

REPÈRES

INTÉRÊT PUBLIC
Journée des thèses

FAITS ET PERSPECTIVES

Contamination de l'environnement :
de nouvelles connaissances

DOSSIER

Médicaments radiopharmaceutiques

Quelles perspectives pour le patient ?



En vidéo : tout sur le radon dans l'habitat

Comment mesurer le radon, gaz radioactif d'origine naturelle, dans sa maison ? Qu'est-ce qu'un détecteur passif et où s'en procurer ? À partir de quelle concentration faut-il mettre en place des mesures ? Dans une série de courtes vidéos, Caroline Vignaud, spécialiste du radon, vous apporte toutes les informations utiles pour réduire son exposition. À voir sur la chaîne YouTube de l'IRSN :

www.youtube.com/user/IRSNvideo



Medirad livre ses recommandations

Optimisation des protocoles à visée diagnostique ou thérapeutique, déploiement dans les services de médecine nucléaire de l'imagerie

quantitative... Lancé en 2017, le projet Medirad dévoile ses recommandations. Objectif : optimiser l'utilisation des rayonnements dans le médical en radiothérapie, médecine nucléaire, imagerie médicale et radiologie interventionnelle.

Retrouvez la synthèse des recommandations sur irsn.fr.
www.irsn.fr/medirad



Pour une culture pratique de la radioprotection

Quels sont les besoins des populations en cas d'accident nucléaire majeur ? Quels sont les défis techniques, socio-économiques, démographiques... pour les territoires affectés ? Toutes les réponses et recommandations sont dans la publication – « Protection radiologique des personnes et de l'environnement en cas

d'accident nucléaire majeur » –, de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), fruit de près d'une décennie de travaux. L'ouvrage est édité par la collection Lignes directrices de l'IRSN.

www.irsn.fr/collection-lignes-directrices



Bilan 2021 des expositions professionnelles

Plus 1,2 %, c'est la hausse du nombre de travailleurs suivis en 2021 par rapport à 2020. Ce retour à la normale après la crise due à la Covid-19 est l'un des principaux constats du nouveau bilan de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants. Dose collective, dose individuelle moyenne par domaine (nucléaire, industriel, médical, etc.)... Retrouvez les données en version numérique et interactive, sur irsn.fr.

www.irsn.fr/rapport-travailleurs-2021

Agenda

8 et 9 novembre 2022

Lyon (Rhône)

Rencontres des PCR

« Partager du savoir-faire » est le mot d'ordre de cette treizième édition adressée aux personnes compétentes en radioprotection. Découvrez la refonte du système Siseri, présentée en session plénière par l'experte en radioprotection Juliette Feuarden. Posez toutes vos questions aux spécialistes IRSN présents.

Plus d'informations :
www.pcr2022.fr/tout-un-programme

18 novembre 2022

Bordeaux (Gironde)

Journée de formation du Réso-PCR

Évolutions et actualités réglementaires, retour sur les inspections... Ne manquez pas la nouvelle journée de formation continue proposée par le Réseau Sud-Ouest des personnes compétentes en radioprotection (PCR), association basée sur le partage et la convivialité.

Plus d'informations :
www.pcr-sudouest.fr/

POUR VOUS ABONNER :

www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications > Magazine Repères

ERRATUM

Deux erreurs se sont glissées dans le *Repères* numéro 54. La légende de l'illustration page 14 devait être : Vingt-deux réacteurs français disposent d'une autorisation pour utiliser du combustible Mox. En page 18, la fin du texte *Étude nappe phréatique* devait être : Les moyens de mesure de l'IRSN mettent en évidence des teneurs entre 0,15 et 4,5 Bq/L sur 139 prélèvements réalisés en une année, affinant ainsi les résultats de l'Agence régionale de santé (< 10 Bq/L).

Online WEBMAG

www.irsn.fr/R55

À LIRE



Faits et perspectives
3 questions à... Yuichi Onda

À LIRE



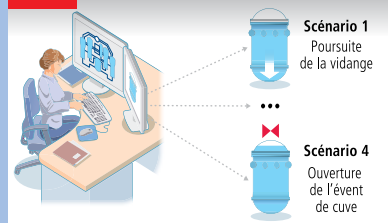
Dossier
Mesurer l'exposition des égoutiers

À LIRE



Dossier
Radioprotection des travailleurs

INFOGRAPHIE



Reportage
La simulation aide à mieux comprendre l'incident de Golfech en 2019

Sommaire

En couverture : Nadège Anizan de l'institut Gustave Roussy (à gauche) et Stéphanie Lamart de l'IRSN (à droite) collaborent pour faire progresser la radioprotection en médecine nucléaire.

P.4 TEMPS FORTS

Environnement

Radionucléides artificiels : quel bruit de fond ?

Denrées contaminées

Des contrôles plus rapides grâce à un nouvel appareil



P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Contamination de l'environnement

Quels sont les nouveaux savoirs sur les transferts de la radioactivité ?

P.9 ZOOM

Ça barbote !

DOSSIER P.10

**Dossier du prochain numéro :
Surveillance de l'air : quelle
efficacité des dispositifs en place ?**

**Médicaments
radiopharmaceutiques**
Quelles perspectives pour le patient ?

P.17 EN PRATIQUE

Traitement par irradiation de la thyroïde

Des fantômes donnent la juste dose

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**Journées des thèses : retour
sur scène**



P.22 REPORTAGE

Réacteurs

Des simulations capitales pour la sûreté




Médecine nucléaire Soigner et protéger

Depuis dix ans environ, de nouveaux médicaments radiopharmaceutiques se développent en médecine nucléaire pour l'imagerie et la thérapie. À titre d'exemple, bientôt plusieurs milliers d'hommes ayant un cancer métastatique de la prostate pourraient chaque année bénéficier d'un de ces nouveaux traitements à base de lutétium 177. L'utilisation de ces médicaments suscite toutefois des interrogations. Quelles activités délivrer au patient pour obtenir un effet thérapeutique optimal ? Quid de sa radioprotection, comme de celle de ses proches et des professionnels ? Ces questions mobilisent l'Institut depuis 2019. *Repères* livre les résultats d'expertises. Elles intéressent les professionnels au-delà de la France, c'est pourquoi l'IRSN est en lien avec les autorités européennes de radioprotection. Au sein du réseau Herca* ils analysent cette problématique, ses enjeux, et portent un message commun. Des échanges sont initiés avec l'association d'industriels *Nuclear medicine Europe*, afin de renforcer la radioprotection partout en Europe.

*Head of the European radiological protection competent authorities.

Aurélie Isambert

Cheffe de l'unité d'expertise
en radioprotection médicale

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Membre d'Etson  – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : www.irsn.fr – Courriel : reperes@irsn.fr – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la communication : Marie Riet-Hucheloup – Rédactrice en chef : Catherine Rouleau – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Valérie Delchambre – Photo de couverture : © Célia Goumard/Médiathèque IRSN – Impression : Handprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – octobre 2022.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Crédit d'impôt recherche L'Institut est agréé

Les dépenses des industriels pour des activités de recherche et développement (R&D) sont éligibles au Crédit d'impôt recherche (Cir) depuis le 1^{er} janvier 2022. Ceci à condition qu'elles soient réalisées par des organismes titulaires d'un agrément délivré par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (Mesri). L'IRSN vient d'être agréé par le Mesri pour dix ans. Ce crédit soutient les activités de R&D des entreprises, quel que soit leur secteur ou leur taille. Certaines, engageant des dépenses de recherche fondamentale et de développement expérimental, peuvent en bénéficier et les déduire de leur impôt. Les recherches menées au sein de l'Institut sont largement partenariales, avec des structures institutionnelles, académiques et industrielles. Deux exemples : une cloche de protection pour la découpe laser d'un site en démantèlement et une crème pour décontaminer la peau exposée à l'uranium. Cet agrément constitue une reconnaissance de la qualité scientifique des recherches que mène l'IRSN.

www Contact :
isabelle.guyot@irsn.fr

MÉDICAMENTS RADIOPHARMACEUTIQUES

10 experts

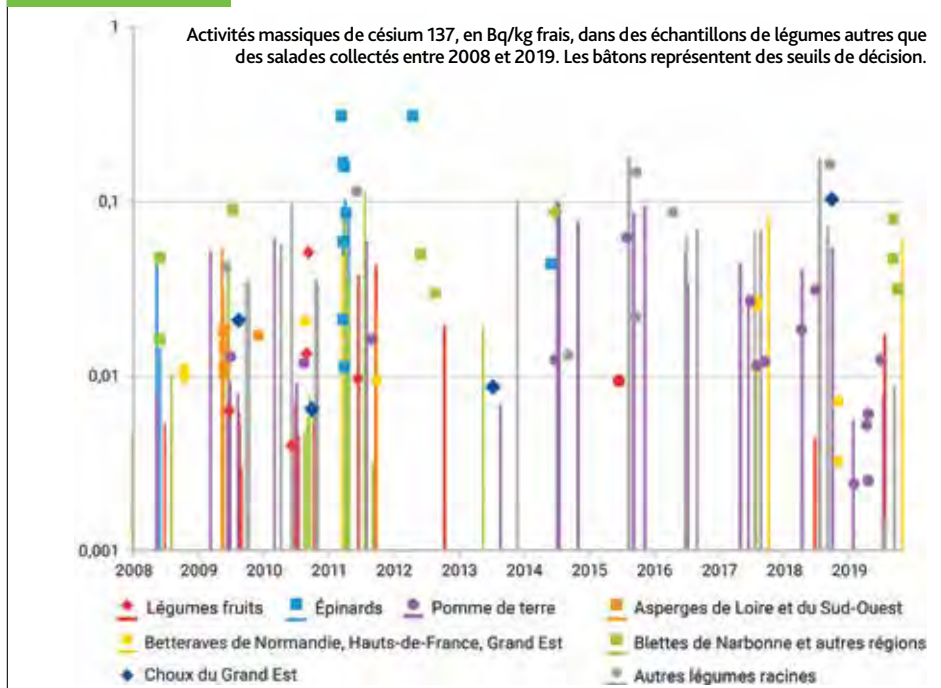
sont mobilisés sur l'expertise
« Nouveaux médicaments
radiopharmaceutiques ».

250

publications scientifiques
environ sont analysées
pour établir rapports
et analyses.

Rendez-vous page 10 pour découvrir
leurs conclusions.

Environnement



Environnement

Quel est le bruit de fond des radionucléides artificiels ?

Quelles sont aujourd'hui les concentrations dans l'environnement des radionucléides artificiels provenant des retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais d'armes nucléaires entre 1950 et 1980 ? Quelle exposition de la population en résulte ?

En avril 2022, l'Institut publie le rapport « Bruit de fond » qui répond à ces questions et permet de disposer d'un état radiologique de référence. Cet état pourrait en particulier être utile en cas d'accident nucléaire. La connaissance du bruit de fond aide à déterminer les quantités de radionucléides ajoutées localement par les rejets des installations nucléaires.

Ce document montre que le bruit de fond est très faible et diminue très lentement¹. Il existe des zones² où les concentrations de certains radionucléides sont plus élevées, en lien avec l'hétérogénéité des dépôts radioactifs initiaux. Sur ces espaces – qui regroupent près de 7 % de la population française –, la dose moyenne due au bruit de fond est estimée à 46 µSv/an, contre 9 µSv/an pour les personnes résidant ailleurs dans l'Hexagone.

Pour mener cette étude, les scientifiques s'appuient sur des milliers de résultats de mesures recueillis depuis les années 1960.

Afin de caractériser la situation actuelle, en complément de la surveillance annuelle, ils ont réalisé sept constats radiologiques régionaux. Menés en Val de Loire, vallée du Rhône, Méditerranée..., ces derniers sont basés sur des campagnes de prélèvements d'échantillons et de leurs analyses³.

1. Les concentrations sont le plus souvent inférieures à 1 Bq/kg dans les denrées et de l'ordre du µBq/m³ dans l'air.
2. Ces zones sont disséminées principalement dans l'est du pays : les Vosges, le Jura, la vallée du Rhône...
3. Pour le constat Normandie et Hauts-de-France par exemple, les scientifiques effectuent près de mille analyses.

www Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/synthese-bruit-fond



Santé



Cette coopérative japonaise, dans la préfecture de Fukushima, vend la production agricole après des contrôles systématiques.

© Noa / Le bar Floreal / Radiatécologie, IRSN

“ En cas d'accident, le spectre est complexe en raison d'un grand nombre de radioéléments.

Denrées contaminées

Des contrôles plus rapides grâce à un nouvel appareil

Sur des territoires contaminés par des rejets radioactifs à la suite d'un accident nucléaire, quels aliments peuvent être consommés ? Pour le déterminer, des contrôles rapides de leur éventuelle contamination sont indispensables.

Un nouvel appareil dénommé Tri-Latac, destiné au contrôle des denrées, est en cours de développement. Afin de statuer sur leur consommation, il vérifie leur niveau de contamination.

Tri-Latac est opérationnel pour la mesure des échantillons d'eau. Des étalonnages sont en cours pour les autres produits alimentaires.

Quels sont ses avantages ? Il identifie rapidement des radionucléides – césium 137,

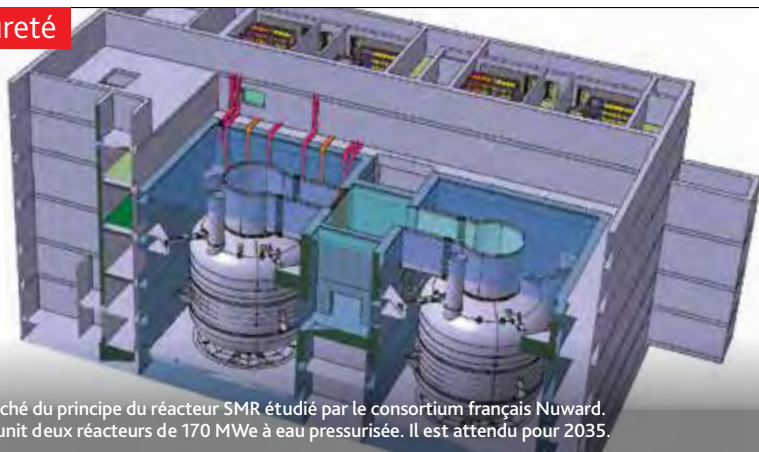
iode 131, etc. – grâce à un nouvel algorithme de traitement des spectres gamma, appelé démelange spectral*. Il est équipé d'un détecteur gamma adapté aux conditions de terrain et se transporte aisément pour être utilisé localement. Son emploi est facile pour des non-initiés.

Cet appareil est élaboré par le Laboratoire de mesure nucléaire (LMN) de l'IRSN, situé au Vésinet (Yvelines) et le Laboratoire national Henri Becquerel (Gif-sur-Yvette, Essonne).

* Son principe est de décomposer le spectre mesuré en spectres individuels des radioéléments présents.

WWW Pour en savoir plus :
Le démelange spectral
www.irsn.fr/demelange-spectral

Sûreté



Ecorché du principe du réacteur SMR étudié par le consortium français Nuward. Il réunit deux réacteurs de 170 MWe à eau pressurisée. Il est attendu pour 2035.

Systèmes de refroidissement passif Leur performance est à l'étude

Les réacteurs de nouvelle génération, tels que les petits réacteurs modulaires de faible puissance (SMR¹), recourent en situation accidentelle à des systèmes de sûreté passifs. Ceux-ci – échangeur de chaleur immergé, circulation d'eau par thermosiphon dans des conduites... – évacuent la puissance résiduelle et emmènent le réacteur dans un état sûr, où toutes les fonctions de sûreté sont assurées. Ils fonctionnent sans apport d'énergie externe ni intervention humaine, grâce à des phénomènes naturels : force gravitationnelle, différence de pression...

L'IRSN s'interroge sur la fiabilité de ces systèmes, notamment les éléments qui

pourraient perturber leur fonctionnement et dégrader leur performance. Le projet Pastis² prévoit le développement dans les Bouches-du-Rhône, à Cadarache, de deux installations expérimentales. But : étudier la circulation naturelle dans une tuyauterie d'un mélange eau-vapeur et le refroidissement d'une enceinte de confinement immergée.

1. Small Modular Reactors.
2. Passive Systems Thermalhydraulic Investigations for Safety (Évaluations de la sûreté des systèmes passifs d'évacuation de puissance), projet financé dans le cadre de France 2030 par l'ANR, opérateur de l'État.

WWW Pour en savoir plus :
Note d'information sur la sûreté des SMR
www.irsn.fr/2021-surete-SMR

Radioprotection

Le partenariat de recherche Pianoforte

Contribuer à la lutte contre le cancer en personnalisant le suivi médical des patients, voilà un des multiples objectifs du partenariat de recherche Pianoforte. Il étudie notamment les effets secondaires des traitements qui utilisent des rayonnements ionisants et les différences de radiosensibilité des patients. Il vise à augmenter la résilience en situation de crise nucléaire ou radiologique et de gestion post-accidentelle, via le développement de nouveaux outils de prise en charge des populations. La Commission européenne vient de sélectionner ce partenariat coordonné par l'IRSN, mené conjointement par cinquante-huit partenaires¹. Il implique un effort considérable de recherche dans de multiples domaines, que seul peut entreprendre un large consortium d'acteurs. Sélectionné dans le cadre d'Horizon Europe², il favorise une vision partagée de l'avenir de la radioprotection. Prévu sur cinq ans, le partenariat devrait s'achever en 2027.

1. Partenaires issus de vingt-deux pays d'Europe, Royaume-Uni et Norvège.
2. Programme-cadre de recherche et d'innovation de l'Union européenne.

WWW Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/projet-pianoforte

FAITS ET PERSPECTIVES



Carottage d'un sol forestier.

© Frédéric Copin/Médiathèque IRSN



Des échantillons de cèdre japonais – écorce et tronc – sont utilisés pour le volet continental du projet Amorad.

© PRF-ENV/SERIS/L2BT/Médiathèque IRSN

Contamination de l'environnement

Quels sont les nouveaux savoirs sur les transferts de la radioactivité ?

Forêt, rivière, océan... Comment se transfèrent les radionucléides dans ces écosystèmes à la suite d'un rejet radioactif ? Grâce au programme de recherche Amorad, ces flux sont mieux appréhendés. En cas d'accident, ces connaissances aideront à déterminer les conséquences sur l'homme et l'environnement.

Février 2022. Le ministère de la Santé japonais suspend des livraisons de poissons de roche pêchés au large de la préfecture de Fukushima au Japon. Les niveaux de césium 137¹ mesurés sur un lot s'avèrent quatorze fois supérieurs à la limite de commercialisation.

Onze ans après l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi, les niveaux de radioactivité dans les poissons ont décliné, mais de manière très variable selon les espèces, leur habitat et leur régime alimentaire. Ceux vivant sur le fond restent les plus atteints, car leur alimentation est liée aux sédiments qui piègent la radioactivité.

Pour évaluer les conséquences d'un accident nucléaire avec des rejets radioactifs, il est nécessaire de comprendre les interactions

entre les radionucléides, les sédiments et la faune. Puis, il faut développer des outils de modélisation pour estimer les transferts vers les poissons et les crustacés consommés par l'homme. C'est l'objectif du projet Amorad – Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement – coordonné par l'IRSN. Focalisé sur les conséquences d'un rejet radioactif en milieux marin et continental, il vient de se terminer après huit années de recherche.

Chaînes alimentaires complexes

L'acquisition de données et la prise en compte de processus peu étudiés jusqu'ici aident à améliorer la représentation des phénomènes de dépôt-érosion des particules

sédimentaires en zone côtière. Elles contribuent à appréhender le transfert du césium 137 dans l'ensemble d'un réseau dit trophique, reposant sur les relations alimentaires entre espèces. Il est désormais possible de simuler les phénomènes de dépôt et de remise en suspension de sédiments dans l'estuaire de la Gironde² ou dans le golfe du Lion en Méditerranée³.

Pour les chaînes trophiques, les modèles validés sur Fukushima, puis mis en place sur le golfe du Lion, peuvent anticiper l'évolution des activités de radionucléides dans différents organismes marins. Mollusques, algues, poissons... les scientifiques sont capables de prédire rapidement ces variations dans un périmètre contaminé pour une catégorie donnée. Ils peuvent cibler une espèce spécifique, depuis le phytoplancton jusqu'aux grands prédateurs. Pour ces derniers, l'adaptation du modèle⁴ au golfe du Lion a pris une année.

Le calcul à l'échelle d'un groupe d'organismes devrait être exploité courant 2023 par le centre technique de crise (CTC) de l'IRSN (Hauts-de-Seine). En cas d'accident

radiologique, il envisage d'exploiter ces outils pour définir la situation et son évolution potentielle, puis d'évaluer les conséquences sur l'environnement et la population, afin de conseiller les pouvoirs publics.

Des bassins versants à la mer

Pour les aspects continentaux, les études au Japon portent sur le transfert du radiocésium après son dépôt à l'échelle des bassins versants et dans le continuum terre-mer. Le modèle Watersed⁵ d'érosion de sol et de transport des particules vers les rivières est amélioré et adapté à la zone de Fukushima et au césium 137. Il démontre le rôle important des rizières dans l'origine de la matière solide transportée. Les suivis du césium 137 sur les particules prélevées dans les rivières confirment que les opérations de remédiation des sols mises en place – décapage et remplacement – participent à la diminution des apports aux rivières (*lire p. 8*).

Les données sur le radiocésium en forêt – au Japon, en France et en Ukraine – et sa répartition entre les sols et les arbres font progresser les connaissances. En fonction de la quantité de césium déposée, un ordre de grandeur de la contamination attendue dans le bois de production – chauffage ou construction – peut être fourni rapidement. Autre avancée : la prédiction de sa répartition au cours du temps entre feuillage, litière, couches de sol, tronc, branche et racine, ainsi qu'à l'échelle de l'écosystème forestier. Celle-ci est rendue possible par les modèles Tree4 et Trips⁶.

Le césium n'est pas le seul en ligne de mire. La thèse en biogéochimie de Marine Roulier explore le comportement de l'iode dans le système sol-forêt. Ses travaux montrent que la couche organique du sol – l'humus – est une zone d'accumulation provisoire. Elle contribue ensuite à la réémission vers l'atmosphère et le sol par lessivage et volatilisation.

Renseigner les pouvoirs publics

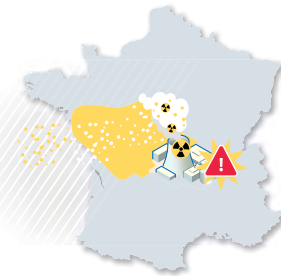
Amorad fournit diverses avancées innovantes en métrologie et en statistiques. Ces dernières sont appliquées à la prévision des activités en césium 137 dans les cours d'eau japonais (*lire p. 8*) et au développement d'un système expert pour le milieu marin. Celui-ci permet de préciser le terme source d'une contamination en utilisant des rétro-calculs, des probabilités et des résultats de modèles hydrodynamiques.

PROCESS

Comment chiffrer l'impact environnemental d'un accident nucléaire ?

Pertes d'exploitation, denrées contaminées... Les conséquences environnementales d'un accident ont un coût. Les experts l'estiment avec un ou plusieurs modèles complémentaires. Illustration pour la pêche¹ et l'agriculture.

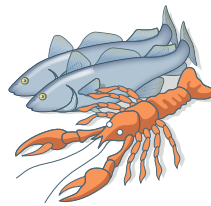
Le scénario d'un accident est créé



Un **accident grave (AG)** fictif survient dans une centrale nucléaire. Les rejets importants de **césium 137** affectent le **bassin versant de la Loire**, jusqu'à la **zone de pêche de l'Atlantique nord**. Les experts utilisent la **modélisation pour estimer les conséquences économiques**.

Les conséquences sur 20 ans sont modélisées dans le cadre du projet Amorad² Voici deux exemples

Cas de la pêche



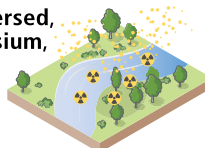
Cinq étapes se succèdent pour estimer le coût des pertes économiques.

1 La plateforme C3X estime l'activité de césium 137 déposée

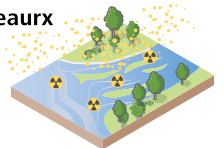
– sols, cours d'eau, végétation –, à partir des données de rejets et de modèles de dispersion atmosphérique de ces rejets.



2 Le logiciel Watersed, avec le module Césium, modélise son transport via le ruissellement et l'érosion.



3 Le logiciel Casteaux estime le transfert de césium 137 dans les réseaux hydrographiques jusqu'à l'océan.



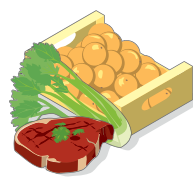
4 Le logiciel Sterne³ modélise le transfert de la radioactivité dans l'eau, la faune et la flore des zones de pêche touchées.



5 Le logiciel Arpagon évalue les pertes économiques. Elles sont dues à l'interdiction de vente des produits de la pêche dépassant un seuil de contamination en Bq/kg⁴.



Cas de l'agriculture



Pour chiffrer les pertes, **Arpagon estime la contamination des denrées agricoles** à partir de l'activité surfacique mesurée par C3X.

1 Les denrées au-dessus des seuils⁵ et interdites de commercialisation sont identifiées. Pour déduire le coût sans actions de remédiation, **Arpagon s'appuie sur les valeurs marchandes** des productions agricoles.

300 M€

1. Pêche dont mollusques et crustacés, rapport IRSN 2021-00717.

2. La première année après l'AG, le coût des pertes correspond à la valeur des produits agricoles qui doivent être jetés. Les années suivantes, l'hypothèse est que la production cesse dans les territoires trop contaminés. Les pertes correspondent alors au montant de la valeur ajoutée non réalisée à cause de l'AG.

3. Simulation du transport et des transferts d'éléments radioactifs dans l'environnement marin.

4. Ces seuils valables pour l'Union européenne sont issus des politiques de radioprotection des consommateurs instaurées à la suite des accidents de Tchernobyl et de Fukushima Daiichi.

5. Communauté européenne de l'énergie atomique, Euratom.

FAITS ET PERSPECTIVES



© Mireille Amand/Médiathèque IRSN

Campagne de pêche dans le golfe du Lion, en Méditerranée.

Un dernier volet⁷ de ce projet porte sur l'évaluation des conséquences économiques dues aux pertes des ressources forestières et aquatiques ou aux obligations de l'arrêt d'alimentation en eau potable et d'irrigation (voir infographie p. 7). Les résultats vont jusqu'à montrer les conséquences économiques d'une perte d'activités récréatives en forêt. ■

1. Pour les denrées marines de Fukushima, 100 Bq/kg de césium 137 est la limite de commercialisation.
2. Modèle Mustang de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer).
3. Modèle Symphonie du Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos).
4. Modèle Golem du Laboratoire sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques (LRTA).
5. Modèle Watersed du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).
6. Tree4 du Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes terrestres (LR2T) de l'IRSN prédit l'évolution du césium 137 dans les compartiments du système sol-arbre. Trips de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) reproduit le cycle de ce radioélément en écosystème forestier.
7. Modèle Arpagon du Laboratoire d'analyse économique des risques nucléaires (Lern).

WWW Pour en savoir plus :
 Amorad www.irsn.fr/amorad
 Thèse de Marine Roulier
www.irsn.fr/Roulier
 Le centre technique de crise de l'IRSN :
www.irsn.fr/Crise-Role-IRSN

WEBMAGAZINE

À LIRE
3 questions à... Yuichi Onda
www.irsn.fr/RS5

Comment Amorad alimente-t-il l'action de l'État ?

En cas d'accident sur une centrale située le long d'un fleuve, ce projet représente de façon plus réaliste le transfert de radionucléides vers les réseaux trophiques* de l'écosystème marin. Les estimations de la contamination radioactive du littoral fournies par ce projet collaboratif international – qui implique treize partenaires – définissent des zones d'interdiction de pêche, d'accès aux plages ou à la navigation de plaisance.

Quelles informations sont disponibles ?

Les modèles aident à protéger la population. Ils fournissent une cartographie de l'évolution de la contamination dans tous les compartiments marins sur plusieurs mois, voire plusieurs années. Il est possible de déterminer le risque lié à l'ingestion de produits de la mer potentiellement contaminés – poissons, coquillages, algues – selon les espèces et les zones de prélèvement. En aidant un territoire affecté, Amorad facilite sa résilience. Il nourrit les travaux du Comité directeur

pour la gestion de la phase post-accidentelle (Codirpa).

Qu'est-ce que le Codirpa ?

Le Codirpa est créé en 2005 par l'ASN à la demande du Premier ministre. Il regroupe des experts de l'IRSN, des exploitants, des représentants des services de l'État et de la société civile. Il propose au gouvernement des recommandations sur la gestion d'un territoire contaminé.

* Ensemble de chaînes alimentaires reliées au sein d'un écosystème.

3 questions à... Florence Gabillaud-Poillion

Chargée de la gestion post-accidentelle à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)



© Coll privée



Les spécialistes de l'Institut et de l'Université de Fukushima font des prélèvements au large du Japon.

AILLEURS

Japon : de nouveaux résultats

« Nous avons été surpris par la rapide baisse de la contamination des sols et des rivières après l'accident de Fukushima Daiichi », annonce Yuichi Onda. Ce spécialiste des isotopes, professeur au Japon à l'Université de Tsukuba, est le pilote du volet nippon du projet Amorad (lire webmag). Cette baisse des teneurs en césium 137 est en effet plus rapide qu'après l'accident de Tchernobyl. Les scientifiques japonais et français impliqués dans le projet l'expliquent par la remédiation humaine – notamment le décapage du sol – et un fort

ruissellement. Ce résultat pourrait servir en cas d'accident en Asie, le climat et la végétation étant similaires. Les études sur la forêt se révèlent au contraire proches de ce qui s'est passé près de Tchernobyl : la contamination est forte et durable. « L'équipe française nous a beaucoup appris, notamment sur l'échantillonnage en forêt », précise Yuichi Onda. Pour parfaire la compréhension du cycle du césium dans la nature – et la radioprotection –, il espère poursuivre l'étude.

* Yuichi Onda et al., Nat Rev Earth Environ. 2020.

Ça barbote !

Léonard de Vinci s'est intéressé à la façon dont les bulles d'air remontent à la surface de l'eau. Est-ce de façon rectiligne ou en zigzagant ? Pour les chercheurs du Laboratoire de radioécologie (LRC) de Cherbourg-en-Cotentin (Manche), la question n'est pas là. Au lieu de s'intéresser à leur trajectoire, ils souhaitent prédire la dispersion de radionucléides – l'iode 131, le césium 137... – en mer, en cas de rejets accidentels d'une centrale nucléaire.

Sur cette photo, les bulles d'air présentes à la surface sont créées par l'agitation de 120 litres

d'eau de mer par injection d'air comprimé au fond d'un bidon, à travers quatre tubes en plastique. Elles provoquent un mouvement de l'eau ou une agitation par barbotage. L'eau est filtrée puis mélangée à des composés chimiques – permanganate de potassium, ferrocyanure... – afin de former des cristaux solides aptes à piéger les radionucléides. Une extraction suit. Son rendement, proche de 100 %, est presque parfait. Leurs concentrations sont mesurées par spectrométrie gamma. Ces données alimentent des modèles, tel le modèle Sterne

Claire Voiseux
Denis Maro

Radioécologistes

– simulation du transport et du transfert d'éléments radioactifs en environnement marin. En cas de rejets radioactifs accidentels, il pourrait être utilisé par les experts de l'IRSN au centre technique de crise à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine). Il simule la dispersion des radionucléides en mer et calcule les concentrations prévisibles dans les sédiments et les différentes espèces marines : poissons, crustacés, algues. Il pourrait ainsi aider à évaluer les conséquences radiologiques pour l'environnement et l'homme. ■



L'appareil de tomographie par émission monophotonique couplé à un scanner (TEMP/TDM) est étalonné avec un fantôme contenant une activité radioactive connue. Nadège Anizan de l'institut Gustave Roussy (à gauche) et Stéphanie Lamart de l'IRSN (à droite) entreprennent cet étalonnage.

27

nouveaux radionucléides sont recensés et classifiés à l'occasion de l'expertise « Nouveaux médicaments radiopharmaceutiques ».

Médicaments radiopharmaceutiques

Quelles perspectives pour le patient ?

De nouveaux médicaments radiopharmaceutiques utilisés en médecine nucléaire soulèvent des questions. Quelle est la dose absorbée pour quelle efficacité ? Comment protéger le patient, son entourage, les professionnels ? L'IRSN conduit des études et émet des recommandations.

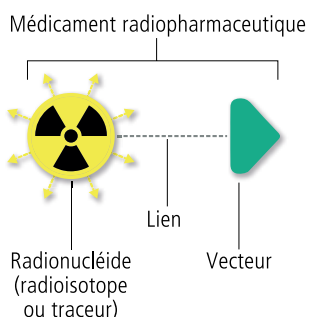
EN CLAIR

Quel est le mode d'action d'un médicament radiopharmaceutique ?

Un médicament radiopharmaceutique est utilisé en diagnostic ou en thérapie. Quelle est sa structure ? Comment est-il véhiculé dans l'organisme ?

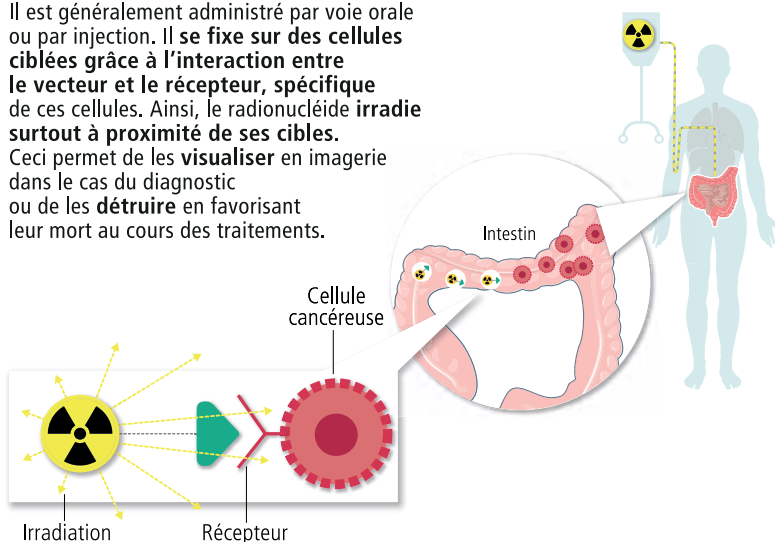
Qu'est-ce qu'un médicament radiopharmaceutique ?

Un médicament radiopharmaceutique délivre un rayonnement – assuré par un radionucléide – dans un organe ou tissu précis, qu'il reconnaît grâce à sa partie vecteur, spécifique des cellules cancéreuses présentes dans cette cible.



Comment fonctionne-t-il ?

Il est généralement administré par voie orale ou par injection. Il se fixe sur des cellules ciblées grâce à l'interaction entre le vecteur et le récepteur, spécifique de ces cellules. Ainsi, le radionucléide irradie surtout à proximité de ses cibles. Ceci permet de les visualiser en imagerie dans le cas du diagnostic ou de les détruire en favorisant leur mort au cours des traitements.



Lutétium 177 oxodotréotide. Ce nom cache un traitement anti-cancer représentatif d'une nouvelle vague de médicaments dits radiopharmaceutiques. Depuis 2017, il bénéficie d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour une indication contre un type de tumeurs du système digestif.

« Les nouveaux médicaments radiopharmaceutiques utilisés pour traiter les cancers ouvrent la voie à un nouvel essor de la médecine nucléaire », salue Célian Michel, expert en radioprotection médicale à l'IRSN. Ils comportent un radionucléide « tueur » – émettant un rayonnement à visée thérapeutique, ici le lutétium 177 – et un vecteur – une molécule qui lui assure un point d'ancrage près de l'organe ou de la lésion (voir infographie ci-contre).

Repères explore les nouveautés en médecine nucléaire liées à l'arrivée de ces nouveaux médicaments, qu'il s'agisse des radionucléides d'utilisation récente ou des associations innovantes incluant un vecteur.

L'iode 131, le pionnier

En thérapie, les médicaments radiopharmaceutiques irradient de manière ciblée une tumeur. En diagnostic, ils servent à suivre le fonctionnement d'un organe, en visualisant par imagerie les rayonnements émis.

Leur essor remonte aux années 1940, avec l'utilisation de l'iode 131. En se fixant dans la thyroïde, ce dernier attaque par irradiation les cellules tumorales. « Tous les radionucléides ne se fixent pas naturellement dans un tissu précis, remarque David Broggio, expert en rayonnement interne. Les nouveaux vecteurs offrent la possibilité de cibler une plus grande variété de tumeurs. »

Depuis quelques années, de nombreux médicaments innovants font l'objet d'essais cliniques et obtiennent des AMM. Porteurs de radionucléides émetteurs bêta et alpha, ils soulèvent des questions de radioprotection pour les patients – la nécessité d'un traitement efficace et sans danger –, leur entourage et les professionnels de santé.



Les travaux sur les nouveaux médicaments radiopharmaceutiques sont menés par des experts. De gauche à droite : Michel Celian, Stéphanie Lamart et David Broggio.

Boama Tarlet-Cauteur/Signatures/Médiathèque IRSN



Boire régulièrement et abondamment – 1,5 à 2 litres d'eau par jour – facilite l'élimination par voie urinaire et fécale. Des laxatifs peuvent être prescrits pendant l'hospitalisation.



Se doucher de façon quotidienne aide à éliminer la radioactivité excrétée par la peau.



Mâcher les substances qui font saliver accélère l'élimination de l'iode 131 présent au niveau des glandes salivaires après un traitement de la thyroïde.

Quelques consignes pour optimiser la radioprotection du patient issues de la revue de la littérature internationale.

© Art Presse/ABC Communication/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

“ L'idéal serait de réaliser des traitements personnalisés avec les médicaments radiopharmaceutiques.

En avril 2020, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) saisit l'IRSN. Pour investiguer cette problématique émergente, il doit « réaliser une expertise sur les perspectives d'utilisation clinique des nouveaux radionucléides en médecine nucléaire, afin d'anticiper leur arrivée sur le marché français et leur impact pour la radioprotection », précise Carole Rousse, directrice des rayonnements ionisants et de la santé auprès de l'Autorité.

www Pour en savoir plus : Travaux de l'IRSN sur les nouveaux radionucléides en médecine nucléaire www.irsn.fr/nouveaux-radionucléides-medicine-nucleaire

250 études examinées

La première partie de l'expertise dresse un état des lieux. Cette tâche d'envergure mobilise trois experts en radioprotection médicale, un chercheur et un spécialiste en pharmacologie à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine). Pendant sept mois, ils passent en revue environ cent-cinquante études sur les radionucléides et les vecteurs. Ils publient un premier rapport et l'avis associé en février 2021*. « Nous avons consulté une quinzaine de professionnels de la médecine nucléaire en France et en Europe, chercheurs et cliniciens, raconte Célian Michel. Nous souhaitons avoir une vision précise des radionucléides ayant le plus de chances d'être utilisés en routine clinique. Cela nous a aidés à les hiérarchiser. »

Les spécialistes les classent en plusieurs catégories. Pour quelques-uns, ayant une AMM définitive ou temporaire, l'utilisation clinique est « certaine ». Parmi eux le radium 223, indiqué pour traiter des métastases osseuses de cancer de la prostate. La deuxième catégorie regroupe ceux à l'utilisation « très probable », en cours d'essais cliniques avancés. Le même classement est appliqué aux radionucléides diagnostiques.

20

spécialistes en médecine nucléaire sont consultés pour l'expertise « Nouveaux médicaments radiopharmaceutiques ».

Le deuxième volet de cette expertise – avec rapport et avis* – aborde le traitement du malade et sa radioprotection. Les spécialistes analysent une centaine d'études scientifiques et d'essais cliniques. La problématique concerne l'efficacité : « Les études cliniques sur lesquelles repose l'AMM préconisent uniquement une activité, relève David Broggio, c'est-à-dire une certaine quantité de radionucléide à injecter associée à un résultat thérapeutique meilleur que les traitements existants. Cependant, tous les patients ne fixent pas le radionucléide de la même façon. » La dose de rayonnement délivrée dans les différents organes dépend de processus physiologiques eux-mêmes fonction du sexe, de l'âge, du stade de la maladie... « L'administration d'une même activité amène à sur-traiter ou à sous-traiter certains patients », poursuit l'expert.

Concernant la radioprotection du malade, de son entourage et des professionnels de santé (lire p. 14), « nous manquons de données sur l'élimination de la radioactivité par l'organisme au cours du temps. C'est un frein pour optimiser les mesures de radioprotection », observe David Broggio.

Des traitements personnalisés

Au terme de ses recherches, l'IRSN émet des propositions. La principale : réfléchir à la possibilité d'intégrer l'approche dosimétrique lors des essais cliniques, puis en routine (lire p.13). « La détermination de la dose passe par l'acquisition de données d'imagerie », indique Célian Michel. David Broggio illustre : « Pour certains patients fixant mal les radionucléides, les praticiens peuvent injecter un peu plus d'activité, afin d'augmenter les chances de nuire à la tumeur. Ils veillent à garantir l'absence d'effets secondaires sur des organes sains. »

Les experts préconisent d'améliorer les connaissances sur la biocinétique – processus d'évacuation des médicaments. Ils recommandent de mieux comprendre comment le rayonnement, distribué lentement et de manière irrégulière – à l'inverse de

la radiothérapie externe –, affecte différents organes. « Il s'agit de mieux connaître la relation entre la dose et l'effet », note David Broggio.

L'IRSN contribue à plusieurs projets de recherche pour combler ces lacunes. Il collabore avec l'institut Gustave Roussy pour établir une dosimétrie personnalisée de patients traités à l'iode 131 (lire p.16).

Réduire les incertitudes

Comment passer de l'activité injectée à la dose délivrée à l'organe ou à la tumeur ? Plusieurs examens d'imagerie aident à évaluer cette dose absorbée. « Chaque stade a des sources d'incertitudes, liées par exemple aux méthodes d'analyse des différentes images médicales du malade », observe Mohammed Bensiali, doctorant en dosimétrie interne à l'IRSN, à Fontenay-aux-Roses. *Peu de chercheurs ont considéré cette question, pourtant capitale.* Or, au final, l'incertitude globale sur l'estimation de la dose peut être « de l'ordre de 40 % sur certaines métastases de petite taille », chiffre-t-il. Dans le cadre de sa thèse¹, le chercheur développe une méthode statistique basée sur les réseaux bayésiens². Elle corrèle et cumule les différentes sources d'incertitudes. L'espoir, à terme, est d'augmenter la fiabilité des méthodes d'évaluation de la dose à l'organe.

L'approche dosimétrique fait débat parmi les praticiens. Elle suppose des moyens – logiciels d'interprétation, imagerie régulière après administration au patient, etc. – et des médecins nucléaires dûment formés. « Il reste beaucoup de travail pour développer des méthodes applicables en routine », confirme Jean-Philippe Vuillez. Ce médecin nucléaire au CHU de Grenoble (Isère) suit les travaux du groupe de travail Canpri³, dédié aux rayonnements ionisants pour la médecine. « L'expertise et les recherches menées par l'Institut alimentent la réflexion sur des protocoles qui sont loin d'être standardisés », conclut le praticien.

Quelles seront les suites de cet travail d'expertise ? « Nous étudions plusieurs recommandations de l'IRSN. Certaines questionnent le processus européen de mise sur le marché des médicaments et les informations à recueillir dans le cadre des essais cliniques », répond Carole Rousse. *L'ASN n'est pas compétente dans ce domaine. Elle portera ces sujets auprès de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé. Cela pourrait encourager le développement d'un volet dosimétrique dans les essais cliniques.* Idem auprès des autorités compétentes et des fabricants : l'ASN jouera son rôle de plaidoyer. ■

* Voir les rapports et avis en p. 16.

1. « Intégration des incertitudes associées à la dosimétrie personnalisée dans l'optimisation des radiothérapies internes », sous la direction de Didier Franck. www.irsn.fr/these-bensiali.

2. Ces réseaux permettent de formaliser les liens de cause à effet entre des variables d'intérêt. S'agissant de liens probabilistes, ils propagent les incertitudes des causes vers les conséquences.

3. Comité d'analyse des nouvelles techniques et pratiques médicales utilisant les rayonnements ionisants.

FOCUS

Logiciel

La standardisation des documents est nécessaire

Philippe, 50 ans, est traité pour un cancer de l'estomac à l'aide du radionucléide lutétium 177 (voir infographie p. 11).

Après l'injection du médicament, Philippe passe des examens d'imagerie – type tomographie par émission monophotonique (TEMP) – et le physicien médical évalue la dose de rayonnement réellement délivrée à la tumeur et aux organes sains.

Il utilise un logiciel qui analyse ces images et calcule la dose reçue.

Ce cas fictif illustre l'utilité de tels logiciels pour personnaliser les traitements.

En 2020, au cours d'une expertise sur les perspectives d'utilisation des nouveaux radionucléides* (lire p. 11), l'IRSN mène une revue bibliographique sur le sujet. Trois experts évaluent treize logiciels disponibles sur le marché.

Ils étudient leur documentation associée, contactent quelques fournisseurs et pointent des pistes d'amélioration.

« La documentation doit être plus explicite. Une standardisation est nécessaire. Tous les logiciels ne recourent pas aux mêmes méthodes de traitement d'image, ce qui génère parfois des résultats de calcul de dose différents pour un même cas », détaille

David Broggio, expert en rayonnement interne à l'IRSN.

