

REPERES

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

EN PRATIQUE

Des fantômes thyroïdiens pour personnaliser les traitements

DOSSIER

Iode radioactif Comprendre sa dispersion pour protéger les populations

FAITS ET PERSPECTIVES

Comment évolue l'exposition professionnelle aux rayonnements ?





Les enjeux du démantèlement

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a fixé une limite de 63,2 GWe pour la production d'électricité d'origine nucléaire en France. Une contrainte qui conduira à l'arrêt de certains réacteurs. Disponible sur irsn.fr, le rapport « Les enjeux du démantèlement des réacteurs à eau sous pression » fait le point sur la sûreté, la radioprotection et la protection de l'environnement.

www.irsn.fr/Demantelement-REP

Vidéo : la sûreté des réacteurs

L'IRSN a rendu un avis sur les réacteurs à eau sous pression (REP) de 900 MWe

et de 1 450 MWe d'EDF. Cet avis est lié au réexamen de sûreté réalisé à l'occasion des quatrième visites décennales (VD4). Dans une vidéo, les experts expliquent leurs travaux et la prise en compte des attentes de la société.

www.irsn.fr/Dialogue-ANCLI-IRSN



Formations sur la prévention des risques

Radiologues, manipulateurs, médecins du travail, industriels, ingénieurs en sûreté ou en environnement... Accédez au calendrier des formations professionnelles de l'IRSN portant sur la prévention des risques et la protection contre les dangers liés aux rayonnements.

www.irsn.fr/formations

Agenda

4 et 5 novembre 2019
Cologne (Allemagne)

Congrès Eurosafe

La conférence internationale consacrée à la sûreté nucléaire, à la gestion des déchets radioactifs et à la radioprotection se tiendra à Cologne, en Allemagne. Elle réunira experts, chercheurs, associations et industriels.

Plus d'informations :
www.eurosafe-forum.org

Le 7 novembre 2019
Bourges (Cher)
Le 29 novembre 2019
Nancy (Meurthe-et-Moselle)

Rencontres des PCR

Ces journées de formation et d'échange sont organisées par les réseaux régionaux de personnes compétentes en radioprotection (PCR) du Centre et d'Alsace-Lorraine. Elles rassembleront les PCR et autres acteurs de la radioprotection. Des représentants des laboratoires de dosimétrie de l'IRSN seront présents. Ils proposeront aux professionnels des prestations de suivi dosimétrique des travailleurs et d'autres services associés.

Plus d'informations :
www.dosimetrie.irsn.fr

Online WEBMAG

www.irsn.fr/R43



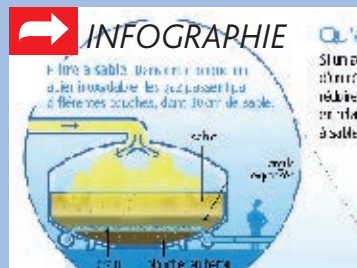
Faits et perspectives

Exposition professionnelle aux rayonnements : bilan et évolution



Faits et perspectives

La gammagraphie : en centrale et dans les aéroports



Dossier

Comprendre le fonctionnement d'un filtre à sable



Dossier

Iode moléculaire : mesure expérimentale du dépôt par temps sec



Dossier

La transformation de l'iode dans l'atmosphère mieux comprise



Intérêt public

Pourquoi un débat sur la gestion des déchets radioactifs ?

Abonnement

POUR VOUS ABONNER : www.irsn.fr
Rubrique l'IRSN > Publications > Magazine Repères

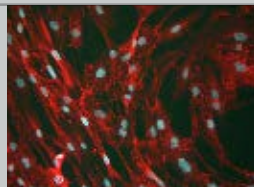
Sommaire

En couverture : Denis Quelo, expert, devant une carte utilisée lors d'un exercice de crise à la centrale de Cattenom (Moselle) avec les zones de protection des populations.

P.4 TEMPS FORTS

Gestion post-accidentelle
« Il faut associer les populations le plus tôt possible »

Complications de radiothérapies
Un essai clinique en thérapie cellulaire vient d'être lancé



P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Rayonnements ionisants
Comment évolue l'exposition des travailleurs ?

P.9 ZOOM

Le béton à l'épreuve du temps

DOSSIER P.10

Dossier du prochain n° :
Iode radioactif : mieux évaluer la contamination pour protéger la santé

Iode radioactif
Comprendre sa dispersion pour protéger les populations

P.17 EN PRATIQUE

Traitement par irradiation de la thyroïde
Des fantômes donnent la juste dose

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

Un « serious game » sur les déchets radioactifs



P.22 REPORTAGE

Paratonnerres radioactifs
Prévenir les risques à la dépose

© Florence Levillain/Signatures/Médiathèque IRSN

Nos travaux sur l'iode intéressent les climatologues

En améliorant les modèles de prévision de l'impact des rejets normaux ou accidentels d'iode radioactif sur la population, l'IRSN remplit sa mission de radioprotection. Ses travaux ont une influence directe sur les décisions des pouvoirs publics. Depuis plusieurs années, ils intéressent aussi les climatologues. Relâché dans l'atmosphère depuis l'océan, l'iode stable produirait des noyaux de condensation conduisant à la formation des nuages, qui refroidissent l'atmosphère. Les mécanismes de dispersion et de transformation de l'iode stable et de l'iode radioactif étant quasi-identiques, les flux que nos chercheurs s'emploient à quantifier permettent aussi d'avancer dans la compréhension du réchauffement climatique. Nos échanges avec les grands laboratoires de climatologie s'intensifient.

Denis Maro

Chef du Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville

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 : repères@irsn.fr – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la communication : Marie Riet-Hucheloup – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinnet – Ont collaboré à ce numéro : Stéphanie Clavelle, Aleth Delattre, Pascale Monti – Comité de lecture : François Bréchnignac, Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation : CITIZENPREFES – Maquette et direction artistique : Vincent Dulau – Iconographie : Sophie Léonard – Photos de couverture : © Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN – Impression : Handiprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – octobre 2019.

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Audit qualité

La certification ISO 9001 renouvelée

L'IRSN obtient le renouvellement de la certification ISO 9001 pour toutes ses activités et sur l'ensemble de ses sites. Sa politique qualité, qui traduit sa volonté d'être à l'écoute de ses partenaires et de satisfaire leurs attentes, est ainsi reconnue. Parmi les points forts relevés par l'Afnor : les relations de l'Institut avec ses nombreuses parties intéressées, dont la société civile, et la cohérence de l'alignement stratégique de l'ensemble des services avec le contrat d'objectifs et de performance. Les auditeurs incitent cependant l'établissement à clarifier les attentes pertinentes des parties intéressées. Certifiée depuis 2007, la démarche qualité de l'Institut améliore la pertinence technique de ses positionnements et favorise l'efficacité de son fonctionnement. La rigueur et le cadrage imposés par la norme sont un soutien pour l'atteinte de ses objectifs et la maîtrise des risques. Ce cinquième renouvellement, obtenu après un audit sans aucune non-conformité, porte sur la période 2019 à 2022. Il sera suivi de visites de surveillance.

IODE RADIOACTIF

35 fois

C'est l'augmentation de la sensibilité des nouveaux pièges à grand débit d'air aux formes gazeuses de l'iode. Ils sont développés par l'Institut pour la surveillance de l'environnement.

72

appareils de mesure de l'activité de l'iode 131 sont testés dans toute l'Europe sur les mêmes fantômes – ou copies factices – de thyroïdes contaminées. L'objectif est d'évaluer leur cohérence de mesure.

Retrouvez notre dossier Iode en page 10.

International



Une famille dépose un bouquet sur le site de sa maison, balayée par le tsunami, près de la centrale nucléaire Fukushima.

Gestion post-accidentelle

« Il faut associer les populations le plus tôt possible »

Et si les populations n'étaient pas du même avis que les autorités sur le devenir des territoires contaminés après un accident nucléaire? Pour répondre à cette question, Christine Fassert, chercheuse en sociologie à l'IRSN, a mené avec Reiko Hasegawa, du Medialab de Sciences Po, plus de 120 entretiens auprès des habitants et des autorités de la préfecture de Fukushima depuis 2012. Appelée Shinrai, pour « confiance » en japonais, cette recherche fait apparaître une diversité de positions qui explique le nombre relativement élevé de non-retours¹, une fois levées les mesures d'évacuation.

« Dans la doctrine de la CIPR², l'idée qui prévaut est que l'attachement au territoire amènerait les populations à revenir, même au prix de précautions contraignantes, comme le port d'un dosimètre, ou l'arrêt de certaines activités, comme les balades en forêt. En réalité, les comportements varient selon l'âge, la situation familiale et le niveau de confiance envers les autorités. » De nombreux parents refusent d'exposer leurs enfants à un risque, même faible, de cancer.

Beaucoup d'habitants jugent mal utilisées les sommes importantes engagées pour la décontamination au nom de la reconquête. Cette recherche soulève la question du rôle de l'expert, et notamment de la légitimité éthique de la position officielle japonaise, visant à rassurer à tout prix. « Ce retour d'expérience est précieux pour les autorités qui auraient à gérer les suites d'un accident majeur, remarque Jean-Christophe Gariel, directeur de la santé à l'IRSN. La situation sera forcément unique, mais elle mettra en jeu les mêmes complexités. Nous pouvons en tirer au moins une leçon : il faut associer populations et autorités locales à la décision le plus tôt possible, dès les grandes orientations. »

1. Selon le journal japonais Nikkei, le taux de retours dans les villages évacués est estimé à 23 %, chiffre qui prend en compte les nouveaux habitants œuvrant au nettoyage et à la décontamination.

2. Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

CONTACT

Christine Fassert :
christine.fassert@irsn.fr

Santé



Cellules souches mésenchymateuses (CSM). Le cytosquelette apparaît en rouge et le noyau en bleu.

© Alain Chapel, IRSN-IRMED-SERAMED

« Les complications sévères de radiothérapie entraînent des hospitalisations à répétition. »

Complications de radiothérapies Un essai clinique en thérapie cellulaire vient d'être lancé

Un essai clinique de phase II Prisme¹, qui utilise des cellules souches mésenchymateuses (CSM), vient de démarrer. Il vise à prouver leur efficacité pour traiter les complications sévères des radiothérapies abdomino-pelviennes. Le Pr Mohamad Mohty, hématologue au CHU Saint-Antoine, à Paris (Île-de-France), en assure la coordination. Douze malades réfractaires aux traitements conventionnels seront inclus dans l'étude. Chaque patient recevra trois injections intraveineuses. Si elles inhibent durablement inflammations, saignements et fistulisations, la dernière phase d'essais avant autorisation de mise sur le marché pourra être lancée sur des centaines de patients de plusieurs pays. Lors d'essais précliniques, les chercheurs de

l'Institut ont montré que les CSM, localisées dans la moelle osseuse et les tissus adipeux, stimulent le processus naturel de réparation du côlon. Elles pourraient bénéficier à toutes les personnes atteintes de cancer qui développent des séquelles invalidantes à la suite de traitements par radiothérapie, seuls ou associés à des chimiothérapies, chirurgies ou thérapies ciblées.

1. *Pelvic Radiation Disease and Mesenchymal Stromal Cells (Prisme)*.

CONTACT

Alain Chapel : alain.chapel@irsn.fr

Environnement



Mise à l'eau de capteurs pour mesurer la taille et la quantité de particules minérales et biologiques.

Mer Méditerranée

Comprendre le cheminement de la contamination

Pourquoi embarquer 16 scientifiques sur un navire et traverser la Méditerranée en 30 jours de La Seyne-sur-Mer (Var) au golfe de Gabès (Tunisie) ? « Pour caractériser le transfert des éléments métalliques, organiques et radioactifs au sein des premiers maillons de la chaîne trophique¹ méditerranéenne, pour lesquels nous manquons de données », répond Olivier Radakovitch, géochimiste à l'IRSN.

Des prélèvements sont réalisés en haute mer et en zones côtières pour mesurer les teneurs en césium 137 et tritium dans la phase dissoute, le phytoplancton et le zooplancton.

« Du côté tunisien, nos études portent sur la caractérisation à haute fréquence des contri-

buteurs à la biomasse planctonique susceptible d'accumuler des contaminants », révèle Malika Belhassen, océanographe à Tunis. Les voies de transfert trophique sont étudiées pour comprendre le cheminement de la contamination.

Ces données alimenteront les modèles de transfert et fourniront une image de la contamination de l'écosystème, référence en cas d'accident, par exemple nucléaire. Baptisée Mérite-Hippocampe, cette campagne s'est déroulée en avril et mai 2019.

1. Alimentaire.

WWW Pour en savoir plus : www.irsn.fr/LRTA

Irradiation chronique Des effets biologiques persistent sur plusieurs générations

« Chez le ver *C. elegans*, nous observons une diminution du stock de cellules spermatiques, associée à une baisse des capacités de reproduction de l'espèce », explique Catherine Lecomte, biochimiste au Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ces effets sont observés après une exposition chronique à une dose de rayons gamma de 50 mGy/h. « Les effets persistent sur plusieurs générations, même lorsqu'elles ne sont plus exposées aux rayons, suggérant une régulation épigénétique¹. » Une analyse du transcriptome² révèle la dérégulation de voies impliquées dans la gamétogénèse, le métabolisme, la résistance au stress, la différenciation et la prolifération cellulaires. Transposables à des organismes plus complexes, ces résultats³ aideront à identifier les mécanismes de la radiotoxicité et de la transmission entre générations.

1. Mécanisme n'impliquant pas de modification de la séquence d'ADN.

2. Ensemble des ARN issus de la transcription du génome.

3. Programme Environnement-santé-travail de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) avec le soutien de l'Instituto Cancer dans le cadre du Plan cancer 2014-2019.

WWW Pour en savoir plus : <https://hal-irsn.archives-ouvertes.fr/anses-01925146>

FAITS ET PERSPECTIVES



Manipulatrice en électroradiologie médicale équipée d'un dosimètre passif et actif, d'une jupette et d'un protège-thyroïde plombés.

© Sophie Brandström/Signatures/Médiathèque IRSN



Dans le nucléaire, les professionnels sont suivis par dosimétrie passive. Ici, préparation d'un générateur de vapeur avant sa sortie.

© Jean-Marie Huron/Signatures/Médiathèque IRSN

Rayonnements ionisants

Comment évolue l'exposition des travailleurs ?

Édité chaque année, le rapport « La radioprotection des travailleurs » fournit une photographie de l'exposition des professionnels aux rayonnements, tous secteurs confondus. La dernière version vient de paraître. *Repères* en présente les grandes lignes.

Quelle est l'exposition des quelque 400 000 travailleurs suivis pour un risque d'exposition aux rayonnements en France ? Des experts de l'IRSN réalisent chaque année un bilan intitulé « La radioprotection des travailleurs, exposition des professionnels aux rayonnements en France ». Y figurent des données sur la dosimétrie externe passive et le suivi de l'exposition interne. Hors radioactivité naturelle, les deux tiers

des 365 980 travailleurs suivis en 2018 sont issus du domaine médical et vétérinaire. Dans ces secteurs, les doses annuelles moyennes sont les plus faibles (maximum 0,30 millisievert – mSv), les plus élevées revenant au nucléaire (1,40 mSv). Pour l'exposition interne, 3 000 cas positifs sont relevés, dont quatre contaminations pour lesquelles un calcul de dose a été nécessaire. Enfin, la dose individuelle moyenne est de 0,80 mSv, soit 12 % de plus qu'en 2017, en lien avec les activités de maintenance du parc.

Siseri¹. « Les données plus précises dont nous disposons apportent une meilleure connaissance de l'exposition dans certains secteurs. Grâce à elles, des études ciblées sont réalisées. Cette année, elles portent sur trois thèmes : les personnels de la radiologie interventionnelle (doses aux extrémités), les prestataires du nucléaire et les travailleurs intervenant dans le démantèlement d'installations, détaille Juliette Feuardent, experte en radioprotection à l'IRSN. L'enjeu ne porte pas sur l'exposition externe, globalement faible, mais sur le risque de contamination. »

Concernant le nombre de dépassements de la limite réglementaire en dose efficace – plus de 20 mSv –, dix cas ont été comptabilisés, contre un ou deux les années précédentes. Pour Juliette Feuardent, cela s'explique : « Huit cas sur dix ont été retenus par défaut, en l'absence de retour sur les conclusions de l'enquête qui doit être menée par le médecin du travail en cas de signalement d'un dépassement. »

WEBMAGAZINE



VIDÉO
Exposition professionnelle aux rayonnements : bilan et évolution

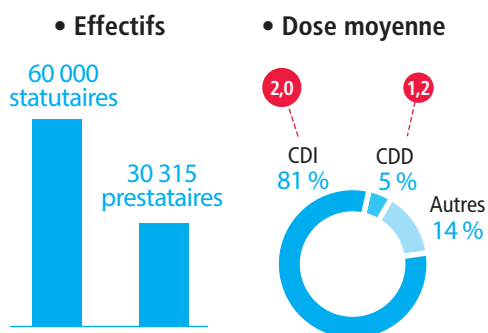
www.irsn.fr/R43

Zoom sur trois expositions professionnelles

Exposition du cristallin, des sous-traitants dans le nucléaire et des radiologues interventionnels. Pour ces trois thèmes, voici les enseignements sur le suivi des travailleurs tirés du rapport 2018 « La radioprotection des travailleurs » et le point de vue d'un professionnel.

● Dose moyenne (mSv) ● Dose maximale (mSv) sur 12 mois

Sous-traitants du nucléaire



Commentaire IRSN

Les prestataires représentent un tiers des effectifs du domaine nucléaire, mais portent les deux tiers de la dose collective reçue dans ce domaine. Cette année, les données sont affinées selon le statut d'emploi : CDD, CDI, intérim. Les personnels en CDI – qui peuvent être des sous-traitants, nomades ou dédiés à un site – sont les plus nombreux (81%) et les plus exposés (dose moyenne de 2 mSv).

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/travailleurs-2018
<https://siseri.irsn.fr/>

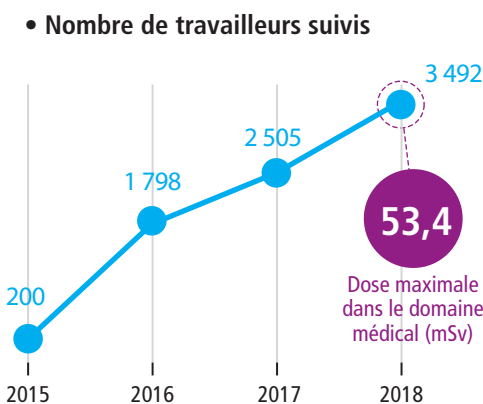
L'avis de...

Élisabeth Depezeville

Médecin du travail
à Cherbourg-en-Cotentin (Manche)

« Chez l'exploitant, l'exposition est moins importante pour les salariés que pour les sous-traitants, soudeurs, tuyauteurs, mécaniciens et échafaudiers qui changent ou découpent des pièces en centrale. L'exposition se fait surtout lors des arrêts de tranche. Sauf incident, la dose annuelle ne dépasse pas 20 mSv. Depuis dix ans, l'exposition a baissé. Mais les travailleurs sont poly-exposés, soumis à la dose et à d'autres risques comme les déplacements et le stress. »

Cristallin de l'œil



Commentaire IRSN

Les professionnels suivis pour l'exposition du cristallin se trouvent essentiellement dans le domaine médical et vétérinaire (83 %). Dans le médical, trois travailleurs ont reçu une dose supérieure à 20 mSv. La dosimétrie n'est pas réalisée en routine dans tous les établissements. En 2023, la limite réglementaire sera abaissée de 150 à 20 mSv, ce qui devrait inciter à une surveillance plus étendue des professionnels.

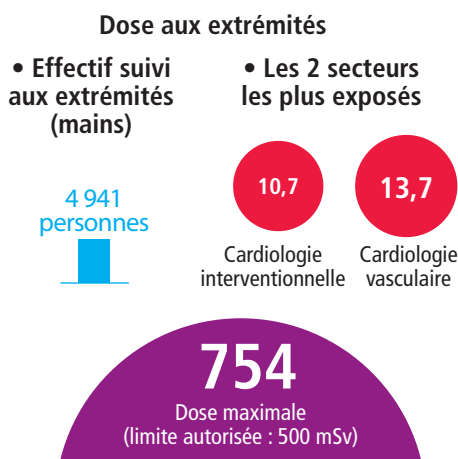
L'avis de...

Nadine Guilabert

Responsable du service radioprotection
à l'Institut Gustave-Roussy, avec Nacima Sadi,
personne compétente en radioprotection (PCR)

« Nous avons estimé l'exposition du cristallin : avec lunettes plombées, la dose annuelle est d'environ 15 mSv, contre 70 mSv sans. Tous les radiologues interventionnels et les internes ont à présent des lunettes plombées équipées d'un dosimètre nominatif. Nous sommes bien en deçà de la valeur limite de 150 mSv et nous nous préparons au seuil de 20 mSv à venir. L'utilisation des protections collectives, via des "écrans" plafonniers est à renforcer. »

Radiologie interventionnelle



Commentaire IRSN

Les actes de radiologie interventionnelle comportent un risque d'exposition des mains. Or, les doses observées sont soit nulles (en-dessous du seuil d'enregistrement), soit très élevées (deux cas de dépassement de la dose réglementaire de 500 mSv). Ces résultats contrastés posent question. Ils suggèrent des défauts de port de dosimètres. Une étude a montré que les cardiologues, en salle dédiée, ont davantage tendance à porter un dosimètre comparé aux chirurgiens, intervenant au bloc. Ces derniers ont une culture limitée en radioprotection.

L'avis de...

Thomas Lemoine

Ingénieur radioprotection au centre hospitalier de Poissy-Saint-Germain (Yvelines)

« Pour limiter l'exposition, il convient de combiner des appareils récents et optimisés avec une équipe pluri-professionnelle formée au réglage des paramètres d'acquisition. Nous avons institué au bloc la présence régulière de la PCR et disposons de manipulateurs radio ayant une culture de radioprotection. En trois ans, les doses reçues ont baissé de 35 % en cardiologie. En chirurgie, une légère augmentation des doses – inférieure à 10% - a été observée grâce au port plus régulier de dosimètres aux extrémités, passifs et opérationnels. »

3 questions à...

Gilles Reynaud

Salarié sous-traitant dans le nucléaire et président de l'association Ma zone contrôlée

Qui sont les sous-traitants de la filière nucléaire ?

Des personnels spécialisés dans la logistique et la maintenance nucléaire : préparation de chantier, mécanique, gestion et traitement des déchets, décontamination, assainissement, démantèlement... Ils sont près de 160000 salariés, pour 60000 agents statutaires chez l'exploitant. La sous-traitance s'est largement développée en zone nucléaire depuis les années 1990. Aujourd'hui, plus de 80 % des travaux sont sous-traités.

Comment leur exposition a-t-elle évolué ?

Depuis quinze ans, il n'y a plus de dépassement. Les seuils réglementaires sont respectés : une dose maximale annuelle de 20 millisieverts (mSv) pour le personnel de catégorie A (EDF) et de 6 mSv pour la catégorie B (CEA, Orano). Le rapport « La radioprotection des travailleurs » exprime l'exposition en dose moyenne, associant agents statutaires – travaillant directement pour l'exploitant, donc beaucoup moins exposés – et sous-traitants. Mais les personnes qui travaillent près du circuit primaire en centrale reçoivent des doses bien supérieures. Certains collègues calorifugeurs arrivent à une dose annuelle de 11-12 mSv par an, plus élevée que la moyenne annoncée dans le rapport.



Quelles sont vos demandes ?

Nous aimerions que la dose soit exprimée selon le statut professionnel, pour dissocier agents statutaires et salariés sous-traitants. Il faudrait aussi des études épidémiologiques sur les effets à long terme des « petites doses » inférieures à 20mSv par an sur les sous-traitants et sur la poly-exposition car nous sommes exposés à la radioactivité, mais aussi à l'amiante, aux agents chimiques dangereux... Nous préconisons un suivi médical tous les six mois – plutôt que tous les ans – en catégorie A et tous les ans – plutôt que tous les deux ans – en catégorie B. Nous appelons aussi à faire reconnaître toutes les contaminations internes comme des accidents du travail.

© Coll. pers.

Le bilan est utilisé par différents partenaires de l'Institut. « Pour nous, partenaires sociaux, il représente une photographie de la situation à un instant T. La comparaison d'année en année peut donner lieu à des préconisations, explique Alain Canton, du Conseil d'orientation des conditions de travail (COCT)². Cette année, nous avons demandé une optimisation des enquêtes en cas de dépassement de doses, afin d'objectiver des défauts de prévention. »

Orienter la réglementation

Pour la Direction générale du travail (DGT), « les résultats tirés de ce rapport³ constituent des signaux pouvant être à l'origine d'évolutions réglementaires, explique Hervé Visseaux, du bureau des risques chimiques, physiques et biologiques. En 2017, ils ont orienté des dispositions du décret n° 2018-437 du 4 juin 2018, comme la prise en compte des faibles doses. Cette année, nous ne notons pas de points nécessitant d'engager une nouvelle réflexion. » ■

1. Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants.
2. Organisme paritaire, conseil du Ministère du travail.
3. Rapport commandé par l'État en application de l'article R. 4451-129 du code du travail paritaire.

CONTACT

Juliette Feuardent
juliette.feuardent@irsn.fr

À LIRE

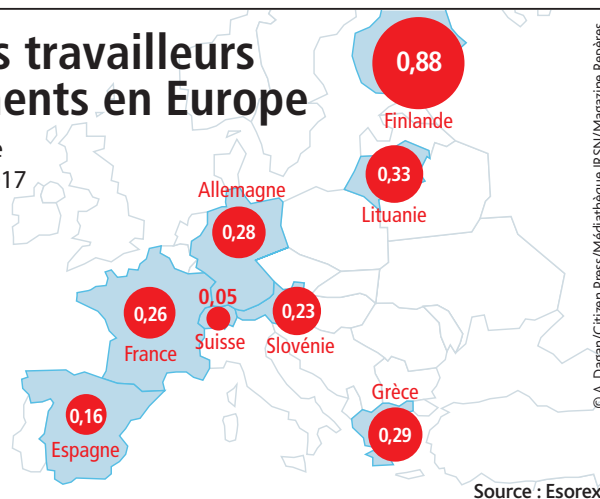


La gammagraphie en centrale et dans les aéroports.

www.irsn.fr/R43

Exposition des travailleurs aux rayonnements en Europe

Dose individuelle moyenne en millisieverts (mSv) en 2017



Source : Esorex

© A. Daggan/Citizen Press/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

AILLEURS

Un suivi dosimétrique européen

Quelle est l'exposition professionnelle ailleurs en Europe ? « Esorex¹ est une plateforme sur l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Elle doit permettre de mesurer l'impact des nouvelles réglementations européennes et de comparer les données des différents pays – en connaissant le contexte dans lesquelles le suivi dosimétrique est réalisé », explique Juliette Feuardent, experte en radioprotection à l'IRSN. Les données du suivi dosimétrique depuis 2010 peuvent être enregistrées sous le même format par chaque pays.

Parmi les vingt-deux États² inscrits à ce jour, seuls 14 ont déposé des données, montrant le besoin de promouvoir cet outil de façon à accroître son utilité. Les données mises en ligne sont accessibles au grand public.

1. European Platform for Occupational Radiation Exposure.

2. Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Lituanie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Suède, Suisse.

WW Pour en savoir plus : <https://esorex-platform.org>

Le béton à l'épreuve du temps

Difficile, de prime abord, de se figurer la composition minéralogique d'une pâte de ciment à la vue de cet amoncellement de sphères multicolores.

Cette image en trois dimensions représente pourtant bel et bien un cube de béton hydraté de 50 micromètres de côté. En plongeant au cœur du matériau, les scientifiques cherchent à déterminer le comportement des structures en béton des alvéoles et des scellements d'un centre de stockage géologique profond où des colis de déchets radioactifs seront stockés.

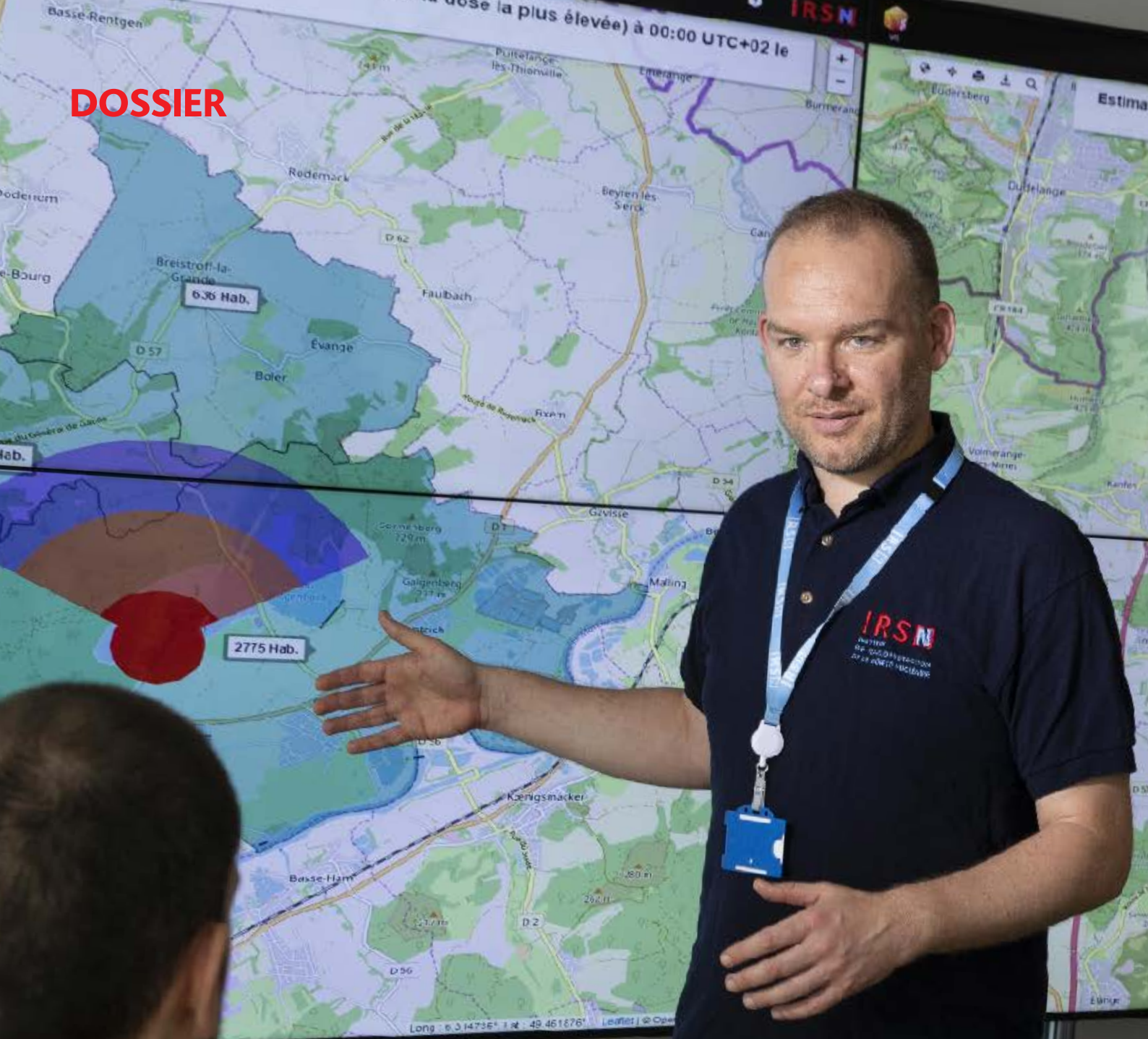
Conçue à partir de données expérimentales, cette modélisation microscopique en trois dimensions permet d'observer avec précision l'agencement des différents grains de matière composant une pâte de ciment. Les formes sphériques de couleur jaune et rouge correspondent par exemple aux molécules de silicate de calcium hydraté assurant la cohésion du matériau.

À l'appui de représentations de ce type, les chercheurs du Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sous-sols (Letis) de

Alexandre Dauzères

Chercheur en physico-chimie des matériaux

l'IRSN étudie la dégradation des pâtes de ciment. En appliquant une loi de changement d'échelle, ils simulent des perturbations physico-chimiques et mécaniques affectant une infrastructure en béton durant plusieurs milliers d'années. Ces travaux visent à élaborer un modèle pour anticiper l'impact de telles modifications sur les bétons des stockages profonds de déchets radioactifs, afin de renforcer l'évaluation de la sûreté de ces installations. ■



1 térabecquerel

C'est la quantité d'iode radioactif rejeté chaque année, en situation normale, par l'usine de La Hague (Manche). Celle administrée en une seule fois pour le traitement de certains cancers est de l'ordre de 5 gigabecquerels.

Denis Quelo, expert, devant une carte utilisée lors d'un exercice de crise centré sur la centrale de Cattenom (Moselle). Elle montre les zones de protection d'urgence des populations susceptibles de recevoir la dose la plus élevée.

Iode radioactif

Comprendre sa dispersion pour protéger les populations

De sa production dans les installations nucléaires à sa dispersion dans l'environnement, l'iode radioactif suit un parcours complexe au cours duquel il peut changer plusieurs fois de forme chimique. Les chercheurs s'emploient à percer les secrets de ce processus pour optimiser la protection des populations.

EN CLAIR

Le cycle de l'iode 131 : du rejet à la consommation

L'iode radioactif est rejeté de manière contrôlée par les centrales, les industries radiopharmaceutiques et les hôpitaux en situation normale d'exploitation, sans impact sanitaire. Il est inhalé et ingéré par l'homme et les animaux.

En cas d'accident, lorsque les concentrations sont importantes, il se concentre dans la thyroïde et peut augmenter le risque de cancer. Sa période radioactive est de huit jours, il disparaît en deux mois environ.



© A. Dagan/Citizen Press/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

Le 11 mars 2011, l'accident nucléaire de Fukushima démarre... Dès les premières heures et pendant plusieurs jours, au fil des explosions et des éventages concertés des enceintes de confinement des réacteurs, d'importantes quantités de radionucléides sont rejetées dans l'atmosphère.

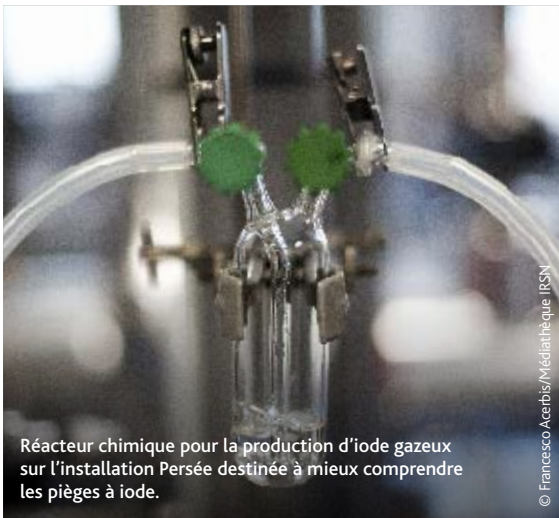
Sans surprise, l'iode 131 est présent, imposant des mesures de protection des populations. Son activité très élevée et sa période le rendent menaçant pendant plusieurs semaines. Il est transporté sur de longues distances sous des formes chimiques diverses – appelées « espèces » – dont la dangerosité et le comportement varient. Inhalé ou ingéré, il se concentre dans la glande thyroïde, induisant un risque accru de cancer.

« Pour prendre les mesures de protection adéquates en cas d'accident, il faut évaluer précisément les doses auxquelles la population risque d'être exposée, explique Anne-Cécile Grégoire, ingénieure de recherche en sûreté de l'IRSN. Nos travaux portent sur les mécanismes de production, la spéciation – formation d'espèces nouvelles – et la dispersion de l'iode, jusqu'à son transfert dans l'environnement. »

Sur la trace de l'iode organique

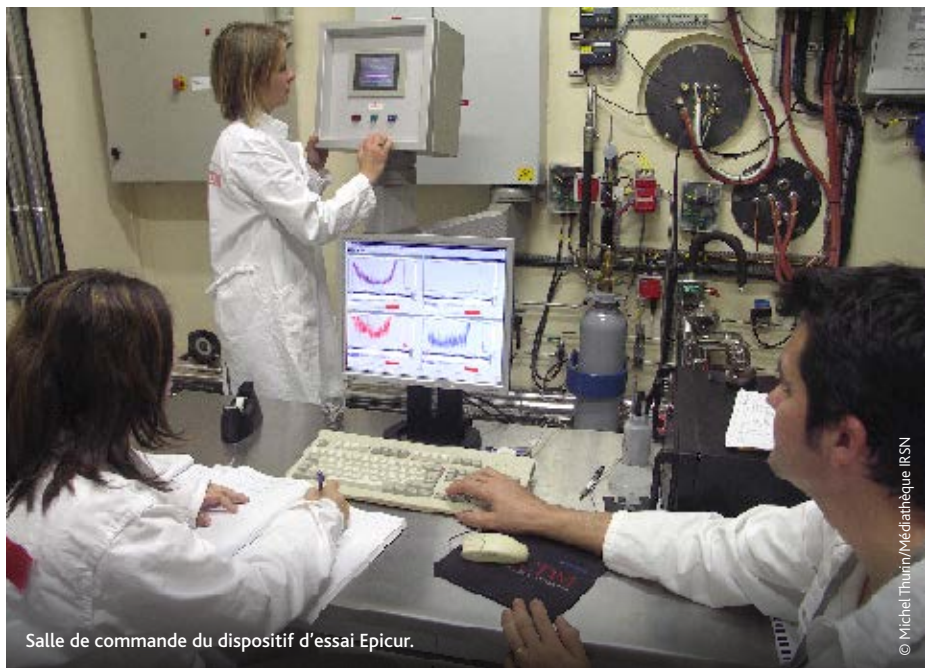
Il faut d'abord estimer le terme source, c'est-à-dire la quantité et la forme chimique de l'iode radioactif rejeté. Dans le cas d'une centrale, cet iode est produit dans le cœur des réacteurs. En cas d'accident, il peut s'échapper dans l'enceinte de confinement, puis dans le milieu environnant.

De 1993 à 2004, au sein du programme Phébus, l'Institut a piloté cinq expériences globales reproduisant une fusion de cœur à échelle réduite, pour mettre en évidence la complexité des réactions en jeu. Si elles ont laissé peu d'incertitudes sur la quantité totale d'iode produite – sous forme de gaz ou d'aérosols, c'est-à-dire de particules –, elles en ont laissé davantage sur ses transformations dans le circuit primaire



Réacteur chimique pour la production d'iode gazeux sur l'installation Persée destinée à mieux comprendre les pièges à iode.

© Francesco Acerbis/Médiathèque IRSN



Salle de commande du dispositif d'essai Epicur.

© Michel Thuin/Médiathèque IRSN

“ L'iode voyage sous des formes chimiques diverses dont la dangerosité et le comportement varient.

puis dans l'enceinte de confinement. L'activité portée par l'iode provient surtout de l'isotope « 131 », supposé être de l'iode moléculaire, un gaz composé uniquement de deux atomes d'iode. Or, à Fukushima, les instruments de mesure ont aussi détecté une grande quantité d'iode 131 gazeux organique, lié à des atomes de carbone. Quand la transformation s'est-elle opérée ?

Des réactions inattendues dans le circuit primaire

Dans la continuité du programme Phébus, le programme Chip² s'est focalisé sur le circuit primaire. Vidé de son eau liquide, il constitue, par ses conditions de pression et de température, un milieu spécifique peu étudié. De nombreux éléments chimiques issus ou non de la fusion du cœur s'y côtoient. Leurs réactions ont été étudiées séparément à Cadarache (Bouches-du-Rhône) sur plusieurs bancs instrumentaux. Les dépôts obtenus ont été analysés à l'Institut des sciences moléculaires de l'université de Bordeaux, équipé d'outils de microspectroscopie optique très précis.

500 fois plus

En Europe, en conditions normales d'exploitation, l'industrie pharmaceutique rejette environ 500 à 1 000 fois plus d'iode 131 que les réacteurs nucléaires.

1. Avec une demi-vie de 8,02 jours, son activité est divisée par seize en un peu plus d'un mois.
2. Chimie de l'iode dans le circuit primaire (Chip).
3. International Source Term Program (ISTP) puis Source Term Evaluation and Mitigation (Stem).
4. Accident Source Term Evaluation Code (Astec).
5. Réseau appelé NUGENIA/Ascom.

« Nous suspicions le césium de jouer un rôle clé, car il peut former avec l'iode un aérosol inorganique très stable, l'iodure de césium, explique Sophie Sobanska, chargée de recherche au CNRS. Nos résultats montrent que l'iode est littéralement pris de vitesse par d'autres éléments issus de la fusion du cœur, notamment le molybdène. Ce phénomène contribuerait à la formation de l'iode moléculaire. »

Que se passe-t-il dans l'enceinte ?

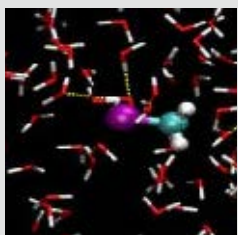
L'Institut s'est aussi intéressé à l'enceinte de confinement³. À Cadarache, un irradiateur de recherche, Epicur, est capable d'en reproduire fidèlement les conditions accidentelles. « Au départ, nous pensions que les peintures époxy recouvrant les murs et les équipements étaient responsables de la formation d'iode organique, se souvient Juliette Colombani, chercheuse en chimie à l'IRSN. Elles attirent naturellement l'iode. Et dans des conditions élevées de rayonnement, d'humidité et de chaleur, elles peuvent se dégrader, libérant de l'iode lié à du carbone. » Lors des essais, l'iode moléculaire est déposé sur des supports peints, puis soumis aux rayonnements gamma. Dans toutes les conditions étudiées, une quantité modérée d'iode organique est produite. Après quelques heures, la réaction s'arrête presque totalement. Les quantités mesurées à Fukushima ne s'expliquent donc pas par ce phénomène.

Les soupçons se portent à présent sur les composés organiques volatils comme le méthane, produit issu de la décomposition des polymères – câbles électriques, peintures... Un nouveau projet de recherche est à l'étude.

Un logiciel simule tous les scénarios

Les campagnes d'essais alimentent et améliorent les modèles informatiques de simulation. Le code Astec⁴ développé par l'IRSN est utilisé par les partenaires du réseau de recherche de la Commission européenne

À LIRE



La transformation de l'iode dans l'atmosphère mieux comprise

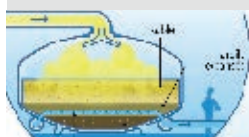
www.irsn.fr/R43

sur les accidents graves⁵. Il sert à simuler les scénarios d'accident, pour la plupart des types de réacteurs, jusqu'au calcul du terme source, par grands types d'espèces.

« La modélisation de la catastrophe de Fukushima a donné des résultats cohérents avec les rejets enregistrés dans les premiers jours, précise Frédéric Cousin, responsable des évaluations de terme source avec ce logiciel. En revanche, elle n'a pas rendu compte des rejets chroniques qui ont suivi, probablement dus à des phénomènes de remobilisation des dépôts dans l'enceinte et le circuit de refroidissement. C'est l'un de nos axes d'amélioration. » Du fait de sa complexité, Astec met plusieurs jours pour livrer son verdict. Pour les situations de crise, il est simplifié pour livrer des résultats très rapidement (voir reportage page 16).

L'influence de la lumière du soleil

Une fois expulsé hors de l'enceinte, comment l'iode se comporte-t-il ? Outre les estimations du terme source dérivées d'Astec, les codes de crise intègrent des modèles météorologiques pour prévoir où et quand il va se déposer, en fonction des conditions de vent ou de précipitation.



INFOGRAPHIE
Comprendre le
fonctionnement
d'un filtre à sable

www.irsn.fr/R22



Benoît Marcillaud, technicien, devant des caissons contenant des filtres à aérosols associés à des pièges à iode.

© Francesco Acerbis/Médiathèque IRSN

Améliorer les filtres à sable

« Les filtres à sable des réacteurs français n'ont pas de propriété particulière de rétention de l'iode organique. Il serait possible d'augmenter leur rendement de filtration en y ajoutant des pièges à iode constitués de matériaux poreux. » Chercheuse à l'IRSN, Céline Monsanglant-Louvet est responsable de PERSÉE¹, un banc d'essais qui reproduit les conditions de température, de pression et d'humidité caractéristiques du fonctionnement normal ou accidentel d'installations nucléaires. L'accident de Fukushima a rappelé l'importance des systèmes d'épuration des effluents gazeux. Après l'évaluation de dispositifs équipant la ligne de dépressurisation de l'enceinte de confinement des réacteurs en cas d'accident grave, les recherches se poursuivent sur les pièges à iode au charbon actif des réseaux de ventilation des installations nucléaires. Elles ont confirmé l'impact de l'humidité de l'air sur leur efficacité de piégeage de l'iode organique, considéré comme la forme chimique la plus pénétrante. (Voir l'infographie sur le webmagazine : www.irsn.fr/R22.)

1. Plateforme expérimentale de recherches sur l'épuration des effluents radioactifs.

Les mesures effectuées par les réseaux de surveillance des radionucléides dans l'air ont permis d'établir la distribution de l'iode entre les formes gazeuses – moléculaires et organiques – et les aérosols. Ses transformations physico-chimiques dans l'atmosphère restent toutefois mal connues. Pour produire par exemple les cartes de dépôt qui vont déterminer les décisions de restriction de consommation des denrées agricoles, les codes font « comme si » les espèces demeuraient sous une forme immuable, une fois sorties de l'enceinte.

« Nous savons que la lumière du soleil stimule la modification de la spéciation, notamment de l'iode moléculaire. À partir d'une certaine distance – importante – du point d'émission, le rapport entre l'iode gazeux et l'iode sous forme d'aérosols se stabilise entre 3/5^e et 4/5^e en faveur des espèces gazeuses, résume Olivier Masson, chercheur en environnement à l'IRSN. Or c'est à proximité du point d'émission, là où l'iode est le plus concentré, que nous avons besoin de comprendre sa répartition entre les trois espèces principales et les transformations qui s'opèrent. » S'il est davantage présent sous forme d'aérosols, la dose reçue en cas d'inhalation est réduite, car cette forme pénètre moins facilement dans les poumons.

Des filtres plus sensibles

Pour la surveillance de l'environnement, un brevet a été déposé pour un nouveau modèle de piège à charbon pour l'iode gazeux organique, le plus difficile à retenir, donc à détecter. Ce filtre est monté sur un dispositif à grand débit pour y faire passer 100 m³ d'air par heure, contre 3 à 5 sur les stations actuelles. Les premiers tests ont été réalisés à proximité de l'usine de La Hague (Manche) pour suivre la concentration d'un autre isotope, l'iode 129. « Ses niveaux sont très bas, sans danger pour la santé, explique Olivier Masson. En travaillant sur ce type de rejets – autorisés et connus – avec des dispositifs placés à des distances variables de la source – par exemple 2, 5, 10 et 50 kilomètres –, nous devrions comprendre les changements entre espèces selon les conditions extérieures. » Les phénomènes quantifiés pourraient alors être transposés aux situations de crise et intégrés aux codes de calcul. Autour de l'iode, l'étau continue à se resserrer... ■

Dossier du prochain numéro :

Contamination par l'iode et protection des populations

À la suite d'une exposition à l'iode radioactif, la dose à la thyroïde varie selon la forme chimique, le mode de contamination et le métabolisme des personnes concernées.

Pour optimiser leur protection, les experts santé conduisent de nombreux programmes pour améliorer sa mesure, préventive et rétrospective.



Les hêtres sont choisis comme espèce témoin pour l'étude de l'iode.

Prendre en compte les transferts dans l'environnement

Comment l'iode radioactif rejeté par les installations se disperse-t-il dans les milieux terrestres et marins ? En cas d'accident, ces milieux constituent-ils une barrière pour l'homme ou amplifient-ils le risque de contamination ? Les scientifiques cherchent des réponses à ces questions.

Sur la grève, aux abords de l'usine de La Hague (Manche), on croise parfois des scientifiques qui collectent de l'eau et des algues. Au sein du Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC), ils étudient le comportement des radionucléides dans le milieu marin. C'est l'iode 129 rejeté en mer par l'usine lors du recyclage du combustible usé qui les intéresse, car sa période est de 15,7 millions d'années.

Dans le milieu marin, les algues brunes concentrent fortement ce radionucléide. « Elles constituent un excellent bio-indicateur pour suivre l'iode radioactif rejeté par les installations nucléaires, explique Bruno Fiévet, océanographe et biologiste au LRC. Dans l'eau de mer, il est très dilué, donc difficile à détecter. Il est nettement plus facile à mesurer dans les végétaux, où il est plus concentré », Lors de leur exondation¹ à marée basse, ces algues transforment une petite fraction de l'iode qu'elles ont concentré en iode volatil réémis vers l'atmosphère. Ainsi, l'iode radioactif qu'elles ont accumulé peut en

partie retourner vers le milieu terrestre sous l'effet des vents, alors qu'il était initialement rejeté en mer. Ce retour vers le milieu terrestre constitue une voie possible d'atteinte de l'homme. Il doit être étudié et évalué.

Comprendre la concentration dans les algues brunes

Quel est l'enjeu de ces recherches ? L'iode 129 est rejeté en mer en très faible quantité lors du recyclage du combustible usé. L'iode 131 peut, quant à lui, être rejeté sous forme liquide lors d'un accident sur une centrale de bord de mer. Pour ces isotopes, deux étapes participent au retour de l'iode radioactif initialement rejeté en mer vers l'atmosphère : sa concentration par l'algue et sa transformation partielle sous forme volatile émise vers l'atmosphère.

Outre la mesure de l'activité radioactive en becquerels (Bq), la compréhension de ces mécanismes implique de distinguer les différentes formes chimiques. « Les chercheurs ont constaté que les formes majoritaires présentes dans l'eau de mer ne sont pas toutes présentes dans l'algue. » Comment s'opère le tri ? Comment l'algue réussit-elle à concentrer autant d'iode, jusqu'à 1 % de la masse sèche ? Quelle fraction est susceptible de revenir vers l'homme par voie atmosphérique ? Existe-t-il d'autres compartiments et interfaces dans le milieu où des changements

 **WEBMAGAZINE**



VIDÉO
Iode moléculaire : mesure expérimentale du dépôt par temps sec
www.irsn.fr/R43

de forme chimique de l'iode interviennent? Les recherches sont nécessaires pour comprendre l'impact des rejets radioactifs sur l'homme et l'environnement.

La canopée ralentit l'iode

Autre volet du programme de recherche sur la dispersion des radionucléides dans l'environnement² : les forêts. Frédéric Coppin, spécialiste des milieux terrestres à l'Institut, travaille avec l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), qui étudie 900 km² de nature dans la Meuse et la Haute-Marne, aux abords de son projet de stockage profond. Les sites forestiers du réseau Renecofor³ et les données collectées depuis 1992 sont mis à la disposition de l'équipe par l'Office national des forêts (ONF).

Des centaines de mesures ont été réalisées pour mieux comprendre des transferts d'iode entre l'arbre et l'environnement. En l'absence d'iode radioactif, les experts ont mesuré l'iode stable, dont le comportement à long terme est similaire. Ces travaux comprennent l'analyse des arbres, des sols et des eaux de pluie, facteur exogène d'apport d'iode important, surtout près des côtes. L'équipe a ensuite projeté ses résultats dans des modèles qui restituent le fonctionnement des hêtres, espèce choisie comme témoin.

« *L'iode n'est pas essentiel à la vie des végétaux, mais ces derniers peuvent le véhiculer, dissous dans l'eau*, explique Frédéric Coppin. *Pour les arbres, l'iode présent dans le sol est principalement accumulé dans les racines. Cela signifie que celui trouvé sur les feuilles vient de l'atmosphère, essentiellement sous la forme de dépôts secs.* » La canopée⁴ joue un rôle de ralentisseur mais l'iode finit par rejoindre le sol, lessivé par la pluie, ou lors de la chute des feuilles. « *Les retours à l'atmosphère seraient ensuite très faibles* », précise le spécialiste.

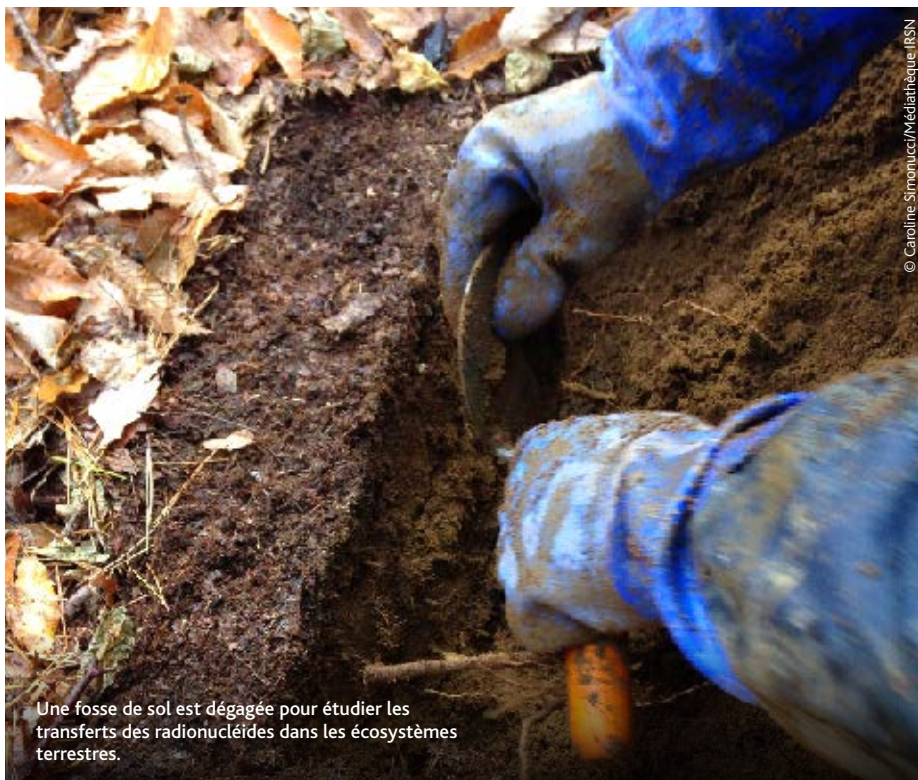
Le sol forestier jouerait donc le rôle d'éponge. L'équipe de Frédéric Coppin s'intéresse maintenant à la caractérisation de la matière organique que l'on peut y trouver. Liée à l'iode, elle peut accroître sa solubilité et le rendre plus facilement mobilisable par les plantes ou par ruissellement des eaux superficielles ou, au contraire, le stabiliser. ■

1. Sortie hors de l'eau.

2. Programme Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement (Amorad), lancé en 2013.

3. Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

4. Étage supérieur de la forêt, celui des feuilles.



Une fosse de sol est dégagée pour étudier les transferts des radionucléides dans les écosystèmes terrestres.

AILLEURS

Des réseaux de surveillance

Janvier 2017 : une présence anormale d'iode 131 sous la forme d'aérosols est détectée dans l'atmosphère par plusieurs stations européennes de surveillance. Ces bases communiquent entre elles dans le cadre d'un réseau informel, le « Ring of Five¹ ». À partir des données échangées, l'IRSN fait « tourner » ses modèles pour reconstituer le parcours des masses d'air et évaluer le terme source. Ses experts remontent jusqu'à une usine radiopharmaceutique proche de Moscou (Russie). Celle-ci n'a pas dépassé ses autorisations de rejet : un dense couvercle nuageux a empêché les polluants de se disperser en altitude et des conditions anticycloniques les ont rabattus sur l'ouest de l'Europe.

« *Ces conditions s'observent fréquemment en janvier, février ou mars*, explique Olivier Masson, chercheur en environnement. *Des événements similaires s'étaient déjà produits et se sont reproduits depuis.* »

En situation normale d'exploitation, les usines qui produisent les traitements radioactifs contre les cancers ont des autorisations de rejets très supérieures à celles des réacteurs de production

d'électricité. Ces rejets ne sont pas pour autant dangereux pour la santé. Géré par l'IRSN, l'Observatoire permanent de la radioactivité de l'atmosphère (Opera) surveille les niveaux des radionucléides dans l'air ambiant, à l'aide d'une quarantaine de stations de prélèvement fonctionnant 7 jours sur 7. Entre 2015 et aujourd'hui, elles ont été équipées de turbines plus puissantes. L'IRSN s'est également doté de détecteurs plus sensibles. Le résultat de ces améliorations s'est traduit par une augmentation de sensibilité d'un facteur 10 pour les aérosols. Un nouveau filtre à charbon vient d'être testé et les rendra bientôt 35 fois plus sensibles aux formes gazeuses. Des réseaux de prélèvement dans les milieux marins, terrestres et en eau douce complètent ce dispositif d'observation.

1. Créé en 1983 par des experts de cinq États du nord de l'Europe, le réseau réunit aujourd'hui 25 pays.

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/iode-2017



1 Des informations sur l'extension du plan particulier d'intervention sont disponibles sur www.distribution-iode.com.

2 Point de situation lors d'un exercice. Les responsables des différentes cellules du centre technique de crise (CTC) rapportent les dernières informations reçues.

3 Équipe de scénarisation d'un exercice de crise.

4 Carte de la région autour de la centrale nucléaire de Cattenom (Moselle). Elle montre les points où une mesure de l'état radiologique est effectuée.

REPORTAGE Une évaluation fiable des risques liés au rejet d'iode radioactif est indispensable en cas d'accident nucléaire. Des outils de crise réalisent ces calculs pour les pouvoirs publics. Des exercices grandeur nature sont réalisés régulièrement.

Centre technique de crise

Des outils pour réagir vite



■ BIBLIOGRAPHIE

Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017. www.irsn.fr//BR2015-2017

Fiche radionucléide iode 131. www.irsn.fr/Fiches-Radio

Masson O. et al. (2011), Environ Sci Technol, 45(18):7670-7677.

Masson O. et al. (2018), Environ Sci Technol, 52(15):8488-8500.

Thèses IRSN :

Gouello M. (2012). Chimie de l'iode et composition des aérosols dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave. www.irsn.fr/Gouello

Trincal J. (2015). Modélisation du comportement de l'iode en atmosphère. www.irsn.fr/Trincal

Roulier M. (2018). Cycle biogéochimique de l'iode en écosystèmes forestiers. www.irsn.fr/Roulier

■ CONTACTS

anne-cecile.gregoire@irsn.fr
olivier.masson@irsn.fr
loic.bosland@irsn.fr

A quelle dose d'iode radioactif les populations vont-elles être exposées ? Faut-il déclencher les plans d'évacuation et ordonner la prise d'iode stable ? Par quels quartiers commencer ? En cas d'accident nucléaire, le préfet a besoin de réponses précises pour prendre les décisions qui s'imposent. Elles lui sont fournies par la cinquantaine d'experts de l'Institut, réunis au sein du centre technique de crise (CTC). « Nous comptons parmi nous des spécialistes de multiples domaines, tous très expérimentés, explique Grégory Ortéga-Nicaise, l'un de ses membres. Cela va du calcul du terme source à l'impact sur la santé humaine et l'environnement, en passant par la communication et la coordination de nos moyens mobiles de mesure des contaminations. » Lui développe les codes de crise qui simplifient le logiciel Astec¹ pour produire, en quelques minutes, une estimation du terme source. Celle-ci retient les hypothèses les plus défavorables, pour ne jamais être dépassée par la réalité. Complétés par des modules météorologiques, ces

codes produisent, par anticipation, des cartes des dépôts radiologiques. Leur fiabilité augmente à mesure que sont prises en compte les découvertes de la recherche théorique.

Quinze exercices par an

« Nous réalisons une quinzaine d'exercices par an. Sur toute leur durée, selon le scénario proposé, nous révisons plusieurs fois nos estimations, comme nous le ferions dans la réalité », poursuit le spécialiste.

Ces exercices mettent en évidence la prévalence des problèmes liés à l'iode dès les premières heures et pendant plusieurs jours.

Les pouvoirs publics ont augmenté le périmètre du plan particulier d'intervention, étendu en 2016 à 20 kilomètres autour des centrales nucléaires. La communication entre les acteurs de la gestion de crise – IRSN, exploitants, autorités de sûreté et préfetures – est primordiale si un accident survient. ■

1. Voir article en page 11.



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. **INFOGRAPHIE** 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 »

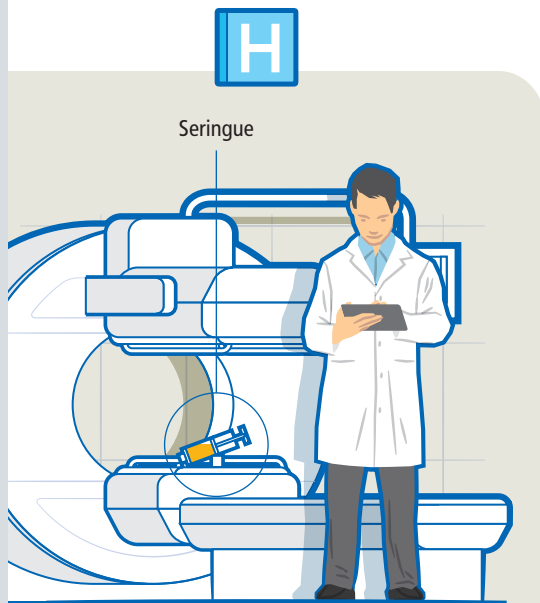
Les hyperthyroïdies liées à la maladie auto-immune de Basedow sont des maladies bénignes de la thyroïde prises en charge par les services de médecine nucléaire. Trois types de traitements permettent de les soigner : la chirurgie, qui consiste à enlever tout ou partie de la thyroïde, l'administration 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 8 jours de période – à des activités de l'ordre de 500 MBq pour une irradiation locale d'environ 100 Gy. Notre service traite chaque année entre 50 et 100 patients hyperthyroïdiens avec ce traitement. 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 radiotraceur 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 ?

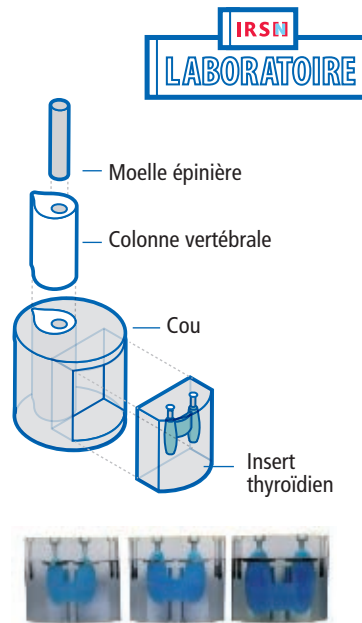
Les fantômes de la thyroïde humaine. Ils sont utilisés pour le calibrage des gamma-caméras et le traitement de pathologies.



1

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

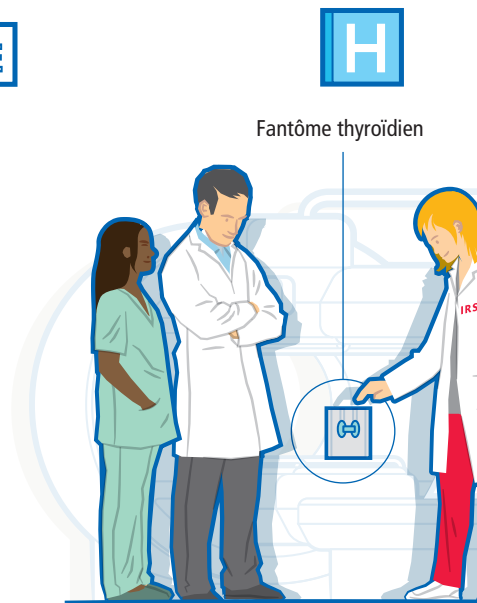
Une **scintigraphie** est pratiquée à l'aide d'une **gamma-caméra** pour obtenir une image fonctionnelle de la thyroïde. La **mesure de la captation d'iode** par la glande nécessite un **étalonnage** de l'appareil. En routine, ce réglage est réalisé par un **physicien médical** ou un manipulateur. Il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



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.



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.

© A. Dagani/Citizen Press/Médiathèque IRSN/Magazine Repères



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

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

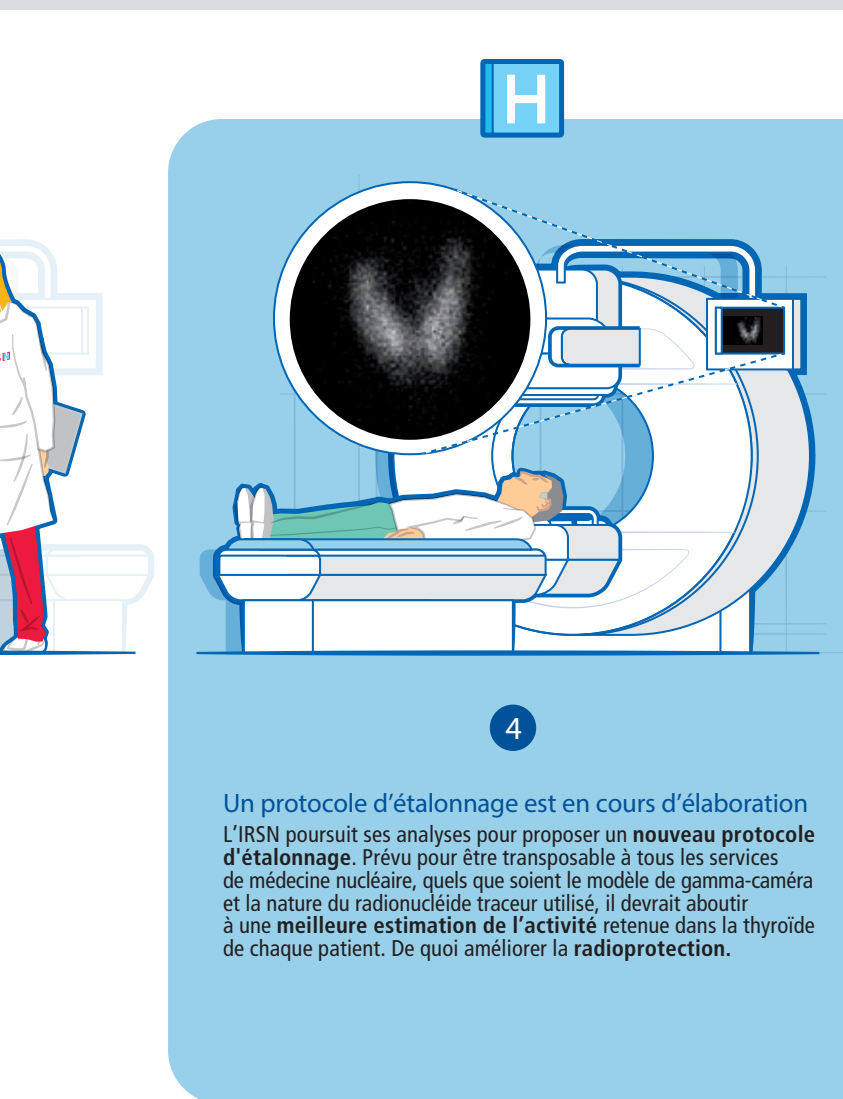
“ Une évaluation précise de la fixation thyroïdienne est primordiale pour la personnalisation de l'activité thérapeutique. Or, en routine clinique, l'étalonnage est souvent réalisé avec des fantômes éloignés de la réalité. Cette simplification peut entraîner une surestimation non négligeable de l'activité 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'image¹. 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 une intercomparaison nationale, en utilisant les fantômes thyroïdiens, afin de réaliser un état de lieux des pratiques françaises sur la mesure de fixation thyroïdienne.

1. Technique permettant d'éliminer le rayonnement parasite.

CONTACT

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

L'IRSN reproduit la forme et la taille de la thyroïde simplifiés pour évaluer l'efficacité des protocoles d'étalonnage des sources utilisées en médecine nucléaire, notamment pour les pathologies bénignes de la thyroïde.



Un protocole d'étalonnage est en cours d'élaboration

L'IRSN poursuit ses analyses pour proposer un **nouveau protocole d'étalonnage**. Prévu pour être transposable à tous les services de médecine nucléaire, quels que soient le modèle de gamma-caméra et la nature du radionucléide traceur utilisé, il devrait aboutir à une **meilleure estimation de l'activité** retenue dans la thyroïde de chaque patient. De quoi améliorer la **radioprotection**.

VERS UN FANTÔME MULTI-NODULES

Certaines formes de pathologies bénignes se caractérisent par la présence d'un ou plusieurs nodules hypo- ou hyper-fixants. Pour améliorer la quantification de la fixation thyroïdienne dans ce contexte, le Laboratoire d'évaluation de la dose interne (Ledi) a conçu un fantôme multi-nodulaire. Plusieurs exemplaires ont été imprimés et des premières mesures ont été réalisées.

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

Un « serious game » sur les déchets radioactifs

Et si un bouleversement politique survenait ? Et s'il n'y avait plus d'argent ? Et si le site de stockage était attaqué ? À l'occasion d'un débat public, des étudiants ont mis à l'épreuve des stratégies de gestion des déchets radioactifs au moyen d'un outil inattendu : un jeu de plateau.

1 Quel est le profil des participants ?

Paris, le 25 mai 2019, une grande salle rassemble plusieurs tablées. Angelo, Raja, Gaëtan, Yasar et Léa sont assis à la même table. Devant eux, des cartes et plateaux de jeu. Pendant trois heures, ils vont jouer à un « serious game¹ ». Ils soumettront des stratégies de gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL) à divers scénarios, puis confronteront leurs points de vue. Angelo Kohou et Raja Zoghliami suivent un master de management environnemental à l'université d'Aix-Marseille (Bouches-du-Rhône). Gaëtan de Lorgeril étudie l'ingénierie nucléaire à l'université de Grenoble (Isère) et Yasar Aslan se forme en génie des installations nucléaires à l'ISTP de Saint-Étienne (Loire). Enfin, Léa Gonnet suit un master « Science et société : histoire, philosophie, sociologie et médiation des sciences » à Strasbourg (Bas-Rhin).

Pour recruter les participants, un appel à volontaires national a été lancé en direction de tous types de formations universitaires : dans les cursus liés au nucléaire, à l'environnement, aux sciences humaines et sociales et dans les instituts d'études politiques qui forment les décideurs de demain. La durée de vie des déchets nucléaires implique les générations futures dans des proportions inédites. La participation des jeunes est indispensable au débat².

1. Baptisé PEP pour « Pathway Evolution Process », ce « jeu sérieux » a été créé dans le cadre du projet SiteX pour les déchets HAVL, puis décliné à la gestion des déchets TFA par l'IRSN et la société Mutadis.
2. Débat public sur le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). Il est organisé par la Commission particulière du débat public (CPDP).



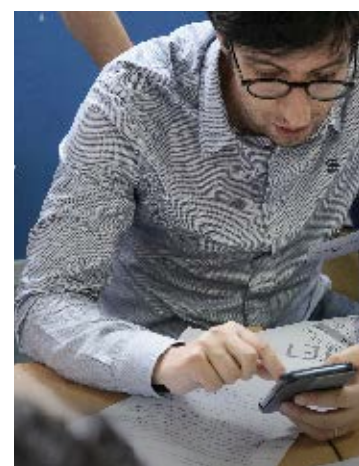
Élément de plateau du « serious game ».

2 Comment se déroule le « serious game » ?

Léa construit son scénario en posant des cartes sur un plateau : « Dans cinquante ans, nous sommes dans une phase de stockage intermédiaire et une galerie souterraine s'effondre. » À tour de rôle, ses voisins évaluent l'impact de la situation. À l'issue de la partie, les points de vue se confrontent. Pour Angelo, il faut aller rapidement vers le stockage géologique profond. D'autres estiment plus sage d'attendre pour laisser des alternatives émerger grâce à la recherche. Les joueurs sont unanimes sur la nécessité d'une solution réversible : « Pas question de fermer définitivement la porte avec du ciment. Nous ne sommes plus dans les années 1970 », s'exclame Yasar.



Yves Marignac, directeur de Wise-Paris, avec Delphine Pellegrini.



3 Quels sont les objectifs de cette séance de jeu ?

« L'enjeu n'est pas d'arrêter un choix ou d'opter pour une solution. Il s'agit avant tout de donner des clés pour comprendre et des outils pour débattre », souligne Delphine Pellegrini, experte IRSN en charge des déchets radioactifs. « Souvent, chacun juge que seule sa position est responsable. Le jeu permet d'examiner avec bienveillance les autres

points de vue et de comprendre qu'il peut y avoir plusieurs positions tenables », précise Yves Marignac, directeur de Wise-Paris, impliqué dans le projet Sitex¹. « Nous ne sommes pas d'accord, mais nous ne sommes pas opposés », résume Angelo après trois heures d'échange.

1. Réseau international d'expertise publique sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs.



Table de jeu sur les déchets à très faible activité (TFA).

4 Qu'apporte la démarche ludique au débat ?

Comme ses collègues venus de Belgique, Julien Dewoghélaère, membre du réseau Sitex¹, anime une table de jeu avec des gestionnaires de risques environnementaux, un ingénieur en énergie nucléaire et un militant écologiste.

« Le jeu collaboratif dépassionne les échanges et garantit à chacun la parole et l'écoute. », explique le facilitateur, qui note la montée en compétences des étudiants. « Je ne connaissais rien au nucléaire, poursuit Marie Belluga, étudiante en ingénierie et management des risques en santé, environnement et travail à Rennes (Ille-et-Vilaine). Le jeu aide à cerner les enjeux et à disposer de clés pour réfléchir et débattre. Je repars avec un avis éclairé sur le stockage géologique des déchets. »

Le « serious game » favorise l'interdisciplinarité. Il permet d'identifier ce qui fait un bon processus de décision compte tenu de la complexité des enjeux.



Dans 50 ans, une galerie souterraine s'effondre. Que fait-on ?

Reportage photo, © Noak/Le Bar Floréal/Médias Réseau IRSN

5 Quel est le bilan de la journée ?

« Il y a eu un vrai dialogue entre les spécialistes et les non-initiés, dont je faisais partie, indique Daniela Mora Salguero, qui étudie la gestion des sols, déchets et sites pollués à l'université d'Aix-Marseille. Je connais maintenant les avantages et les inconvénients des différentes stratégies. J'ai fait valoir mon point de vue ; nous ne pouvons laisser aux générations futures le soin de trouver des solutions. »

À la table voisine, à l'issue d'une dernière partie, les échanges portent sur la difficulté à construire un processus de décision.

Qui consulter : les habitants du site de stockage, toute la population, les spécialistes ? Qui va décider ? Léa interroge ses pairs « Pensez-vous que ce type de dispositif serait utile dans votre cursus pour identifier les enjeux politiques et sociaux derrière les choix techniques ? »

Tous acquiescent.



Daniela Mora Salguero, étudiante, et François Marsal, expert.

Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/PNGMDR-Podcasts
www.sitex.network

Paratonnerres radioactifs

Prévenir les risques à la dépose

Des milliers de paratonnerres radioactifs, ou « parads », sont présents sur nos toitures. Un collège de l'Essonne a fait appel à une entreprise agréée pour enlever le sien en toute sécurité pour la population et les travailleurs.

En ce premier jour des vacances de la Toussaint¹, les élèves et le personnel du collège Condorcet à Dourdan (Essonne) ont déserté l'établissement. L'occasion idéale pour « déposer » – enlever – le paratonnerre à tête radioactive (parads) situé sur le toit. Ils sont interdits depuis 1987², mais il en resterait 40 000 en place, selon l'association Inaparad (Inventaire national des paratonnerres radioactifs).

Franklin France, entreprise spécialisée dans la protection contre la foudre, a été choisie par le collège pour la dépose. Grâce aux fiches de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), le type de parad et le radionucléide présent ont été identifiés. Il s'agit d'un modèle à plots radioactifs de la marque Héli³, contenant du radium 226. Dès 8 h 30, Smahine Boufeldja, assistant coordinateur de chantier, et Alban Ossart, responsable qualité sécurité environnement, sont sur place avec une nacelle télescopique.

Pas moins de quatre dosimètres

Première étape : préparer la zone d'intervention et le périmètre de sécurité. Afin d'éviter toute contamination par les poussières radioactives, l'assistant coordinateur de chantier utilise un équipement de protection individuelle (EPI) à usage unique. Il porte trois dosimètres passifs – doigt, poignet, poitrine – et un dosimètre opérationnel qui contrôle la dose reçue en temps réel. Et c'est parti ! Pilotant sa montée depuis la nacelle, Smahine Boufeldja parvient à hauteur du paratonnerre. À l'aide d'une disqueuse, il découpe les deux attaches du mât. « La difficulté est de ne pas faire tomber le parad, qui pèse plus de 20 kg », souligne-t-il. Une fois redescendu, il découpe la tête et les trois tiges appelées « moustaches ». Il met ces éléments radioactifs dans un sac en aluminium plastifié fermé par un ruban adhésif. L'emballage et les EPI sont conditionnés dans un fût, lui-même glissé dans un deuxième, telle une poupée russe. Ce dernier est scellé et étiqueté.

La dépose d'un paratonnerre radioactif nécessite l'intervention d'une société spécialisée. Ici, à bord d'une nacelle, l'assistant coordinateur de chantier monte sur le toit d'un collège de l'Essonne pour enlever un parad.



Le débit de dose au contact et à un mètre du fût est mesuré. « Cela sert à déterminer l'indice de transport, de 0 à 10, explique Alban Ossart. Il est de 1 lorsque le débit de dose maximum mesuré à un mètre du colis est de 10 μ Sv/h. Notre entreprise est autorisée à transporter des colis dont l'indice est inférieur à 3. La législation nous impose de remplir un « document de transport » comportant ces renseignements. » L'équipe vérifie qu'aucune partie radioactive ne reste sur le site, la zone d'intervention est nettoyée. Le fût est solidement arrimé dans le camion, identifié par une plaque orange

indiquant le code du danger et par une autre avec son symbole (classe 7 : matière radioactive). Le fût est entreposé dans le site de stockage de Franklin France, en Seine-et-Marne. L'ensemble de l'opération a duré une bonne heure. ■

1. Reportage publié dans Repères n° 32, en février 2017.

2. Sont interdits depuis 1987 l'emploi des radioéléments pour la fabrication des paratonnerres ainsi que leur commercialisation et leur importation (arrêté du 11 octobre 1983).

3. La société Héli³ a été la première à commercialiser des parads en France.



DIAPORAMAS

Retrouvez tous les reportages !



Le suivi dosimétrique du professionnel

www.irsn.fr/R32



Comment mettre et enlever un EPI

www.irsn.fr/R32



Se protéger avec un EPI et suivre sa dosimétrie

Smahine Boufeldja porte un équipement de protection individuel (EPI) à usage unique. Ici à son poignet, un des trois dosimètres passifs. En conformité avec la réglementation, ils permettent de s'assurer que les limites d'exposition au niveau de la peau et des extrémités ne sont pas dépassées.

www Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/R23
www.irsn.fr/paratonnerres



Mesurer le débit de dose

La tête du parad est déposée sur une feuille en plastique. L'assistant coordinateur de chantier mesure le débit de dose autour. Une zone d'intervention de 5 mètres de rayon a été balisée pour interdire l'accès à toute personne extérieure.



Les éléments radioactifs sont mis en fût avant le transport

La tête du paratonnerre et les autres éléments radioactifs sont placés dans un sac en aluminium. Ce dernier est mis dans un fût, lui-même glissé dans un autre, en attendant le transport.



Plus de 200 « chasseurs volontaires » de parads

Citoyens bénévoles, ils contribuent à l'Inventaire national des paratonnerres radioactifs (Inaparad), créé par Jean-Christian Tirat, journaliste toulousain, en mars 2011. Conseillé par l'IRSN, Inaparad fonctionne en étroite relation avec les experts. Ici, un chasseur de parad mesure l'activité d'un modèle inconnu.



Reportage photo : © Florence Levillain/Signatures/IRSN



Le fût est transporté conformément aux règles de sécurité

Le colis est placé dans le coffre du véhicule, le plus loin possible du chauffeur. Il est calé solidement à l'aide de sangles et de crochets. Le conducteur reviendra au lieu de stockage par le chemin le plus direct. L'Andra prendra ensuite en charge le colis.

Neutrons Facilitez le suivi dosimétrique

Conseillers en radioprotection et médecins du travail, vous voulez optimiser le suivi dosimétrique des travailleurs ?

Le nouveau dosimètre de l'IRSN est plus compact, robuste et facile à porter. Il embarque un dosimètre radio-photoluminescent (RPL) qui détecte les rayons X, bêta et gamma, et un détecteur solide de traces nucléaires CR39 de grande surface qui détecte les neutrons rapides, intermédiaires et thermiques, sans correction d'énergie. Les résultats sont mis à votre disposition sur le portail monDosimètre et sur Siseri.



© Blad/jack3D/Stock

© Grégoire Maisonneuve/Médiathèque IRSN

Pour en savoir plus

Laboratoire de dosimétrie de l'IRSN (LDI)
Tel : 01 30 15 52 22
Contact : dosimetre@irsn.fr
www.irsn.fr/dosimetrie-interne

