

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN

n° 11
Janvier-Mars
2013



La sûreté d'un stockage géologique des déchets radioactifs : du micro- scopique au macroscopique

> Applications

Des fantômes numériques
pour la dosimétrie
cardiovasculaire

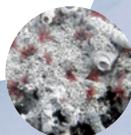
page 3



> Avancées

La radioactivité chez les
organismes de sites hydro-
thermaux sous-marins

page 5



> Formation

Cartographier
la radioactivité
en temps réel

page 9



ÉDITORIAL

© M. Delporte/IRSN



Éclairer les esprits, des experts comme de la société

Dans un avenir proche, va être soumis à débat public, puis au processus de décision administrative, le projet d'un site de stockage en couche géologique profonde de déchets nucléaires à vie longue. Il incombe à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)

d'établir la démonstration de la sûreté de ce stockage, et de mener les travaux d'études et de recherche pour la soutenir. L'Agence a mis à profit un vaste ensemble de données, d'hypothèses longuement pesées et confrontées aux essais qu'elle a menés dans le laboratoire souterrain de Bure.

Pour autant, les enjeux techniques et les attentes de la société sur ce sujet atteignent un niveau tel qu'il était tout à fait nécessaire que l'IRSN – qui est chargé d'évaluer la capacité du projet à remplir sa mission – mène en parallèle ses propres recherches pour bien orienter ses travaux d'expertise. Le « focus » de ce numéro d'Aktis présente l'approche de recherche de l'IRSN dans ce domaine.

2

Ces travaux prennent aujourd'hui un nouveau relief à travers l'initiative prise par l'Anclci⁽¹⁾, le Clis⁽²⁾ de Bure et l'IRSN : partager ces connaissances scientifiques avec ceux de nos concitoyens qui veulent se forger leur propre opinion en vue d'exercer, de manière éclairée, leur droit à la participation au processus de décision.

Matthieu Schuler,
Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats

⁽¹⁾ Anclci : Association nationale des comités et commissions locales d'information.

⁽²⁾ Clis de Bure : Comité local d'information et de suivi du laboratoire souterrain de recherche sur la gestion des déchets radioactifs de Bure.

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 Repusard – Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler – Rédactrice en chef : Sandrine Marano – Comité de lecture : Gianni Bruna, Matthieu Schuler, Jeanne Suhamy – Comité éditorial : Gianni Bruna, Aleth Delattre, Dominique Franquard, Bernard Goudal, Christine Gouedranche, Pascale Monti, Matthieu Schuler – Rédaction : Isabelle Bellin – Conception et réalisation : Aphania – Impression : IdéaleProd, sur papier recyclé – 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'information, 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.

Couverture : De l'ettringite (hydrate de sulfate, de calcium et d'aluminium) apparaît à l'interface argilite/ciment. © A. Dauzères/IRSN

SOMMAIRE

Édito

Par Matthieu Schuler

Applications de la recherche

Pages 3

Des fantômes numériques pour la dosimétrie cardiovasculaire

Avancées de la recherche

Pages 4 et 5

Caractérisation sous synchrotron des cinétiques de dissolution/précipitation des hydrures

La radioactivité chez les organismes de sites hydrothermaux sous-marins

FOCUS

Pages 6 à 8

La sûreté d'un stockage géologique des déchets radioactifs : du microscopique au macroscopique



Formation par la recherche

Page 9

Cartographier la radioactivité en temps réel

L'influence du vent sur le confinement des polluants au sein d'installations nucléaires

La vie de la recherche

Pages 10 et 11

Deux soutenances de HDR en radioprotection

2012 : une année de prix pour les doctorants de l'IRSN

Glossaire

Page 12

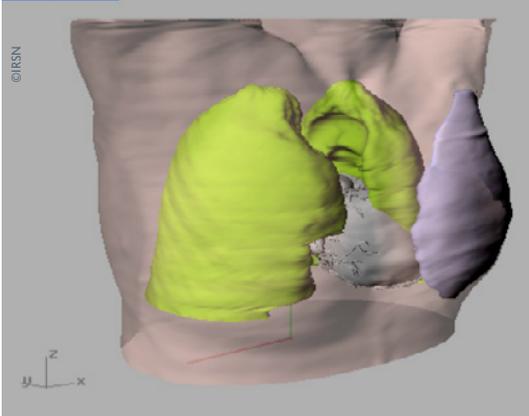
DES FANTÔMES NUMÉRIQUES POUR LA DOSIMÉTRIE CARDIOVASCULAIRE

Les premiers résultats d'une thèse menée à l'IRSN montrent l'intérêt d'utiliser des fantômes numériques hybrides pour évaluer plus précisément la dose reçue par le cœur lors d'une radiothérapie thoracique.

La radiothérapie thoracique (par exemple pour le traitement d'un cancer du sein) peut s'avérer toxique pour le cœur, car il se trouve alors à proximité du champ d'irradiation voire partiellement dans ce champ. Limiter ce problème majeur, reconnu par la communauté scientifique, nécessite d'évaluer plus précisément la dose reçue par le cœur, d'une part pour la minimiser lors des traitements, et d'autre part pour mieux connaître la relation entre la dose et l'effet possible. Un travail de thèse a commencé il y a un an à l'IRSN pour établir une méthode plus précise d'évaluation de ces doses tenant compte de l'anatomie des patients. Les

informations disponibles dans les dossiers anciens. À partir de ces deux types d'images et à l'aide d'un logiciel d'infographie, elle a construit pour chaque patiente un fantôme numérique. Elle y a inséré un modèle détaillé de cœur car l'organe n'est pas suffisamment visible sur les clichés de départ, quel qu'en soit le type. Le plan de traitement^{GLO} des patientes a ensuite été simulé sur les fantômes numériques à l'aide d'un logiciel utilisé en clinique. Les doses reçues par les patientes de chacun des deux groupes ont ainsi pu être calculées à partir du fantôme numérique, et comparées à la dosimétrie établie au moment du traitement.

Perspective



Fantôme numérique hybride d'un thorax féminin (vert=poumons ; violet=glande mammaire gauche) avec le modèle détaillé de cœur (gris).

premiers résultats ont déjà montré la pertinence d'utiliser des fantômes numériques, c'est-à-dire des représentations de l'anatomie d'un patient en trois dimensions, pour la dosimétrie cardiovasculaire.

[Scanographies et radiographies]

La doctorante, Alexandra Moignier, a travaillé à partir des images de six patientes traitées pour un cancer du sein gauche : dans trois cas (groupe 1), elle a utilisé les scanographies thoraciques typiquement disponibles dans les dossiers récents ; dans les trois autres (groupe 2), elle a utilisé les radiographies orthogonales pour reproduire les

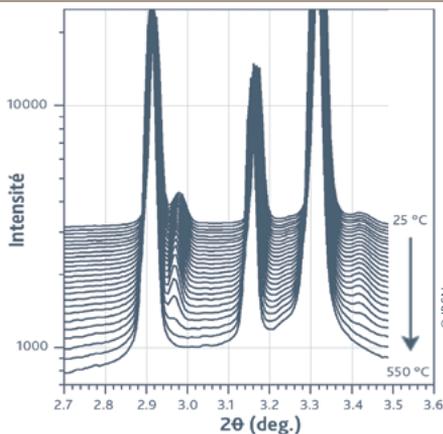
[Représentativité moins arbitraire]

En comparant les résultats des dosimétries initiales et recalculées, il apparaît que pour le premier groupe de patientes le fantôme est très représentatif de leur anatomie et que les doses reconstituées à partir du fantôme numérique concordent avec celles calculées lors du traitement. Pour le second groupe, malgré une fidélité anatomique plus limitée, l'évaluation dosimétrique reste proche de celle fournie par le fantôme numérique. Les résultats obtenus grâce au modèle de cœur montrent que la dose reçue à l'artère coronaire la plus proche du champ d'irradiation est deux à trois fois plus importante que celle reçue au cœur. Ces résultats attestent de la flexibilité des fantômes numériques qui permettent de simuler de nombreuses anatomies en faisant varier individuellement les paramètres et en insérant un modèle de cœur générique ou personnalisé.

Contacts : Alexandra Moignier - alexandra.moignier@irsn.fr
(Laboratoire d'évaluation de la dose interne - LEDI)

Bernard Aubert - bernard.aubert@irsn.fr
(Unité d'expertise médicale - UEM)

+++ Publication : Moignier A., Derreumaux S., Broggio D., Beurrier J., Chea M., Boisserie G., Franck D., Aubert B., Mazon J.-J., «Potential of Hybrid Computational Phantoms for Retrospective Heart Dosimetry After Breast Radiation Therapy: A Feasibility Study» - International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics 85 (2013) pp. 492-499.



Le rayonnement X du synchrotron est diffracté selon un angle spécifique (en abscisse du diagramme) à chaque composant chimique de l'échantillon. Le diagramme représente en ordonnée l'intensité du rayonnement après diffraction ; les pics sont caractéristiques d'un composant donné, et leurs hauteurs donnent leurs proportions dans l'échantillon. Chaque ligne correspond à une température : de 25° C en arrière-plan à 550° C au premier plan. Le second pic, caractéristique de l'hydruure de zirconium, diminue avec l'augmentation de la température. Ceci démontre la dissolution progressive des hydruures et permet de quantifier la cinétique associée.

Combustible - Physique/chimie

CARACTÉRISATION SOUS RAYONNEMENT SYNCHROTRON DES CINÉTIQUES DE DISSOLUTION/PRÉCIPITATION D'HYDRURES

Pour mieux connaître les phases de l'hydrogène piégé dans les gaines du combustible nucléaire, l'IRSN a soumis des échantillons de Zircaloy-4 au rayonnement synchrotron de l'ESRF.

Lors de leur séjour en réacteur, les gaines en alliage de zirconium qui contiennent le combustible nucléaire s'oxydent. Cette oxydation engendre la formation d'hydrogène dont une partie s'accumule progressivement dans les gaines sous deux formes différentes : précipité en plaquettes d'hydruure de zirconium ou dissous dans la matrice de zirconium. L'hydrogène ainsi fixé modifie les propriétés de la gaine et peut notamment la fragiliser. La gaine constituant la première barrière de confinement des radionucléides produits par la fission, il est essentiel de bien caractériser sa résistance. Cela nécessite bien sûr de quantifier l'hydrogène fixé mais aussi de bien caractériser la partition entre les deux formes ci-dessus.

Si la quantité d'hydrogène piégé dans la gaine est aujourd'hui assez bien évaluée, il n'en est pas de même pour la partition entre formes. Le verrou scientifique à lever est la cinétique avec laquelle, à une température donnée, les transformations d'une forme à l'autre s'opèrent dans les gaines.

[À l'aide du synchrotron]

L'Institut a lancé un projet de recherche exploratoire⁽¹⁾ sur deux ans pour mieux caractériser les

cinétiques de dissolution et de précipitation des hydruures dans le Zircaloy-4 (un des alliages de zirconium utilisé pour les gaines) à l'aide du rayonnement synchrotron de l'ESRF⁽²⁾. Ce dernier permet en effet de suivre en continu les changements de phase qui se produisent dans la matière à l'échelle de petits composants tels que les hydruures. Plus de 48 heures d'expérimentation ont porté sur des échantillons de Zircaloy-4, hydruurés au préalable en laboratoire, pour être représentatifs d'une gaine ayant séjourné en réacteur. Placés dans un four installé sur une ligne du synchrotron, ils ont été successivement chauffés, maintenus à un certain niveau de température (environ 500° C), puis refroidis à différentes vitesses.

[Dissolution et précipitation des hydruures]

La masse de données ainsi recueillies a permis, après interprétation, de quantifier les cinétiques de dissolution et de précipitation des hydruures à différentes températures. Un gonflement de la matrice de zirconium consécutif à la dissolution des hydruures a aussi été mis en évidence. Pour modéliser ces phénomènes, et ainsi améliorer la précision des simulations numériques du comportement des combustibles nucléaires, il reste à mieux comprendre les mécanismes élémentaires conduisant aux cinétiques de dissolution observées. C'est à cette fin qu'a été lancée en 2011 une thèse sur le comportement à l'échelle atomique des hydruures de zirconium.

Contact : Olivier Marchand - olivier.marchand@irsn.fr
(Laboratoire de physique et de thermomécanique des matériaux - LPTM)

⁽¹⁾ Les projets de recherche exploratoire relèvent d'un dispositif mis en place à l'Institut pour explorer des domaines de recherche non prévus par les programmes classiques.

⁽²⁾ ESRF : European Synchrotron Radiation Facility.



INSA-Lyon, Université de Manchester.

+++ Zanellato O., Preuss M., Buffiere J.-Y., Ribeiro F., Steuwer A., Desquines J., Andrieux J., Krebs B.
« Synchrotron diffraction study of dissolution and precipitation kinetics of hydrides in Zircaloy-4 », *Journal of Nuclear Materials*, 420 (2012) 537-547.

LA RADIOACTIVITÉ CHEZ LES ORGANISMES DE SITES HYDROTHERMAUX SOUS-MARINS

L'IRSN vient d'attribuer son premier prix de la créativité en recherche à Sabine Charmasson pour son travail de recherche exploratoire sur la radioactivité naturelle accumulée par les organismes vivant près des sources hydrothermales sous-marines.

Situées au fond des mers, dans des zones d'activité volcanique, les sources hydrothermales sont des points où l'eau rejaillit après avoir circulé au contact des roches basaltiques de la croûte océanique. Ce fluide hydrothermal est chargé en sels minéraux, en éléments métalliques, en radioéléments naturels et en gaz dissous. Une équipe de l'IRSN a cherché à valider l'hypothèse que la faune exubérante vivant dans les écosystèmes hydrothermaux accumule la radioactivité naturelle transportée par ces fluides. Cette recherche exploratoire vise à identifier des organismes soumis en permanence (exposition chronique) à des niveaux de radioactivité élevés, en vue de progresser dans la compréhension des mécanismes de réaction du vivant aux rayonnements ionisants.



© Ifremer-Nautifile Campagne Phare 2002

*Le ver polychète *Paralvinella grasslei* vit dans un épais mucus, seules ses branchies rouges sont visibles. L'IRSN projette d'étudier le polonium dans les tissus de ces organismes dont les tubes muqueux ont atteint des valeurs proches de 19 000 Bq/kg sec.*

Les chercheurs ont mesuré les teneurs en radioéléments de divers organismes (crustacés, vers, mollusques) collectés sur la dorsale orientale du Pacifique et la ride Médio-Atlantique en 1996, 2001, 2002 et 2007. Les mesures ont porté sur les isotopes 234, 235 et 238 de l'uranium, les isotopes 230 et 232 du thorium, le plomb 210 et le polonium 210.

[Un à deux ordres de grandeur]

Sans atteindre des niveaux exceptionnels, la radioactivité mesurée est généralement

supérieure d'un à deux ordres de grandeur aux niveaux mesurés dans les organismes côtiers ou dans les organismes abyssaux vivant hors de l'influence des sources. En ce qui concerne l'uranium, elle peut avoisiner 800 à 1000 Bq/kg sec en ^{234}U (soit environ 3 $\mu\text{g/g}$) et en ^{238}U (soit environ 250 $\mu\text{g/g}$) chez des polychètes^{GLO} *Paralvinella grasslei* qui colonisent les cheminées. La concentration dépend du site de prélèvement, de la localisation dans la zone de mélange fluide-eau de mer et du régime alimentaire des organismes. L'analyse des données suggère que le devenir de l'uranium est lié aux nombreuses bactéries chimioautotrophes^{GLO} qui peuplent ces environnements et contribuent à solubiliser l'uranium, le rendant ainsi biodisponible^{GLO} pour les organismes de ces écosystèmes.

[Des niveaux élevés en polonium]

Durant le projet, les chercheurs de l'IRSN ont aussi participé en mai 2007 à une campagne de prélèvement de bathymodioles (mollusques bivalves) endémiques de la zone des Açores. Des niveaux élevés en ^{210}Po , radionucléide à vie courte, de l'ordre de 800 Bq/kg sec, ont été mesurés notamment au niveau des branchies, organes hôtes de bactéries chimioautotrophes. Les débits de dose pondérés dus au seul ^{210}Po , évalués 3 à 4 microgray par heure ($\mu\text{Gy/h}$), sont légèrement plus importants que pour les moules côtières (1 $\mu\text{Gy/h}$) mais restent faibles. Ce projet a permis de soulever un petit coin du mystère qui entoure encore la compréhension du cycle complexe des radioéléments dans ces environnements atypiques.

Contact : Sabine Charmasson - sabine.charmasson@irsn.fr
(Laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin - LERCM)



Ifremer, Université de Nantes.

+++ Publication : Charmasson S., Le Faouder A., Loyer J., Cosson R. P., Sarradin P.M. « ^{210}Po and ^{210}Pb in the tissues of the deep-sea hydrothermal vent mussel *Bathymodiolus azoricus* from the Menez Gwen field (Mid-Atlantic Ridge) » *Science of the Total Environment* 409 (2011) 771-777.

LA SÛRETÉ D'UN STOCKAGE GÉOLOGIQUE DES DÉCHETS RADIOACTIFS : DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE

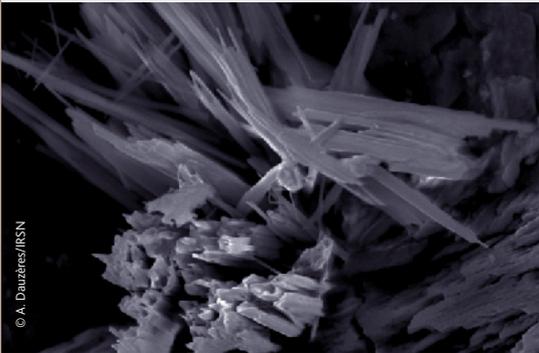
Afin de nourrir sa capacité à évaluer la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs à vie longue en couche géologique profonde, l'IRSN effectue des recherches ciblées, qui sont indépendantes de celles menées par le concepteur du stockage, l'Andra. L'une des principales préoccupations est d'identifier les chemins que les radionucléides transportés par l'eau inévitablement présente, pourraient emprunter vers la biosphère après l'altération des matrices qui les confinent initialement (verre, acier). Dans ce but, l'IRSN s'intéresse à toutes les échelles de la problématique, du microscopique au macroscopique.

En 2013, avant que l'Andra ne dépose une demande d'autorisation pour la création d'une installation de stockage, un débat public doit être organisé sur le stockage profond de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Ce stockage est envisagé dans la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien (COx) en Meuse/Haute-Marne. Installé à plus de 500 mètres de profondeur, il doit garantir le confinement des radionucléides pendant plusieurs centaines de milliers d'années, tout en restant réversible pendant au moins 100 ans. L'IRSN mobilise son expertise, notamment en géochimie, géologie et hydrogéologie^{GLO}, et effectue ses propres recherches afin d'instruire les sujets qu'il considère être des points-clés pour la sûreté. Le stockage prévoit l'enfouissement des déchets dans des alvéoles creusées à l'horizontal puis tapissées ou bouchées à l'aide de béton. Ce béton

(fabriqué à base de ciment commun) peut-il altérer les propriétés de confinement de l'argilite et à terme accélérer la migration des radionucléides vers la surface ? Inversement, les matériaux cimentaires risquent-ils d'être dégradés par l'argilite, remettant en cause la durabilité des ouvrages et ainsi la réversibilité du stockage ? Pour renforcer l'expertise de l'Institut et apporter un questionnement pertinent, les chercheurs de l'IRSN ont d'abord étudié la minéralogie à l'interface argilite/ciment sur des échantillons prélevés dans la station expérimentale de Tournemire (Aveyron), dans d'anciens forages de prospection bétonnés au début des années 1990. Les éléments chimiques traversent l'interface ciment/argilite par diffusion via l'eau contenue dans les pores des matériaux : les hydroxydes de sodium, de potassium et de calcium contenus dans l'eau porale cimentaire (pH >13,2) diffusent vers l'argilite en créant un panache alcalin, et inversement les sulfates et carbonates de l'eau porale argileuse (pH neutre voisin de 7,5) diffusent dans le ciment, induisant une attaque multi-ionique.

[Panache alcalin dans l'argilite]

La diffusion dans l'argilite a été évaluée par signature isotopique, une méthode basée sur le rapport entre deux isotopes d'un élément chimique, ici le strontium (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) naturellement présent dans certaines phases du milieu argileux et cimentaire. Ce rapport, très différent dans les deux milieux, permet de mesurer la profondeur du panache alcalin : en 15 ans, il a diffusé sur une épaisseur d'argilite d'environ 3 cm, soit trois fois plus que ne le laisserait penser les analyses chimiques réalisées avec d'autres techniques. Ces dernières ont par ailleurs permis de



Après 15 ans, des composés à base de calcium apparaissent à l'interface argilite/ciment : calcites mais aussi silicates de calcium hydratés (C-S-H) ainsi que de l'ettringite (hydrate de sulfate, de calcium et d'aluminium, cristaux de ces photos), deux composés mis en évidence dans l'argilite.

montrer que, dans cette zone, la minéralogie de l'argilite est modifiée.

Contrairement à ce qui était attendu, l'évolution minéralogique induite par la présence du béton diminue la porosité de l'argilite (de 10 % à 5, voire 3 %) sur environ 1,5 cm, probablement à cause de la formation importante de calcites et de silicates de calcium hydratés. Inversement, la porosité du ciment augmente au contact de l'argilite (de 40 à 60 %), en contradiction avec plusieurs autres études. Ce résultat serait dû à la qualité du contact béton/argilite et donc à la façon dont sont coulés les bétons. En modifiant ainsi la porosité de part et d'autre de l'interface, les interactions argilite-béton impactent les propriétés de transfert d'eau et de soluté de l'ensemble. Leur évaluation doit donc tenir compte des conditions de construction de l'ouvrage, ainsi que de l'évolution des conditions thermiques, hydrauliques et mécaniques environnantes. D'autres études s'achèvent actuellement sur l'interaction de l'argilite avec le fer.