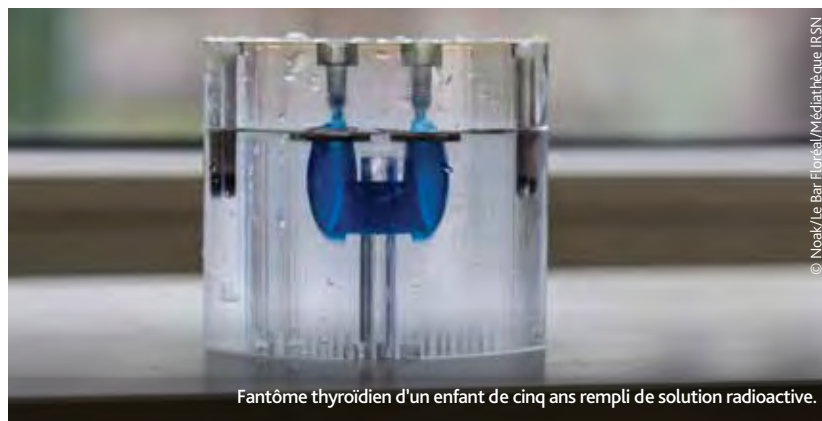
Ces observations, remises à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), aideront les fournisseurs de logiciels à améliorer leurs produits et les traitements.

* Rapport 2021-00484 et avis 2021-00117.

FOCUS

Estimation de dose

Des fantômes au secours de la thyroïde



Fantôme thyroïdien d'un enfant de cinq ans rempli de solution radioactive.

« Les traitements des maladies de la thyroïde par l'iode 131 sont peu personnalisés », remarque Laurent Ménard, chercheur en imagerie biomédicale à l'IJCLab Orsay (Essonne). *La dosimétrie est généralement rudimentaire. Notre ambition est de parvenir à la rendre précise, avant et pendant le traitement.* »

Le projet Thidos* développe de nouvelles méthodes quantifiant mieux les incertitudes liées aux calculs de dose. Il inclut le développement d'une gamma-caméra transportable à haute résolution, utilisable au lit du patient. L'objectif est de réaliser des images biologiques échelonnées dans le temps et de mesurer la dose

de radioactivité accumulée dans les organes, tout en respectant la radioprotection du personnel. Son étalonnage permet d'envisager une quantification précise, étape indispensable avant la phase clinique, prévue l'année prochaine.

La caméra est évaluée sur des fantômes réalistes de thyroïde remplis d'iode radioactif, avec et sans nodules, simulacres physiques conçus par l'IRSN en impression 3D.

* Collaboration Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab), Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi), Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine) et Institut Claudius Regaud, Toulouse (Haute-Garonne).

Les mesures de radioprotection au-delà du patient

Un patient traité en médecine nucléaire est temporairement une source de rayonnements. L'IRSN explore l'élimination des nouveaux médicaments radiopharmaceutiques. La radioprotection des personnes à son contact s'améliore.

En 2021, un nouveau médicament radiopharmaceutique – le lutétium 177 associé au vecteur PSMA¹ – reçoit une autorisation temporaire d'utilisation pour le traitement des cancers métastatiques de la prostate par radiothérapie interne vectorisée (voir infographie p. 11). Le service de médecine nucléaire (MN) du centre hospitalier régional universitaire (CHRU) de Nancy-Brabois (Meurthe-et-Moselle) l'adopte. « Nous l'administrons à raison de quatre à six cures, espacées de six à dix semaines », détaille Gilles Karcher, professeur de MN dans ce CHRU. L'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) envisage de l'autoriser pour le traitement à des stades plus précoces du cancer de la prostate.

L'arrivée de ce médicament va accroître le nombre de prises en charge. Plus de 50 000 nouveaux cas de ce cancer sont détectés en France chaque année. « Le nombre de patients traités pourrait être multiplié par dix, anticipe Gilles Karcher. Cela nécessite d'adapter les mesures de radioprotection pour limiter l'exposition de l'entourage et du personnel médical. » Sans oublier d'autres professions : égoutiers, transporteurs...

Personnels de l'assainissement

Cette adaptation commence dès l'hôpital. Les urines radioactives des malades sont collectées dans des cuves de décroissance. Il faut quatre à six mois pour que leur radioactivité ait décliné sous le seuil permettant le rejet à l'égout² (voir webmag).

Depuis 2019, l'application Cidrrre³ développée par l'IRSN estime la dose reçue par les



En cas de traitement en médecine nucléaire, les mesures de radioprotection visent les proches du patient et le personnel médical.

personnels des réseaux d'assainissement et stations d'épuration. Objectif : s'assurer que les rejets ne les exposent pas à plus d'un millisievert (mSv) par an⁴.

Cidrrre intègre l'activité totale de radionucléides administrés annuellement par un service de MN et le volume d'eau usée rejeté. « L'application est mise à profit quand le nombre de patients augmente ou dès qu'un nouveau médicament radiopharmaceutique est employé », illustre Éric Blanchardon, expert en radioprotection de la population.

L'entourage : quelle exposition ?

Quid du rayonnement émis par le patient ? « L'enjeu est de l'estimer au plus juste. Les précautions à prendre pour limiter l'exposition de son entourage ne doivent pas compliquer inutilement le quotidien de chacun », répond David Célier, expert en radioprotection.

Lors de la sortie du patient de l'hôpital, une mesure du rayonnement à un mètre est réalisée. Cette donnée, associée à un modèle de décroissance radioactive, estime la durée pendant laquelle des précautions doivent être prises.

Si après administration d'un médicament radiopharmaceutique une fraction de la radioactivité est excrétée très rapidement, une autre reste plus longtemps dans le corps. En raison d'un nombre de malades potentiels élevé, les traitements du cancer de la prostate avec le lutétium 177 pourraient être réalisés en ambulatoire avec une sortie le jour de l'injection (lire p. 11). L'IRSN élabore une nouvelle méthode de calcul de l'exposition. « Elle tient compte des deux phases d'élimination d'un médicament », précise David Célier. La méthode classique a été conçue pour le traitement du cancer de la thyroïde avec l'iode 131. Comme l'hospitalisation dure environ quarante-huit heures, le modèle de décroissance considère que l'excrétion rapide est terminée quand il rentre à domicile.

Deux mètres de distance

L'Institut explore les nouveaux médicaments radiopharmaceutiques (lire p. 11). En 2021, deux rapports et avis⁵ résument ses recommandations pour la radioprotection. Depuis 2020, le réseau européen Eurados⁶, dont l'IRSN fait partie, évalue l'exposition de l'entourage. Son projet combine des

modèles numériques du corps humain et des codes de calcul Monte-Carlo⁷. « Il doit fournir des valeurs de référence, pour recommander aux patients la conduite à tenir », résume l'expert en rayonnement interne David Broggio.

Pour une enquête initiée en 2020 par le réseau des autorités européennes de radioprotection (Herca), les experts examinent les pratiques de radioprotection de l'entourage dans quatorze pays d'Europe, au Canada et aux États-Unis. Pour le lutétium 177, l'IRSN retient que le malade doit maintenir au moins deux mètres de distance avec les adultes durant sept jours ; quinze s'il côtoie de jeunes enfants ou des femmes enceintes. Pour mieux estimer les doses reçues par les proches, les experts préconisent des mesures de débit de dose à différentes hauteurs et distances du patient à sa sortie de l'hôpital. Qu'en est-il de la radioprotection des personnels en MN ? En 2021, l'IRSN enquête auprès de quinze centres. Aucune contamination atmosphérique significative n'est relevée. « Les données sont encore limitées », souligne Célian Michel, physicien médical. L'approche dosimétrique aidera à améliorer les connaissances. ■

1. Le vecteur PSMA-617 cible l'antigène membranaire spécifique de la prostate (PSMA), surexprimé dans les cellules cancéreuses.
2. 100 Bq/L pour le lutétium 177 et l'iode 131 utilisés en traitement, 10 Bq/L pour les radionucléides utilisés en diagnostic.
3. Calcul d'impact des déversements radioactifs dans les réseaux <https://cidre.irsn.fr/>
4. La réglementation française fixe à 1 mSv/an la dose efficace maximale due aux activités nucléaires pouvant être reçue par la population.
5. Rapports IRSN 2021-00484 et 00753, avis IRSN 2021-00117 et 00175. www.irsn.fr/nouveaux-radionucléides-medicine-nucleaire
6. European radiation dosimetry group <https://eurados.sckcen.be/>
7. Logiciel simulant les lois de la physique des particules.

WEBMAGAZINE



À LIRE
Mesurer l'exposition des égoutiers avec l'application Cidre
www.irsn.fr/R37



À LIRE
Radioprotection des travailleurs
www.irsn.fr/R53

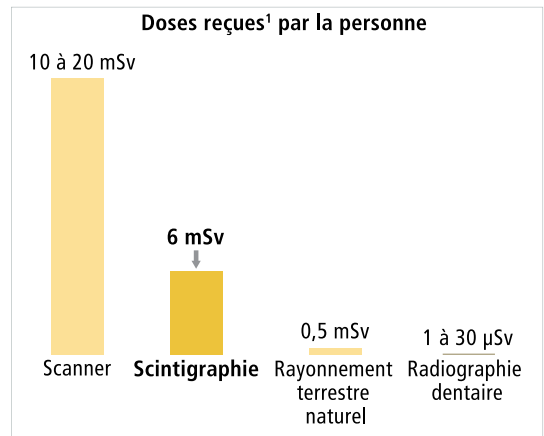
EN CLAIR

Scintigraphie : comment évaluer l'exposition de l'entourage d'un patient ?

À la suite d'une scintigraphie, l'entourage du malade peut être exposé. Des simulations sont réalisées pour déterminer les doses reçues. L'objectif : définir des mesures de radioprotection pour des personnes à proximité.

1 Un médicament radiopharmaceutique est administré

Jean-Charles est traité pour un cancer primaire. Une scintigraphie par injection technétium 99m est réalisée à des fins de diagnostic, pour rechercher d'éventuelles métastases osseuses.

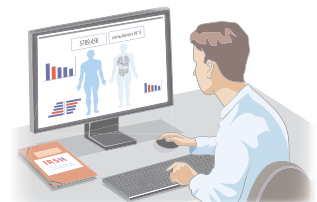
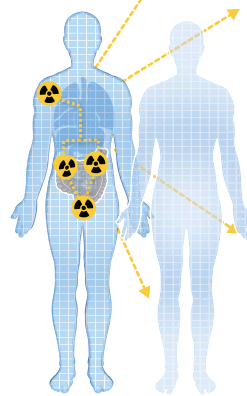
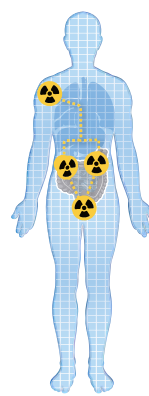


2 L'exposition de l'entourage du patient est estimée

Des scientifiques² utilisent un modèle numérique du patient pour simuler la concentration du technétium 99m dans ses organes : tumeurs osseuses, reins, vessie...

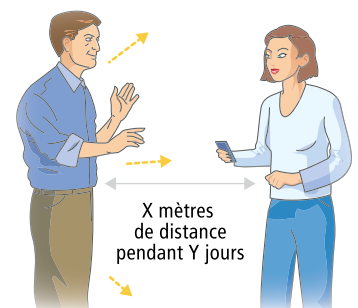
Ils placent un autre modèle correspondant à une personne de l'entourage – femme, enfant... – en face du modèle patient.

Avec un code de calcul Monte-Carlo, des rayonnements sont émis depuis le patient vers cette personne de l'entourage. La dose globale reçue par celle-ci, ou un de ses organes, est déterminée.



3 Les mesures de radioprotection seront définies

Cette étude fournira aux services de médecine nucléaire des outils de calculs – abaques – pour estimer la dose efficace reçue par l'entourage dont l'ordre de grandeur est de l'ordre de 20 µSv. Des recommandations de radioprotection pour les proches pourront être élaborées, notamment pour les nouveaux médicaments radiopharmaceutiques.



1. Ordre de grandeur.
2. Etude menée par des scientifiques de l'IRSN et du réseau Eurados (European Radiation Dosimetry Group).



Photoreportage : © Célia Gourmand/Médiathèque IRSN

1 Nadège Anizan, physicienne médicale à Gustave Roussy (GR) à Villejuif (Val-de-Marne), règle l'appareil de tomographie par émission monophotonique couplé à un scanner (TEMP/TDM). Cet imageur médical détecte le rayonnement émis par l'iode 131 et permet de visualiser sa répartition dans les organes.

2 Les résultats de la TEMP sont visibles en temps réel dans la salle d'acquisition. Les deux spécialistes Nadège Anizan et Stéphanie Lamart, physicienne médicale et chercheuse à l'IRSN (à droite), les analysent conjointement.

3 Le logiciel Oedipe estime de façon personnalisée la dose réellement délivrée à l'organe, ici les poumons.

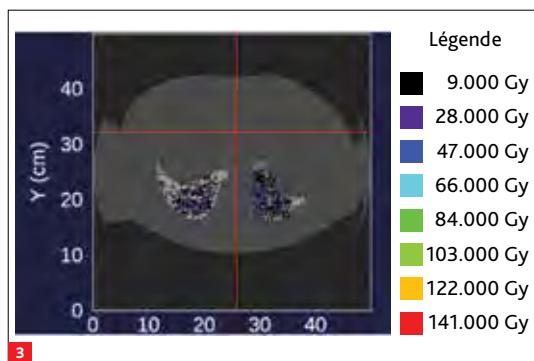
REPORTAGE Comment personnaliser la quantité d'iode 131 administrée à des patients atteints de cancer de la thyroïde métastatique ? Gustave Roussy et l'IRSN collaborent pour atteindre cet objectif.

Traitement du cancer

Mieux connaître la dose absorbée



2



3

© IRSN

Nadège Anizan, physicienne médicale à Gustave Roussy à Villejuif (Val-de-Marne), entre dans une pièce spacieuse aux murs blindés. Au centre trône un imposant appareil d'imagerie. Il est un élément clé de l'essai clinique Meraïode*, dont les données sont explorées en collaboration avec l'IRSN.

Ensemble, les deux instituts étudient la dose de rayonnements délivrée aux patients atteints de formes réfractaires de cancers métastatiques de la thyroïde, traités par une association thérapeutique incluant l'iode 131, un médicament radiopharmaceutique. Pour ces malades, il est important d'ajuster le traitement, afin d'en augmenter l'efficacité et de limiter les effets secondaires. « Or, aujourd'hui, l'activité n'est pas personnalisée », précise Nadège Anizan.

L'un des objectifs de cette étude est de calculer la dose délivrée au niveau des poumons sains et des métastases. « Nous vérifions a posteriori s'il existe une corrélation entre des toxicités et la dose reçue à l'organe », indique Stéphanie Lamart, physicienne médicale et chercheuse au Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi) à l'IRSN, dans les Hauts-de-Seine. Pour

l'évaluer, une image est acquise chaque jour, pendant quatre jours suivant la prise de l'iode 131. »

C'est là qu'intervient l'imposant dispositif d'imagerie. Quel est son intérêt ? Il combine deux modalités. Il réalise l'imagerie fonctionnelle des tissus – tomographie par émission monophotonique (TEMP) – pour visualiser la fixation du médicament radiopharmaceutique. Il assure l'imagerie anatomique – tomodensitométrie (TDM), communément appelée scanner – pour obtenir la densité des tissus. « Le logiciel Oedipe de l'IRSN agrège les données et permet à Gustave Roussy d'accéder à des estimations dosimétriques de référence », explique Stéphanie Lamart.

L'essai Meraïode touche à sa fin. Quarante patients sont inclus dans plusieurs centres français, dont une dizaine à Gustave Roussy. Les méthodes développées et mises en œuvre font avancer la recherche sur les traitements personnalisés en radiothérapie interne vectorisée, thématique en plein essor aujourd'hui. ■

* Essai clinique NCT03244956.

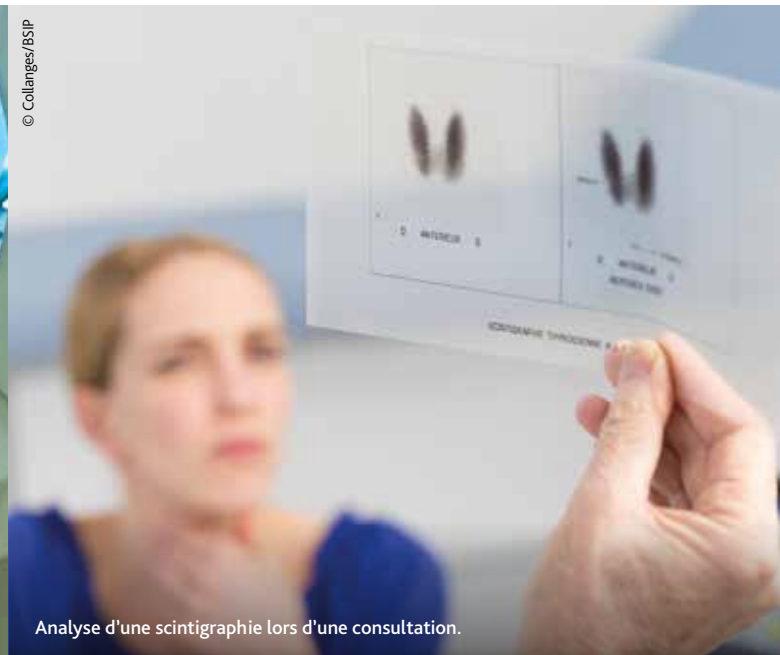
■ BIBLIOGRAPHIE

* Voir article p. 11 à 13
Rapport IRSN 2021-00083, avis IRSN 2021-00016
Rapport IRSN 2021-00484, avis IRSN 2021-00117
www.irsn.fr/nouveaux-radionucléides-médecine-nucléaire

* Voir article p. 14 à 15
Rapports IRSN 2021-00753, avis IRSN 2021-00175
www.irsn.fr/nouveaux-radionucléides-médecine-nucléaire



Examen de scintigraphie réalisé sur un patient.



Analyse d'une scintigraphie lors d'une consultation.

Traitement par irradiation de la thyroïde

Des fantômes donnent la juste dose

L'ESSENTIEL Traiter certaines maladies bénignes de la thyroïde implique d'administrer de l'iode 131. La capacité de la glande à fixer le radioélément doit être mesurée pour déterminer l'activité thérapeutique à injecter. **TÉMOIGNAGE** Un spécialiste en médecine nucléaire des hôpitaux universitaires Paris-Sud. **DÉCRYPTAGE** Comment les fantômes thyroïdiens sont-ils utilisés? **AVIS D'EXPERT** La chercheuse en dosimétrie interne à l'origine de l'innovation.



Emmanuel Durand

Chef du service de biophysique et médecine nucléaire des hôpitaux universitaires Paris-Sud (Kremlin-Bicêtre, Val-de-Marne)

TÉMOIGNAGE "La personnalisation du traitement pourrait limiter les effets secondaires"

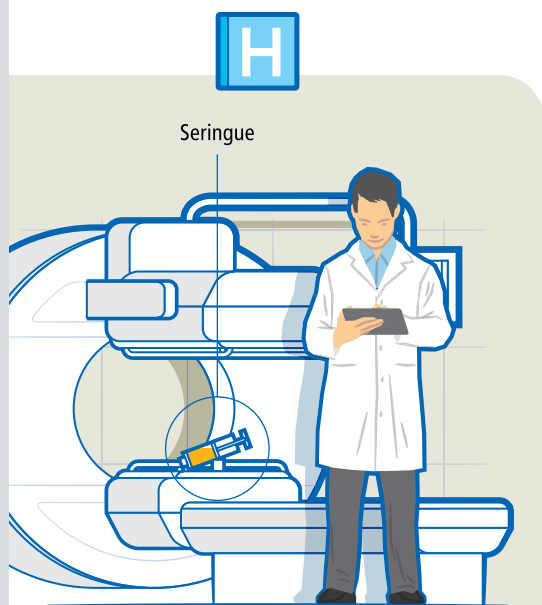
Les hyperthyroïdies en lien avec la maladie auto-immune de Basedow sont des maladies bénignes de la thyroïde prises en charge par les services de médecine nucléaire. Trois types de traitements les soignent : la chirurgie, qui consiste à enlever tout ou partie de la thyroïde, l'administration de médicaments bloquant la fabrication des hormones thyroïdiennes, ou l'injection d'iode radioactif destiné à détruire totalement ou partiellement la glande. On utilise de l'iode 131 – émetteur bêta et gamma avec huit jours de période – à des activités de l'ordre de 500 MBq pour une irradiation locale d'environ 100 Gy. Notre service traite 50 à 100 patients hyperthyroïdiens avec ce traitement chaque année. Au niveau national, ils sont près de 10000 à en bénéficier tous les ans. Pour qu'il soit efficace, il est nécessaire de vérifier, au préalable, que la thyroïde du patient capte le radioélément.

Une scintigraphie réalisée avec un élément radioactif comme l'iode 123 permet au praticien de s'en assurer. Du taux de captation mesuré avec cet examen découle la quantité d'iode 131 à injecter au patient pour traiter la maladie.

L'utilisation de fantômes thyroïdiens offre aujourd'hui l'opportunité de calibrer avec une plus grande précision la gamma-caméra permettant d'acquérir une image fonctionnelle de la thyroïde. En améliorant l'étalonnage de la mesure de fixation thyroïdienne, ces dispositifs nous aident à déterminer la dose d'iode 131 qu'il convient d'administrer à chaque patient. Cette forme de « personnalisation thérapeutique » pourrait contribuer à limiter certains effets secondaires comme l'hypothyroïdie. Cette dernière se manifeste dans plus de la moitié des cas et souvent plusieurs années après le traitement. ■

Comment les fantômes thyroïdiens sont-ils utilisés ?

Les fantômes de l'humaine. Ils sont d'étalonnage des notamment pour



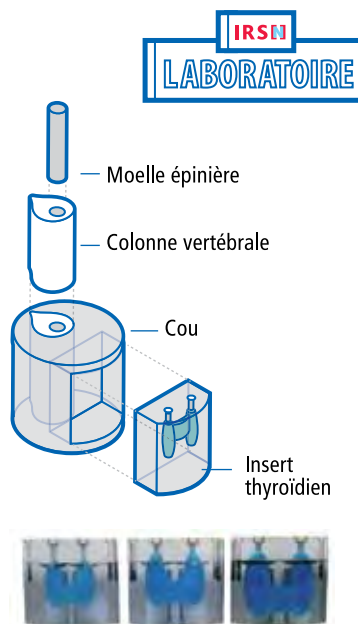
H

Seringue

1

À l'hôpital, la captation d'iode est mesurée

Une **scintigraphie** est réalisée avec une **gamma-caméra** pour obtenir une image fonctionnelle de la thyroïde. La **mesure de la captation d'iode** par la glande nécessite un **étalonnage** de l'appareil. En routine, ce réglage est réalisé par un **physicien médical** ou un **manipulateur**. Il utilise des **fantômes** souvent éloignés de la réalité anatomique, tels que des **seringues** remplies de radionucléides (iode 123, 131 ou technétium 99m).

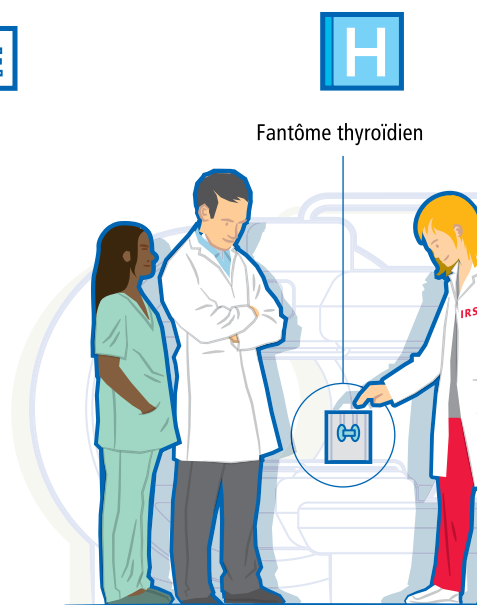


IRSN
LABORATOIRE

2

Des fantômes très réalistes sont fabriqués

L'IRSN conçoit des fantômes thyroïdiens dans son **Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi)**, dans les Hauts-de-Seine. Modélisés à l'aide d'un logiciel d'infographie, ils sont réalisés avec une imprimante 3D puis assemblés. Fabriqués dans une **résine plastique**, ils reproduisent de façon réaliste l'atténuation des rayonnements provoquée par le tissu adipeux de la thyroïde.



H

Fantôme thyroïdien

3

Les chercheurs réalisent des investigations

Objectif : identifier les **limites des méthodes d'étalonnage** actuelles. Avec les hôpitaux Bicêtre (Val-de-Marne) et Antoine-Béclère (Hauts-de-Seine), les chercheurs de l'IRSN analysent les résultats obtenus avec les protocoles de routine. Une **étude rétrospective** évaluera le **biais induit par la mesure** sur l'activité thérapeutique réellement administrée aux patients.



Tiffany Beaumont retire les fantômes de colonne vertébrale de l'imprimante 3D à l'aide d'une spatule.

© Noa/Le Bar - Floréal/Médiathèque IRSN

UTILISATION POST-ACCIDENTELLE

En cas d'accident nucléaire, l'iode 131 est l'un des radionucléides rejetés dans l'environnement. Il peut augmenter le risque de cancer radio-induit de la thyroïde, en particulier chez les enfants. Le jeu des fantômes conçus par l'IRSN couvre toutes les classes d'âge d'une population. Il permet d'**étalonner les systèmes de mesure utilisés en situation post-accidentelle** afin d'évaluer la contamination des individus. Il est utilisé par le Laboratoire de mesure in vivo (Lamiv) et sera implémenté dans les véhicules de crise.

UNE INNOVATION PROTÉGÉE

Les fantômes thyroïdiens et leur procédé de fabrication – modélisation, forme, impression 3D, assemblage... – sont protégés par un **brevet en France étendu à l'international**. Trois jeux de fantômes ont été acquis par l'Organisme technique de sûreté (TSO) japonais. Ils seront utilisés pour les installations d'anthroporadiométrie dédiées à la mesure post-accidentelle de la contamination interne.

AVIS D'EXPERT



© Noak/Le Bar Floreal/Médiathèque IRSN

Tiffany Beaumont

Chercheuse en dosimétrie interne à l'IRSN

Vers un calcul plus personnalisé de l'activité thérapeutique

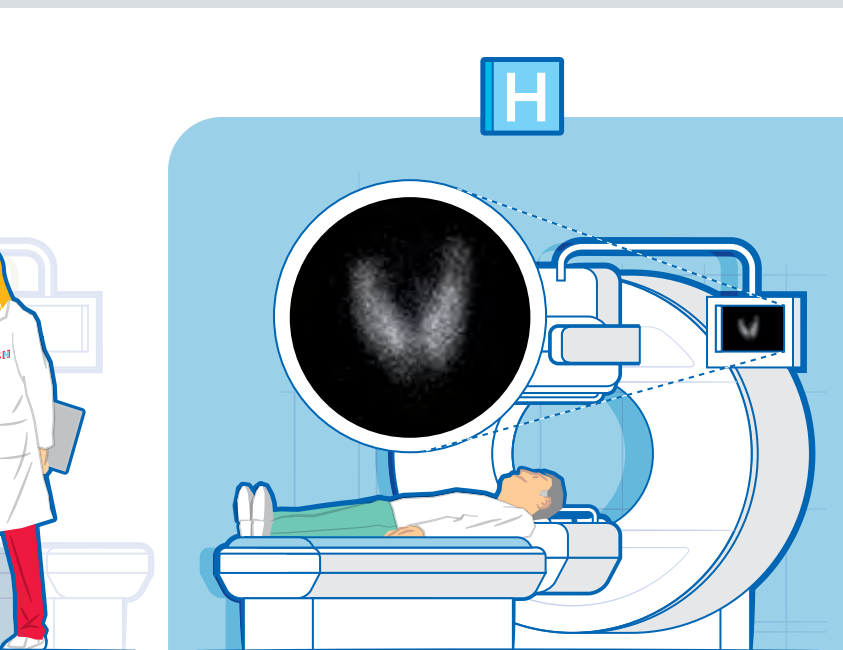
“ Une évaluation précise de la fixation thyroïdienne est primordiale pour la personnalisation de l'activité thérapeutique. Or, en routine clinique, l'étalonnage est souvent réalisé avec des fantômes éloignés de la réalité. Cette simplification peut entraîner une surestimation non négligeable de l'activité thérapeutique d'iode 131 prescrite. Pour limiter ce risque, en collaboration avec l'hôpital Bicêtre (Île-de-France) et l'Oncopole de Toulouse (Haute-Garonne), l'Institut développe une méthode d'étalonnage et d'analyse plus précise, basée sur le seuillage d'image*. Elle améliore l'estimation de la fixation thyroïdienne afin d'aller vers un calcul plus personnalisé de l'activité. Adapté et adaptable à la routine, son déploiement dans les services de médecine nucléaire devrait être facilité. Les premiers résultats montrent que l'activité pourrait être abaissée sans affecter l'efficacité du traitement. D'ici à trois ans, lorsque l'étude sera achevée, des recommandations seront publiées. L'Institut projette de lancer un intercomparaison nationale, en utilisant les fantômes thyroïdiens, afin de réaliser un état de lieux des pratiques françaises sur la mesure de fixation thyroïdienne.

* Technique permettant d'éliminer le rayonnement parasite.

CONTACT

Tiffany Beaumont
01 30 15 52 23
tiffany.beaumont@irsn.fr

IRSN reproduisent la forme et la taille de la thyroïde utilisés pour évaluer l'efficacité des protocoles gamma-caméras utilisées en médecine nucléaire, le traitement de pathologies bénignes de la thyroïde.



4

Un protocole d'étalonnage a été élaboré

L'IRSN a élaboré un nouveau protocole d'étalonnage pouvant être transposé à **tous les services** de médecine nucléaire, quels que soient le modèle de gamma-caméra et le type d'iode utilisé. Il permet d'avoir une **meilleure estimation de l'activité** retenue dans la thyroïde.

En collaboration avec l'Assistance publique - Hôpitaux de Paris (APHP) - Université Paris-Saclay, une étude rétrospective est en cours sur cinquante-deux patients traités pour des maladies de Basedow. Le but est d'évaluer le **biais** sur l'estimation de l'activité retenue et la **dose réellement reçue** à la thyroïde.

VERS UN FANTÔME MULTI-NODULES

Certaines formes de pathologies bénignes se caractérisent par la présence d'un ou plusieurs **nodules hypofixants ou hyperfixants**. Pour **améliorer la quantification de la fixation thyroïdienne** dans ce contexte, le Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi) développe des **fantômes multi-nodulaires**. Des mesures doivent être réalisées en collaboration avec l'hôpital Cochin à Paris et le centre François Baclesse à Caen.

CONTACTS

Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi)
01 58 35 82 51 - ledi@irsn.fr

Laboratoire de mesure in vivo (Lamiv)
01 30 15 52 22 - dosimetre@irsn.fr

BIBLIOGRAPHIE

Thèse de Tiffany Beaumont sur l'apport de la 3D pour la réalisation des fantômes (2018). www.irsn.fr/these-beaumont

Journées des thèses : retour sur scène

Scientifiques et industriels participent aux Journées des thèses 2022 à Nice (Alpes-Maritimes). Pour les doctorants et les publics présents, c'est une occasion d'échanger et d'apprécier l'étendue des recherches de l'IRSN et l'avancée des connaissances.

1 Quel est l'objectif des Journées des thèses ?

En 2022, quatre-vingt-seize doctorants sont sur le devant de la scène à l'occasion des Journées des thèses de l'IRSN, trois jours organisés par l'Institut. Leurs travaux en santé, sûreté et environnement font l'objet de présentations et de posters. Directeurs de thèse – qu'ils viennent de l'IRSN, comme c'est majoritairement le cas, ou d'ailleurs – et industriels participent à ces journées. Une soirée est consacrée à un débat sur l'impact de la recherche sur le réchauffement climatique et au concours d'éloquence « Trois minutes pour une thèse ». Elles sont l'occasion pour les doctorants de faire leurs armes et, pour le public, d'apprécier les avancées scientifiques. « En plus de mes sujets habituels en sûreté nucléaire, j'ai assisté à des présentations médicales sur des thèmes dont je ne suis pas du tout spécialiste, comme les effets de l'irradiation sur la santé, mentionne Serge de Perthuis, directeur recherche

et développement chez Framatome. *J'ai apprécié la variété de ces sujets qui me concernent en tant que citoyen. »* Doctorante en sciences humaines et sociales, Alexandra Wartel¹ revient convaincue : « *J'y allais un peu à reculons, car étant en troisième année de thèse, mon temps est compté. Je ne regrette pas. J'ai compris la plus-value de ces journées : voir ce qui se fait dans d'autres équipes et disciplines. »* Les sujets 2022 sont variés : effets biologiques des rayonnements ionisants, comportement du béton, accident grave, incendie, évaluation du risque sismique... L'événement est annuel depuis 2002.

1. Thèse : Activité humaine et performance transversale : le cas de la préparation des traitements en radiothérapie externe. Toutes les thèses citées et les laboratoires concernés sont consultables sur www.irsn.fr/Theses



Un public varié assiste aux présentations des doctorants : collègues étudiants, chercheurs, industriels...



Présentation des posters des doctorants.

2 Qu'en retirent les thésards ?

Ces exercices sont incontournables pour Michel Gradeck, professeur à l'Université de Lorraine (Meurthe-et-Moselle). Il encadre la thèse de Juan Esteban Luna Valencia, étudiant le refroidissement du combustible². « *Ils doivent prendre confiance, être professionnels : respect du temps, présentation impeccable... Ils apprennent à expliquer avec des mots simples et justes des notions complexes. »* Magali Schiano Di Lombo est en troisième année³. « *C'est mon premier congrès en présentiel du fait de la pandémie, raconte-t-elle. Les questions poussent à justifier nos choix méthodologiques. »* Rencontrer d'autres doctorants est essentiel : « *En thèse, on a besoin d'un collectif qui comprend ce que l'on fait, même si nos sujets sont différents. »* L'événement aide à étoffer son réseau : « *Après ma présentation, une personne du public, venue discuter de mon sujet, m'a fourni un contact pour ma thèse »*, se félicite Alexandra Wartel.

2. Thèse : Étude du refroidissement d'un assemblage combustible par un écoulement vertical vapeur/gouttes à l'échelle d'un sous-canal.

3. Thèse : Comparaison d'effets physiologiques radio-induits par les rayonnements bêta reçus à l'ADN et à l'organisme entier chez le poisson zèbre *Danio rerio*.

3 Quels bénéfices pour les directeurs de thèse ?

Thierry Loiseau, chimiste dans le Nord pour le Centre national de recherche scientifique (CNRS), est venu écouter Julie Nguyen Sadassivame⁴. C'est la deuxième thèse CNRS/IRSN qu'il codirige. Ces journées lui permettent de faire une veille : « *Je privilégie les sujets proches de ma thématique : la diffusion des radionucléides dans l'environnement, les solutions pour les piéger... Cela me donne une vision élargie de mon domaine*

de recherche. » Michel Gradeck ajoute : « *Je vois toutes les thématiques que couvre l'IRSN. Cette ouverture est importante en science.* » Ces journées sont l'occasion de rencontrer des industriels. « *L'objectif est de leur montrer les travaux réalisés dans nos laboratoires universitaires* », précise-t-il.

4. Thèse : Étude expérimentale de la faisabilité de piégeage des gaz rares par des matériaux poreux innovants de type metal-organic framework (MOF), en codirection avec l'Université de Lille.



Des chercheurs assistent aux Journées des thèses.

4 Et pour le public étranger ?

Ernst-Arndt Reinecke est spécialiste sûreté au Centre de recherche de Jülich (Allemagne). Il codirige la thèse de Gabriela Nobrega⁵.

« *Elle a réalisé un programme expérimental d'un an dans notre laboratoire spécialisé dans l'hydrogène. Nous avons échangé sur les avancées des travaux qu'elle effectue dorénavant au sein de l'IRSN.* »

Comme ses homologues français, le scientifique assiste à plusieurs présentations. Les recherches de Laura Vastier⁶, sur la propagation des flammes dans les conditions d'un accident grave, l'intéressent, car elles contribuent à un projet européen impliquant son institution.

« *J'ai aussi suivi d'autres champs de recherche. Cela donne un bon aperçu des progrès réalisés dans différents domaines.* » Il apprécie les échanges informels : « *Je découvre avec intérêt les préoccupations de la prochaine génération.* »

5. Thèse : Étude de l'empoisonnement des recombinaison auto-catalytiques passifs.

6. Thèse : Étude de la propagation de flamme dans une atmosphère gazeuse représentative de la phase tardive d'un accident grave dans un réacteur à eau pressurisée (REP).

Reportage photo : © Albane Noor/Signatures/Médiathèque IRSN



Voix, posture... Une formatrice aide les doctorants à se préparer pour le concours « Trois minutes pour une thèse ».

Marie Frèrejacques, doctorante en toxicologie, est la gagnante du concours « Trois minutes pour une thèse ».



5 Pourquoi des industriels sont-ils présents ?

Pour sa première venue aux journées, Serge de Perthuis assiste à une trentaine de présentations. En sûreté, plusieurs l'interpellent, dont celle de Juan Esteban Luna Valencia, qui étudie le refroidissement d'un assemblage de combustible². Son dispositif expérimental – un écoulement vertical vapeur/gouttes – l'intrigue. « *Je visiterais volontiers son laboratoire* », dit-il.

La présentation de Maryam Trad⁷, sur une nouvelle stratégie de modélisation pour l'interface acier-béton, retient aussi

son attention. « *Cette thèse m'intéresse pour ses méthodes mathématiques. Framatome ne contrôle pas le béton, mais des aciers. Nous utilisons aussi des ultrasons, certains principes pourraient donc s'appliquer...* », souligne-t-il.

Et de conclure : « *Après leur thèse, ces chercheurs feront peut-être de bonnes recrues pour Framatome.* »

7. Thèse : Une nouvelle stratégie de modélisation enrichie pour l'interface acier-béton dans le contexte des éléments de plaques multicouches : application à l'évaluation des spectres de plancher.

Réacteurs

Des simulations capitales pour la sûreté

Un tube d'un générateur de vapeur d'un réacteur se rompt. Une brèche apparaît dans le circuit primaire. Ces situations fictives sont simulées par des experts grâce à la plateforme Sofia. Les résultats alimentent des expertises.

La salle de commande de la centrale de Golfech, dans le Tarn-et-Garonne, est en alerte : une canalisation vient de céder sur l'un des générateurs de vapeur du réacteur n° 1. Devant leurs écrans de contrôle, deux ingénieurs s'affairent. Ils ont quelques minutes pour circonscrire la fuite de radioactivité en équilibrant la pression entre le générateur affecté et le circuit primaire.

Cette séquence fictive se déroule dans les locaux de l'IRSN de Fontenay-aux-Roses, dans les Hauts-de-Seine, sur le simulateur d'observation Sofia. Il reproduit les principaux systèmes d'une centrale de type réacteur à eau sous pression (REP)¹ en condition de fonctionnement normal, incidentel ou accidentel.

Rejouer de vrais incidents

Chaque année, soixante-dix personnes se forment sur cette plateforme de simulation lancée en 2005. Outre les ingénieurs de l'IRSN et les inspecteurs de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), des experts de différents pays souhaitant se doter de l'énergie nucléaire prennent part à ces sessions de formation². Accident de perte de réfrigérant primaire, rupture d'un tube sur un générateur de vapeur, perte de la source froide... sont des situations présentées aux participants.

Au niveau national, Sofia sert de support à l'évaluation de sûreté des réacteurs. Il est

employé pour tester les nouvelles procédures de conduite des différentes catégories de réacteurs en exploitation³. La plateforme sert à reproduire des incidents survenus sur le parc français, préparer des exercices de crise ou modéliser l'impact d'éventuelles anomalies identifiées lors du contrôle des installations.

Des évolutions sont intégrées

En mars dernier, Sofia étudie les conséquences de deux brèches de vingt-cinq centimètres de diamètre au niveau du circuit d'injection de sécurité⁴ des réacteurs de 1 300 MWe⁵.

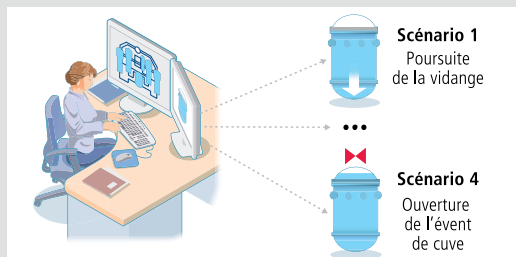
« Ce cas de figure peut aboutir au découvrément transitoire du cœur du réacteur. Nos calculs montrent que la température de la gaine des crayons combustibles atteindrait 490 °C. Ceci reste très inférieur au seuil maximal de sûreté, fixé à 1 200 °C, significatif d'une dégradation du combustible », détaille Robin Dorel, expert en thermohydraulique et chef de projet de ce simulateur.

Grâce à son architecture informatique modulaire, Sofia évolue au gré des améliorations de sûreté des réacteurs. Sur la cinquantaine de modifications prévues par EDF après le retour d'expérience de l'accident de Fukushima Daiichi, une vingtaine sont intégrées au simulateur. En 2021, les dernières mises à jour incluent deux équipements « noyau dur »⁶, qui doivent être



installés sur tous les réacteurs français d'ici 2030. « Nous avons aussi intégré les dispositifs requis pour poursuivre l'exploitation des réacteurs de 900 MWe au-delà de leur quatrième visite décennale », complète Robin Dorel. ■

WEBMAGAZINE



INFOGRAPHIE

Sofia aide à mieux comprendre l'incident survenu à la centrale de Golfech en 2019

www.irsn.fr/R53

1. Les principaux systèmes sont de nature hydraulique, thermique, électrique et de contrôle-commande.
2. Huit modules par an, dont quatre centrés sur la conduite de réacteur en condition accidentelle.
3. Réacteurs de 900, 1300 et 1450 MWe et EPR.
4. Système qui injecte de l'eau froide et borée dans le circuit primaire principal du réacteur en cas d'accident.
5. Ce travail fait suite à la détection, en janvier 2022, de fissures sur les tuyauteries du système d'injection de sécurité de l'un des deux réacteurs de la centrale de Penly (Seine-Maritime).
6. Équipements ultimes aptes à résister à des agressions dont la sévérité dépasse celle retenue dans le référentiel de sûreté en vigueur.



Salle de commande minimaliste

La salle de commande du simulateur s'apparente à une interface homme-machine. L'écran de gauche montre le circuit d'un générateur de vapeur d'un réacteur de 1300 MWe. Celui du milieu figure le synoptique des grappes de commande. À droite, la cuve du réacteur et ses quatre générateurs sont visualisés à l'aide du code de calcul Cathare – code avancé de thermohydraulique pour les accidents de réacteurs à eau – intégré à Sofia.



Le développement et l'exploitation du simulateur Sofia sont assurés par cinq spécialistes en thermohydraulique : Arnaud Duchayne, Amina Younsi, Inès Daoud, Guy Briday et Robin Dorel (de gauche à droite).

Face à un accident fictif

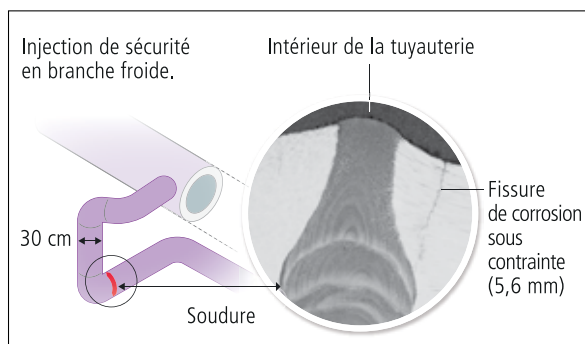
Les stages dédiés à la conduite de réacteur en condition accidentelle durent cinq jours. Ils alternent cours théoriques et travaux pratiques. Chaque exercice de simulation est précédé d'une évaluation des paramètres physiques de l'accident sélectionné. Le formateur conseille un groupe d'ingénieurs stagiaires avant leur confrontation à un accident fictif de perte de réfrigérant primaire sur un réacteur de 1300 MWe.



Reportage photo : © Sylvain Renard/Médiathèque IRSN

Un code au service de la sûreté

Amina Younsi, chercheuse en thermohydraulique, s'adresse aux participants d'une formation sur la conduite d'un REP en situation accidentelle. Elle indique l'emplacement d'une brèche générée à l'aide du code de calcul Cathare au niveau du circuit primaire.



© Aft Presse/ABC Communication/Médiathèque IRSN
Photo - V. Denis - EDF Direction Industrielle DY&C/AMA - IJDEC



Échafauder des scénarios

L'IRSN conçoit des exercices de crise impliquant une centrale nucléaire. Les scénarios sont élaborés par des ingénieurs, avant d'être testés sur le simulateur. Ici, Amina Younsi (à gauche) et Inès Daoud (à droite) travaillent sur un scénario de rupture de lignes d'alimentation en eau de générateurs de vapeur. Plusieurs versions sont échafaudées avec le simulateur pour les trois paliers – 900, 1300 et 1450 MWe – du parc électronucléaire, pour évaluer les risques d'inondation interne de l'installation.

Quel impact pour la sûreté ?

Plusieurs fissures sont détectées fin 2021 sur le circuit d'injection de sécurité du réacteur n° 1 de la centrale de Civaux dans la Vienne. Sofia évalue l'impact pour la sûreté : en cas de rupture simultanée de deux tuyauteries de ce circuit, les procédures de conduite permettent de refroidir le cœur et donc d'éviter sa fusion.



Votre dosimétrie en quelques clics

Vous êtes conseiller en radioprotection et en charge des dosimètres de votre établissement ?

Le portail *monDosimetre* vous facilite leur gestion. En quelques clics, commandez vos dosimètres, mettez à jour les fiches des porteurs, éditez vos tableaux de bord logistiques, personnalisez vos bilans dosimétriques... et découvrez régulièrement de nouvelles fonctionnalités. *IRSN dosimétrie* vous accompagne, quel que soit votre domaine d'activité – médical, industriel, nucléaire, recherche – ou la taille de votre structure. Votre abonnement est accessible où que vous soyez, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Contactez-nous

IRSN DOSIMÉTRIE
dosimetre@irsn.fr
www.dosimetrie.irsn.fr
<https://mondosimetre.irsn.fr>

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE