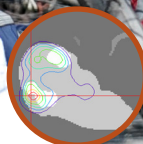


Focus

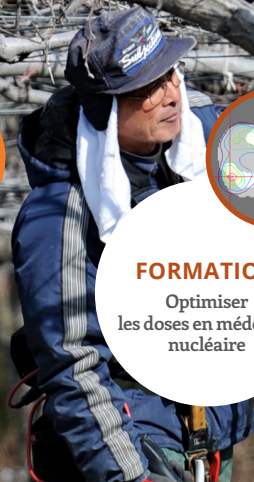
étudier les **DENRÉES JAPONAISES**
terrestres contaminées
pour **AMÉLIORER L'APPUI**
à la gestion de crise

**AVANCÉES**

Refroidir
un cœur de réacteur
endommagé

**FORMATION**

Optimiser
les doses en médecine
nucléaire



L'analyse du « post-accident », une clé pour la reconquête des territoires contaminés



L'un des paradoxes inhérent au métier d'expert en sûreté veut que l'Institut travaille de front sur la prévention des accidents majeurs et sur le développement des connaissances permettant d'apporter un appui efficace face à la survenue d'un tel accident, toujours possible malgré les efforts de prévention. La catastrophe de Fukushima a mis en lumière des difficultés supplémentaires par rapport à celle de Tchernobyl : la durée possible de la phase d'urgence pour un site multi-installations, la complexité

de la phase post-accidentelle dans un pays à grande densité d'activités économique. Sa gestion montre la forte imbrication des questions scientifiques, sociétales et économiques dans la reconquête des territoires. Un motif clair pour que l'Institut s'investisse dans des analyses fines d'une situation approchant celles qui pourraient être rencontrées en Europe.

La reconquête d'une activité socio-économique dans un territoire contaminé par des dépôts radioactifs nécessite de prévoir les évolutions de cette contamination au cours du temps dans les différents compartiments de la vie humaine : habitat, espaces agricoles... Il est donc essentiel que les pouvoirs publics soient en mesure d'apporter leur soutien aux communautés concernées, à partir de connaissances scientifiques établies, de manière à ce qu'elles aient la meilleure vision possible des perturbations que la contamination induit et induira dans la durée sur leurs conditions de vie. Ainsi que l'illustre le dossier de ce numéro, l'IRSN s'investit dans ces travaux pour être prêt à répondre à ces questions.

Matthieu Schuler,

Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats

Aktis est la lettre d'information scientifique de l'IRSN. Elle présente les principaux résultats de recherches menées par l'Institut dans les domaines de la radioprotection, de la sûreté et de la sécurité nucléaire. Trimestrielle et gratuite, elle existe aussi en version électronique sur abonnement. Aktis est une publication trimestrielle de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jacques Repussard - Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Giovanni Bruna, Matthieu Schuler - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Giovanni Bruna, Aleth Delattre, Jean-Michel Evrard, Christine Goudebranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano - Réalisation : www.grouperougevit.fr - AIRE - ISSN : 2110-588X - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément à la loi No 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi No 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, tout utilisateur ayant déposé des informations directement ou indirectement nominatives, peut demander la communication de ces informations et les faire rectifier le cas échéant.

SOMMAIRE

ÉDITO
Matthieu Schuler

AVANCÉES DE LA RECHERCHE
PAGE 3

- Refroidir un cœur de réacteur endommagé
- Les cibles de l'uranium dans les organismes aquatiques

FOCUS
PAGE 6

Étudier les denrées japonaises terrestres contaminées pour améliorer l'appui à la gestion de crise

FORMATION PAR LA RECHERCHE
PAGE 9

- Comment se dégraderaient les gaines de combustible irradié au contact de l'air ?
- Optimiser les doses en médecine nucléaire

VIE DE LA RECHERCHE
PAGE 11

- Publication
- Vidéos
- Prix
- Soutenances

Glossaire ^{GL0}
PAGE 11

Photo de couverture - Élagage de poiriers sur une plantation de Nihonmatsu dans la préfecture de Fukushima, le 26 mars 2011. © Roslan Rahman/AFP

Accident de fusion du cœur

REFROIDIR un cœur de RÉACTEUR ENDOMMAGÉ

En cas de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire, tout serait mis en œuvre pour arrêter la progression de l'accident, notamment en injectant de l'eau dans la cuve. Maîtriser les conditions dans lesquelles il est possible de refroidir ainsi un cœur endommagé est donc un enjeu de sûreté majeur. C'est l'objet du programme PEARL.

Si le cœur d'un réacteur nucléaire n'est plus refroidi, les crayons de combustible s'échauffent et se dégradent. Comme ce fut le cas sur le réacteur de TMI-2 aux USA en 1979 et probablement à Fukushima, le cœur peut alors s'effondrer pour former une grande masse de particules millimétriques appelée « lit de débris ». Quelles sont les conditions pour que ce « lit » puisse être refroidi par renoyage, c'est-à-dire par injection d'eau ? Pour répondre à cette question, l'IRSN mène le programme expérimental PEARL. Dans le premier volet du programme, des « lits » de taille moyenne (25 kg, diamètre de 11 à 29 cm, 25 cm de haut), chauffés à différentes températures, ont été renoyés, à la pression atmosphérique dans l'installation PRELUDE. Les lits sont simulés par des billes métalliques contenues dans un tube en quartz chauffées par induction pendant l'expérience. Les quelque 150 essais se distinguent par la qualité et l'originalité des mesures réalisées (notamment la mesure de pression pour des écoulements eau-vapeur dans un lit à haute température), et par la diversité des paramètres étudiés⁽¹⁾. Cette série d'essais a ainsi fourni une base de données unique au monde.

DEUX SITUATIONS FAVORISENT LE REFROIDISSEMENT

Leur analyse a révélé des résultats importants. D'une part, il existe une valeur du débit d'eau injectée à partir de laquelle la capacité de refroidissement ne s'améliore plus. Au-delà, l'eau injectée a tendance à contourner les régions les moins perméables et ne participe quasiment plus à leur refroidissement. D'autre part, la durée du refroidissement ne peut être réduite en deçà d'une limite qui dépend uniquement des caractéristiques géométriques du lit, et ce quelle que soit la disponibilité de l'eau. De plus, les résultats ont confirmé que deux situations favorisent le re-

froidissement : lorsque le renoyage s'effectue par le bas, l'eau et la vapeur s'écoulent ainsi dans le même sens ; et lorsque la vapeur d'eau produite par le renoyage soulève les particules (fluidisation du lit).

LA CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE

Les données déjà obtenues sont essentielles pour bien évaluer les stratégies de conduite proposées par EDF pour injecter l'eau en situation accidentelle. Elles ont montré l'importance de la configuration géométrique du lit sur le refroidissement. Dans le second volet du programme PEARL, une nouvelle installation permettra des essais à plus grande échelle (500 kg, diamètre de 54 cm, 50 cm de hauteur), et à plus haute pression (jusqu'à 10 bar). Plus représentatifs des conditions d'accident en réacteur, ils contribueront à une meilleure évaluation de sûreté. Les premiers essais sont attendus d'ici la fin d'année.



L'installation PEARL permettra d'étudier les écoulements multi-dimensionnels et les effets de la puissance résiduelle dans des conditions représentatives d'un réacteur accidenté. Les choix technologiques et l'instrumentation ont été qualifiés grâce à l'installation PRELUDE, plus petite.

© Jean-Marie Huron/Signatures/IRSN

EDF, Sarnet 2 (projet de la Commission européenne)

CONTACT

Nouridine Chikhi
nouridine.chikhi@irsn.fr

Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux - LE2M

⁽¹⁾ Débit d'eau injectée, taille des particules, puissance de chauffe, mode d'injection par le bas ou par le haut, configuration géométrique avec/sans bypass.

PUBLICATION

Repetto G. *et al.*
« Main outcomes on debris bed cooling from PRELUDE Experiments », *Proceeding of 6th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2013)*, Avignon, France, October 02-04, 2013.

En savoir plus sur le programme PEARL



LES CIBLES DE L'URANIUM dans les organismes aquatiques

Si la toxicité globale de l'uranium à faibles doses est globalement bien caractérisée pour les organismes vivants, ses mécanismes d'action au niveau cellulaire sont mal connus. Une équipe de l'IRSN est partie de l'hypothèse que, sur le plan biologique, la toxicité de l'uranium peut mieux s'expliquer en caractérisant les interactions entre l'élément et les entités moléculaires impliquées dans le métabolisme biochimique. Soutenue par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et en collaboration avec le CNRS, elle a exploré le problème en utilisant une approche métallomique^{GL0}.

Laboratoire de Chimie Analytique, Bioinorganique et environnement-IPREM CNRS Pau-UMR 5254

CONTACT

Sandrine Frelon sandrine.frelon@irsn.fr

Laboratoire de biogéochimie, biodisponibilité et transferts des radionucléides - L2BT



⁽¹⁾ L'uranium est présent naturellement à faibles doses dans l'environnement, mais il peut aussi être issu d'activités humaines telles que l'épandage d'engrais phosphatés ou les effluents d'installations du cycle du combustible électronucléaire. Sa concentration peut alors se situer au-dessus de la valeur naturelle.

Par quels mécanismes d'action chimique l'uranium est-il toxique pour les organismes vivants ? De nombreuses recherches, en particulier à l'IRSN, ont jusqu'à présent permis de cerner la toxicité globale de ce radioélément que l'on trouve à concentrations plus ou moins faibles dans l'environnement, notamment dans les écosystèmes aquatiques⁽¹⁾. En revanche, les interactions entre les molécules de la cellule et l'uranium qui sont à l'origine de cette toxicité ont été peu étudiées. Une équipe de l'IRSN en collaboration avec le CNRS a eu l'idée d'utiliser la métallomique^{GL0}, discipline innovante étudiant les interactions métal-molécules, pour mieux comprendre comment se distribue l'uranium une fois qu'il s'est introduit au sein des cellules d'organismes, sous quelles formes chimiques il se trouve et avec quelles molécules biologiques (protéines, peptides ou acides nucléiques) il s'associe. Ces études permettront *in fine* d'explicitier le lien entre exposition et toxicité. Ce projet dénommé ST MALO (Speciation of uranium in aquatic living organisms) a été lauréat d'un appel à projets « jeune chercheur » de l'Agence nationale pour la recherche (ANR) en raison de l'innovation du sujet et de la complexité d'une approche métallomique avec l'uranium.

ÉLEVÉS DANS L'EAU CONTAMINÉE

Les mécanismes d'action de l'uranium ont été étudiés sur deux organismes – modèles aquatiques, le poisson-zèbre (*Danio rerio*) et l'écrevisse (*Procambarus clarkii*). Ceux-ci ont été élevés en laboratoire dans de l'eau contaminée à l'uranium avec plusieurs conditions d'exposition : contamination chronique à faibles concentrations (situation représentant un système aquatique proche d'anciennes mines d'uranium), ou contamination aiguë à fortes concentrations (représentant un

rejet accidentel d'installation du cycle du combustible électronucléaire). Deux organes clés par organisme ont été étudiés : les branchies, puisque l'uranium contenu dans l'eau entre par cet organe dans les organismes aquatiques ; l'hépatopancréas des écrevisses, organe de détoxification ; et les reins des poissons, organe de stockage, notamment de l'uranium. Après broyage et centrifugation des organes, le cytosol des cellules, « composant sensible » dans lequel baigne l'ensemble des constituants cellulaires, a été isolé afin d'analyser les molécules qui s'y trouvaient, et tout particulièrement celles complexées avec l'uranium.

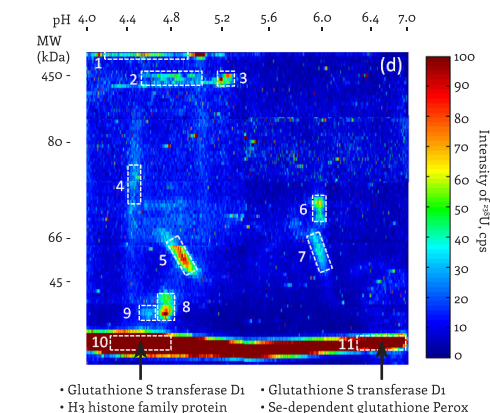
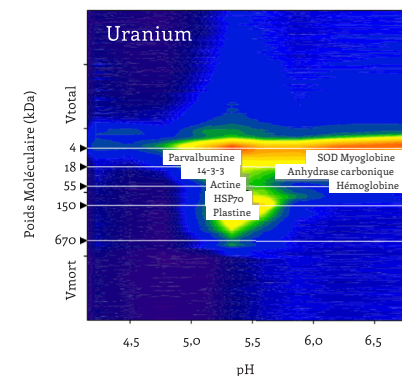
PRÉSERVER AU MIEUX LES COMPLEXES DE L'URANIUM

Toute la difficulté de ces travaux a résidé dans la mise au point des méthodes choisies pour analyser les complexes de l'uranium et dans leur application à des échantillons réalistes par rapport à ce qui existe dans l'environnement (accumulation très faible, parfois inférieure à 50 nanogrammes). Les atomes d'uranium ont une liaison non covalente (*i. e.* électrostatique), donc faible, avec les biomolécules : cette liaison peut être rompue facilement par les méthodes d'analyse classiques des protéines. Aussi les approches développées ont été adaptées avec des produits peu agressifs pour préserver au mieux ces complexes pendant l'analyse ; en contrepartie, la séparation des biomolécules est moins performante qu'avec des produits classiques. Une première technique, la focalisation isoélectrique hors gel, utilisée couplée à l'analyse en continu de l'uranium et d'éléments essentiels tels que le fer et le calcium, a permis de séparer et d'identifier, en milieu liquide, les protéines des branchies du poisson zèbre qui avaient été complexées avec l'uranium. En parallèle, la tech-

nique d'électrophorèse sur gel, classiquement utilisée en protéomique^{GL0} pour son pouvoir de séparation des protéines, a été optimisée pour obtenir une séparation non dénaturante des complexes uranium-protéines dans les organes d'écrevisses. Les portions riches en uranium ont ainsi été identifiées et les protéines présentes caractérisées. Ceci a permis d'associer sans ambiguïté la présence d'uranium à une protéine bien identifiée et de dresser une liste des molécules cibles de l'uranium.

CARTOGRAPHIE DE L'URANIUM

L'analyse des résultats obtenus par ces techniques a permis de déterminer la distribution de l'uranium parmi les protéines cellulaires des écrevisses et des poissons zèbres contaminés. Tout d'abord, la répartition de l'uranium n'est pas homogène parmi les protéines, et elle est différente d'un organe à l'autre. La cartographie de l'uranium montre une affinité particulière du radioélément pour les protéines à caractère acide, contenant du phosphore (phosphorylation, présence d'ATP), du fer, du zinc et du cuivre. De plus, des différences sur la nature des complexes de l'uranium ont été mises en évidence dans les branchies du poisson zèbre selon que l'exposition est aiguë ou chronique, pour une même contamination totale. Enfin, il est apparu que les protéines identifiées comme cibles de l'uranium (environ quinze par organe étudié), et dont la fonctionnalité pourrait être perturbée par le radioélément, participent à plusieurs fonctions biologiques majeures. L'analyse de la littérature scientifique a montré que certaines de ces cibles protéiques⁽²⁾ ont d'ores et déjà été identifiées dans des modèles/organes biologiques diffé-



Cartographie bidimensionnelle (point isoélectrique / poids moléculaire) de l'uranium dans les protéines cytosoliques des branchies de poisson (*D. rerio*) (a) ou d'hépatopancréas d'écrevisse (*P. clarkii*) (b) - Identification de quelques protéines potentiellement cibles, sous des spots riches en uranium. © IRSN

rents, et à l'aide de stratégies analytiques différentes de celle utilisée par l'équipe de l'IRSN. De plus, il est apparu que l'ensemble des cibles sont regroupées autour de fonctions biologiques⁽³⁾ similaires d'un modèle et d'un organe à l'autre. Ces recoupements confirment l'importance des protéines-cibles identifiées durant le projet STMALO dans les mécanismes de toxicité de l'uranium. Une nouvelle thèse poursuit ces travaux en transposant l'approche et la méthode de STMALO aux gonades de poisson zèbre afin de comprendre les liens entre les interactions protéines-uranium au sein de cet organe et les dysfonctionnements potentiels de la fonction de reproduction. Cette thèse participe du projet NEEDS-ENVIRONNEMENT TARGETS débuté en 2014.

⁽²⁾ Actine, protéine 14-3-3, glyceraldehyde-3-phosphate déhydrogénase, calréticuline, SOD, ferritine, L-lactate déhydrogénase chaîne B, protéines phosphorylées ou contenant de l'ATP.

⁽³⁾ Transporteurs d'O₂, rôle dans le métabolisme du Ca, dans la structure cellulaire, protéine d'activité de détoxification, homéostasie des métaux, métabolisme des acides aminés et des sucres.

PUBLICATION

• Xu M. *et al.*
« Non-Denaturing Isoelectric Focusing Gel Electrophoresis for Uranium-protein Complexes Quantitative Analysis with LA-ICP MS. » *Anal Bioanal Chem* (2014) 406: 1063-1072.

• Xu M. *et al.*
« In Vivo Screening and Identification of Uranium Protein Targets in *Procambarus clarkii* by Non-Denaturing 2D Gel Electrophoresis » *Talanta*, acceptée (2013).

• Frelon S. *et al.*
« Subcellular fractionation and chemical speciation of uranium to elucidate its fate in gills and hepatopancreas of crayfish *Procambarus clarkii*. » *Chemosphere* (2013) 91: 481-490.

• *Développements analytiques pour la spéciation de l'uranium dans les branchies du poisson zèbre (Danio rerio) après exposition*, thèse soutenue par Guillaume Bucher le 22 novembre 2013 à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, École doctorale des sciences exactes et leurs applications (ED 211).

étudier LES DENRÉES JAPONAISES terrestres contaminées pour AMÉLIORER L'APPUI à la gestion de crise

Si un accident nucléaire survenait en France, l'IRSN aurait pour rôle d'apporter un appui aux autorités, aux populations et aux élus locaux à la fois pendant et après l'accident. Sur la base des leçons tirées des accidents graves de Tchernobyl et de Fukushima, l'IRSN doit poursuivre ses travaux pour être prêt à jouer son rôle d'appui de la façon la plus efficace. Ainsi, dans le domaine de la contamination de l'alimentation, l'Institut a choisi d'analyser tous les résultats de mesure publiés par le ministère japonais de la Santé et du Travail (MHLW). D'un point de vue opérationnel et immédiat, ceci lui a tout d'abord permis d'informer au fur et à mesure les résidents français au Japon et de conseiller la DGCCRF^{GL0}, organisme en charge du contrôle des denrées importées du Japon. Du point de vue de la préparation à sa mission d'appui, l'IRSN a exploité ces données afin de confronter les outils logiciels qu'il développe à toute la complexité d'une situation réelle. Au-delà, ces données ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances radioécologiques, en comblant certaines lacunes dans la compréhension des transferts de la contamination dans les fruits.

CONTACT

Philippe Renaud
philippe.renaud@irsn.fr

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement - Sesure

⁽¹⁾ Les articles scientifiques publiés dans des revues, qui fournissent les fondements scientifiques de cet article, sont consacrés exclusivement à l'étude des denrées alimentaires terrestres : plantes agricoles ou sauvages, produits d'élevage et gibier. L'IRSN a traité dans d'autres documents l'analyse de la contamination de la sphère marine, et notamment des denrées que sont les poissons.

Entre mars 2011 et mars 2013, le ministère japonais de la Santé et du Travail (MHLW) a régulièrement publié sur son site Internet les résultats de mesure sur la contamination de denrées alimentaires produites au Japon. L'IRSN a analysé de façon systématique tout ce qui concernait les denrées terrestres notamment⁽¹⁾, au fur et à mesure de leur mise à disposition. Grâce à ce travail, des bulletins destinés aux ressortissants français vivant au Japon ont été diffusés jusqu'en 2013 pour les informer et formuler des recommandations à leur attention. Sur le plan de la recherche, cette analyse a permis de conforter et compléter les observations et connaissances acquises après l'accident de Tchernobyl sur la façon dont les dépôts de radioéléments se transfèrent aux plantes agricoles ou sauvages, aux produits d'élevage et au gibier. De manière générale, les niveaux de contamination des denrées japonaises et leurs évolutions n'ont pas occasionné de surprise notable. Le plus souvent, les connaissances radioécologiques avaient permis de les prévoir et donc de les interpréter. La période des retombées radioactives sur le Japon – plus précoce dans les calendriers agricoles et d'élevage que celle de l'accident de Tchernobyl – a joué un rôle important : la contamination de la plupart des denrées est restée très modérée, alors même que les dépôts ont été très importants. Les denrées ont été principalement contaminées par l'iode 131 et par les césiums 137 et 134.

SURTOUT LES LÉGUMES-FEUILLES

La contamination la plus importante, exprimée par l'activité massique^{GL0}, observée dans les denrées agricoles ou issues de l'élevage, a été mesurée seulement dans les légumes-feuilles comme les salades, les épinards ou les choux (quelques dizaines de milliers de becquerels par kilo (Bq/kg) d'iode 131 ou de césiums 134 et 137) peu de temps après l'accident. Cette contamination a ensuite diminué rapidement, de 100 à 1 000 fois en deux à trois mois. Pour la part de contamination liée à l'iode, cette diminution est liée à la décroissance radioactive ; pour celle liée aux césiums, elle est due principalement à la croissance des plantes. Cette diminution a été conforme avec ce qui avait été observé en France après l'accident de Tchernobyl et avec ce qui pouvait être prédit par les outils de calcul de l'IRSN. Pour les arbustes à feuillage persistant comme les théiers et les bambous, des activités de quelques milliers de Bq/kg de césiums ont été mesurées dans les feuilles en 2011. Cette contamination des feuilles s'est transférée à la plante, ce qui a entraîné une contamination rémanente en 2012 et même en 2013 dans les pousses de bambous. En ce qui concerne les vergers, la faible interception des dépôts radioactifs, due à l'absence de feuilles au moment des rejets, s'est traduite par une faible contamination de la récolte de 2011 et une faible rémanence de cette contamination dans les récoltes de 2012 et 2013. Les céréales étant encore en herbe mi-mars, le césium

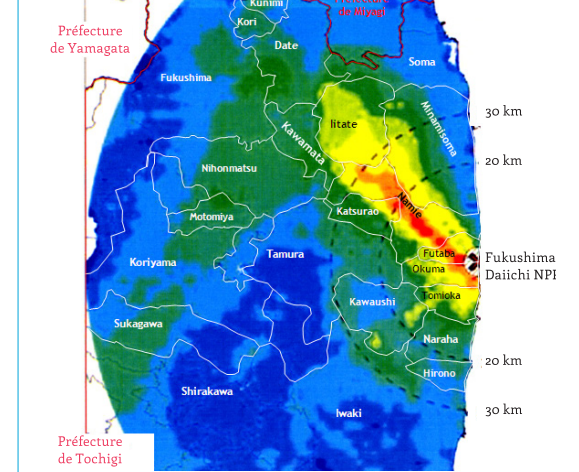
retenu sur les feuilles n'a que peu été transféré aux grains dont la formation a commencé deux mois plus tard. Le riz n'était quant à lui pas encore planté à cette période. Il est important de souligner que si l'accident était survenu trois ou quatre mois plus tard, la plupart des productions agricoles, fruitières et céréalières, auraient atteint des niveaux de contamination très élevés comparables à ceux observés dans les légumes-feuilles.

FOURRAGES IMPORTÉS

La contamination des produits laitiers et de la viande a quant à elle été limitée par la pratique, courante au Japon, d'alimenter les animaux avec des fourrages importés. Si les vaches des territoires non-évacués les plus contaminés (comme Iitate ou Kawamata) avaient consommé des herbages locaux, la contamination de leur lait aurait atteint 100 000 Bq/L, soit plus de 100 fois les valeurs maximales effectivement observées. Enfin, l'accident de Tchernobyl avait montré que les produits forestiers comme les champignons et le gibier atteignent des niveaux de contamination élevés qui ne diminuent que lentement au fil des années. Celui de Fukushima a confirmé cette particularité en l'étendant aux pousses de végétaux consommées au Japon (pousses d'aralia, de Koshiabura, cresses de fougères) et aux champignons cultivés, les shiitakés.

LES DOSES REÇUES PAR LA POPULATION

Les doses reçues par la population japonaise résultant de la consommation de denrées alimentaires ont été limitées en raison de la contamination modérée de ces denrées issues de l'agriculture et de l'élevage, mais aussi grâce à l'évacuation des territoires les plus touchés et aux interdictions de consommation. Comme attendu, la population a reçu les doses par ingestion les plus élevées durant le premier mois qui a suivi les dépôts radioactifs. Elles sont liées à l'ingestion de produits locaux, notamment des légumes-feuilles et des champignons dont la consommation n'a pas été interdite immédiatement. Des analyses d'urine réalisées dans le cadre d'une étude japonaise témoignent que certaines personnes ont pu recevoir ainsi des doses à la thyroïde de quelques dizaines de millisieverts. L'évaluation par le calcul de la dose reçue par une personne à partir des activités mesurées dans les légumes-feuilles produits à Iitate et Kawamata aboutit à ce même ordre de grandeur. Pour le



reste de l'année 2011, les doses efficaces dues aux seuls césiums 134 et 137 (l'iode ayant quasiment disparu par décroissance radioactive au terme des trois premiers mois) ont été très faibles au regard de l'importance des dépôts radioactifs : de l'ordre de 1 millisievert (mSv) entre mai et décembre 2011 pour des personnes qui auraient consommé exclusivement des produits locaux sur des localités parmi les plus touchées des zones non-évacuées. Même la consommation ponctuelle de denrées terrestres parmi les plus contaminées mesurées en 2011, avant ou en dépit des interdictions de consommation, n'a pas pu conduire à des doses significativement supérieures. Ainsi, la consommation de 1 kg des champignons dont les teneurs mesurées en césium 134 et 137 étaient de 8 900 et 11 000 Bq/kg respectivement (valeurs maximales mesurées en 2011) aurait conduit à une dose de 310 microsieverts (µSv). Ces constats soulignent la pertinence pour les autorités de prononcer des interdictions immédiates de consommer des denrées locales dans un périmètre à définir rapidement sans attendre le recueil, plus lent, des résultats de mesure, comme le préconise le Comité directeur français du post-accidentel (CODIR-PA ; groupe de travail national pour la définition d'une doctrine de gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire pour le cas où il surviendrait en France).

AMÉLIORATION DES MODÈLES PRÉDICTIFS

Le volume de données mis à disposition des scientifiques du monde entier par le MHLW a été très important : les résultats des analyses d'iode 131 et de césiums 134 et 137 réalisées sur 742 000 échantillons de denrées alimentaires de toutes

Carte des dépôts rémanents en mars 2013 avec localisation des localités : Kawamata et Iitate notamment (carte issue du site « Extension Site of Distribution Map of Radiation Dose, etc.,/ Digital Japan »)

PUBLICATIONS

- Renaud P. et al. « Foodstuff contamination in Japan after the Fukushima accident and related dose assessments ; Part 1 Foodstuff contamination. » *Radioprotection* 48(4). 493-509. 2013. français.
- Renaud P. et al. « Foodstuff contamination in Japan after the Fukushima accident and related dose assessments ; Part 2 Ingestion dose during the first year. » *Radioprotection* 49(1) 17-22 (2014).

En savoir plus sur l'accident de Fukushima

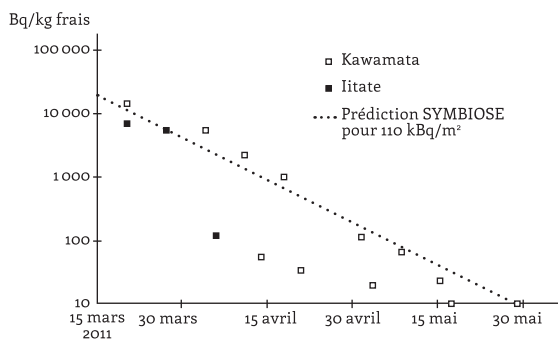


natures sont disponibles. Ces informations sont suffisamment précises (désignation de la denrée, date et localisation du prélèvement) pour être utilisées au test des outils de calculs de l'IRSN. Ainsi, des calculs effectués au moyen du code

Symbiose – un logiciel qui permet de faire des prévisions sur l'évolution de la contamination et sur l'exposition des populations en situation normale et post-accidentelle – ont été confrontés de manière satisfaisante aux activités massives d'iode et de césium mesurées par les Japonais dans les légumes-feuilles (ci-dessus), les herbages et le lait.

MODÈLE DES TRANSFERTS AUX FRUITS

Les données publiées par le MHLW présentent par ailleurs un intérêt particulier pour améliorer les connaissances radioécologiques dans le cas des fruits de verger (abricots, cerises, pêches, pommes, poires, raisins...). En effet, les transferts de contamination aux fruits sont beaucoup moins documentés dans la littérature scientifique que ceux des autres denrées et l'IRSN ne dispose actuellement d'aucun modèle étayé. L'étude menée par l'IRSN sur la base des données japonaises complète des observations faites en France, en Grèce, en Italie et en Autriche après l'accident de Tchernobyl. Elle a permis d'obtenir des facteurs de transfert du césium 137 dans les fruits. Ceux-ci établissent directement la correspondance entre les activités déposées (Bq/m^2) lors des retombées radioactives et la contamination

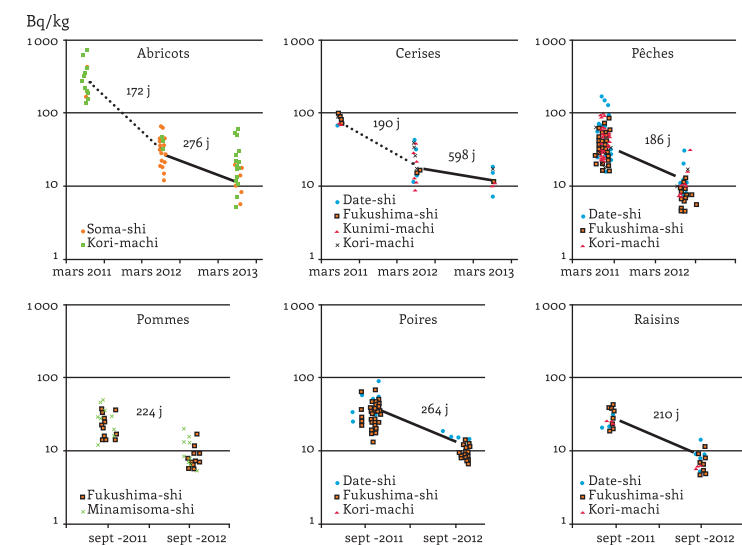


Activités de ^{137}Cs mesurées dans des légumes-feuilles (épinards, salades, choux) provenant d'Iitate et de Kawamata et activités estimées par le code de calcul SYMBIOSE pour un dépôt de $110\ 000\ Bq/m^2$.

PUBLICATIONS

• Renaud P. et al. « Lesson from the Fukushima and Chernobyl accidents concerning the ^{137}Cs contamination of orchard fresh fruits. » *Radioprotection/E-first*, juin 2014.

des fruits (Bq/kg) à la première récolte, en fonction du délai entre les dépôts et la récolte. Pour les récoltes suivantes, la diminution de la contamination a également pu être quantifiée à l'aide des mesures japonaises et européennes (ci-dessous). Ces résultats jettent les bases d'un modèle des transferts aux fruits après un accident nucléaire qui alimentera les outils de calculs de l'IRSN. D'autres études de ce type sont en cours sur les produits forestiers (champignons et gibiers) et sur de grandes cultures de céréales et de légumineuses, dont le riz, le sarrasin et le soja. Elles viendront consolider les outils de gestion post-accidentelle de l'IRSN afin de rendre plus efficace son appui aux décideurs par l'amélioration de ses capacités de prévision.



Activités de ^{137}Cs (Bq/kg frais) dans des fruits provenant de différentes localités parmi les plus touchées par les dépôts radioactifs et périodes de diminution (en jours) pour les récoltes successives.

Combustible - Physique/chimie

Comment se dégraderaient LES GAINES DE COMBUSTIBLE irradié au CONTACT DE L'AIR ?

L'accident de Fukushima a mis en lumière le risque – dans des situations extrêmes – que le combustible nucléaire usé entreposé en piscine ne soit plus sous eau. Mieux comprendre les mécanismes de dégradation du combustible dans ces situations devrait permettre d'en limiter les conséquences.

L'oxydation par la vapeur d'eau des gaines des crayons de combustible nucléaire a été intensivement étudiée dans l'hypothèse d'un accident de réacteur. En revanche, l'oxydation au contact de l'air – qui se produirait si le combustible n'était accidentellement plus immergé dans une piscine ou lors de sa manutention – est encore mal connue. Cette oxydation étant plus rapide que sous vapeur d'eau (l'azote en est un catalyseur) il est nécessaire d'en expliciter les mécanismes et les cinétiques.

OBSERVATION EXPÉRIMENTALE DE L'OXYDATION

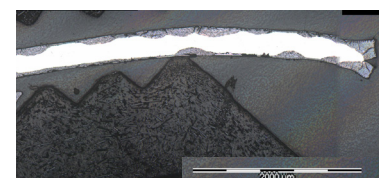
Durantsa thèse, Marina Lasserre a observé expérimentalement l'oxydation d'échantillons de gaine sous air : après une première phase pendant laquelle se développe, à la surface de la gaine, une couche d'oxyde protectrice et uniforme, des zones oxydées, nitrurées et poreuses apparaissent progressivement et de façon apparemment aléatoire ; la vitesse de corrosion augmente alors très rapidement⁽¹⁾. Sur la base de cette observation, un modèle de « germination-croissance » a été adopté pour représenter l'oxydation : il permet de rendre compte du développement aléatoire des zones attaquées (la germination) et de leur extension à une vitesse donnée (la croissance). La vitesse d'oxydation peut donc s'écrire sous la forme d'un produit de deux fonctions : une fonction (statistique) d'espace, qui caractérise l'évolution de la surface touchée par l'oxydation, et une fonction chimique pour la réactivité surfacique de croissance⁽²⁾.

DÉCROCHEMENTS DE PRESSION

Pour définir spécifiquement la fonction chimique, Marina Lasserre a adopté une démarche originale. Elle a utilisé une technique éprouvée qui consiste à

obtenir la vitesse d'oxydation en mesurant l'évolution du poids des échantillons au cours de la corrosion (technique d'analyse thermo-gravimétrique – ATG). Mais au lieu de l'appliquer dans des conditions fixes de pression partielle d'oxygène, elle a effectué des changements rapides (ou « décrochements ») de pression : en mesurant les rapports de vitesses d'oxydation, elle s'est ainsi affranchie de la fonction d'espace. Puis elle a tracé l'évolution du rapport de vitesse pour différents « décrochements » afin de mettre en évidence une fonction entre la réactivité surfacique de croissance et la pression partielle d'oxygène. Pour la fonction d'espace, elle a utilisé un modèle statistique classique⁽²⁾.

Cette méthode a permis de déterminer quantitativement les paramètres cinétiques de la réaction d'oxydation, ce qui n'avait jamais été fait auparavant. Les fonctions ainsi obtenues décrivent de manière très satisfaisante la vitesse de la réaction. L'une des actions de recherche lancées dans le cadre du programme ANR DENOP⁽³⁾ va permettre d'affiner le modèle qui, à terme, sera implanté dans le logiciel de calcul des accidents graves ASTEC⁽⁴⁾.



En blanc, l'échantillon de gaine de combustible. On distingue en gris (sur le fond blanc) une couche uniforme d'oxydation qui, dans une première phase, s'est formée sur toute la surface ; ainsi que les taches plus larges qui se sont formées aléatoirement durant la deuxième phase de l'oxydation sous air. Image réalisée à l'aide d'un microscope optique métallographique inversé Olympus PMG3.

© IRSN

École nationale supérieure des mines de Saint-Etienne (Laboratoire Georges Friedel CNRS-UMR 5307), AREVA

CONTACT

Olivia Coindreau
olivia.coindreau@irsn.fr

Laboratoire d'étude de la physique du corium - LEPC

⁽¹⁾ L'oxydation totale de la gaine est atteinte en moins d'un quart d'heure à 850°C, température adoptée pour les expériences.

⁽²⁾ Modèle statistique de Mampel avec les paramètres qui permettent de reproduire au mieux la vitesse de la réaction.

⁽³⁾ Programme de l'Agence nationale pour la recherche (ANR) sur le Dénoyage accidentel des piscines d'entreposage de combustible nucléaire.

PUBLICATION

Modélisation des phénomènes de corrosion du Zircaloy-4 sous mélanges oxygène-azote à haute température, thèse soutenue par Marina Lasserre le 17 décembre 2013 à l'École supérieure des Mines de St-Etienne.

En savoir plus sur le programme Denopi



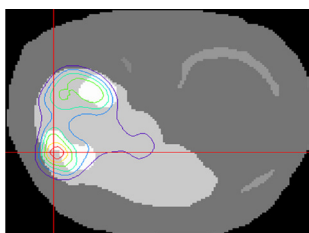
Optimiser LES DOSES en médecine nucléaire

Dans le domaine médical, et plus particulièrement en médecine nucléaire, optimiser les doses de radioactivité délivrées représente un enjeu de radioprotection et un enjeu d'efficacité du traitement. Une méthode de dosimétrie personnalisée vient d'être mise au point et appliquée dans le cas d'un traitement émergent.

Certaines tumeurs non-opérables peuvent être traitées en médecine nucléaire par la radiothérapie interne sélective (ou SIRT), en injectant dans l'organisme des radioéléments qui vont détruire sélectivement⁽¹⁾ la tumeur. Actuellement, l'activité de radioéléments à injecter est essentiellement définie à partir du poids et de la taille du patient. Alice Petitguillaume a développé durant sa thèse une méthode de dosimétrie personnalisée utilisant un code Monte Carlo, ou PMCD, pour la SIRT. Elle prend en compte la morphologie du patient et la distribution du radio-pharmaceutique qui est spécifique à cette personne.

UNE REPRÉSENTATION PERSONNALISÉE EN 3D

Le protocole de la SIRT consiste à injecter dans une première étape du technétium 99m associé à des macro-agrégats d'albumine pour mimer le



■ 20 Gy	■ Tissus restants
■ 40 Gy	■ Poumon droit
■ 60 Gy	■ Poumon gauche
■ 80 Gy	■ Foie sain
■ 100 Gy	■ Métastases hépatiques
■ 120 Gy	

Image du foie avec métastases et les isodoses obtenues à l'aide du logiciel OEDIPE. Développé par l'IRSN, celui-ci transforme les images anatomiques de la personne (scanner, IRM) et les caractéristiques de la source (images TEMP-TDM) en données exploitables par le code MCNPX.

© IRSN

traitement et visualiser la distribution du radioélément dans l'organisme du patient⁽²⁾. Dans une seconde étape, l'yttrium 90, porté par des microsphères, est injecté pour le traitement. La première étape fournit deux types d'images en trois dimensions : celle des organes du patient et celle de la distribution du radioélément dans les organes. Alice Petitguillaume a appliqué la PMCD en introduisant ces images dans le logiciel OEDIPE développé par l'IRSN ; il crée ainsi une représentation en 3D du patient (fantôme voxelisé) associée à la distribution du radionucléide. Ces données sont formalisées pour le code de calcul Monte Carlo⁽³⁾ MCNPX qui simule l'interaction des particules dans le corps du patient. En sortie, OEDIPE calcule les doses reçues par les organes et établit une cartographie des doses sous forme de courbes isodoses. À partir de la dose considérée comme tolérable pour les tissus sains, l'activité de radioélément à injecter est définie de façon à ce que la dose délivrée à la tumeur, dans l'étape de traitement, soit maximale.

AUGMENTER LA DOSE

Pour tester sa pertinence, cette méthode a été appliquée *a posteriori* aux cas de dix-huit patients traités à l'Hôpital européen Georges Pompidou pour un cancer du foie non-opérable. Avec la PMCD, l'activité qui aurait pu être injectée est en moyenne 27 % plus importante qu'avec la méthode la plus élaborée utilisée en clinique, en respectant les mêmes critères de dose moyenne aux organes à risque. De plus, avec la visualisation de la répartition de la dose en 3D, il est possible d'augmenter la dose reçue par le foie sain sur une zone restreinte en conservant les fonctions de l'organe. L'activité à injecter aurait ainsi pu être augmentée d'au moins 40 %. Cette méthode de dosimétrie personnalisée permet donc d'augmenter l'efficacité du traitement, avec le même niveau de préservation des tissus sains. Elle pourrait être appliquée à d'autres types de radiothérapies internes.

CONTACT

Aurélié Desbrée
aurelie.desbree@irsn.fr

Laboratoire d'évaluation de la dose interne - Ledi



⁽¹⁾ Le radioélément est porté par des microsphères qui sont injectées dans l'artère hépatique. Celle-ci irrigant principalement la tumeur, les microsphères vont s'y fixer.

⁽²⁾ Cette visualisation est réalisée à l'aide d'un TEMP-TDM. TEMP est l'acronyme de Tomographie d'émission monophotonique qui correspond à l'acronyme SPECT en anglais pour Single Photon Emission Computed Tomography. TDM est l'imagerie scanner pour l'anatomie (CT en anglais).

⁽³⁾ Un logiciel de calcul Monte Carlo simule le chemin suivi par des particules en utilisant la méthode de calcul statistique Monte Carlo, sur la base de lancements aléatoires des particules.

PUBLICATION

• Petitguillaume A. et al. « Three-Dimensional Personalized Monte Carlo Dosimetry in ⁹⁰Y Resin Microspheres Therapy of Hepatic Metastases: Non tumoral Liver and Lungs Radiation Protection Considerations and Treatment Planning Optimization », *The Journal of Nuclear Medicine*. 2014;55:405-413.

PUBLICATION

UNE RUBRIQUE SPÉCIALE SUR ASTEC DANS « NED »

La revue Nuclear Engineering and Design (NED) consacre une rubrique spéciale de son numéro 272 (juin 2014) au système de logiciels ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code). Développé par l'IRSN et par son homologue allemand Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), ASTEC a pour objet de simuler l'ensemble des phénomènes qui interviendraient au cours d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression.

VIDÉOS

JOURNÉE SCIENTIFIQUE SUR LES RISQUES RÉSIDUELS



Le 25 mars 2014, le Conseil scientifique de l'IRSN a participé à un séminaire organisé par le Directeur scientifique consacré à la « Reconquête des territoires contaminés ». Au cœur des missions de l'IRSN, ce thème a rassemblé des scientifiques d'horizons différents, partenaires et acteurs des recherches de l'Institut. Les vidéos des interventions de cette journée sont en ligne.

PRIX

JAD FARAH REÇOIT LE PRIX DU « JEUNE PHYSICIEN MÉDICAL » DU 6^E AAMP

Jad Farah, ingénieur-chercheur au Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) a reçu le prix du « Jeune physicien médical » (Young Medical Physicist) lors du 6^e Meeting d'Alpe-Adria (AAMP) qui s'est tenu à Budapest (Hongrie) du 29 au 31 mai 2014. Intitulée « Characterization of XR-

RV3 GafChromic films in standard laboratory and in clinical conditions : Means to reduce uncertainties », la présentation primée portait sur la réduction des incertitudes liées à l'utilisation de films radiochromiques en radiologie interventionnelle. Ce type de films présente un intérêt tout particulier en dosimétrie dans les cas où le gradient de dose est important. Le travail récompensé a été réalisé dans le cadre du réseau Eurados qui regroupe les laboratoires de recherche européens dans le domaine de la dosimétrie des rayonnements ionisants.

LE 2^E PRIX « JEUNE SCIENTIFIQUE » DE L'IRPA ATTRIBUÉ À FABIEN PANZA

Fabien Panza, ingénieur au Service d'intervention et d'assistance en radioprotection de l'IRSN, a reçu le deuxième prix du « Jeune scientifique » (Young scientist award) lors du congrès de l'International Radiation Protection Association (IRPA) qui s'est tenu à Genève (Suisse) du 23 au 27 juin 2014. Le travail récompensé concerne le développement d'un système embarqué de mesure de la radioactivité sur des sites contaminés, dénommé Marcassin (Moyen autoporteur pour la réalisation de cartographies de l'activité sur sites contaminés). Monté sur un quad qui se déplace à vitesse constante en mesurant la radioactivité du sol, il permet de réaliser rapidement une cartographie du site inspecté.

SOUTENANCES

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Fabienne Ribeiro soutiendra son HDR intitulée *Apport des approches atomistiques à la sûreté nucléaire* le 26 septembre 2014, au centre de Cadarache (Bouches du Rhône).

THÈSES

Deux thèses ont été soutenues au second trimestre : celle de Christelle Durand sur les *Effets des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) sur l'hypermotilité viscérale chronique dans un modèle d'ulcération colique radio-induite chez le rat* le 19 juin 2014 à Fontenay-aux-Roses ; et celle de Paul Sapin sur *l'Étude expérimentale de l'ébullition en masse dans un milieu poreux modèle* le 14 mai 2014 à Toulouse.

+ En savoir plus sur Eurados



+ En savoir plus sur le 6^e meeting d'Alpe-Adria



+ En savoir plus sur le 2^e prix « jeune scientifique » de l'IRPA



+ En savoir plus sur le congrès IRPA 2014



+ Pour accéder aux vidéos



ACTIVITÉ

MASSIQUE : Activité par unité de masse d'un matériau ou d'un fluide.

Représente, ici, la concentration d'un radionucléide dans un échantillon alimentaire (unité Bq/kg).

ASTEC : Acronyme de Accident Source Term Evaluation Code. Système de logiciels dont l'objet est de simuler l'ensemble des phénomènes qui interviendraient au cours d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire à eau sous pression.

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

MÉTALLOMIQUE :

La distribution élémentaire des ions métalliques dans la cellule et leurs interactions avec les biomolécules est appelée métallome, par analogie avec l'ensemble des protéines appelées protéome. L'étude des métallomes est la métallomique.

PROTÉOMIQUE :

Consiste à étudier l'ensemble des protéines d'un organisme, d'un fluide biologique, d'un organe, d'une cellule ou même d'un compartiment cellulaire.

RÉACTIVITÉ SURFACIQUE DE CROISSANCE :

grandeur qui s'exprime en $\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et qui caractérise la vitesse d'une réaction.

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est un organisme public d'expertise et de recherche pour la sûreté et la sécurité nucléaires et la radioprotection. Il intervient comme expert en appui aux autorités publiques. Il exerce également des missions de service public qui lui sont confiées par la réglementation. Il contribue notamment à la surveillance radiologique du territoire national et des travailleurs, à la gestion des situations d'urgence et à l'information du public. Il met son expertise à la disposition de partenaires et de clients français ou étrangers.

Pour consulter la version numérique d'Aktis, accéder aux publications scientifiques et aux informations complémentaires en ligne, et pour s'abonner, rendez-vous sur le site Internet de l'IRSN : www.irsn.fr/aktis

**SIÈGE SOCIAL**

31 avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses -
France
RCS Nanterre B 440 546 018

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

COURRIER

BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex - France

SITE INTERNET

www.irsn.fr