteneur) avant la crémation d'un corps radioactif, si possible
- d'évacuer le fut contenant les poussières contaminées aussi rapidement que possible
- si les deux recommandations ci-dessus ne sont pas possibles, d'augmenter la distance entre la zone de stockage des filtres contaminés et les autres salles du crématorium (en particulier les locaux administratifs)

Même pour le scénario le plus exposant, l'application des 3 recommandations ci-dessus permettent de réduire drastiquement l'exposition des travailleurs en dessous de 300 μSv

Merci pour votre attention.

Questions ?

Rapports disponibles sur :

https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/radioprotection-homme/Pages/Nouveaux-radionucleides-medecine-nucleaire-pour-actes-diagnostique-ou-therapeutique.aspx#.Ya5BymDMKUK

et <https://www.irsn.fr/sites/default/files/2023-02/Avis-IRSN-2023-00004.pdf>
(partie 4 : patients décédés après un acte de MN)