[Propagation des failles dans l'argile]

À plus grande échelle, les formations géologiques présentent des hétérogénéités qui se manifestent notamment par des failles. Celles-ci pourraient éventuellement drainer préférentiellement les radionucléides depuis la couche d'argile contenant les déchets vers les formations calcaires aquifères supérieures ou inférieures. Ni l'imagerie sismique^{GLO} ni les forages n'ont actuellement montré de faille dans la zone du stockage envisagé. Les chercheurs de l'IRSN s'interrogent toutefois sur les mécanismes de création et de propagation d'une faille dans l'argile depuis les couches calcaires encadrant la couche d'argile (alternances argilo-calcaires). Dans le cadre de sa thèse, Vincent Roche a étudié des failles normales (déplacements verticaux de 1 cm à 1 m) dans des alternances argilo-calcaires dans le bassin du Sud-Est⁽¹⁾, analogues géologiques^{GLO} au multicouche de Meuse/Haute-Marne mais avec des couches très peu épaisses (10 cm à 1 m), ce qui permet de les observer en totalité. À partir d'un recueil sur le terrain des données sur l'architecture des failles selon les propriétés des couches (géométrie, minéralogie, élasticité, friction, cohésion), un modèle conceptuel a été construit.

[Initiation dans les calcaires...]

Vincent Roche a ensuite pu généraliser ce modèle à tout multicouche argilo-calcaire, d'une part grâce à des données issues de la littérature ou obtenues sur d'autres analogues présentant des couches plus épaisses (Tournemire, Malte),

Exemples de failles analysées dans le bassin du Sud-Est : la première (photo A et son interprétation B) est confinée dans les calcaires, la seconde (C et D) s'est propagée dans les couches argileuses, amortie en bas dans les argiles, restreinte en haut par une faille horizontale.

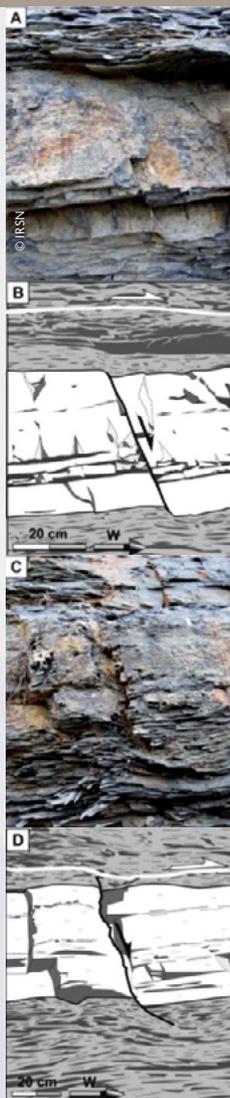
d'autre part en analysant par simulation numérique la sensibilité⁽²⁾ de son modèle aux propriétés des couches. Il a notamment montré que les failles s'initient dans les calcaires et que leur profondeur de propagation dans l'argilite dépend du déplacement de la faille (qui croît avec le temps) : les failles avec de faibles déplacements ne traversent pas l'interface ; les failles intermédiaires sont amorties dans l'argilite ; les plus importantes traversent plusieurs couches.

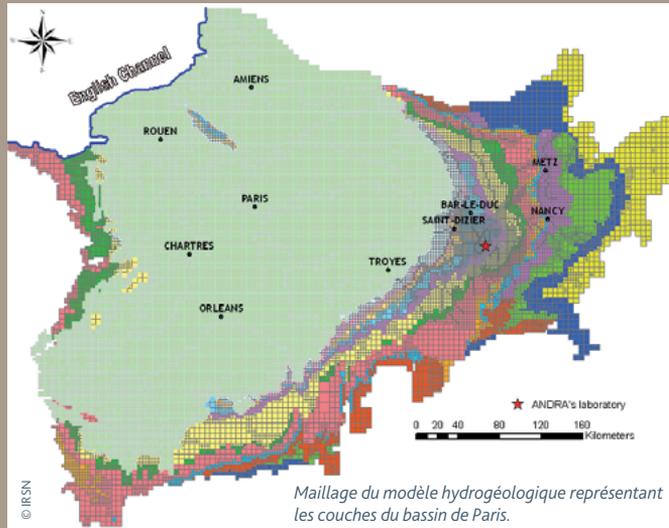
[... et amortissement dans l'argilite]

Il confirme ainsi que les failles normales ont tendance à s'amortir dans les couches argileuses, dans des proportions dépendant notamment de la teneur en argile. Son modèle permet de proposer une première estimation de la profondeur de propagation d'une faille normale, dont on connaîtrait le déplacement vertical dans les calcaires par investigation sismique. Il montre qu'en Meuse/Haute-Marne, des failles d'un déplacement vertical de 5 m dans les calcaires ne traverseraient pas la totalité du COx. Ce modèle nécessite d'être encore précisé et étendu en étudiant des failles réactivées par plusieurs épisodes tectoniques, notamment horizontaux, comme cela a pu être le cas dans l'histoire géologique de Meuse/Haute-Marne.

[Modèle hydrogéologique]

Quoi qu'il en soit, au bout de quelques centaines de milliers d'années, certains radionucléides ne seront plus confinés dans la couche argileuse et rejoindront les aquifères, même par diffusion





Maillage du modèle hydrogéologique représentant les couches du bassin de Paris.

lente et en absence de faille. L'IRSN modélise ces écoulements d'eau pour savoir combien de temps mettra le panache de radioactivité à rejoindre la surface et quelle sera sa dilution. On connaît globalement l'empilement des couches géologiques plus ou moins aptes à laisser circuler l'eau dans le bassin sédimentaire de Paris (180 000 km² au Nord de la France), auquel appartient la région de Bure. Représenter les écoulements dans cette région suppose donc une modélisation hydrogéologique^{GLO} de l'ensemble du Bassin. L'IRSN utilise pour cela un modèle développé depuis 1999 avec l'École des Mines ParisTECH. Il intègre notamment des données géologiques telles que profondeur, épaisseur et perméabilité des couches, déterminées par cartographie géologique, en forage et par prospection sismique.

[Niveaux d'eau et de sel]

Initialement, le modèle n'était « calé^{GLO} » que sur les niveaux d'eau mesurés en forage dans les aquifères du bassin parisien. Pour accroître la précision du modèle, les chercheurs l'ont également calé sur les teneurs en sel contenues dans l'eau de ces forages : un double calage inédit à cette échelle. Pour obtenir des résultats cohérents, ils ont aussi tenu compte du phénomène thermohalin, c'est-à-dire l'influence de la température et de de la teneur en sel sur la circulation d'eau (plus l'eau est salée, plus elle est dense et plonge en profondeur).

Le modèle s'avère ainsi relativement représentatif des écoulements dans le Bassin de Paris et surtout dans la région de Bure. Les chercheurs ont notamment confirmé que d'importantes remontées de sel s'effectuaient à travers la faille de Bray, située

au centre du bassin de Paris et qui met en connexion différents aquifères. Poursuivant dans cette voie, ils développent un nouveau modèle, cette fois à l'aide du code Mélodie⁽³⁾ de l'IRSN, car ce dernier tient aussi compte du phénomène de diffusion, qui semble également influencer sur la migration du sel dans le bassin sédimentaire de Paris.

L'enjeu de la démonstration de sûreté à long terme d'un stockage réside dans la capacité à estimer comment les propriétés de confinement de ce stockage sont susceptibles d'évoluer. Ce, à différentes échelles de temps – du siècle jusqu'au million d'années – et d'espace – du colis de déchet jusqu'au bassin hydrogéologique.

Grâce aux connaissances acquises en propre sur ces sujets, l'IRSN se prépare à évaluer la robustesse des arguments scientifiques que l'Andra apportera dans sa démonstration, en support de sa demande de création d'une installation de stockage dans le site de Meuse/Haute Marne.

Contacts : Alexandre Dauzères - alexandre.dauzeres@irsn.fr
(Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sols - Letis)

Muriel Rocher - muriel.rocher@irsn.fr

Amélie de Hoyos - amelie.dehoyos@irsn.fr
(Bureau d'expertise et de recherche sur les installations de stockage - Beris)

⁽¹⁾ Le Bassin du Sud-Est est limité à l'ouest par le Massif central, à l'est par le Jura et les Alpes.

⁽²⁾ Modèle géologique 3DEC, très utilisé pour les milieux discontinus en présence de failles.

⁽³⁾ Logiciel Mélodie : Modèle d'évaluation à long terme des déchets irradiants enterrés.



Centre de géosciences de l'École des Mines ParisTECH ; Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), laboratoire ISTeP (Institut des sciences de la Terre de Paris).

+++ Architecture et croissance des failles dans les alternances argilo-calcaires - Exemples dans les alternances du Bassin du Sud-Est (France) et modélisation numérique. Thèse soutenue par Vincent Roche le 28 octobre 2011 à Paris.

+++ Techer I., et al. « Tracing interactions between natural argillites and hyper-alkaline fluids from engineered cement paste and concrete: Chemical and isotopic monitoring of a 15-years old deep-disposal analogue » *Applied Geochemistry* 27 (2012) 1384-1402.

+++ De Hoyos A., et al. « Influence of thermohaline effects on groundwater modelling - Application to the Paris sedimentary Basin » *Journal of Hydrology* 464-465 (2012) 12-26.

CARTOGRAPHIER LA RADIOACTIVITÉ EN TEMPS RÉEL

Un nouveau dispositif mobile et léger pour cartographier *in situ* la contamination radioactive d'un site a été mis au point durant une thèse élaborée à l'IRSN par Fabien Panza. Le prototype Oscar a été expérimenté avec succès sur un site de la préfecture de Fukushima (Japon).

Réaliser une cartographie en temps réel de la radioactivité présente sur un terrain de petite dimension (champ, zone délimitée dans une ville, etc.) : c'est le défi relevé par Fabien Panza avec le prototype Oscar⁽¹⁾, qu'il a créé durant une thèse effectuée à l'IRSN, et pour lequel trois brevets ont été déposés. Le dispositif utilise un spectromètre gamma au germanium couplé à un GPS, le tout monté sur un chariot mobile afin de pouvoir effectuer les relevés en se déplaçant. Cette modalité de recueil implique que les mesures du spectromètre durent très peu de temps, et sont donc peu intenses. Établir une carte précise et fiable de la radioactivité du site nécessite alors qu'un nombre suffisant de données ait été récolté au-dessus des zones contaminées.

[Optimiser le parcours]

Pour éviter à l'opérateur de faire les mesures à l'aveugle, F. Panza a d'abord développé deux algorithmes qui, en traitant les mesures en temps réel, permettent d'optimiser le parcours des relevés et le temps de mesure. Fondé sur la méthode dite de « back-projection », le premier algorithme oriente l'opérateur vers les zones les plus contaminées. Cette méthode exploite la fonction de réponse angulaire^{GL0} du spectromètre pour estimer en temps réel la zone d'où proviennent les rayonnements enregistrés. L'opérateur peut ainsi augmenter le nombre de mesures au-dessus de cette zone afin d'estimer avec plus de finesse sa contamination.

Le second algorithme, Alcam (Algorithme cartographique de l'activité maximale), a pour but de savoir si une source diffuse ou ponctuelle de radiation est présente dans le sol. Il repose sur une méthode qui s'apparente à la triangulation : à partir de plusieurs mesures d'une même source, il est possible d'en déduire comme information la position de la source et son activité. Appliquant ce principe le long du parcours du détecteur sur le site, l'algorithme corréle les informations obtenues à chaque nouvelle mesure. En posant des hypothèses sur les caractéristiques de la source,

on obtient alors en temps réel une carte de l'activité possible maximale qui produirait le flux enregistré. Une mesure sur ces points physiques permet de confirmer une contamination localisée.

[Carte haute définition]

Dès que les mesures sont achevées, la carte haute définition de la radioactivité effectivement présente dans le sol est réalisée par le troisième algorithme développé par F. Panza. Inspiré d'une analogie avec des traitements de données astronomiques, celui-ci utilise une méthode de déconvolution^{GL0} des mesures spectrométriques (par la réponse impulsionnelle du spectromètre) pour déduire le flux de rayonnement gamma émis par le sol. La carte finale correspond ainsi à la cartographie de l'activité du site.

Contacts : Rodolfo Gurriaran - rodolfo.gurriaran@irsn.fr
(Laboratoire de mesure de la radioactivité dans l'environnement - LMRE)

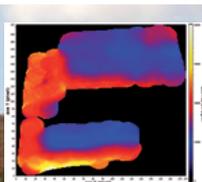
Fabien Panza - fabien.panza@irsn.fr
(Groupe logistique et métrologie - GLM)

⁽¹⁾ Oscar : Outil spectrométrique pour la cartographie des radionucléides.



CSTB ; Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de l'Université de La Rochelle.

+++ Développement de la spectrométrie gamma *in situ* pour la cartographie de site, thèse soutenue le 20 septembre 2012 à l'Université de Strasbourg (ED182).



Carte d'activité réalisée à l'aide du prototype Oscar pour un site contaminé japonais



L'INFLUENCE DU VENT SUR LE CONFINEMENT DES POLLUANTS AU SEIN D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Des expérimentations menées au sein de la soufflerie climatique Jules Verne du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ont permis d'étudier les effets du vent sur le confinement de polluants au sein d'installations nucléaires et de valider la prise en compte de ces effets par le logiciel Sylvia développé par l'IRSN pour l'étude des incendies en milieux confinés et ventilés.

Les bâtiments industriels, tels que ceux de l'industrie nucléaire, sont équipés d'un réseau de ventilation qui garantit le confinement des polluants au sein de l'installation, que ce soit en fonctionnement normal, dégradé ou accidentel. Ce réseau est dimensionné pour que les locaux soient maintenus dans une cascade de dépression par rapport à l'environnement extérieur, cascade qui les hiérarchise selon le risque de contamination.

Pour simuler des phénomènes de ventilation, d'incendie et de transfert d'espèces volatiles au sein des réseaux de ventilation des installations, l'IRSN a développé le logiciel Sylvia⁽¹⁾ qui permet de réaliser des études de sûreté nucléaire. Une thèse, récemment achevée à l'Institut par Nicolas Le Roux, a permis de valider ce logiciel pour sa prise en compte des phénomènes de couplage entre l'aéraulique interne à l'installation et les effets du vent. En effet, le vent induit des champs de pression au niveau des communications extérieures de l'installation, qui sont susceptibles de modifier les écoulements aérauliques internes, notamment les débits de fuite entre locaux. Des expérimentations à échelle réduite ont été menées au sein de la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB⁽²⁾.



Visualisation par injection de fumée d'une inversion de fuite externe lors d'un essai en soufflerie pour une vitesse de vent de 105 km/h environ.

à une échelle réduite et inversement. Après une phase de validation sur des parties élémentaires de réseaux de ventilation (conduits raccordés à un seul local ou à un filtre à très haute efficacité), cette méthode a été appliquée pour réaliser des campagnes expérimentales pour deux configurations simplifiées, représentatives d'installations nucléaires.

[Champs de pression]

Les expérimentations montrent que le vent peut entraîner une perte partielle ou globale du confinement dynamique des polluants en fonction de la vitesse et de l'incidence du vent, et selon l'architecture et le mode de fonctionnement de l'installation. Cela résulte des champs de pression, créés au niveau des communications extérieures par la vitesse moyenne du vent ou sa composante turbulente. Ils peuvent modifier la hiérarchisation des pressions entre locaux et avec l'environnement extérieur. Ces résultats expérimentaux contribuent à la validation du logiciel Sylvia pour prendre en compte les effets du vent en situation isotherme. La prise en compte des phénomènes thermiques couplés aux transferts de masse est prévue lors d'une seconde thèse qui a débuté fin 2012.

Contact : Nicolas Le Roux - nicolas.le-roux@irsn.fr
(Laboratoire d'études et de modélisation en aérodispersion et confinement - LEMAC)

[Approche par similitude]

Le doctorant a d'abord mis en œuvre une méthode fondée sur une approche par similitude pour étudier à échelle réduite les écoulements isothermes au sein d'installations munies d'un réseau de ventilation. Cette approche a permis de transcrire l'ensemble des grandeurs géométriques et aérauliques (volume des locaux, dimension des conduits, débit, pression...) d'une installation réelle

⁽¹⁾ Sylvia : systèmes de logiciels pour l'étude de la ventilation, de l'incendie et de l'aérocontamination.

⁽²⁾ CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment.



Groupe Ramses de l'Université de Strasbourg.

+++ Étude par similitude de l'influence du vent sur les transferts de masse dans les bâtiments complexes, thèse soutenue par Nicolas Le Roux le 5 décembre 2011 à Nantes.

DEUX SOUTENANCES DE HDR EN RADIOPROTECTION

Habilitation à diriger des recherches

Éric Blanchardon a exposé une synthèse de ses travaux et des perspectives de recherche sur le « Développement et application de méthodes pour l'évaluation de la dose de rayonnement résultant d'une contamination radioactive interne », pour obtenir son habilitation à diriger des recherches le 21 novembre 2012. Fabien Milliat a fait de même le 19 décembre 2012 sur le thème des « lésions radio-induites aux tissus sains : rôle du compartiment vasculaire ».

2012 : UNE ANNÉE DE PRIX POUR LES DOCTORANTS DE L'IRSN

Dix récompenses ont été décernées en 2012



STARRLIGHT AUGUSTINE a reçu le prix de thèse 2011 de l'université Aix-Marseille pour l'excellence de ses travaux de thèse effectuée au Laboratoire d'Écotoxicologie des radionucléides (Leco) de l'IRSN, et soutenue le 23 avril 2012.



ANDREA BACHRATA, qui a effectué sa thèse au Laboratoire d'étude et de simulation des accidents majeurs (Lesam) de l'IRSN, a reçu le prix du meilleur papier étudiant lors de la 20^e International Conference on Nuclear Engineering (ICONE20 - Anaheim (USA) – 30 juillet au 3 août 2012). Elle avait par ailleurs reçu le 10 octobre 2011 une bourse L'Oréal France-Unesco-Académie des sciences « Pour les Femmes & la Science ».

JÉRÉMY SABARD, en troisième année de thèse au Bureau de physique des accidents graves (BPhAG) de l'IRSN, a remporté l'un des cinq prix du meilleur article au 9^e International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE - Cracovie (Pologne) – 22 au 27 juillet 2012).



MÉLANY GOUELLO, qui a réalisé sa thèse au Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie (L2EC) de l'IRSN, a reçu le prix du meilleur poster lors de la Conférence Nuclear Energy for New Europe (NENE 2012 - Ljubjana (Slovénie) – 5 au 7 septembre 2012).



ISABEL IDARRAGA qui a effectué sa thèse au Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux (LE2M) de l'IRSN, a reçu le 18 juin 2012 à Paris le prix Jean Bourgeois décerné par la Sfen (Société française d'énergie nucléaire).

PIERRE ROUPSARD, qui a mené sa thèse au Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC) de l'IRSN, a reçu le prix du meilleur poster lors de la 19^e European Aerosol Conference (Grenade (Espagne) – 2 au 7 septembre 2012).

CAROLINE ROUAS, qui a réalisé sa thèse au Laboratoire de radiotoxicologie de l'IRSN, a obtenu le prix de thèse de l'École doctorale 425 de l'Université Paris XI à Chatenay-Malabry qui récompense une thèse du Pôle de Pharmacologie-Toxicologie.

MILAUD CHAHLAFI a reçu en janvier 2012 le prix de la meilleure thèse en sciences de l'ingénieur décerné par la Fondation EADS en 2011 pour sa thèse effectuée au Laboratoire d'étude et de simulation des accidents majeurs (Lesam) de l'IRSN.

JAD FARAH, choisi pour représenter la France au 13^e Congrès de l'IRPA (Glasgow – 13 au 18 mai 2012), a remporté le premier « prix des jeunes professionnels » pour son travail de thèse effectué au Laboratoire d'évaluation de la dose interne de l'IRSN.



MORGAN DUTILLEUL, en troisième année de thèse au Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (Leco) de l'IRSN, a remporté le deuxième prix de la finale du concours « Votre soutenance en 180 secondes » (3MT – 3 minutes thesis), lors du 80^e Congrès de l'Association francophone pour le savoir (Acfas) le 10 mai 2012.

ANALOGUE GÉOLOGIQUE

Site ou matériau ayant certaines caractéristiques géologiques (structure, minéralogie...) similaires à celles de l'objet d'étude.

BACTÉRIES CHIMIOAUTOTROPHES

Bactéries qui réalisent la chimiosynthèse : l'énergie utilisée provient de l'oxydation de composés minéraux tels que les composés soufrés ou le méthane (équivalent du rôle de la lumière dans la photosynthèse).

BIODISPONIBILITÉ

Disponibilité d'un élément pour être absorbé et assimilé par les organismes vivants.

CALAGE D'UN MODÈLE

Consiste à modifier ses paramètres, dans une gamme de valeurs réalistes, pour que les résultats des simulations soient les plus proches possible des valeurs mesurées.

DÉCONVOLUTION

Opération mathématique qui consiste à reconstituer un élément d'entrée en connaissant le résultat et la fonction permettant de passer de l'élément d'entrée au résultat (ici, le résultat est la mesure ; la fonction est la fonction de réponse du détecteur ; et l'élément d'entrée la radioactivité présente).

HYDROGÉOLOGIE

Étude des eaux souterraines.

IMAGERIE SISMIQUE

Imagerie utilisée dans le sous-sol, qui utilise l'écho d'ondes sonores réfléchies par les interfaces géologiques (différentes couches, failles).

PLAN DE TRAITEMENT

Ensemble des faisceaux de rayonnement nécessaires pour réaliser le traitement. Le plan décrit l'orientation et la géométrie des faisceaux ainsi que la dose délivrée par chacun d'eux.

POLYCHÈTES (POLYCHAETA)

Vers annelés comportant plus de 10 000 espèces, dont la plupart vivent en mer.

RÉPONSE ANGULAIRE DU SPECTROMÈTRE

Fonction qui réalise le passage entre l'activité d'un volume du sol et le flux de rayonnement enregistré.

TRANSPORT PAR DIFFUSION

Transport lié à une différence de concentration d'un élément chimique dans une solution : les éléments dissous migrent des zones les plus concentrées vers les zones les moins concentrées pour se répartir uniformément.

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
B.P.17 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

Site Internet
<http://www.irsn.fr>

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE