

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN

n° 16
Avril - Juin
2014



> Caractériser les rejets d'un accident à l'aide du débit de dose

> Applications

Des détecteurs de référence pour caractériser les flux de neutrons

page 3



> Avancées

Modéliser le vieillissement de l'acier

page 5



> Formation

Interaction fer/argile en présence de bactéries

page 9



Une recherche en lien avec l'expertise

L'une des missions régaliennes de l'IRSN est l'appui technique auprès des autorités françaises en matière de sûreté et sécurité nucléaires ainsi que de radioprotection.

L'Institut dispose de larges capacités humaines et matérielles pour appréhender et traiter toute situation et problématique en matière de risque.

Une R&D appliquée est nécessaire pour soutenir l'expertise, maintenir les compétences et améliorer les techniques. C'est notamment le cas en métrologie, comme en témoigne l'article sur les deux systèmes de détection innovants pour quantifier l'énergie des neutrons. Ils ont été développés au Laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'IRSN, laboratoire primaire national, référence pour la dosimétrie des neutrons.

C'est aussi le cas dans le domaine de la modélisation et des logiciels, courroies fondamentales de l'évaluation du risque. Le focus de ce numéro montre que la recherche, ici sur une technique de modélisation inverse, permet d'améliorer l'exploitation des données, et de mieux reconstituer les retombées d'un accident : ces informations sont nécessaires pour la gestion de la crise.

Condition indispensable pour que l'action publique prévue par les textes législatifs et réglementaires puisse s'exercer efficacement, l'expertise de l'IRSN doit être maintenue au meilleur niveau, et pour cela, l'Institut doit se prévaloir d'une recherche propre, en lien direct avec les besoins de l'expertise et pour l'acquisition et le maintien des connaissances.

Giovanni Bruna,
Directeur scientifique



© Olivier Saignette/Mikaël Lafontan/IRSN

2

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 nucléaires. 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 : Giovanni Bruna, Aleth Delattre, Jean-Michel Evrard, Christine Coudedranche, Pascale Monti, Matthieu Schuler - Rédaction : Isabelle Bellin - Conception et réalisation : Aphanis - Chef de projet : Aphanis/Jeanne Suhamy - 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

Par Giovanni Bruna

Applications de la recherche

P. 3 et 4

Des détecteurs de référence pour caractériser les flux de neutrons

Avancées de la recherche

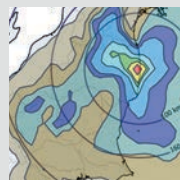
P. 5

Modéliser le vieillissement de l'acier

FOCUS

P. 6 à 8

Caractériser les rejets d'un accident à l'aide du débit de dose



Formation par la recherche

P. 9 et 10

Interaction fer/argile en présence de bactéries
Perturbations de la cellule à faibles doses

La vie de la recherche

P. 11

Collaborations
Thèses
Soutenances

Glossaire^{GLO}

P. 11 et 12

DES DÉTECTEURS DE RÉFÉRENCE POUR CARACTÉRISER LES FLUX DE NEUTRONS

Le Laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'IRSN est le laboratoire français de référence en matière de métrologie des neutrons : depuis plus de dix ans, il est associé au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Pour fournir des références, les plus exactes possibles et indépendantes de celles des laboratoires nationaux étrangers, le LMDN développe, entre autres, deux systèmes de détection innovants.

La dosimétrie des neutrons demeure un enjeu important en radioprotection dans différents secteurs d'activité comme l'industrie nucléaire, le médical (hadronthérapie) ou la recherche. De par leur nature, les neutrons sont difficiles à mesurer car ils interagissent peu avec la matière ; de plus, leur gamme est très étendue en énergie, de 10^{-3} à plus de 10^9 eV. Les différentes techniques

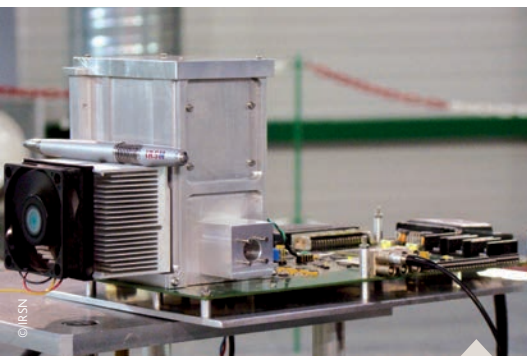
qu'il faut détecter : la mesure de leur énergie et leur angle d'émission permettent de reconstruire, par le calcul, l'énergie du neutron incident.

[Des systèmes les plus efficaces possible]

Un détecteur de protons de recul se compose d'un convertisseur de neutrons en protons par collision et d'un détecteur de protons qui permet de remonter aux caractéristiques du champ neutronique. Mais la probabilité de conversion est très faible. Pour concevoir des détecteurs efficaces, trois doctorants ont travaillé dans l'équipe depuis 2006. Objectif : détecter le maximum de protons de recul en agrandissant la zone de détection, une évolution rendue envisageable par des nouvelles technologies utilisées en physique des particules. Les recherches ont été orientées vers des systèmes à localisation : les capteurs sont beaucoup plus grands et permettent de quadriller la surface de détection avec précision, quel que soit l'angle d'émission. Un premier doctorant, Amokrane Allaoua (2006-2009), a évalué les solutions en lice. Il en a conclu que deux détecteurs étaient nécessaires pour couvrir toute la gamme en énergie d'Amande. Les deux doctorants suivants, financés en partie par le LNE, ont développé, avec l'aide d'équipes du CNRS, chacun un système, testé et optimisé sur Amande. Un travail important a également été fait pour quantifier et réduire les incertitudes de mesure.

[À base de convertisseur solide]

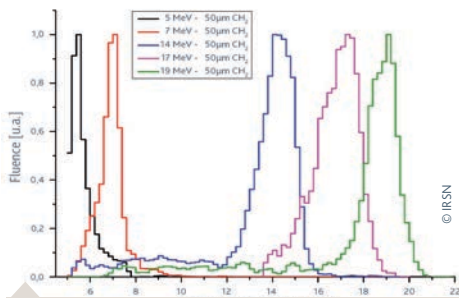
Julien Tafureau, qui a soutenu sa thèse fin 2013, a mis au point un prototype pour les hautes énergies (5 à 20 MeV), qui s'avère 10 à 100 fois plus efficace que les systèmes existants⁽²⁾. Il a utilisé des capteurs CMOS^{GLO} développés par le CNRS (IPHC) pour la détection de particules en physique des ions lourds. Dans ce détecteur, dénommé TPR-CMOS, les neutrons sont « convertis » en protons sur une cible de polyéthylène. Chaque proton de recul créé traverse ensuite trois capteurs pixélisés CMOS. Au niveau d'un pixel, le proton crée une charge d'ionisation qui permet de le détecter



Premier prototype du détecteur à protons de recul TPR-CMOS, pour les particules dont l'énergie est comprise entre 5 et 20 MeV, construit en 2009.

développées afin de couvrir l'ensemble des besoins nécessitant d'être caractérisées et étalonnées auprès de champs de neutrons de référence. C'est pourquoi l'IRSN est chargé de produire et maintenir des champs neutroniques de référence. L'accélérateur Amande⁽¹⁾ fournit de tels champs, mono-énergétiques^{GLO} et d'énergie comprise entre 2 keV et 20 MeV.

Pour les caractériser, Lena Lebreton développe des détecteurs efficaces (avec la meilleure probabilité de détection), mesurant la distribution de la fluence^{GLO} en fonction de l'énergie des neutrons. Afin que cette mesure soit considérée comme référence, le défi est de l'obtenir sans étalonner au préalable le système avec une source de neutrons. Ceux-ci n'étant pas directement détectables, ce sont des particules secondaires^{GLO} produites lors des chocs des neutrons avec la matière, tels que les protons de recul,



© IRSN
Mesures faites avec le TPR-CMOS devant plusieurs champs mono-énergétiques d'Amande et pour différentes épaisseurs de convertisseur.

et de connaître sa position. Avec les trois positions successives, la trajectoire du proton, donc son angle d'émission, est déterminée. Quant à son énergie, elle est mesurée grâce à une diode au silicium. La solution est néanmoins complexe à mettre en œuvre. L'épaisseur des capteurs doit notamment être affinée à 50 micromètres pour que les protons puissent les traverser sans être arrêtés. Pour pérenniser et optimiser ce détecteur, l'IRSN fait développer des capteurs CMOS dédiés. Ils devraient être prêts en juin 2014. Le dispositif complet (convertisseur, capteurs, diode, électronique) est prévu pour la fin de l'année.

4

[Pixels micrométriques]

Dans la gamme des basses énergies, les neutrons seraient arrêtés dès le premier capteur CMOS. Après une étude bibliographique, le même principe a été retenu mais avec des convertisseurs gazeux, une solution inspirée des chambres d'ionisation. Les électrons d'ionisation, générés par les protons de recul, sont collectés sur une anode : le courant produit permet de déduire l'énergie des protons de recul. Pour suivre la trace de chacun et


connaître son angle d'émission, l'équipe a imaginé « pixelliser » cette anode et prendre des images successives des impacts des électrons. Amokrane Allaoua a travaillé avec une équipe de physique des particules du LPSC de Grenoble qui avait développé de telles solutions, baptisées chambres à projection temporelle (ou TPC en anglais). Dans le cadre d'un projet ANR (2007-2009), ils ont mis au point une électronique très rapide (une image toutes les 20 ns) et les premiers éléments d'un détecteur. Donovan Maire a pris le relais en 2012. Ses premiers résultats lui ont déjà valu le prix du meilleur poster au congrès Anima 2013. Le système complet, baptisée μ TPC car ses pixels sont micrométriques, comprend un gaz hydrogéné dans une enceinte sous atmosphère contrôlée à très basse pression (50 mbars absolus) pour que le trajet de chaque proton soit le plus long possible. Il permet de bien suivre la trace des protons de 8 keV à 1 MeV. Le doctorant espère avoir des mesures exploitables d'ici à la fin de l'année. L'IRSN disposera bientôt de spectromètres étalons complétant le dispositif actuel constitué d'un long compteur (pour la mesure de la fluence intégrale) et de la technique du temps de vol (pour la mesure de l'énergie). Il restera alors à trouver des solutions pour déterminer la distribution en énergie de référence en dessous de 8 keV et entre 1 et 5 MeV : un nouveau défi, compte tenu des verrous scientifiques et technologiques actuels.

Léna Lebreton - lana.lebreton@irsn.fr
(Laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons - LMDN)

- (1) Accélérateur pour la métrologie et les applications neutroniques en dosimétrie externe, inauguré en 2005.
- (2) Compte tenu de la très faible probabilité de collision (donc de création de protons) et de sa probabilité de détection, le système du PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), laboratoire national allemand, détecte au mieux 2 protons pour 100 000 neutrons.



© IRSN
Prototype de détecteur à protons de recul μ TPC pour les particules à basse énergie, comprise entre 8 keV et 1 MeV.

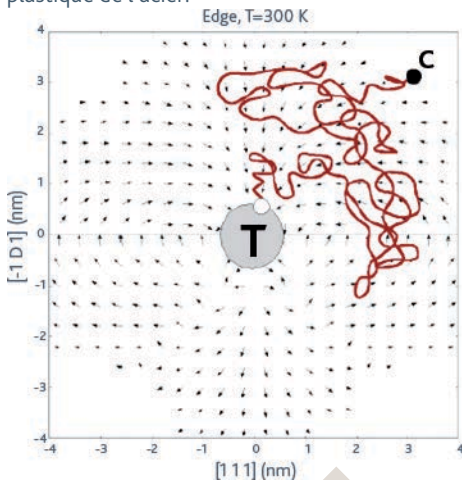
 Laboratoire national de métrologie et d'essai (LNE) ; Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) - CNRS/IN2P3 Strasbourg ; Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC) - CNRS/IN2P3 Grenoble.

- +++ Un spectromètre à pixels actifs pour la métrologie des champs neutroniques, thèse soutenue par Julien Tafareau le 30 septembre 2013 à Strasbourg.
- +++ Étude et développement de détecteurs dédiés aux mesures de référence de champs neutroniques mono-énergétiques, thèse soutenue par Amokrane Allaoua à Strasbourg le 24 novembre 2009, discipline physique, spécialité neutronique-instrumentations.
- +++ Maire D. et al., « μ -TPC: a future standard instrument for low energy neutron field characterization », congrès Anima 2013, 23 au 27 juin 2013, Marseille.

MODÉLISER LE VIEILLISSEMENT DE L'ACIER

Dans la perspective d'une extension de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires au-delà de 40 ans, des études approfondies du vieillissement de l'acier des cuves ont été engagées par l'IRSN. Dans le cadre de son post-doctorat, Deyana Tchitchekova a mis au point une nouvelle méthode permettant de simplifier la simulation à l'échelle atomique des processus de vieillissement.

Un des principaux mécanismes de vieillissement de l'acier est dû à l'interaction des atomes de carbone avec certains défauts de la structure cristalline du fer appelés dislocations. Le déplacement de ces dernières permet la déformation plastique de l'acier.



Trajectoire d'un atome de carbone près d'une dislocation (d'après R. Veiga et al., PRB, 82, 054103 [2010]).

Le champ de contraintes local généré par une dislocation modifie la diffusion des atomes de carbone. Ceux-ci vont s'agréger à la dislocation et former une « atmosphère de Cottrell ». Ceci bloque le déplacement de la dislocation et rend l'acier moins ductile (en limitant sa capacité de déformation plastique) et donc plus fragile. La structure des atmosphères de Cottrell, leur cinétique de formation, ainsi que la force de blocage exercée sur les dislocations sont relativement mal connues.

[À l'échelle atomique]

Pour mieux comprendre ces phénomènes, il est nécessaire de les modéliser à l'échelle atomique sur de longues périodes. Ceci implique de recourir à des méthodes thermo-statistiques simplifiées telles que la méthode de Monte-Carlo cinétique (MCC). Celle-ci modélise la diffusion des atomes de carbone d'un site interstitiel^{GLO} à un autre en

évaluant la probabilité qu'ils franchissent les barrières d'énergie qui les séparent, sachant que la hauteur de ces barrières est modifiée sous l'effet des contraintes induites par les dislocations.

Lors de son post-doctorat, D. Tchitchekova a développé une méthode (LinCoSS) pour estimer l'amplitude des barrières d'énergie pour un atome de carbone dans un champ de contraintes hétérogènes correspondant à celui d'une dislocation. La méthode repose sur une décomposition de ce champ en une combinaison linéaire de contraintes élémentaires simples ; elle est fondée sur l'hypothèse que l'effet du champ de contraintes peut être évalué comme une combinaison linéaire des effets induits par chaque composante de ce champ.

[Plus précise que d'autres]

LinCoSS a été validée par comparaison à des calculs réalisés avec la méthode de référence CI-NEB⁽¹⁾. Les valeurs des barrières d'énergie que cette méthode fournit permettent à un algorithme MCC de modéliser la diffusion d'un atome de carbone au voisinage proche d'une dislocation de façon plus précise que d'autres méthodes simplifiées. Elle est rapide et facile à mettre en œuvre.

L'enjeu est maintenant d'étudier simultanément la diffusion d'un grand nombre d'atomes de carbone au voisinage d'une dislocation, puis dans la dislocation elle-même, afin de représenter de manière réaliste la formation d'une atmosphère de Cottrell et de comprendre par quels mécanismes celle-ci provoque le blocage de la dislocation.

Fabienne Ribeiro - fabienne.ribeiro@irsn.fr
(Laboratoire de physique et de thermomécanique des matériaux – LPTM)

⁽¹⁾ Climbing-Image Nudged Elastic Band method.



Laboratoire Mateis de l'INSA de Lyon.

+++ Tchitchekova D. et al., « Energy barriers for carbon diffusion in ferrite under heterogeneous stress, International workshop on multiscale simulation of the prediction of radiation damage in reactor pressure vessel steel and internals up to 60 years of operation », 10-12 décembre 2013, Fontainebleau, France.

CARACTÉRISER LES REJETS D'UN ACCIDENT

L'une des missions de l'IRSN est de fournir un appui opérationnel aux pouvoirs publics et aux autorités en cas d'incident ou d'accident impliquant des sources de rayonnements ionisants. Le dispositif de crise, méthodes et outils, développé par l'IRSN depuis de nombreuses années à cette fin, a été mis à l'épreuve par l'accident de la centrale japonaise de Fukushima. L'IRSN a évalué pendant la crise, les conséquences radiologiques de l'accident, en particulier l'évolution de la contamination des territoires ainsi que les doses susceptibles d'être reçues par les populations. Néanmoins, ces évaluations sont associées à des incertitudes importantes, notamment celles inhérentes à la connaissance des rejets. L'IRSN travaille à réduire les incertitudes sur ces rejets, et dans cet objectif, a développé une nouvelle approche : fondée sur le principe de la modélisation inverse, elle permet d'estimer le rejet à partir des mesures de débit de dose. Ces données sont complexes à utiliser car elles agrègent en une seule mesure de nombreuses informations qu'il est difficile d'extraire (tous les radionucléides présents au sol et dans l'air contribuent simultanément au débit de dose), mais sont les plus répandues pour la surveillance de l'environnement. La méthode développée est générique ; elle peut être utilisée pour de nombreux types d'accident nucléaire et elle est parfaitement adaptée à une utilisation en situation de crise.

En cas d'incident ou d'accident comportant un risque de contamination de l'environnement, l'IRSN a pour mission d'acquies des informations et des données aussi complètes et fiables que possible sur la situation en cours et son historique, et d'en faire l'analyse. Outre l'évaluation de la sûreté de l'installation impliquée, il s'agit d'en évaluer les conséquences radiologiques dans l'environnement. L'objectif de ces expertises est d'aider les pouvoirs publics, et toute institution concernée, à décider des actions à mener pour protéger les populations et limiter les conséquences de l'accident.

Pour effectuer ces évaluations, l'IRSN simule la dispersion des rejets et les dépôts avec des modèles de dispersion atmosphérique. Afin que cette simulation soit réalisée avec suffisamment de réalisme, il est essentiel de connaître précisément les rejets. Ils sont caractérisés par ce qu'on appelle le « terme source », à savoir l'évolution temporelle des débits de rejet pour chaque radionucléide émis dans l'atmosphère. Le terme source est défini, en cas de crise, en exploitant les données disponibles sur l'état de l'installation.

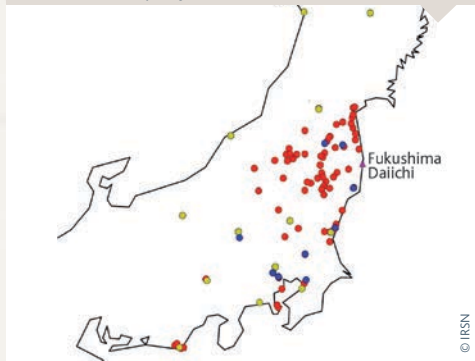
[Utiliser les mesures prises dans l'environnement]

Pendant la crise de Fukushima, les données sur l'installation auxquelles l'IRSN pouvait avoir accès étaient partielles. Ces lacunes ont généré de nombreuses incertitudes sur le déroulement précis et sur la composition en radioéléments des épisodes de rejets.



Réacteurs 3 et 4 de la centrale de Fukushima Daiichi en mars 2011.

Carte des stations de mesure. En rouge, les stations de débit de dose ; en bleu, les stations d'activité volumique ; en beige, les stations de dépôts journaliers.



À L'AIDE DU DÉBIT DE DOSE

Pour les combler, il s'est avéré nécessaire d'utiliser des mesures effectuées dans l'environnement afin de corriger les paramètres du modèle de dispersion atmosphérique, notamment le terme source. C'est dans cet objectif que les méthodes de modélisation inverse^{GLO} peuvent être employées. Pour pouvoir évaluer le terme source à partir des observations de débit de doses très répandues mais difficiles à exploiter, une équipe de l'IRSN a développé une nouvelle approche de modélisation inverse.

Les méthodes de modélisation inverse permettent une estimation du terme source en utilisant les informations issues des observations et du modèle de dispersion atmosphérique. Concrètement, il s'agit de déterminer le terme source qui minimise l'écart entre les observations recueillies dans l'environnement et leurs simulations par un modèle de dispersion atmosphérique. La variable à adapter pour minimiser les écarts est donc le terme source. Les méthodes existantes de modélisation inverse pour estimer le terme source ne pouvaient exploiter que des mesures d'activité volumique ou surfacique^{GLO}. Une estimation du terme source de l'accident de Fukushima a été réalisée ainsi en collaboration avec le Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique (Cerea). Mais il a été montré qu'il n'était pas possible de reconstituer l'ensemble des épisodes de rejet en utilisant uniquement les mesures d'activité volumique car elles étaient trop peu nombreuses et mal réparties sur le territoire japonais⁽¹⁾. Afin de compenser le manque de mesures, une estimation *a priori* des rejets a été utilisée pour évaluer le terme source. Dans ce cas, la méthode inverse sert à améliorer l'estimation *a priori*. Dans ce contexte, le recours aux mesures d'activités volumiques n'a pas permis une évaluation complète et indépendante du terme source par les méthodes inverses.

[Le caractère global des mesures de débit de dose]

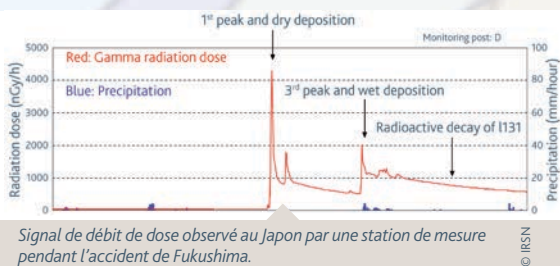
Il existe un type de mesures, le débit de dose, dont les résultats sont plus nombreux et mieux répartis sur le territoire. Dans les autres pays possédant des centrales nucléaires, les réseaux de mesure de débit de dose sont aussi plus denses que les réseaux fournissant les autres types de mesure.

Quelles informations fournit une mesure de débit de dose ? La date et l'heure du passage du panache au-dessus de la station de mesure, l'intensité du rayonnement ambiant. Elle fournit aussi une information sur la décroissance radioactive des radionucléides

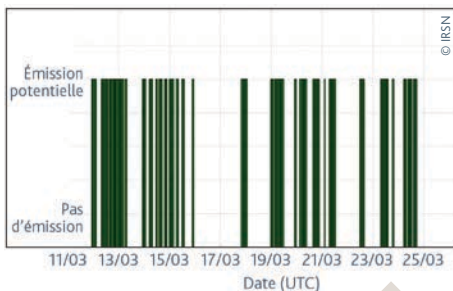
déposés autour de la station. La difficulté d'exploitation des données de débit de dose vient du caractère global des mesures : elles ne différencient ni les radionucléides entre eux, ni leur localisation dans l'air ou au sol, éléments importants dans la définition du terme source. Avant Fukushima, les études effectuées pour exploiter les mesures de débit de dose étaient appliquées à des situations simplifiées par rapport à un accident réel, et n'étaient pas adaptées. L'IRSN a donc mis au point une nouvelle méthode basée sur les techniques de modélisation inverse pour estimer le terme source d'un accident nucléaire à partir des seules mesures de débit de dose, qui sont les plus nombreuses, et les plus facilement accessibles.

[Trois étapes]

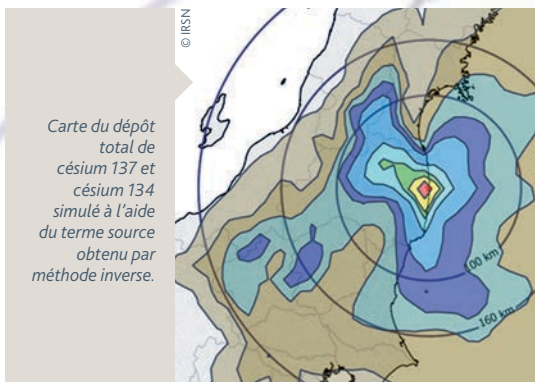
La méthode mise au point par l'IRSN exploite en trois étapes les informations contenues dans les mesures de débit de dose, afin de contraindre suffisamment le problème inverse et permettre de converger vers un



terme source optimal (au sens du problème inverse). La première étape consiste à définir les informations dont on dispose *a priori* pour réduire l'espace des solutions possibles au problème inverse posé. Elle consiste à identifier les radionucléides qui contribuent majoritairement au signal de débit de dose. Sur le cas de Fukushima, une dizaine d'entre eux ont été spécifiés grâce à la station de mesure de Chiba qui a fourni des mesures spectrométriques de débit de dose. Le nombre de radionucléides a pu être encore réduit sachant que certains radionucléides vont rester dans les mêmes proportions les uns par rapport aux autres pendant l'accident. *In fine*, il suffit de déterminer le débit de rejet de 5 radionucléides (¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³¹I, ¹³²Te, ¹³³Xe) pour reconstituer les rejets responsables de l'essentiel du débit de dose mesuré sur les stations du réseau de surveillance japonais. La deuxième étape consiste à identifier les périodes potentielles de rejet. Les mesures de débit de dose sont d'abord analysées pour extraire les périodes pendant lesquelles un panache est détecté au-dessus des stations de



Périodes de rejets potentiels, définies heure par heure à l'issue de la 2^{ème} étape de la méthode d'inversion.



mesures. La modélisation inverse est ensuite utilisée pour identifier les périodes de rejet qui pourraient expliquer la détection de panaches par les stations de mesure.

Enfin la troisième étape consiste à estimer les débits de rejet de chaque radionucléide pendant les périodes potentielles de rejet identifiées par la deuxième étape. Connaissant le débit de dose global mesuré sur chaque station, ainsi que l'évolution du débit de dose du dépôt dû à la décroissance radioactive, il est possible de reconstituer par modélisation inverse la quantité de chaque radionucléide rejetée heure par heure.

recherche en cours. Une approche multi-échelle permettra également de mieux bénéficier de la diversité des mesures, y compris celles relevées dans des territoires très éloignés de l'installation accidentée.

La méthode développée est générique et peut être utilisée pour tout type d'accident nucléaire, dès lors que les rejets dans l'atmosphère sont mesurés par des stations de mesure. Elle permet d'estimer un terme source avec des temps de calcul raisonnables et est donc parfaitement adaptée à une utilisation en situation de crise.

Anne Mathieu - anne.mathieu@irsn.fr
(Bureau de modélisation des transferts atmosphériques – BMTA)

⁽¹⁾ Les autres mesures sont l'activité volumique et l'activité surfacique. L'activité volumique est mesurée pour chaque radionucléide, mais cumulée dans le temps de 1h à 24h ; de plus, les quelques stations de mesure existantes sont toutes situées dans la même zone par rapport à la centrale de Fukushima. Quant à l'activité surfacique, elle a été peu mesurée durant les rejets ; là encore, il s'agit de valeurs cumulatives qui ne permettraient pas de reconstituer une évolution des dépôts dans le temps. En revanche, les données existant pour l'activité surfacique et volumique contribuent à la validation des simulations.



Cerea, Laboratoire commun EDF R&D et École des Ponts ParisTech.

+++ Mathieu A. et al., « État de la modélisation pour simuler l'accident nucléaire de la centrale Fukushima Daiichi », *Pollution Atmosphérique*, n°217 (2013), janvier-mars 2013.

+++ Saunier O. et al., « An inverse modeling method to assess the source term of the Fukushima Nuclear Power Plant accident using gamma dose rate observations », *Atmospheric Chemistry and Physics* (2013), 13, 11403–11421.

+++ Winiarek V. et al., « Estimation of errors in the inverse modeling of accidental release of atmospheric pollutant: Application to the reconstruction of the cesium-137 and iodine-131 source terms from the Fukushima Daiichi power plant », *Journal of geophysical research* (2012), Vol. 117, D05122.

L'IRSN a ainsi obtenu une reconstitution cohérente des rejets de l'accident de Fukushima. Les rejets consécutifs aux explosions et aux évènements^{GLO} des réacteurs ont été reconstruits par cette méthode. Celle-ci a aussi permis d'identifier d'autres épisodes de rejets que la connaissance lacunaire sur l'état des installations ne permettait pas.

Le terme source obtenu par cette nouvelle méthode a été validé en l'utilisant pour simuler les débits de dose. En effet, les incertitudes sur les données météorologiques (particulièrement sensibles au Japon où le relief est complexe) et sur les modèles de dispersion ne permettent pas toujours de retrouver un accord parfait entre les simulations et les observations. L'accord obtenu entre les résultats de la simulation et les mesures de débit de dose est très satisfaisant. De même, le terme source a été validé en comparant les observations aux simulations des dépôts et des activités volumiques, qui sont soumises aux mêmes incertitudes ; l'accord entre simulation et mesures est acceptable.

Des pistes existent pour améliorer la reconstruction de la composition isotopique des rejets en couplant l'utilisation des mesures de débit de dose aux autres types de mesure, un travail de

INTERACTION FER/ARGILE EN PRÉSENCE DE BACTÉRIES

Afin d'évaluer la sûreté d'une installation de stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité, l'IRSN mène ses propres recherches sur l'évolution des propriétés des différents matériaux mis en contact dans un stockage. Ces recherches concernent notamment l'interaction entre les matériaux argileux et l'acier des conteneurs en présence de bactéries.

Dans un stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité, les interactions chimiques entre les aciers et les argiles⁽¹⁾ pourraient modifier les propriétés de confinement de ces aciers et argiles. Complétant d'autres travaux réalisés à l'IRSN dans ce domaine (voir *Aktis* n°4, 11, 13), Camille Chautard a étudié l'influence que des hétérogénéités aux interfaces entre les matériaux (vides technologiques ou fractures dans la roche) ainsi que des activités bactériennes peuvent avoir sur ces interactions chimiques.

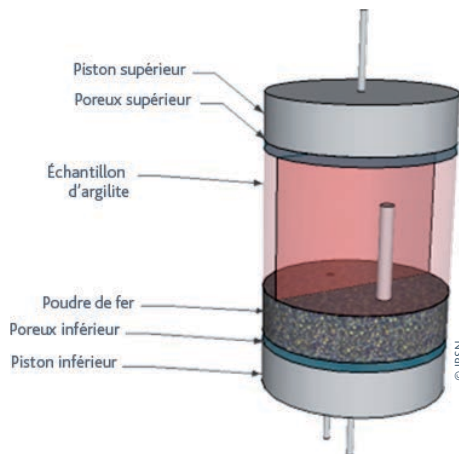
[Cellules de percolation]

La doctorante a d'abord conçu un montage expérimental, particulièrement complexe à mettre au point. Il s'agissait de faire percoler, à 60° C et pendant 13 mois, une eau représentative de l'eau porale^{GLO} d'une argilite au travers d'une masse de fer, puis dans un cylindre d'argilite dont l'une des moitiés contient un échantillon de fer massif. Deux cellules de percolation ont été installées. Dans une des cellules, l'eau contenait deux souches bactériennes (sulfato-réductrice et ferri-réductrice) alors que dans l'autre cellule, il n'y avait pas de bactéries. L'interface fer pulvérulent/argilite et l'interface fer massif/argilite ont été caractérisées par différentes techniques⁽²⁾. Les mécanismes biogéochimiques observés expérimentalement ont été analysés par simulation numérique avec le code Hytec.

[Influence des bactéries]

À l'interface entre la zone de fer pulvérulent et l'argilite, l'argilite a montré des transformations sur une faible profondeur (10 µm), et une faible vitesse moyenne de corrosion (inférieure à 1 µm/an) a été observée, cohérente avec celles publiées dans la littérature scientifique. Aucune différence n'a été notée entre les deux cellules.

À l'interface fer massif/argilite, les vitesses de corrosion moyennes sont élevées (entre 7 et 18 µm.an⁻¹) et du même ordre avec et sans bactéries. En revanche, une corrosion localisée (sulfures de fer et piqûrations) est observée uniquement avec bactéries. Ceci laisse supposer que les bactéries ont un rôle dans la corrosion localisée ; toutefois le dispositif expérimental ne permet pas d'évaluer



Cellule de percolation : la masse de fer en bas de la cellule est choisie sous forme de poudre pour faciliter son passage en solution. Le cylindre fin dans la partie supérieure est l'échantillon de fer massif.

la vitesse de cette corrosion et donc de quantifier cette influence. De plus, ces travaux montrent une migration des bactéries le long de l'interstice existant entre le fer massif et l'argilite qui le contient. Les résultats obtenus à l'issue de cette thèse confirment que les espaces vides et la présence de bactéries sont des éléments à prendre en compte dans l'évaluation de la sûreté d'installations de stockage en milieu géologique.

François Marsal - francois.marsal@irsn.fr
(Bureau d'expertise des filières de gestion des déchets et de la sûreté des colis - Begesc)

⁽¹⁾ Les aciers sont notamment les constituants de sur-conteneurs des déchets ; les argiles correspondent à la roche hôte, l'argilite, ainsi qu'aux scellements des ouvrages de stockage.

⁽²⁾ Techniques de caractérisation utilisées : MEB, MEB/EDS, Raman, DRX, tomographie aux rayons X.

PERTURBATIONS DE LA CELLULE À FAIBLES DOSES

Pour répondre au questionnement sociétal sur l'effet de faibles doses de rayonnements ionisants, les chercheurs de l'IRSN poursuivent l'acquisition de connaissances scientifiques. La thèse d'Ingrid Nosel s'inscrit dans cette démarche, en étudiant les effets de faibles doses sur l'expression des gènes de l'ADN des lymphocytes.

Les effets sur la cellule d'une exposition aux rayonnements ionisants à des doses inférieures à 100 milliGrays (mGy) sont encore mal connus : la cellule diminue-t-elle l'intensité de sa réponse de façon continue ou existe-t-il un seuil d'exposition en dessous duquel elle ne répond pas à l'irradiation ? Durant sa thèse, Ingrid Nosel a analysé l'effet de 6 doses différentes de rayonnements gamma sur les gènes de lymphocytes T CD4 humains, l'un des types cellulaires clés du système immunitaire.

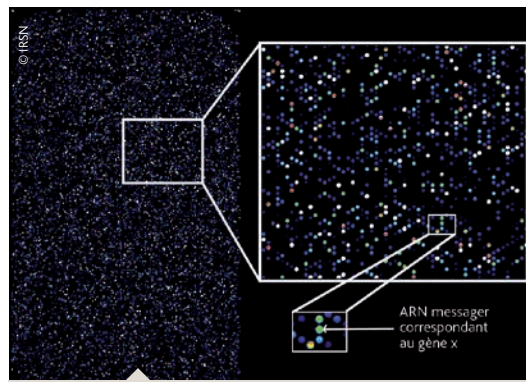
10

[6 niveaux d'irradiation]

Chaque échantillon de sang a été réparti en 7 flacons : une a été conservée en référence ; les 6 autres ont été irradiés chacune à une dose différente entre 5 et 500 mGy⁽¹⁾. Pour identifier les gènes dont l'expression a été influencée par l'irradiation, les lymphocytes T CD4 ont été purifiés. Leurs ARN messagers, supports de l'expression des gènes, ont été extraits de ces cellules 2,5 h, 5 h, 7,5 h, et 10 h après l'irradiation ; puis quantifiés grâce à des puces à oligonucléotides (voir image).

[370 gènes au profil remarquable]

Pour analyser les dizaines de milliers de données obtenues et identifier les éléments pertinents, I. Nosel a développé une méthode analytique biostatistique spécifique. Sur les 17 000 gènes⁽²⁾ effectivement exprimés dans les cellules étudiées, 2745 ont une expression modulée par l'irradiation dans l'une des situations étudiées. Parmi ces gènes, l'analyse statistique en singularise 370 qui peuvent être classés en 2 catégories. Dans la première se trouvent les 68 gènes dont l'expression augmente avec la dose reçue : ces gènes sont déjà connus pour leur rôle suite à une exposition à fortes doses (notamment la régulation de la réparation de l'ADN et de la survie des cellules). La seconde catégorie



Sur la puce à oligonucléotide (ici en fausses couleurs), chaque plot est spécifique d'un ARN messenger. Les ARN messagers, associés à une molécule fluorescente, s'hybrident sur le plot qui leur est spécifique. L'analyse de la fluorescence permet de connaître la quantité d'ARN sur chaque plot.

est une découverte : pour ces 302 gènes, l'expression augmente significativement dès 5 mGy, et reste à ce niveau, quelle que soit la dose. Parmi ces gènes, I. Nosel a identifié une majorité des acteurs intervenant dans le processus de la phosphorylation oxydative, mécanisme fondamental de la mitochondrie pour fournir de l'énergie à la cellule. L'étude du transcriptome^{GLO} a ainsi permis d'identifier une perturbation fonctionnelle de la cellule même aux plus faibles doses d'irradiation. À ce stade, on ne peut pas en tirer d'information sur d'éventuelles conséquences à l'échelle de l'organisme. Mais cette perturbation pourrait constituer un indicateur d'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants après avoir vérifié que ce phénomène est spécifique de l'irradiation et qu'aucun autre « stresser »^{GLO} ne conduit à une modification fonctionnelle identique.

Gaëtan Gruel - gaetan.gruel@irsn.fr
(Laboratoire de dosimétrie biologique - LDB)

⁽¹⁾ 5 et 10 mGy qui correspondent à de l'imagerie médicale peu irradiante, type radiographie ; 25 et 50 mGy qui correspondent à de l'imagerie médicale plus irradiante, type scanner ; 100 mGy qui est la dose seuil communément admise pour l'apparition de cancers à partir du suivi épidémiologique des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki.

⁽²⁾ Le génome humain comprend quelque 25 000 gènes.

+++ Quantification chez l'homme et à l'échelle du génome des modifications d'expression génique induites par de faibles doses de rayonnements ionisants, thèse soutenue par Ingrid Nosel le 21 novembre 2013 à Fontenay-aux-Roses.

+++ Nosel I. et al., « Characterization of gene expression profiles at low and very low doses of ionizing radiation », *DNA Repair*, (2013)12(7), 508-517.

COLLABORATIONS

Renouvellement du C3R. Le contrat de collaboration qui structure le laboratoire Combustion, cinétique chimique et réactivité (C3R), laboratoire commun entre l'IRSN et l'Université de Lille 1, est en passe d'être renouvelé pour une durée de 4 ans. Créé en 2009, il met en commun des moyens de recherches, matériels, humains et financiers du Laboratoire d'études du corium et du transfert des radioéléments (LETR) et du Laboratoire d'expérimentation, environnement et chimie (L2EC) de l'IRSN et du Laboratoire de physico-chimie des processus de combustion et de l'atmosphère (PC2A/UMR 8522), unité mixte du CNRS et de l'Université de Lille 1. Une grande partie des travaux réalisés pendant les 4 premières années visait à mieux comprendre le transport de l'iode dans le circuit primaire en conditions accidentelles, en lien avec le programme expérimental Chip (Chimie de l'iode dans le circuit primaire d'un réacteur à eau sous pression). Un autre axe de recherche important a concerné la physico-chimie de l'incendie. L'équipe du C3R est aussi impliquée dans le groupe de travail 6 du Labex CaPPA (Chemical and physical properties of the atmosphere) du programme Initiative d'avenir de l'Agence nationale pour la recherche (ANR).

Accord de collaboration avec Bratislava. Un accord de coopération quadrilatéral, entre l'IRSN

(C3R), l'Université de Comenius (Bratislava, Slovaquie), l'Université de Lille 1 et le CNRS, a été signé le 19 février 2014 : il formalise une collaboration initiée en 2006. Les axes de recherche portent sur la chimie atmosphérique de l'iode pour mieux prédire la dispersion de l'iode dans l'atmosphère en cas d'accident grave, et sur l'amélioration des connaissances sur le comportement des produits de fission (notamment du ruthénium) en cas d'accident de fusion du cœur.



Comprimés d'iode.

© Olivier Seignette/Mikael Lafont/IRSN

Lancement du projet ANR Priodac.

L'IRSN a lancé le 27 mars 2014 le projet Priodac (prophylaxie répétée par l'iode stable en situation accidentelle) avec quatre partenaires scientifiques (CEA, Pharmacie centrale des Armées, Université d'Aix-Marseille, Université Nice Sophia-Antipolis). Il vise à déterminer les modalités

d'administration d'iode stable aux personnes se trouvant dans une zone de rejets accidentels radioactifs répétés ou prolongés. C'est l'un des 14 projets auxquels l'IRSN participe (il en pilote 7) qui ont été retenus par l'Agence nationale de recherche (ANR) dans le cadre du programme Investissements d'avenir « nucléaire de demain » RSNR 2012.

(11)

SOUTENANCES

Trois thèses ont été soutenues en mars 2014 à l'IRSN :

- *Cycle sismique et aléa sismique d'un réseau de failles actives : le cas du rift de Corinthe-Patras (Grèce)*, par Aurélien Boiselet, le 26 mars 2014 à Paris ;
- *Micro-irradiation ciblée par faisceau d'ions pour*

la radiobiologie in vitro et in vivo, par François Vianna, le 26 mars 2014 à Gradignan ;

- *Étude numérique et expérimentale des longueurs de bon mélange : application à l'évaluation de la représentativité des points de prélèvement en conduit*, par Jonathan Alengry, le 20 mars 2014 à Gif-sur-Yvette.

THÈSES

Journées des thèses. Les Journées des thèses ont eu lieu cette année au printemps, du 31 mars au 2 avril 2014 à Paris. Ce séminaire annuel permet aux doctorants de 2^{ème} et de 3^{ème} année de l'IRSN de présenter l'avancée de leurs travaux

aux autres doctorants et aux encadrants. Trois experts de l'Institut, qui ont soutenu récemment leur habilitation à diriger des recherches (HDR), ont par ailleurs présenté un état de l'art de leurs recherches.

ACTIVITÉ SURFACIQUE

Activité par unité de surface. Représente ici, la quantité d'un radionucléide déposée sur le sol par unité de surface (unité : Bq/m²).

ACTIVITÉ VOLUMIQUE

Activité par unité de volume d'un matériau ou d'un fluide. Représente ici, la concentration d'un radionucléide dans l'air (unité : Bq/m³).

CAPTEURS CMOS

Détecteurs en silicium sur lesquels a été implantée de la microélectronique suivant la technologie CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Ils sont utilisés pour de nombreuses applications telles que les appareils photo numériques mais aussi dans de nombreuses applications scientifiques.

CHAMPS NEUTRONIQUES MONO-ÉNERGÉTIQUES

Produits à partir d'un accélérateur d'ions et d'une cible choisie, ces champs sont centrés sur une énergie donnée variable dans une large gamme. Ils permettent d'étudier la réponse en énergie des détecteurs de façon très précise.

EAU PORALE

Eau contenue dans les pores de l'argilite.

ÉVENTAGE

En cas d'accident, c'est la libération, éventuellement *via* des systèmes de filtration, de l'air sous-pression contenu dans l'enceinte de confinement du réacteur. L'opération, volontaire ou non, fait baisser la pression dans l'enceinte mais engendre des rejets dans l'environnement.

FLUENCE

Nombre de particules incidentes par unité de surface (m^{-2}).

MODÉLISATION INVERSE

Résolution d'un problème inverse par la modélisation. Un problème inverse est une situation dans laquelle on tente de déterminer les causes d'un phénomène à partir des observations expérimentales de ses effets. La modélisation peut s'approcher des observations en s'écartant des paramètres

réels. Des contraintes ou des *a priori* doivent être ajoutés pour réduire l'espace des possibilités et aboutir à une solution unique.

PARTICULES SECONDAIRES

Lorsque les neutrons entrent en collision avec la matière, ils produisent, avec une certaine probabilité, de nouvelles particules dites secondaires (protons, alpha, carbone, électron). Ce sont ces particules ionisantes qui génèrent des dégâts dans la matière, par exemple dans les cellules humaines.

SITES INTERSTITIELS

Dans un cristal, des motifs (atomes, ions ou molécules) sont situés aux nœuds d'un réseau. Les espaces entre ces nœuds sont appelés sites interstitiels. Des atomes étrangers, tels que le carbone, peuvent se glisser dans ces interstices.

STRESSEUR

Facteur qui peut être une caractéristique de l'environnement (température, salinité...) ou un polluant, et qui induit un stress sur un organisme ou une cellule.

TRANSCRIPTOME

Ensemble des ARN messagers produits lors du processus de transcription d'un génome.

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

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.

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

<http://www.irsn.fr>

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE