

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN

N° **25**
janvier 2017

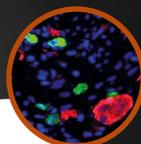
FOCUS

Les INVESTIGATIONS
GÉOCHIMIQUES *en aval*
d'anciennes MINES



AVANCÉES

NUCLEA,
une base de données
thermodynamiques
pour les matériaux



FORMATION

Des cellules souches
pour traiter
les douleurs viscérales
radio-induites

AUSCULTER LE SOL POUR MIEUX DIALOGUER AVEC LA SOCIÉTÉ



© Antoine Bonvaillant/IRSN

L'IRSN innove dans les modes d'interaction et de participation de la société en vue d'améliorer la gouvernance des risques nucléaires et radiologiques. Ainsi, dans sa mission de veille permanente en radioprotection appliquée au domaine environnemental, l'Institut a pris le parti de s'ouvrir aux questionnements des acteurs locaux avant de mettre en œuvre ses plans de prélèvements et de mesures dédiés à la surveillance du territoire.

Riches de points de vue empruntant à d'autres formes de savoir, issues des expériences quotidiennes des citoyens, ces questionnements peuvent venir challenger nos experts, au moment où ils ouvrent le dialogue.

Or, l'« héritage » laissé par l'activité des anciennes mines d'uranium met en jeu des mécanismes complexes. D'où l'impérieuse nécessité d'investiguer et d'appréhender, par des démarches scientifiques, ces mécanismes pour les quantifier et identifier ceux qui jouent un rôle déterminant, ainsi que l'illustrent plusieurs articles de ce numéro. Ainsi nous pourrions aborder sereinement les interactions et questions en provenance de la société, pour une surveillance radiologique qui s'enrichit sur les deux volets.

En ce début d'année, je vous présente à la fois tous mes vœux pour une année 2017 riche sur le plan personnel, et scientifique – qui est la vocation d'Aktis – en même temps que je vous en souhaite bonne lecture.

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. 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 : 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 Goudedranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano, Isabelle Bellin/Technoscope et Jean-Philippe Braly/Technoscope - Réalisation : www.grouperougevit.fr - 24572 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

Matthieu Schuler

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- NUCLEA, une base de données thermodynamiques pour les matériaux
- Vers une évaluation de la « dose biologique » reçue en cas de contamination

FOCUS

PAGE 6

Les investigations géochimiques en aval d'anciennes mines

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

- Caractériser les sources de pollution à proximité des anciennes mines d'uranium
- Des cellules souches pour traiter les douleurs viscérales radio-induites

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Soutenances : HDR et thèses
- Prix

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photo de couverture - Ningyote (Ca,U)PO₄·H₂O identifiée dans les sédiments
© Morin et al. Geochim. Persp. Lett. (2016)

NUCLEA, une base de données thermodynamiques POUR LES MATÉRIAUX

Pour pouvoir évaluer les conséquences d'un accident de fusion de cœur dans un réacteur nucléaire, et contribuer au développement de moyens visant à les limiter, l'IRSN simule numériquement ces accidents. Pour cela, il est nécessaire de connaître les propriétés thermodynamiques des matériaux constituant le cœur du réacteur et celles de leur mélange après fusion. Ainsi a été créée la base NUCLEA, dont l'objectif est de calculer les équilibres thermodynamiques des systèmes chimiques complexes impliqués lors d'un tel accident. Elle s'enrichit à l'aide des résultats de plusieurs programmes européens de recherche et constitue actuellement la référence européenne en ce domaine. Une thèse récente menée à l'IRSN a permis de l'améliorer.

Lors d'un accident de fusion du cœur sur un réacteur nucléaire, les différents composants fondus se mélangent pour former ce qu'on appelle génériquement corium^{GL0}. Constitué du combustible nucléaire, de sa gaine, des barres de commande, des structures métalliques et en béton et des produits de fission, ce corium est le siège d'interactions multiples conduisant à la présence de nombreuses phases^{GL0}. Au début des années 1990, il est apparu nécessaire, pour modéliser les accidents de fusion, de disposer de données thermodynamiques des matériaux qui le composent afin de pouvoir identifier les équilibres entre ces phases. C'est ainsi que la base NUCLEA a été conçue en 2003 dans le cadre du projet européen ENTHALPY. Elle est le fruit d'une collaboration entre la société THERMODATA et l'IRSN avec le concours de la Commission européenne ; son pilotage est aujourd'hui assuré par l'Institut avec le soutien du CNRS et de l'université de Grenoble.

Les équilibres thermodynamiques entre les phases d'un système constitué de deux ou trois éléments chimiques sont représentés au moyen d'un diagramme de phase^{GL0}. Pour le corium, cette approche est impossible compte tenu du nombre élevé d'éléments chimiques qui le constituent et du domaine de température à couvrir⁽¹⁾. Les équilibres thermodynamiques du corium sont calculés à partir des enthalpies libres^{GL0} de chacune des phases du système ; ces enthalpies libres sont elles-mêmes extrapolées à partir de celles des différents sous-systèmes de deux ou trois des éléments chimiques présents dans le corium. Ce sont les enthalpies

libres de ces sous-systèmes chimiques binaires et ternaires qui constituent la base NUCLEA⁽²⁾. En pratique, elles sont obtenues par une approche (nommée CALPHAD) basée à la fois sur le calcul et sur l'expérience, qui consiste à déterminer, pour chaque phase d'un système binaire ou ternaire, son enthalpie libre. Ces enthalpies libres sont construites, à l'aide de modèles décrivant autant que possible la réalité microscopique du matériau, en mettant en cohérence les données expérimentales issues de différentes origines pour obtenir le résultat le plus précis possible.

Minimisation globale de l'enthalpie libre

Associé à la base NUCLEA, le logiciel Nuclea-Toolbox, développé par l'IRSN, calcule l'équilibre thermodynamique d'un mélange multi-

Université d'Aix-Marseille (IM2NP); Université de Savoie-Mont Blanc (SYMME)

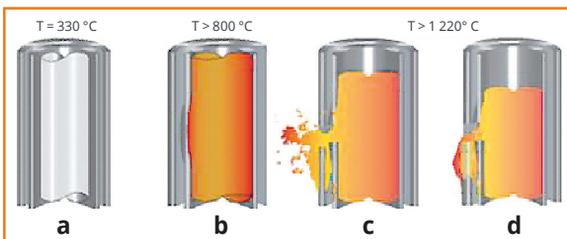
CONTACT

Marc Barrachin
marc.barrachin@irsn.fr

Laboratoire d'étude du corium et du transfert des radioéléments - LETR

⁽¹⁾ 20 à 3 500 °C : il est à noter que NUCLEA peut être utilisée pour prédire les phases dans un corium à température ambiante, ce qui peut présenter un intérêt dans le processus de démantèlement d'une installation accidentée.

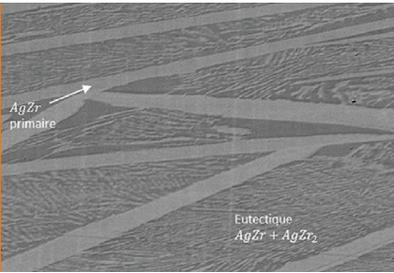
⁽²⁾ La base NUCLEA contient les enthalpies libres de systèmes binaires et ternaires de 20 éléments qui peuvent être présents dans le corium ou interagir avec lui : Al-Si - Mg-Ca - U-Zr-O-Fe-Ni-Cr-Ag-In-B-C-Sr-Ru-La-Ba - H - Ar.



Dégradation de la barre de commande dans un scénario d'accident grave à basse pression du circuit primaire^{GL0}. (a) barre en conditions nominales (b) augmentation de la pression interne dans le crayon interne au tube guide suite à la perte du refroidissement et gonflement progressif de la gaine en acier inoxydable (c) rupture du crayon (d) relocalisation des matériaux absorbants.

© IRSN

Image MEB en mode BSE d'un échantillon brut de fusion de composition nominale 56,9 at. Zr, 43,1 at. Ag
© IRSN



PUBLICATIONS

- S. Bakardjieva, M. Barrachin et al. « Quality improvements of thermodynamic data applied to corium interactions for severe accident modelling in SARNET2 » *Annals of Nuclear Energy*, 74 (2014)110-124.
- S. Bakardjieva, M. Barrachin et al. « Improvement of the European thermodynamic database NUCLEA » *Progress in Nuclear Energy*, 52 (2010) 84-96.
- A. Decreton et al. « Contribution to the description of the absorber rod behavior in severe accident conditions: An experimental investigation of the Ag-Zr phase diagram » *Journal of Nuclear Materials*, 465 (2015) 849-856.
- Contribution expérimentale à l'étude thermodynamique des systèmes Ag-Zr et Ag-Cd-In, thèse soutenue par Alexandre Decreton le 17 mars 2016 à l'université d'Aix-Marseille.



composants en minimisant son enthalpie libre. Les résultats obtenus sont ensuite confrontés à l'expérience, et donnent lieu à des ajustements de modèles. Cette méthode donne la possibilité de « prédire » la thermodynamique d'un matériau complexe à partir de la seule modélisation des systèmes binaires et ternaires, ce qui en fait une méthode très puissante.

La qualité de la base NUCLEA dépend des mesures expérimentales disponibles. Or, comme ces dernières sont le fruit de recherches sur des systèmes chimiques à haute température contenant des éléments radioactifs, tels l'uranium et le plutonium, les données thermodynamiques sont difficiles et coûteuses à obtenir. Si des études ont été réalisées sur la plupart des systèmes binaires métalliques, les données expérimentales relatives à ceux qui impliquent l'oxygène (oxydes d'uranium et de plutonium notamment) sont en nombre plus limité. L'information expérimentale sur les systèmes ternaires est encore plus réduite. Depuis plus de dix ans, divers programmes internationaux (sous l'égide de la Commission européenne comme ENTHALPY, ISTC CORPHAD, ISTC PRECOS, SARNET ou sous l'égide de l'OCDE/AEN comme MASCA ou MCCI) et nationaux (collaborations avec le CNRS) concourent à combler ces lacunes. Les écarts apparaissant entre les calculs et ces données pointent les systèmes binaires et ternaires dont la modélisation doit être améliorée par l'acquisition de nouvelles données.

Confirmer des parties du diagramme

L'IRSN, en partenariat avec l'université d'Aix-Marseille (IM2NP) et l'université de Savoie-Mont-Blanc (SYMME), a récemment produit des données de base pour NUCLEA via une thèse soutenue en mars 2016. Ces travaux ont porté sur

la thermodynamique de l'alliage argent-indium-cadmium constituant les barres de commande des réacteurs français de 900 et 1 300 MWe. Lors d'un accident grave, en cas de rupture de la gaine en acier inoxydable qui contient ces barres, les constituants fondus de l'alliage peuvent interagir avec le zirconium des gaines de combustible et influencer sur les déplacements des matériaux dans le cœur. La thèse de Alexandre Decreton s'est concentrée sur l'étude expérimentale du diagramme de phase du système Ag-Zr et sur la détermination des propriétés thermodynamiques des composés définis de ce système, c'est-à-dire des phases dont la composition ne varie pas avec la température. Ses résultats ont confirmé que ces composés étaient AgZr et AgZr₂.

Ce diagramme de phase a été étudié à partir d'échantillons élaborés par un procédé de fusion à arc électrique sous atmosphère d'argon purifié. Deux techniques d'analyse complémentaires ont été mises en œuvre : l'analyse microstructurale d'échantillons bruts de fusion ou recuits par MEB^{GL0} et l'analyse thermique différentielle, qui permet de détecter les transitions de phases. Les mesures réalisées par le doctorant ont permis de préciser les parties jusqu'alors controversées du diagramme de phase, notamment les équilibres impliquant la phase liquide pour des concentrations majoritaires de Zr ainsi que la nature des transformations^{GL0} des composés AgZr et AgZr₂ lors de leur liquéfaction.

Des mesures de l'enthalpie de formation des composés AgZr et AgZr₂ ont été réalisées par calorimétrie de dissolution. Pour dissoudre le zirconium, une approche originale de dissolution en bain acide à température ambiante a permis de déterminer l'enthalpie standard de formation de AgZr, valeur en accord avec le calcul théorique ab-initio^{GL0} de sa structure électronique. En revanche, les résultats obtenus pour AgZr₂ présentent une forte incertitude liée à la durée de dissolution, qui devrait être résolue par une optimisation de l'efficacité du solvant. Par ailleurs, le doctorant a étudié le système Ag-In-Cd au moyen de plusieurs techniques expérimentales, améliorant ainsi la connaissance du diagramme de phase de ce système pour ce qui concerne sa phase liquide, phase très importante pour l'étude des accidents de fusion du cœur. Les données ainsi obtenues ont été intégrées dans la base NUCLEA.

Vers une ÉVALUATION de la « DOSE BIOLOGIQUE » reçue en cas de CONTAMINATION

Pour estimer la dose biologique reçue dans l'organisme après une incorporation de radionucléides, l'IRSN travaille à adapter la méthode, fondée sur l'analyse des aberrations chromosomiques, qui est utilisée en cas d'exposition externe.

En cas de contamination de l'organisme par des radionucléides, l'anthroporadiométrie^{GL0} et les analyses radio-toxicologiques permettent d'identifier le ou les radionucléides incorporés, d'en quantifier l'activité et de calculer la « dose physique » reçue aux organes. La mesure de la fréquence des aberrations chromosomiques⁽¹⁾ dans les lymphocytes circulants^{GL0} permet quant à elle de calculer la « dose biologique » reçue au corps entier⁽²⁾. Si cette technique est validée pour les situations d'irradiation externe, il n'a jamais été prouvé qu'elle est utilisable pour une évaluation correcte de la dose en contamination interne. Un modèle expérimental permettant de tester la pertinence de cette technique en cas de contamination a été mis en place chez la souris.

Une première étape a consisté à construire une courbe de référence pour établir la relation entre la dose de rayonnement et l'effet, en irradiant *in vitro* du sang de souris à différentes doses de rayons gamma. Il a pour cela été nécessaire d'adapter au cas de la souris les conditions de culture cellulaire

utilisées chez l'homme pour favoriser la division des lymphocytes, ou mitose^{GL0}, à un stade, la métaphase^{GL0}, facilitant la visualisation des chromosomes et de leurs aberrations. Les conditions ainsi établies ont permis d'obtenir un pourcentage optimal de lymphocytes de souris en métaphase. Les aberrations chromosomiques y sont alors détectées par des sondes fluorescentes (technique dite du « m-FISH »).

Trois fois plus de dommages chromosomiques

La seconde étape a consisté à valider ce modèle expérimental. Les scientifiques ont comparé les valeurs de référence dose/effet obtenues chez la souris après irradiation externe à celles bien connues chez l'Homme. Il est apparu que la répartition des aberrations chromosomiques induites par une irradiation externe des lymphocytes est similaire chez la souris et l'Homme. En revanche, leur taux global est deux fois plus faible dans les lymphocytes de souris. Puis, ils ont comparé les aberrations chromosomiques de lymphocytes issus de sang de souris après une contamination au césium 137 avec celles résultant d'une irradiation externe de lymphocytes de souris. À dose et débit de dose équivalents, la contamination interne au césium 137 induit trois fois plus de dommages chromosomiques que l'irradiation externe.

Le modèle expérimental a ainsi permis une avancée vers l'utilisation de la technique en cas de contamination. La future plateforme PARISII, nouvelle animalerie de l'IRSN pouvant héberger des rongeurs contaminés, permettra de confirmer s'il est possible d'établir une dosimétrie biologique pour une souris contaminée *in vivo* au Césium 137 en utilisant les courbes de références nouvellement établies.

CONTACT

Sandrine Roch-Lefèvre
sandrine.roch-lefevre@irsn.fr

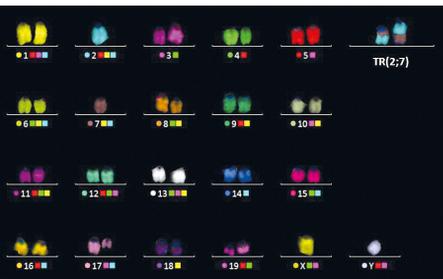
Laboratoire de dosimétrie biologique - LDB

⁽¹⁾ Chromosomes dicentriques, translocations, insertions, délétions...

⁽²⁾ La fréquence des aberrations chromosomiques conséquences des dommages de l'ADN est proportionnelle à la dose.

PUBLICATION

• S. Roch-Lefèvre *et al.* « A mouse model of cytogenetic analysis to evaluate caesium 137 radiation dose exposure and contamination level in lymphocytes », *Radiat Environ Biophys.*, 2016, 55, 61-70.



Exemple de métaphase de lymphocyte de souris dont les chromosomes ont été marqués avec la technique du m-FISH. Deux aberrations chromosomiques sont détectables (TR(2 ; 7)).

© IRSN

Les INVESTIGATIONS GÉOCHIMIQUES en aval d'anciennes MINES

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPIC) - UMR 7590 CNRS/ université Paris VI/ Institut de recherche et de développement/ Muséum d'histoire naturelle)
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (UMR 8212 CNRS/ Université de Versailles-Saint-Quentin / Commissariat à l'énergie atomique)

CONTACT

Arnaud Mangeret
arnaud.mangeret@irsn.fr

Laboratoire d'études des transferts en sub-surface - LT2S

Dans le cadre de sa mission d'appui aux pouvoirs publics, l'IRSN contribue à l'évaluation de l'impact radiologique sur l'environnement des installations de la filière nucléaire, parmi lesquelles les anciennes mines d'uranium. Si leur exploitation est désormais terminée, les sites sur lesquels elles étaient implantées et qui sont aujourd'hui réaménagés, sont drainés par des eaux favorisant, sous certaines conditions, la remobilisation et le transport de l'uranium qui peut ensuite s'accumuler dans les sédiments des cours d'eau ou des lacs localisés en aval. Comprendre les mécanismes d'accumulation de l'uranium dans ces sédiments, et ceux liés à sa possible remobilisation en cas de curage et de stockage à sec constitue donc un enjeu important en matière d'évaluation d'impact. C'est pour répondre à ces objectifs que l'IRSN s'est engagé, en tant que pilote au côté d'autres partenaires académiques, dans les projets Uramines I et II.

Évaluer le devenir à long terme de l'uranium dans les dépôts sédimentaires en aval des anciennes mines est un des axes d'étude prioritaires assignés à Areva dans le cadre du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). L'exploitant est notamment chargé d'étudier les relations entre les

rejets et l'accumulation de radioéléments dans les sédiments. À défaut d'une directive générale pour les gérer, c'est au préfet qu'il revient aujourd'hui de décider, lors d'opérations de curage, des modalités à mettre en œuvre pour leur retrait et leur stockage. Afin de pouvoir évaluer le lien entre l'activité minière et l'accumulation de l'uranium dans les sédiments ainsi que l'impact des solutions de gestion proposées, l'IRSN mène, depuis 2012, des actions de recherche avec l'IMPIC et le LSCE dans le cadre des projets Uramines I et II. Leur finalité est de comprendre comment l'uranium présent dans l'eau des rivières s'accumule dans les sédiments lacustres et caractériser l'éventuelle réversibilité des processus impliqués. Le site choisi dans le cadre de ce projet est formé par le continuum hydrologique partant de l'ancienne mine des Bois noirs, exploitée de 1955 à 1980, jusqu'à la retenue d'eau du barrage hydroélectrique de Saint-Clément (Massif central) situé à 20 km en aval. Ce lac est une base de loisirs depuis les années 1930.

Variations de concentration

L'eau issue de la mine est caractérisée par des concentrations en uranium et en radium supérieures à celles des cours d'eau de la région. En application des exigences fixées par arrêté préfectoral, ces eaux doivent être contrôlées et traitées pour limiter notamment leur concentration en radium. Elles sont par la suite rejetées dans le cours d'eau qui longe le site minier,



Plateforme de carottage sur barge UWITEC® pour le prélèvement de carottes longues.

© IRSN



Section de sédiments du lac après ouverture de la carotte.
© IRSN

la Besbre, et alimente le lac de Saint-Clément. Une proportion de l'uranium transporté par la Besbre est piégée dans les sédiments qui se déposent au fond du plan d'eau. Les variations de concentration en uranium dans les sédiments observées aujourd'hui peuvent être mises en relation avec les apports de la mine au cours du temps. Dans la perspective d'analyser les travaux qui seront produits par Areva dans le cadre du PNGMDR, l'IRSN doit pouvoir faire ce lien. Pour cela, l'IRSN s'est attaché à déterminer, dans le cadre des projets URAMINES I et II, le taux de sédimentation dans la retenue d'eau et les processus biogéochimiques susceptibles de modifier la distribution de l'uranium dans les sédiments.

Datation du radium 228

Afin d'identifier le taux de sédimentation, les dépôts sédimentaires lacustres doivent être datés. La méthode la plus couramment utilisée est basée sur la mesure du plomb 210 (radionucléide également d'origine naturelle). Cependant, celle-ci s'est avérée inapplicable dans ce cas car les apports de plomb 210 provenant des eaux de la mine perturbent le signal. Une autre méthode repose sur le repérage du césium 137 associé aux retombées de l'accident de Tchernobyl (1986) ou des essais nucléaires atmosphériques (maximum au début des années 1960). Toutefois cette méthode nécessite de disposer de sédiments suffisamment anciens et donc d'effectuer des prélèvements suffisamment profonds, ce qui n'a pas été pos-

sible pour la majorité des prélèvements réalisés au cours du projet. Seules quelques-unes des carottes se sont avérées suffisamment longues pour observer un pic de césium 137. L'absence d'américium 241 caractéristique des essais nucléaires a permis d'attribuer ce pic à l'accident de Tchernobyl. Pour compléter leurs interprétations, les chercheurs ont fait appel à une



Carotte de sédiments réalisée avec un carottier gravitaire à main UWITEC®.
© IRSN

PUBLICATIONS

• Morin G., Mangeret A. *et al.* « Mononuclear U(IV) complexes and ningyoite as major uranium species in lake sediments », *Geochemical Perspectives Letters*, 2016, 2, 95-105.

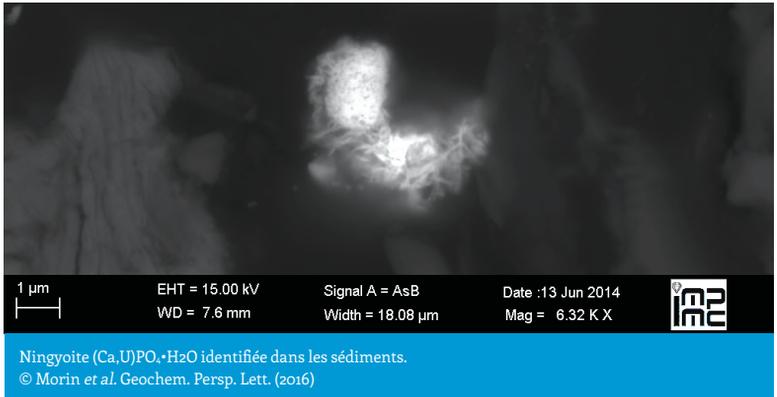


• Reyss J. L., Mangeret, A. *et al.* « Estimation of the sedimentation rates based on the excess of radium 228 in granitic reservoir sediments », *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 162-163, 8-13.



⁽¹⁾ Techniques synchrotron XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) et EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure): elles permettent de mesurer l'état d'oxydation de l'uranium et de déterminer les phases porteuses à l'échelle moléculaire.

⁽²⁾ ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) et SSRL (Stanford Synchrotron Radiation Lightsource).



autre technique, jamais utilisée pour dater des sédiments lacustres : la datation par le radium 228. L'activité de ce radionucléide est généralement égale à celle de son père, le thorium 232. Dans les sédiments du lac de Saint-Clément, l'activité du radium 228 est supérieure à celle du thorium 232 et diminue en profondeur proportionnellement à la demi-vie du radium 228. Cette proportionnalité permet d'estimer l'âge des dépôts sédimentaires. La courte demi-vie du radium (5,7 ans) limite néanmoins cette méthode à l'analyse de la sédimentation des 30 dernières années. Dans les carottes où les deux approches ont pu être mises en œuvre, les résultats sont cohérents entre eux, validant ainsi la méthode basée sur l'excès de radium 228. Le taux de sédimentation estimé à partir de ces divers résultats est de l'ordre de 2 à 4 cm/an.

Processus biogéochimiques

Pour apprécier la sensibilité de l'uranium aux processus biogéochimiques intervenant dans le sédiment, les équipes scientifiques des projets Uramines ont identifié les phases porteuses de l'uranium, c'est-à-dire la nature des molécules et des minéraux auxquels il était associé. Ces informations permettent ensuite d'évaluer la stabilité des phases formées par l'uranium et ainsi de prédire l'impact d'un curage sur la mobilité de l'uranium.

Le comportement de l'uranium est largement conditionné par la présence d'oxygène. En effet, en son absence, il est à la valence IV. Il est alors peu soluble et peu mobile. À l'inverse en milieu oxydant, il est à la valence VI, forme dont la solubilité et la mobilité sont nettement plus fortes. Dans les sédiments du lac de Saint-Clément

l'oxygène ne pénètre pas au-delà de quelques millimètres ; ils constituent donc un milieu favorable à l'immobilisation de l'uranium sous la valence +IV. Pour étudier les formes chimiques de l'uranium +IV dans les sédiments, il était nécessaire de préserver les prélèvements de l'oxydation au contact l'air. Un protocole de prélèvement a donc été mis en œuvre pour préserver les conditions réductrices du sédiment. Pour cela les carottes ont été immédiatement conditionnées sous atmosphère inerte et transportées au laboratoire. Afin de caractériser les phases porteuses, les chercheurs ont opté pour une méthode permettant d'identifier la nature des atomes qui entourent l'uranium : la spectroscopie d'absorption des rayons X sur rayonnements synchrotron (techniques XANES et EXAFS)⁽¹⁾ à l'ESRF de Grenoble et au SSRL de Stanford⁽²⁾. Ces analyses ont montré l'absence d'uraninite, une forme solide très stable de l'U(IV), qui était considérée, jusqu'à très récemment, comme l'espèce majoritaire dans ce type de milieu. Dans les sédiments du lac de Saint-Clément, ils ont constaté que l'U(IV) est majoritairement présent sous des formes potentiellement moins stables que l'uraninite, notamment des formes sorbées sur des phosphates et/ou des silicates du sédiment.

À l'issue de ces travaux, plusieurs questions restent en suspens notamment en ce qui concerne la stabilité des formes chimiques de l'U(IV) mises en évidence en présence d'oxygène – situation qui serait rencontrée en cas de curage – et leur impact sur la mobilité de l'uranium. Des éléments de réponse seront apportés dans le cadre d'une thèse et d'un post-doctorat inscrits dans le projet Uramines 2 (2015-2018), copiloté par l'IRSN et l'IMPIC.

Caractériser LES SOURCES DE POLLUTION à proximité des anciennes MINES D'URANIUM

Parmi les recommandations émises en 2010 par le Groupe d'expertise pluraliste⁽⁴⁾ sur l'impact des mines d'uranium à présent fermées, figure celle de mieux caractériser et prédire l'évolution de leur environnement. Une thèse menée à l'IRSN y a contribué en étudiant spécifiquement les zones humides autour des anciens sites miniers.

Des accumulations d'uranium et de ses descendants peuvent être observées dans les zones humides ou sur les berges des rivières, à l'aval d'anciens sites miniers, entraînant des élévations locales du débit de dose de rayonnements ionisants de plusieurs centaines de nanosieverts par heure (nSv.h⁻¹). La présence d'éléments traces métalliques (ETM) a également été mise en évidence. L'enjeu de la thèse conduite par Alicia Cuvier a été de développer des méthodes pour localiser et caractériser les polluants dans les zones humides à proximité de l'ancienne mine de Bertholène (Aveyron) ; le but étant de pouvoir l'appliquer à d'autres sites miniers.

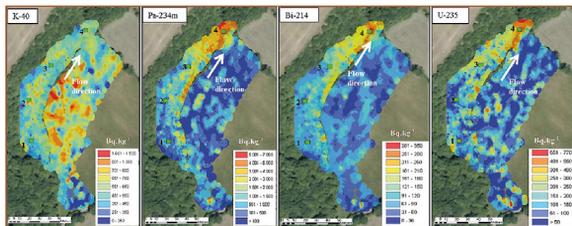
Différentes échelles d'observation

Alicia Cuvier a cartographié l'uranium et ses descendants à différentes échelles d'observation : de parcelles de plusieurs milliers de mètres carrés jusqu'à des fractions micrométriques qui composent un sol. C'est le long de la petite rivière qui draine le site de Bertholène qu'ont été effectuées les mesures *in situ* de la radioactivité à l'aide d'un dispositif mobile de spectrométrie gamma développé par l'IRSN. La cartographie obtenue montre que la parcelle de la rive gauche (environ 2 000 m²) présente des zones de fortes activités en ²³⁸U (jusqu'à 20 000 Bq/kg) et ses descendants (²³⁰Th, ²²⁶Ra et ²¹⁰Pb, principalement), probablement déposés lors des crues. De plus, des prélèvements de sols permettent d'évaluer les variations de l'activité avec la profondeur, à l'échelle centimétrique. Enfin, les séparations granulométriques montrent que c'est la fraction la plus fine du sol (< 50 µm) qui concentre le plus les radionucléides. Cette méthode a permis d'identifier précisément les zones de contamination marquées.

Stockage et relargage

A. Cuvier a aussi mené des expérimentations pour évaluer le stockage et le relargage potentiel des radionucléides dans les sols, notamment des lessivages chimiques. Elle a ainsi observé que l'uranium est associé à une fraction du sol au potentiel rédox réducteur, et peut donc être relargué dans l'environnement si ce potentiel ou le pH du sol varie. Il en est de même pour le radium 226, qui s'avère être associé au baryum, présent dans les sols sous forme de sulfate. Ces lessivages ont également montré des contaminations en ETM relativement faibles, à l'exception du manganèse.

La méthode développée durant cette thèse, qui met en œuvre l'acquisition de données à différentes échelles d'observation allant du kilomètre au micron, peut être utilisée pour caractériser les sources de pollution existant dans l'environnement de n'importe quelle ancienne mine d'uranium. Elle constitue une base indispensable pour estimer l'évolution de la contamination.



Cartographie réalisée par spectrométrie gamma mobile (MARCASSIN) de l'activité en ⁴⁰K, en descendants de l'²³⁸U (²¹⁴Pb et ²¹⁴Bi) et en ²³⁵U (en Bq.kg⁻¹) d'une parcelle de 10 000 m² environ, le long de la petite rivière qui draine l'ancien site minier de Bertholène (Aveyron).

© IRSN

EcoLab,
UMR 5245,
CNRS/INPT-ENSAT,
université Paul Sabatier
de Toulouse.

CONTACT

Laurent Pourcelot
laurent.pourcelot
@irsn.fr

Laboratoire d'études
et d'expertises de la
radioactivité dans
l'environnement -
LEREN

PUBLICATION

• Accumulation de l'uranium, de ses descendants et des éléments traces métalliques dans les sols des zones humides autour des anciennes mines d'uranium, thèse soutenue par Alicia Cuvier le 6 novembre 2015, à l'université de Toulouse.



⁽⁴⁾ Un groupe d'expertise pluraliste ou GEP a été mandaté par les ministres chargés de l'écologie, de l'industrie et de la santé ainsi que par le président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour évaluer l'impact des anciennes mines d'uranium et proposer des recommandations.

DES CELLULES SOUCHES pour traiter les douleurs VISCÉRALES RADIO-INDUITES



INRA, ESPCI
de Paris

CONTACT

Alexandra Sémont
alexandra.semont
@irsn.fr

Laboratoire
de recherche en
régénération des tissus
sains irradiés (LRzI)

⁽¹⁾ Ce modèle, mis au point au laboratoire a fait l'objet d'une validation par un comité d'éthique dédié.

PUBLICATION

• *Effet des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) sur l'hypersensibilité viscérale chronique dans un modèle d'ulcération colique radio-induite chez le rat*, thèse soutenue par Christelle Durand le 19 Juin 2014.



L'IRSN explore la capacité des cellules souches de moelle osseuse à traiter les douleurs d'origine viscérale chroniques consécutives à une radiothérapie de la zone pelvienne. Les résultats obtenus sur l'animal sont prometteurs.

La moitié des patients traités par radiothérapie pour un cancer de la zone pelvienne souffrent de douleurs viscérales chroniques pour lesquelles les traitements sont souvent inefficaces. Ces douleurs altèrent considérablement la qualité de vie de ces patients et peuvent générer de sévères troubles affectifs. Dans le cadre d'une thèse, Christelle Durand a évalué la capacité des cellules souches mésenchymateuses (CSM) à diminuer la douleur viscérale après irradiation.

La doctorante a mené son étude en utilisant le modèle expérimental⁽¹⁾ de rats irradiés à 27 Grays au niveau de la zone colorectale, qui est utilisé depuis plusieurs années au laboratoire afin d'étudier les complications gastro-intestinales associées à une radiothérapie.

Le croisement de plusieurs paramètres a permis à Christelle Durand de valider ce modèle pour étudier la douleur consécutive à l'irradiation. D'une part, l'hypersensibilité viscérale a été évaluée à l'aide d'une technique de référence au niveau international, acquise par le laboratoire auprès

de l'INRA. La douleur ressentie y est quantifiée à l'aide du réflexe nerveux qu'elle déclenche ; celui-ci est identifié grâce à l'enregistrement des contractions abdominales lorsqu'une pression est appliquée au niveau du côlon. Pour les rats irradiés, le nombre de ces contractions abdominales est augmenté, suggérant une hypersensibilité viscérale, et ce durant au moins 8 semaines.

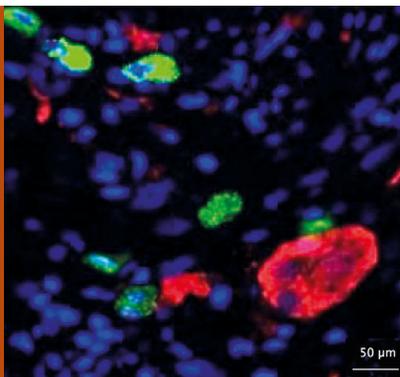
Hypersensibilité viscérale

D'autre part, des paramètres histologiques ont été pris en compte : la doctorante a montré que l'irradiation entraîne chez le rat une augmentation de l'interaction anatomique entre les mastocytes (cellules inflammatoires) et les fibres nerveuses. Ces caractéristiques sont aussi observées chez les patients après radiothérapie. Dans le cas des maladies inflammatoires de l'intestin, l'augmentation d'une telle interaction est directement liée à l'augmentation d'une sensation douloureuse. L'ensemble de ces résultats a permis de valider l'utilisation du modèle pour mettre en évidence l'hypersensibilité viscérale. C. Durand a ensuite étudié l'efficacité thérapeutique des CSM dans le cas d'une hypersensibilité viscérale induite par l'irradiation. 1,5 million de CSM ont été administrées en intraveineuse aux rats, un mois après une irradiation de 27 Gy de la zone colorectale. Une semaine après le traitement, le nombre de contractions abdominales était revenu à la normale, l'hypersensibilité avait donc disparu. De plus, l'augmentation après irradiation de l'interaction entre les fibres nerveuses et les mastocytes dans le côlon a été réduite de 23 %.

Fort de ces premiers résultats, l'IRSN poursuit ses travaux pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans cet effet antalgique des CSM.

Représentation des interactions anatomiques entre les fibres nerveuses ou ganglions nerveux (marquage immunohistochimique en rouge) et les cellules inflammatoires (mastocytes, marquage immunohistochimique en vert) au niveau de coupes de côlon (sous-muqueuse) après une irradiation localisée de 27 Gy. La barre de mesure correspond à 50 micromètres. Grossissement x 4,8.

© IRSN



50 µm

SOUTENANCES

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR)

- **Jeanne Malet** a soutenu son HDR intitulée *Aérodispersion dans les risques naturels ou industriels et mitigation par des systèmes d'aspersion* le 16 juin 2016 ;
- **Luiz Leal** a soutenu son HDR intitulée *Role of Nuclear Data in Response to Practical Applications* le 13 juillet 2016.

THÈSES

Les dernières thèses soutenues en 2016 :

- *Étude expérimentale et modélisation des explosions hybrides solides/solides : application au cas des mélanges de poussières graphite/métaux par Miriam d'Amico* le 14 décembre 2016 à Nancy ;
- *Étude de l'effet des cellules souches mésenchymateuses sur un modèle de fibrose colique radio-induite chez le rat par Benoît Usunier* le 14 décembre 2016 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Étude des conséquences génétiques et épigénétiques consécutives à la signalisation des dommages radio-induits de l'ADN par Aurélie Vaurijoux* le 12 décembre 2016 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Modélisation du comportement du ruthénium lors de son transport dans le circuit primaire par Faoulat Miradji* le 5 décembre 2016 à Cadarache ;
- *Étude de la dégradation radiolytique de polymères constitutifs de câbles contrôle commande K1 en ambiance nucléaire par Sidi Ahmedou* le 1^{er} décembre 2016 à Aubières ;
- *Modélisation multi-dimensionnelle de la propagation des ondes sismiques dans des milieux linéaires et non-linéaires par Elif Oral* le 1^{er} décembre 2016 à Champs-sur-Marne ;
- *Détermination de la composition isotopique du soufre pour l'étude de l'origine, biotique ou abiotique, des sulfures de fer en corrosion anoxique par Sophie Grusset* le 24 novembre 2016 à Paris ;

- *Développement d'un modèle analytique dédié au calcul des doses secondaires neutroniques aux organes sains des patients en protonthérapie par Anthony Bonfrate* le 24 novembre 2016 à Orsay ;
- *Éjection de gaz et de grains suite à la rupture d'un crayon de combustible nucléaire : modélisation de la dynamique par Yixian Zhou* le 2 novembre 2016 à Marseille ;
- *Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radio-induits précoces dans des cellules exposées à des irradiations d'ions légers (proton et alpha) par Sylvain Meylan* le 21 octobre 2016 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Influence d'une température de 70°C sur la géochimie, la microstructure et la diffusion aux interfaces béton/argile : expérimentations en laboratoire, in situ et modélisation par Philipines Lalan* le 4 octobre 2016 à Paris ;
- *Développement d'un système de détection d'émetteurs gamma en coïncidence par Hugues Paradis* le 16 septembre 2016 à Orsay ;
- *Développement d'outils d'aide au diagnostic en contexte incertain : application aux diagnostics de situations accidentelles, par Ahmed Mabrouk* le 13 septembre 2016 à Paris ;
- *Modélisation numérique de la pyrolyse en atmosphère normalement oxygénée et sous-oxygénée, par Ahmed Kacem* le 30 mai 2016 à Marseille ;
- *Étude par similitude du couplage des effets thermiques et du vent sur les transferts de masse dans les réseaux aérauliques des bâtiments complexes, par Thomas Le Dez* le 04 mai 2016 à Nantes.

PRIX

DEUX ANCIENS DOCTORANTS DE L'IRSN PRIMÉS : Sarah Baghdadi...

Sarah Baghdadi, qui a mené jusqu'en 2015 sa thèse au Laboratoire de radiochimie (LRC) de l'IRSN, a reçu le prix Laurent Exmelin lors de la dernière réunion annuelle Procorad (Promotion du contrôle de qualité des analyses de biologie médicale en radiotoxicologie, 15-17 juin 2016 à Dijon).

... et Anthony Rondeau

Anthony Rondeau a reçu le 7 septembre 2016 le prix Jean Bricard décerné par l'Association française d'études et de recherches sur les aérosols (Asfera), lors de la 22^e Conférence européenne sur les aérosols (EAC-2016, 4-7 septembre 2016, Tours), pour son travail de thèse menée à l'IRSN.

UN BEST POSTER AWARD POUR DES INGÉNIEURS DU LPMA...

Samuel Peillon et **Mamadou Sow**, ingénieurs au Laboratoire de physique et de métrologie des aérosols (SCA/LPMA) de l'IRSN ont reçu le prix du meilleur poster (Best Poster Award) lors de la 22^e Euro-Pear Aerosol Conference (EAC 2016).

... ET POUR UN ANCIEN DOCTORANT DE L'IRSN

Sylvain Meylan, qui a très récemment soutenu sa thèse menée au Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) de l'IRSN, a reçu le prix du meilleur poster lors de la dernière ICRS (International Conference on Radiation Shielding, octobre 2016, Paris).

LUIZ LEAL PRIMÉ PAR L'AMERICAN NUCLEAR SOCIETY

Luiz Leal, chercheur au Laboratoire d'expertise et de recherche en neutronique des réacteurs (LNR) de l'IRSN, est co-lauréat pour l'année 2016 du prix Eugene P. Wigner du physicien des réacteurs (Eugene P. Wigner Reactor Physicist Award) de l'American Nuclear Society (ANS), remis le 7 novembre 2016.

En savoir plus sur les Prix



ANTHROPORADIOMÉTRIE**OU EXAMEN****ANTHROPORADIOMÉTRIQUE:**

Examen permettant la mesure du rayonnement gamma ou X émis par le corps humain et permettant, à partir d'un étalonnage approprié, de quantifier l'activité des radionucléides émetteurs gamma présents dans le corps entier (charge corporelle) ou dans certains organes d'intérêt (thyroïde, poumons).

CALCUL AB INITIO DE LA STRUCTURE ÉLECTRONIQUE:

On utilise la théorie de la fonctionnelle de la densité qui est une méthode de calcul quantique permettant l'étude de la structure électronique du matériau, en principe de manière exacte. Elle donne accès, moyennant quelques approximations, à l'enthalpie de formation des composés définis.

CIRCUIT PRIMAIRE DU

RÉACTEUR: Circuit fermé où circule l'eau de refroidissement du cœur.

CORIUM: Mélange des matériaux issus de la dégradation du cœur.

DIAGRAMME DE PHASE:

Détermine les limites de domaines dans lesquels peuvent exister des phases, la composition et les proportions de ces différentes phases.

ENTHALPIE LIBRE: Potentiel thermodynamique utilisé pour décrire un système chimique à température et à pression constante. L'évolution spontanée d'un tel système conduit à une diminution de son enthalpie libre (ou énergie de Gibbs).

LYMPHOCYTE: Catégorie de globules blancs impliqués dans divers mécanismes immunitaires. Les lymphocytes circulants sont ceux circulant dans le sang.

MITOSE: Phase du cycle cellulaire correspondant à la division d'une cellule mère en deux cellules filles.

MEB: Microscopie électronique à balayage.

MÉTAPHASE: Regroupement des chromosomes condensés à l'équateur de la cellule.

NATURE DES**TRANSFORMATIONS:**

Congruente dans le cas où le composé fond sans changer de composition, péritectique dans la situation où il fond partiellement en formant une phase liquide et une phase solide de compositions différentes du composé.

PHASE: Domaine du matériau dont les propriétés thermodynamiques sont uniformes. Ce domaine est caractérisé par une structure et par un arrangement atomique identiques.

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