

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

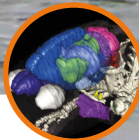
L'actualité de la recherche à l'IRSN

N° 28

Hiver 2018

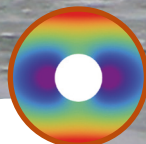
FOCUS

*Vers une MEILLEURE PRÉDICTION
du devenir des RADIONUCLÉIDES
dans le MILIEU MARIN*



AVANCÉES

RODES, un outil dédié
aux calculs
de doses en soutien
à la radiotoxicologie
expérimentale



FORMATION

Un nouveau modèle
de comportement
mécanique
pour les matériaux
nanoporeux

BESOIN SIMPLE ET RÉALITÉ COMPLEXE !



Photo de Jean-Christophe Niel

Sept ans après l'accident de Fukushima, la distribution du corium (magma créé par la fusion du cœur) dans les réacteurs accidentés n'est encore que partiellement connue. La progression du corium au moment de l'accident a pu affecter l'intégrité de l'enceinte de confinement et créer une voie de rejet supplémentaire vers l'environnement. Aujourd'hui, sa répartition et sa composition sont des données indispensables pour assurer un démantèlement dans des conditions optimales de sûreté. Elles ne peuvent

être apportées, de manière détaillée, que par des investigations et prélèvements robotisés qu'il faut mener dans un milieu particulièrement hostile.

La simulation pourrait être une alternative mais les outils actuels ne permettent pas encore une reconstitution suffisamment fine du déroulement de l'accident. Accroître le réalisme des simulations nécessite une nouvelle génération d'outils avec des modèles plus détaillés mettant en œuvre des approches multiphysiques complexes, à différentes échelles. Ce numéro en donne une illustration avec la modélisation, en cas de réinjection d'eau sur un cœur asséché, des mouvements des fragments de combustible s'accumulant en un « lit de débris ». Elle représente un type de configuration de plus en plus réaliste – difficile à reproduire expérimentalement – imprimable en 3D, mettant ainsi à disposition un objet qui permet de mesurer les caractéristiques de l'écoulement, et, partant, de valider le modèle de refroidissement. Cette approche de modélisation multi-échelle touche des sujets de plus en plus larges, comme en témoignent les articles sur les matériaux nanoporeux ou sur la chimie du ruthénium en réacteur. Son intérêt, en complément de l'expérimentation, en fait un élément clé de la recherche de l'Institut et un challenge pour les enjeux de sûreté les plus importants.

Avant de vous souhaiter une bonne lecture de ce numéro 28 d'Aktis, je tiens à remercier Matthieu Schuler pour son action volontaire et son engagement sans relâche au sein de l'IRSN au profit de la sûreté et la sécurité nucléaire et la radioprotection. Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats, il a notamment supervisé depuis 2011 la rédaction de cette revue avec la volonté de partage et de diffusion large des travaux et résultats de recherche de l'Institut auprès de la communauté scientifique. Son arrivée à l'ANSES en début d'année laisse présager un renforcement des relations entre l'ANSES et l'IRSN dans les nombreux domaines que nous partageons.

Jean-Christophe Niel,

Directeur Général de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

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. Gratuite, elle est aussi diffusée sous forme de mail. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel - Directeur de la rédaction : Patrice Deschamps - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Christian Tamponnet, Matthieu Schuler, Jean-Michel Bonnet, Nathalie Lemaître - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Christian Tamponnet, Aleth Delattre, Richard Gonzalez, Christine Gouedranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano, Audrey de Santis / UMAPS - Réalisation : www.grouperougevit.fr - 25310 Impression : Idéale Prod, certifiée Imprim'Vert - ISSN : 2110-588X - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément à la loi N° 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 N° 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

Jean-Christophe Niel

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- RODES, un outil dédié aux calculs de doses en soutien de la radiotoxicologie expérimentale
- Deux stratégies complémentaires pour mesurer la carbonylation des protéines
- Un modèle réaliste pour les lits de débris

FOCUS

PAGE 6

Vers une meilleure prédiction du devenir des radionucléides dans le milieu marin

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

- Un nouveau modèle de comportement mécanique pour les matériaux nanoporeux
- Le comportement du ruthénium dans le circuit primaire en cas d'accident

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Soutenances de HDR
- Nouveaux sujets de thèse
- Soutenances de thèse

Glossaire ^{GL0}

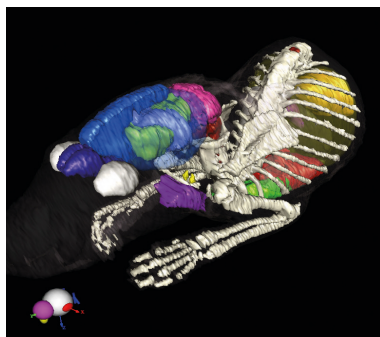
PAGE 12

Photo de couverture -
Bateau de pêche près des côtes japonaises
© Sabine Charmasson / IRSN

RODES, un outil dédié AUX CALCULS DE DOSES en soutien à la radiotoxicologie expérimentale

L'IRSN étudie les effets biologiques consécutifs à la contamination chronique d'organismes vivants par des radionucléides afin d'estimer le risque sanitaire potentiellement associé. Pour cela, il mène des programmes expérimentaux sur des modèles animaux afin de comprendre et quantifier le lien entre contamination, doses aux organes et effets.

Les programmes expérimentaux de radiotoxicologie permettent d'étudier les effets d'une contamination à une ou plusieurs substances radioactives. L'analyse exige de connaître précisément l'évolution temporelle de la répartition de la dose absorbée par les organes. Pour chaque organe celle-ci provient de la concentration en radionucléide(s) internalisé(s) ainsi que du rayonnement émis par les autres organes devenus, en raison de leur contamination, sources d'irradiation pour le reste du corps. La dose reçue par les animaux durant les programmes expérimentaux est calculée à partir des mesures de concentration contenue dans les organes. Ces mesures, combinées à l'analyse d'images scanner ou IRM, permettent à l'aide d'un logiciel de simulation Monte Carlo^{GLD} de restituer la dose reçue par chaque organe. Une équipe de l'IRSN a développé un nouvel outil baptisé **RODES**, premier du genre, qui permet aux biologistes d'estimer directement la dose reçue par un organe à partir de mesures expérimentales.



Vues d'un fantôme voxelisé de rate. Les contours des organes internes sont représentés par les différentes couleurs.

© IRSN

Le logiciel **RODES** utilise un ensemble de facteurs spécifiques pour chaque organe, calculés par les chercheurs de l'IRSN à partir de fantômes numériques voxelisés, c'est-à-dire des représentations numériques en 3D de rats et de souris (à l'aide du logiciel **EDIPE**⁽¹⁾). Les fantômes intègrent 13 organes sources et 28 organes cibles. Puis des simulations Monte Carlo ont été réalisées sur les fantômes à partir des caractéristiques des contaminations envisagées, pour un spectre large de 11 énergies de photons et de sept énergies d'électrons, afin de pouvoir prendre en compte tout type de radionucléide émetteur bêta ou gamma.

Calcul précis de la dose à l'organe

Ceci a permis d'obtenir dans un premier temps les quantités d'énergie absorbées par chaque organe cible en fonction de l'organe source (appelées fractions massiques d'énergie absorbées ou SAFs), pour chaque énergie étudiée. Dans un second temps, l'ensemble des SAFs a permis de définir les doses de rayonnement absorbées par les organes cibles à chaque désintégration radioactive dans un organe source (appelées facteurs-S). Ces facteurs sont spécifiques d'un radionucléide et servent de base au calcul de dose final dans **RODES** en étant combinés aux mesures expérimentales de la radioactivité des animaux. Le logiciel a été validé en comparant les résultats obtenus avec les données de la littérature. Il a été déposé à l'Agence pour la protection des programmes, et est distribué gratuitement, sous licence libre. Simple d'utilisation, il suffit d'intégrer ses données expérimentales – radionucléide, espèce animale, sexe, âge, organes cibles, organes sources, mesures d'activité – pour que le logiciel fournisse une dose précise reçue par les organes cibles.

Paris - Centre de recherche cardiovasculaire à l'HEGP (PARCC-HEGP - unité mixte Inserm 970) et Plateforme d'imagerie du vivant, université Paris Descartes - Sorbonne Paris Cité

CONTACT

Eric Blanchardon
eric.blanchardon@irsn.fr

Aurélien Desbrée
aurelie.desbree@irsn.fr

Laboratoire d'évaluation de la dose interne - LedI

⁽¹⁾ Le logiciel **EDIPE** développé par l'IRSN permet de créer des fantômes voxelisés à partir d'images médicales (IRM, scanners) et de générer automatiquement un fichier d'entrée pour le code de calcul Monte Carlo **MCPNPX**. Pour chaque espèce, afin de limiter le nombre important de simulations, un seul individu par sexe a été utilisé ainsi qu'un seul par catégorie d'âge (rats juvéniles, adultes et vieux, souris adultes).

PUBLICATION

• Locatelli M. et al.
« **RODES** software for dose assessment of rats and mice contaminated with radionuclides »
J Radiol Prot. (2017) 37(1):214-229.



DEUX STRATÉGIES complémentaires pour mesurer la CARBONYLATION DES protéines

Les dommages aux protéines, notamment la carbonylation, suite à l'exposition chronique des êtres vivants aux rayonnements ionisants est une question émergente. Le projet ISATIS étudie ces mécanismes biologiques, et en premier lieu leur caractérisation, pour mieux évaluer et prédire la toxicité de ce type d'exposition.

MedILS
(Croatie),
UMR 5247 (Montpellier)

CONTACT

Sandrine Frelon
sandrine.frelon@
irsn.fr

Laboratoire
d'écotoxicologie des
radionucléides - Leco

⁽¹⁾ Le réactif utilisé – l'hydrazide – peut, suivant les conditions, se fixer sur d'autres groupements chimiques que les carbonyles. Par ailleurs, certaines conditions de préparation (oxydantes) peuvent conduire à une surproduction de protéines carbonylées.

PUBLICATIONS

• Kuzmic M. *et al.*
« In situ visualization of carbonylation and its co-localization with proteins, lipids, DNA and RNA in *Caenorhabditis elegans* » *Free Radical Biology and Medicine*, 101 (2016) 465-474



• Pыр dit Ruys S. *et al.*
« Benchmarking of protein carbonylation analysis in *Caenorhabditis elegans*: specific considerations and general advice » *Free Radical Biology and Medicine*, 99(2016)364-373

Le projet ISATIS vise à étudier les mécanismes élémentaires d'interaction des rayonnements ionisants avec les molécules biologiques constitutives d'un organisme vivant, notamment avec les protéines^{GL0} dont les dommages seraient tout aussi critiques que ceux à l'ADN. Parmi ces dommages, la carbonylation^{GL0} est un biomarqueur reconnu en cas de stress oxydatif cellulaire^{GL0}. Elle a été récemment associée à un défaut de reproduction chez des organismes invertébrés, les nématodes (vers), après une irradiation aiguë à forte dose de rayonnements gamma (>200 Grays). Aucun résultat n'existant pour le domaine des faibles doses (<100 milliGrays) et des expositions chroniques, cette problématique est l'un des enjeux du projet ISATIS.

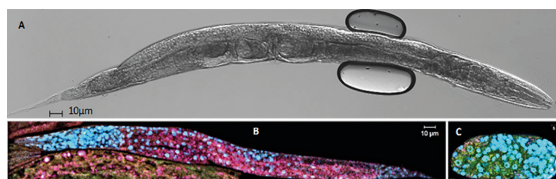
Les méthodes existantes pour mesurer ces dommages étant questionnées par les scientifiques, la première étape du projet était de définir une approche adaptée aux conditions de l'étude. En pratique, deux méthodes complémentaires ont été développées et optimisées chez le nématode *Caenorhabditis elegans*. La première permet de déterminer la quantité et la nature des protéines carbonylées dans l'échantillon de plusieurs individus ayant reçu le même traitement. Elle repose sur l'extraction des protéines, suivie de leur séparation chimique puis d'un dénombrement des groupements carbonyles des protéines, ces derniers ayant été marqués par un composé fluorescent. Les étapes de la préparation, notamment le temps de réaction pour le marquage,

ses conditions physico-chimiques et la quantité de réactif, ont été optimisées. Il s'agissait d'une part d'éviter un biais⁽¹⁾ sur la quantité de carbonyles mesurée dans l'échantillon, et, d'autre part, de pouvoir marquer toutes les protéines par un second composé fluorescent afin d'obtenir le pourcentage de protéines carbonylées par rapport aux protéines totales.

Protéines et autres biomolécules

L'autre méthode permet de dénombrer les carbonyles directement dans l'organisme entier, par imagerie confocale^{GL0}. Le même composé est utilisé pour le marquage des carbonyles. Ces derniers n'étant pas « portés » uniquement par les protéines mais aussi par d'autres biomolécules (ADN, ARN et lipides), chaque biomolécule est aussi associée à un marqueur spécifique. Cette méthode permet ainsi de mesurer le niveau de carbonylation des protéines comme des autres biomolécules.

Les deux méthodes ont ensuite été validées à l'aide de tests, *via* l'exposition aiguë de nématodes aux rayons ultraviolets, connus pour générer des carbonyles. Les résultats sont tout à fait concordants, signant un premier jalon technique fondamental pour la suite du projet ISATIS. Celui-ci permettra d'évaluer le lien de ce dommage avec une perturbation de la reproduction ou de la longévité sur des nématodes exposés à une irradiation y chronique.

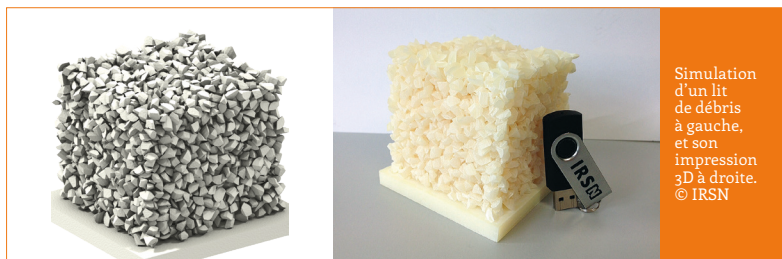


En haut, *Caenorhabditis elegans* avec œufs au microscope optique. En bas, vers et œuf marqués avec un marquage multiple carbonyles/lipides/ADN/protéines.

© IRSN / Kuzmic M. *et al.*

Un MODÈLE réaliste pour les LITS DE DÉBRIS

L'IRSN mène des recherches sur l'efficacité d'un envoi d'eau pour ralentir la dégradation du cœur d'un réacteur nucléaire en cas d'accident de fusion. En effet, si un « lit de débris » s'est formé, l'efficacité du refroidissement de ce lit par l'eau dépend en particulier de sa structure géométrique. Pour mieux en comprendre l'impact, un modèle de formation du lit de débris vient d'être mis au point.



Simulation d'un lit de débris à gauche, et son impression 3D à droite. © IRSN

Lors d'un accident de fusion d'un cœur de réacteur nucléaire, un ou plusieurs assemblages de combustible peuvent s'effondrer et former un « lit de débris » c'est-à-dire un mélange de fragments de pastilles de combustible et de gaines. Selon ses caractéristiques géométriques, et la chaleur résiduelle, le lit laissera plus ou moins facilement passer l'eau et la vapeur pour le refroidir. Actuellement les études sur le refroidissement des lits de débris reposent sur des modèles simplifiés qui représentent les débris par des sphères. Une représentation plus réaliste permettrait cependant de mieux évaluer l'efficacité du refroidissement.

Devant le peu de données expérimentales disponibles pour reconstituer la morphologie d'un lit de débris, l'idée a été d'en simuler la formation à partir des caractéristiques connues du combustible fissuré pendant l'irradiation et de représenter le combustible comme un matériau constitué de grains. L'utilisation des équations de la mécanique des fluides permet ensuite de remonter aux propriétés de l'écoulement dans ces lits de débris.

Simulations d'effondrement

Durant son post-doctorat, Duc-Hanh NGUYEN a réalisé des simulations d'effondrement de crayons combustibles endommagés et de formation de lits

de débris à partir de deux schémas différents de fissuration des pastilles de combustible et divers degrés de fragmentation (fonction de la durée d'irradiation). Ces simulations ont permis de caractériser des lits de débris qui s'approchent de ceux pouvant potentiellement se former dans le cœur d'un réacteur. Les résultats ont montré que le nombre de fissures le long de l'axe de révolution des pastilles influence fortement la porosité finale du lit de débris. Celle-ci varie entre 31 % et 45 % avec une configuration plus probable autour de 41 %⁽¹⁾. Sur la base d'un modèle théorique, il a été possible d'évaluer l'impact du degré de fragmentation des pastilles sur les pertes de charges, c'est-à-dire sur la dissipation de l'énergie mécanique de l'eau lorsqu'elle traverse le lit de débris. Par ailleurs, les résultats des simulations sont directement utilisables pour imprimer les lits de débris simulés en 3D pour engager une approche expérimentale. Une première série d'échantillons a été imprimée et soumise à des essais d'écoulement à froid dans un dispositif expérimental de l'IRSN. Les résultats seront confrontés à ceux obtenus jusqu'ici en représentant les lits de débris avec des sphères.

Ces travaux seront utilisés dans les logiciels de simulation dédiés à ce type d'accidents, comme le logiciel ASTEC⁽²⁾. De plus, la technique mise au point ouvre la voie à l'étude d'autres configurations et à des travaux de vérification expérimentale.

Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT)

CONTACT

Vincent Topin
vincent.topin@irsn.fr
Laboratoire d'étude de la physique du corium - LEPC

⁽¹⁾ cette valeur est cohérente avec celle observée dans le cœur endommagé du réacteur n°2 de la centrale américaine de Three Mile Island accidentée en 1979.

⁽²⁾ logiciel de simulation des accidents graves porté par l'IRSN.

PUBLICATION

• Nguyen D.-H. et al.
« Investigation of the structure of debris beds formed from fuel rods fragmentation »
Nuclear Engineering and Design 313 (2017) 96-107.



Vers une meilleure PRÉDICTION du DEVENIR des radionucléides dans le MILIEU MARIN

 Dans le cadre d'Amorad-marin : LA- Université Toulouse, Ifremer, LSIS- USTV (Université du Sud Toulon Var), LSCE-CEA-CNRS, EPOC-TGM- Université de Bordeaux, CLS (Collecte localisation satellite), REEDS- Université Versailles Saint-Quentin, EDF

CONTACTS

Sabine Charmasson
sabine.charmasson@irsn.fr

Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques - LRTA

L'évaluation des conséquences d'un accident tel que celui de Fukushima repose en grande partie sur des prévisions fournies par des modèles décrivant la dispersion des radionucléides et la contamination qui en résulte au sein des différents compartiments (air, terre, mer...) de l'environnement, prévisions consolidées par des mesures *in situ*. Les modèles existants, développés après l'accident de Tchernobyl, concernent surtout la dispersion dans l'air et le dépôt dans l'environnement terrestre, jusqu'aux conséquences sur l'homme. Pour la partie marine, ils étaient lacunaires, tant pour la gestion immédiate de la crise, que pour la compréhension et la prédiction des événements à long terme. Un important projet de recherche a été lancé peu de temps après l'accident de Fukushima dans le cadre du programme Investissement d'avenir⁽¹⁾ pour approfondir les connaissances sur les conséquences d'un accident. De nouveaux modèles de recherche, plus fins, sont développés dans le cadre de ce projet afin de mieux évaluer l'impact sur l'environnement marin notamment, à long terme. Aucun modèle opérationnel n'existait à l'IRSN pour aider efficacement à la prise de décision en situation accidentelle impactant le milieu marin. D'où le développement actuel d'un outil prévoyant l'évolution dans le temps et l'espace, des concentrations en radionucléides dans les différents compartiments.

⁽¹⁾ PIA RSNR : Programme Investissements d'avenir (PIA), appel à projet Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection (RSNR), mis en œuvre en 2012 par l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le compte du Commissariat général à l'investissement (CGI) suite à l'accident de Fukushima.

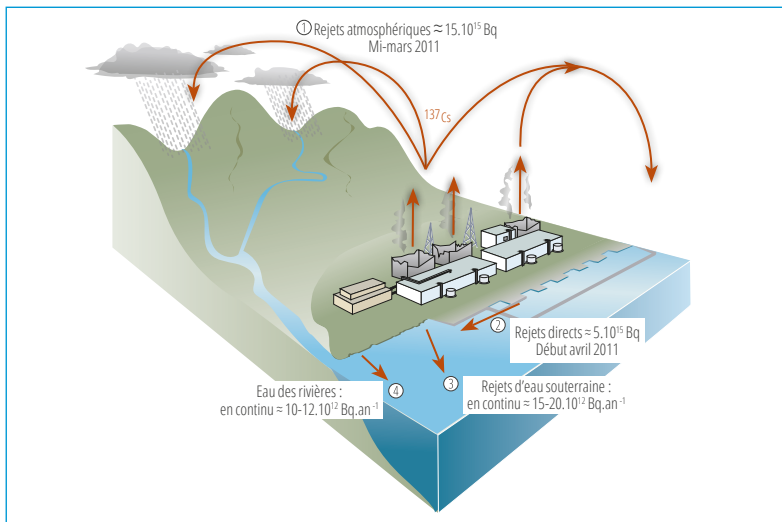
⁽²⁾ Les rejets atmosphériques (15 à 20.10⁶ Bq) en césium 137 ont été 5 fois moindres que ceux de Tchernobyl, et environ 50 fois moins élevés que ceux dispersés par les essais nucléaires atmosphériques.

L'accident de Fukushima constitue à ce jour le plus important apport direct de radionucléides au milieu marin suite à un accident sur une installation nucléaire civile, ayant conduit à des concentrations particulièrement élevées dans l'eau, les sédiments et les espèces vivantes. Les conditions météorologiques ont en effet en grande partie orienté les rejets radioactifs atmosphériques⁽²⁾ au-dessus de l'océan où ils se sont déposés et dispersés dans l'eau de mer ; à cela se sont ajoutés des rejets directs d'eau contaminée issue du refroidissement des réacteurs accidentés. Le césium radioactif, notamment, restera mesurable à moyen et long termes à des niveaux différents selon que l'on se trouve à proximité des côtes, ou au large dans le Pacifique.

*68 millions de becquerels
par mètre cube*

Un groupe de scientifiques de diverses institutions internationales, dont l'IRSN, a dressé un état des lieux des connaissances publiées, notamment les mesures *in situ*, concernant l'océan Pacifique après

l'accident. Des quatre sources de contamination de l'océan répertoriées, les deux principales sont les retombées atmosphériques des rejets consécutifs aux explosions (des 12, 14 et 15 mars 2011) et les rejets directs en mer⁽³⁾. La concentration dans l'eau de mer a atteint 68 millions de becquerels par m³ début avril ; elle a ensuite été rapidement diluée par les courants pour atteindre environ 1 000 Bq.m⁻³ près de la centrale à partir de 2013. Les deux autres sources de contamination sont liées au domaine terrestre ; elles sont moins importantes mais perdurent encore aujourd'hui. Il s'agit de l'eau souterraine issue des sols contaminés, et de l'eau des rivières qui drainent les bassins-versants contaminés⁽⁴⁾. La quantité (en becquerels) de césium 137 présente dans le Pacifique Nord a ainsi augmenté de 25 % par rapport à ce qui existait encore en 2011 en raison des essais nucléaires atmosphériques. D'autres radionucléides ont été rejetés⁽⁵⁾ mais en quantité bien moindre. Une petite fraction des césiums radioactifs (1 à 2 %) s'est déposée dans les sédiments et constitue un « réservoir » qui peut être libéré sur le long terme. Concernant le biotope marin, les poissons dits démersaux (se nourrissant au fond de la mer et donc



Les quatre voies de contamination de l'environnement.

© IRSN

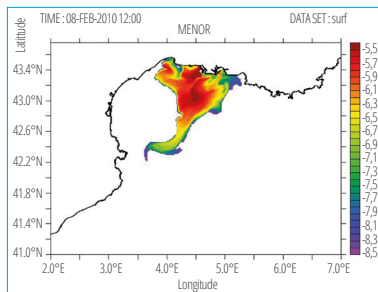
sur les sédiments) vivant dans le port de la centrale sont les plus contaminés et retenus dans le port par un filet. En dehors de cette zone, 50 % des poissons analysés montraient en 2011 une concentration supérieure à la limite de commercialisation de $100 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; cinq ans plus tard, ils n'étaient plus que 1 %. Cette décroissance est plus lente pour les poissons démersaux et la faune benthique (mollusque, etc.) que pour les poissons pélagiques qui nagent et se nourrissent dans toute la colonne d'eau.

Évaluer les conséquences immédiates

Cet état des lieux souligne la nécessité de disposer en France d'outils prédictifs d'aide à la décision concernant l'impact sur l'environnement marin dont les produits de la pêche, notamment au regard de la longueur des côtes françaises et du nombre de réacteurs présents en métropole.

Dès 2012, l'IRSN a lancé une étude pour disposer à terme d'un outil capable d'évaluer, pendant la crise, les conséquences immédiates de rejets accidentels en mer. Un tel outil permettra aussi de guider la stratégie d'échantillonnage nécessaire après un accident pour contrôler et suivre l'étendue de la contamination. STERNE, acronyme pour « simulation du transport et du transfert d'éléments radioactifs dans l'environnement marin », a été conçu pour prédire la dispersion des radionucléides et la contamination dans l'eau de mer

et les espèces marines. L'outil calcule sur un maillage en 3D la dispersion des radionucléides à l'aide de deux types de données : d'une part, les données hydrodynamiques prédites en temps réel à partir de données météorologiques et des marées ; d'autre part, les caractéristiques du rejet en termes de quantité et de localisation. Un modèle radioécologique fondé sur des équations de transfert dynamique vers les espèces marines animales et végétales, a été implémenté pour évaluer les concentrations de radionucléides dans les organismes aquatiques. Le résultat est formalisé sous forme de cartes permettant de suivre l'évolution spatio-temporelle de la contamination. Le logiciel est



Exemple de résultat de simulation pour une dispersion en surface d'un rejet unitaire de ^{137}Cs venant du Rhône ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ en eau de surface, échelle logarithmique) à partir du 1^{er} février 2010, en utilisant des données hydrodynamiques réalistes, avec le logiciel STERNE.

© IRSN

③ Les modèles de dispersion atmosphérique suggèrent que près de 80 % des rejets atmosphériques se sont déposés à la surface de l'océan. Les déversements d'eau de mer puis d'eau douce utilisées pour refroidir les réacteurs ainsi que les fuites d'eau stagnante à partir des sous-sols des bâtiments des réacteurs endommagés sont estimés à $5 \cdot 10^{15}$ Bq début avril 2011. Rapport UNSCEAR 2013.

④ Respectivement 15 à $20 \cdot 10^{12}$ Bq par an, et 10 à $12 \cdot 10^{12}$ Bq par an ce qui correspondrait à 1 à 2 % des césiums radioactifs déposés sur le territoire.

⑤ Les césiums 134 et 137 ont été rejetés dans des proportions similaires, mais l'isotope 134 ayant une demi-vie plus courte (2,06 ans), sa concentration a aujourd'hui fortement décliné. L'iode 131 de période très courte (8 jours) a aujourd'hui disparu. Le strontium 90 , dont la période est similaire à celle du césium 137 , a été rejeté dans une proportion 12 fois moindre.

⑥ Ces fiches indiquent notamment les courants dominants en fonction de la météorologie et les informations sur les marées; elles fournissent des cartes mentionnant les sites d'intérêt économique (aquaculture, pêche...) ou écologique.

PUBLICATIONS

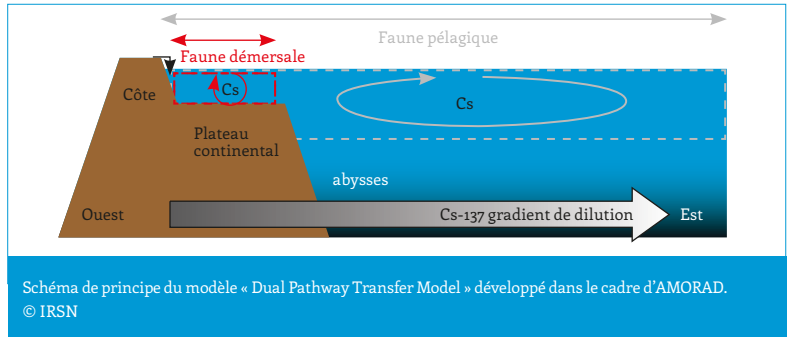
• Buessler K. *et al.* « Fukushima Daiichi-Derived Radionuclides in the Ocean: Transport, Fate, and Impacts » *Annual Review of Marine Science* 2017. 9:173–203



• Duffa C. *et al.* « Development of emergency response tools for accidental radiological contamination of French coastal areas » *Journal of Environmental Radioactivity* 151 (2016) 487–494



• Fiévet B. *et al.* « A dual pathways transfer model to account for changes in the radioactive caesium level in demersal and pelagic fish after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident » *PLoS ONE*. 2017. 12(3): e0172442.



en cours de validation à l'aide des données existantes. En complément, des fiches de données⁽⁶⁾ décrivant les spécificités des sites sensibles le long des côtes françaises sont établies.

Au-delà de la gestion de crise, l'évaluation des conséquences à moyen et long termes nécessite des connaissances plus approfondies. Un programme de recherche de grande envergure, AMORAD, a été monté dès 2012 dans le cadre de l'appel à projet PIA Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection (PIA RSNR)⁽¹⁾. Ce programme, qui s'achèvera fin 2019, vise à améliorer les modèles de prévision de la dispersion des radionucléides dans l'environnement terrestre comme marin, ce qui permettra à terme d'évaluer l'impact pour l'homme. Pour le milieu marin, la recherche porte sur au moins deux aspects : d'une part, les processus à l'interface entre le continent et l'océan et le transport des radionucléides par les particules à différentes échelles spatio-temporelles et d'autre part, le transfert des radionucléides dans les chaînes alimentaires ainsi que la sensibilité et la vulnérabilité des écosystèmes impactés. Ces travaux sont complétés par le développement de méthodes d'aide à la décision afin de créer un pont entre scientifiques et gestionnaires du risque. En effet, les décideurs ont besoin d'informations synthétiques sur le moyen ou long terme leur permettant d'appréhender le niveau de contamination sur une zone donnée ainsi que l'impact de cette contamination sur différents enjeux sanitaires, environnementaux ou économiques.

Ensemble des processus de contamination

Un premier modèle de transfert du césium aux poissons a ainsi été développé pour rendre compte de la contamination plus élevée des espèces démersales à Fukushima. Il considère deux zones : d'une part l'étroite

bande du plateau continental, située entre la côte et les abysses, où vivent ces dernières et où se retrouve une partie du césium rejeté par la centrale accidentée et d'autre part une zone plus large, correspondant essentiellement à la pleine mer, où vivent les espèces pélagiques. Ce modèle (Dual Pathway Transfer Model) considère que les poissons sont contaminés par deux voies : l'eau de mer et la nourriture. La prise en compte de la nourriture est très importante car, le césium s'accumulant dans le biote, celui-ci devient une source de contamination pour les animaux qui s'en nourrissent et crée une sorte de recyclage de la contamination qui retarde l'élimination du césium. Les résultats de ce modèle ont été confrontés aux mesures faites près de Fukushima après l'accident mais aussi dans la Manche sur la base des données de surveillance acquises dans le contexte du fonctionnement normal des installations nucléaires côtières. Dans les deux cas, l'analyse montre que le paramétrage obtenu est adapté pour reproduire les principaux processus gouvernant le transfert de césiums radioactifs aux poissons dans l'environnement marin.

Les travaux se poursuivent dans le cadre du projet AMORAD pour obtenir une modélisation représentant l'ensemble des processus de contamination jusqu'aux poissons, en partant de l'hydrodynamique et en intégrant les maillons intermédiaires tels que la production primaire, le zooplancton, les invertébrés benthiques, les petits pélagiques, etc. Elle prend en compte le régime alimentaire des poissons, grâce au travail réalisé notamment dans le cadre de la thèse de M. Belharet (voir *Aktis* n°23). La contamination des sédiments et son évolution sont également en cours de modélisation dans les différentes zones ateliers couvertes par le projet (Fukushima, Manche, Golfe de Gascogne et Méditerranée). Ainsi les avancées obtenues par AMORAD devraient permettre d'estimer avec une précision spatiale et temporelle assez complète le devenir d'une contamination accidentelle.

Un NOUVEAU MODÈLE de comportement MÉCANIQUE pour les MATÉRIAUX NANOPOREUX

Afin d'évaluer la tenue du combustible nucléaire en cas d'accident de réactivité (RIA), l'IRSN simule son comportement à l'aide de logiciels prenant en compte ses caractéristiques mécaniques. Un nouveau modèle détaillé permettra de simuler l'effet de la présence de nano-bulles de gaz dans le matériau sur sa rigidité et sa fragilité.

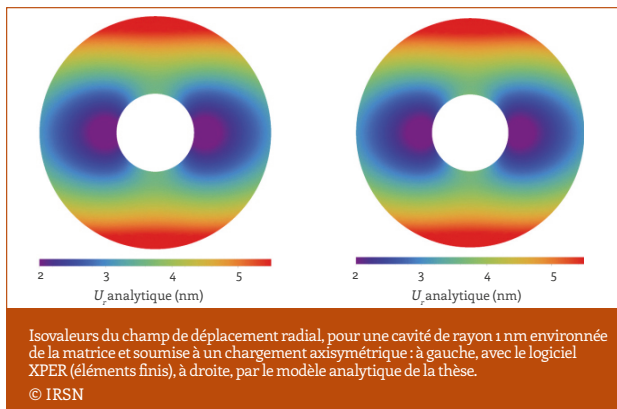
La microstructure du combustible nucléaire UO_2 évolue fortement durant sa vie en réacteur. Cette céramique poreuse piège en son sein, à forte irradiation, deux principales populations de bulles de gaz de fission : des cavités nanométriques de forme plutôt sphérique (bulles intragranulaires) et des cavités micrométriques de forme plutôt aplatie (bulles intergranulaires). Durant un RIA, la température du matériau augmente fortement induisant une augmentation importante de la pression dans ces bulles.

Une thèse de 2012 (M. Colbert) a mis en évidence un « effet de surface » à l'échelle des cavités nanométriques qui modifie le comportement élastique du combustible : localement, à proximité de la surface de ces cavités, le matériau est plus rigide que dans le reste de la matrice. À porosité donnée, plus les cavités sont nombreuses, plus leur taille est petite et plus cet effet de rigidification par nano-porosité est significatif. Durant un RIA, cette rigidification permet au combustible de mieux résister à la pression due au gaz dans les bulles mais elle le rend aussi moins apte à accommoder de fortes sollicitations : le combustible est plus rigide mais plus fragile.

Motifs morphologiques représentatifs

X. Haller a développé pendant sa thèse un modèle micromécanique mathématique, tenant compte à la fois de la structure nanoporeuse hétérogène de l' UO_2 irradié et de l'effet de surface des bulles nanométriques, qui permet de décrire le comportement élastique macroscopique du matériau. Il a pour cela utilisé un modèle de changement d'échelle qui permet de représenter, par une loi globale de comportement, tous les comportements spécifiques que le matériau a

plus petite échelle. X. Haller a choisi de modéliser l' UO_2 irradié comme un milieu poreux construit en assemblant différents motifs distribués et orientés aléatoirement par la méthode des



motifs morphologiques représentatifs, où un motif correspond à un volume sphérique composé d'une cavité⁽¹⁾ sous pression plongée dans une matrice (matériau dense). L'effet de surface des cavités est pris en compte pour chaque motif en utilisant un modèle⁽²⁾ connu qui décrit l'interface entre la matrice dense et les cavités. La méthode des motifs morphologiques représentatifs permet d'assembler les motifs pour représenter le matériau, et d'en tirer la loi globale de comportement.

Ce modèle sera implémenté dans le logiciel SCANAIR, actuellement développé à l'IRSN pour évaluer le comportement thermomécanique des crayons combustibles au cours d'un RIA. Enfin, de nouveaux travaux sont en cours pour affiner les données élémentaires de ce nouveau modèle par l'intermédiaire de calculs à l'échelle atomique.

 CNRS/
Université de
Montpellier, Laboratoire
commun MIST

CONTACTS

Pierre-Guy Vincent
pierre-guy.vincent@
irsn.fr

Laboratoire
de physique
et de thermomécanique
des matériaux - LPTM

⁽¹⁾ Nanocavité sphérique
ou microcavité
sphéroïdale.

⁽²⁾ Modèle d'interface
imparfaite cohérente
avec propriétés
propres à l'interface.

PUBLICATION

• *Modélisation du comportement élastique des matériaux nanoporeux : application au combustible UO_2* , Thèse soutenue par Xavier Haller le 23 octobre 2015 à l'Université de Montpellier, École doctorale : Information, structures, systèmes.



Le COMPORTEMENT du ruthénium dans le CIRCUIT primaire en cas D'ACCIDENT

 Laboratoires
Phlam et PC2a
de l'Université de Lille

CONTACTS

Laurent Cantrel
laurent.cantrel@irsn.fr

Laboratoire
d'expérimentation
environnement
et chimie – L2EC

Sidi Souvi
sidi.souvi@irsn.fr

Laboratoire
d'étude du transfert
des radioéléments-
LETR

⁽¹⁾ En particulier, la radio-toxicité du ruthénium 106 est comparable à celle de l'iode 131 ou du césium 137 et sa période d'environ un an.

⁽²⁾ ASTEC/SOPHAEROS, développés par l'IRSN ou modèles transposés dans l'outil EPS2.

PUBLICATION

• *Modélisation du comportement du ruthénium lors de son transport dans le circuit primaire*, thèse de l'Université de Lille 1, école doctorale Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement, soutenue par Faoulat Miradji le 5 décembre 2016 à Cadarache (Bouches du Rhône).



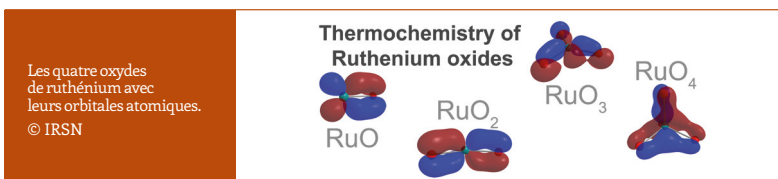
Lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire à eau sous pression, différents radionucléides peuvent être relâchés, dont certains isotopes du ruthénium. Les connaissances sur leur chimie en conditions d'accident ont été complétées pour diminuer les incertitudes dans l'évaluation des rejets.

Lors d'un accident de fusion du cœur, dans des conditions très oxydantes, du ruthénium peut être rejeté dans l'environnement sous forme de gaz ou d'aérosols. Pour prendre les mesures de protection nécessaires contre le risque induit par ses isotopes⁽¹⁾ radioactifs, les rejets sont évalués à l'aide de logiciels⁽²⁾ simulant le transport des éléments chimiques du circuit primaire du réacteur jusqu'à l'environnement. Cette évaluation présente cependant une grande incertitude, car le comportement physico-chimique des oxydes de ruthénium dans le circuit primaire n'est pas bien connu. Afin d'améliorer la pertinence des évaluations, la thèse de Faoulat Miradji visait à compléter les connaissances sur la thermochimie et la réactivité des espèces de ruthénium en conditions d'accident.

données thermochimiques ainsi obtenues ont permis d'apprécier la cohérence des données de la littérature et de sélectionner ainsi les plus pertinentes.

Existence controversée

Puis cette approche a été étendue aux oxyhydroxydes de ruthénium dont l'existence dans le circuit primaire est controversée. Des calculs de spéciation chimique, établissant l'inventaire des molécules qui peuvent se former dans les conditions d'accident, ont été réalisés à partir des données obtenues. Ils ont confirmé que les espèces gazeuses susceptibles d'être présentes de manière significative lors d'un accident de fusion du cœur ne sont pas des oxyhydroxydes mais les oxydes RuO₃ et



La démarche adoptée par la doctorante a été de modéliser le comportement de ces espèces à l'échelle moléculaire. Une méthode de calcul de chimie quantique a été mise au point et qualifiée pour établir précisément les données thermodynamiques des oxydes de ruthénium gazeux (RuO, RuO₂, RuO₃ et RuO₄) en fonction de la température. Cette méthode fait appel à la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)^{ab initio} pour optimiser les modèles des structures géométriques des molécules étudiées ; elle utilise aussi des calculs *ab initio* (calcul à partir d'équations fondamentales) de chimie quantique pour déterminer l'énergie des électrons. Les

RuO₄, levant ainsi la controverse. La doctorante a ensuite étudié la cinétique des différentes réactions chimiques pouvant conduire à la formation de ces oxydes afin d'identifier le chemin réactionnel le plus probable et les limitations cinétiques.

Ces données fondamentales vont permettre à court terme d'enrichir la modélisation du logiciel ASTEC porté par l'IRSN pour simuler les accidents de fusion du cœur. Elles contribueront à l'interprétation des essais expérimentaux réalisés dans le cadre du projet STEM2 de l'OCDE, dédié à l'étude du comportement du ruthénium à haute température dans le circuit primaire.

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

HDR DE JEAN BACCOU ET ALEXANDRE DAUZÈRES

Jean Baccou a soutenu son HDR « Contributions à l'analyse de données spatialisées et applications dans les études de risque », le 25 octobre 2017.

Alexandre Dautères a soutenu la sienne le 26 janvier 2018, intitulée « Contribution à la compréhension des interactions physico-chimiques des matériaux anthropiques et naturels dans les environnements de stockage de déchets radioactifs ».

THÈSES

NOUVEAUX SUJETS DE THÈSE

Les propositions de sujets pour des thèses commençant fin 2018 sont en ligne sur le site Internet de l'IRSN. Pour postuler, contactez directement le directeur de thèse selon les modalités indiquées en ligne. La sélection définitive des sujets et des candidats sera faite en mai ou juin 2018.

LES DERNIÈRES SOUTENANCES DE THÈSES

- *Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induit par le plissage des médias filtrants THE*, par **Youssef Alilou** le 2 mars 2018 à Nancy ;
- *Study of water injection with evaporation in a highly degraded nuclear reactor core*, par **Ali Swaidan** le 5 février 2018 à St-Paul-lez-Durance ;
- *Étude expérimentale d'une interaction thermique au sein d'un fluide*, par **Adrien Abbate** le 8 janvier 2018 à Villeurbanne ;
- *Optimisation de la dosimétrie en alphathérapie par approche multi-échelle : application au traitement des métastases osseuses par le Ra-223*, par **Nadia Benabdallah** le 21 décembre 2017 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Modélisation à pas de temps horaire des transferts de tritium au sein d'un écosystème prairial*, par **Hugo Renard** le 21 décembre 2017 à St-Paul-lez-Durance ;
- *Quantification des vitesses de dépôt par temps sec et documentation des processus d'émission des aérosols sur couvert naturel : du nanomètre au micromètre*, par **Geoffrey Pellerin** le 20 décembre 2017 à Créteil ;
- *Modélisation dynamique de la (bio) disponibilité des radionucléides dans les sols : approche comparative*

modèles-expériences appliquée au transfert de césium dans la rhizosphère, par **Mohamed Amine Cherif** le 18 décembre 2017 à Aix-en-Provence ;

- *Contribution à la quantification des incertitudes portées par la variabilité spatiale des déchets radioactifs enterrés à Tchernobyl*, par **Huong Liên Nguyen** le 14 décembre 2017 à Paris ;
- *Planification adaptative d'expériences et krigeage non-stationnaire : application à la prise en compte des incertitudes dans les études mécaniques en sûreté nucléaire*, par **Sébastien Marmin** le 12 décembre 2017 à Marseille ;
- *Approche hiérarchique bayésienne pour la prise en compte d'erreurs de mesure d'exposition chronique et à faibles doses de rayonnements ionisants dans l'estimation du risque de cancers radio-induits. Application à une cohorte de mineurs d'uranium*, par **Sabine Hoffmann** le 12 décembre 2017 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Approche ergonomique de l'analyse des risques en radiothérapie : de l'analyse des modes de défaillances à la mise en discussion des modes de réussite*, par **Sylvie Thellier** le 12 décembre 2017 à Paris ;
- *Évaluation de rejets moyen-terme en situation accidentelle grave d'un réacteur à eau pressurisée : étude expérimentale de la re-vaporisation de dépôts de produits de fission (Cs, I)*, par **Dorel Obada** le 4 décembre 2017 à Cadarache ;
- *Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants chez Caenorhabditis elegans : de l'ADN aux protéines*, par **Cécile Dubois** le 28 novembre 2017 à Cadarache ;
- *Méthode de raffinement local multi-niveaux pour la fissuration des matériaux hétérogènes*, par **Éric Delaume** le 27 novembre 2017 à Montpellier ;
- *Effet de la sous-oxygénation sur les paramètres de combustion*, par **David Alibert** le 22 novembre 2017 à Marseille ;
- *Mobilité du thallium et du radium dans l'environnement*, par **Loïc Martin** le 20 novembre 2017 à Paris ;
- *Réactivité chimique des aérosols d'iode en conditions accidentelles dans un réacteur nucléaire*, par **Houssam Hijazi** le 16 novembre 2017 à Lille ;
- *Contribution à l'étude du comportement du tritium dans le béryllium (contexte ITER)*, par **Laura Ferry** le 13 novembre 2017 à Saint Paul lez Durance ;
- *Étude comparative des phénomènes de transferts convectif et diffusif au sein de l'argile à opalines du Mont Terri*, par **Catherine Ji Yu** le 9 novembre 2017 à Fontenay-aux-Roses.

En savoir plus sur les HDR



En savoir plus sur les nouveaux sujets de thèse



En savoir plus sur les nouvelles soutenances de thèses



CODE MONTE CARLO:

méthode de simulation probabiliste. Elle permet dans le domaine de la dosimétrie de simuler le transport des particules et les interactions entre les rayonnements et la matière, pour en déduire par exemple la dose reçue ar des organes irradiés.

CARBONYLATION DES PROTÉINES:

modification oxydative des protéines, pouvant être produite suite à l'action d'espèces réactives de l'oxygène.

IMAGERIE CONFOCALE:

technique de microscopie optique qui a la propriété de réaliser des images de grande résolution appelées « sections optiques ». Ces images sont comme des coupes « optiques » d'une épaisseur d'environ 0,4 µm, et peuvent être obtenues à différents niveaux dans l'épaisseur d'un échantillon.

PROTÉINES:

molécules fonctionnelles de la cellule et de l'organisme, actrices principales qui contribuent aux grandes fonctions physiologiques telles que la nutrition, la reproduction, le comportement, etc.

STRESS OXYDATIF CELLULAIRE:

agression des constituants de la cellule par des espèces réactives de l'oxygène ou de l'azote tels que des radicaux libres, des ions oxygénés et des peroxydes; existant de façon naturelle, il peut être augmenté par l'irradiation aux rayonnements gamma.

THÉORIE DE LA FONCTIONNELLE DE LA DENSITÉ (DFT):

méthode de chimie quantique la plus utilisée dans les calculs de la structure électronique de la matière (atomes, molécules, solides). Le principe consiste en une reformulation du problème quantique à N corps en un problème monocorps (ou, bi-corps si on considère les problèmes de spin) avec pour paramètre la densité électronique.

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