

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN

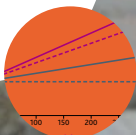
n° 13
Juillet - Septembre
2013

> Vers une meilleure prédiction des rejets d'iode en cas d'accident nucléaire

> Avancées

L'impact de l'erreur
de mesure sur
l'évaluation du risque

page 3



> Formation

L'effet de la RSI sur les
propriétés du béton des
enceintes de confinement

page 7



> Formation

Mécanismes d'action des
cellules souches adultes sur
l'inflammation radio-induite

page 10



ÉDITORIAL

© M. Delporte/IRSN



Préserver la construction de l'Europe de la recherche

À l'heure où les négociations politiques ont commencé sur la dotation du 8^{ème} Programme cadre (PC), baptisé du nom prometteur d'« Horizon 2020 », certains des derniers projets du 7^{ème} PC préfigurent des modes de fonctionnement toujours plus intégrés. L'IRSN participe à cinq de ces projets.

Impérieuse nécessité que celle d'améliorer l'efficacité des systèmes de recherche, compte tenu des réalités budgétaires. Dans ses arbitrages, la Commission européenne devra veiller à protéger les instruments qui poussent les laboratoires et les organismes dans un sens vertueux, à savoir le financement des plateformes thématiques de recherche. Celles-ci doivent mettre en mouvement les agendas stratégiques de recherche qu'elles ont élaborés au PC précédent.

Eu égard à son investissement dans les projets européens, la préoccupation de l'IRSN est double : d'un côté, s'assurer que le financement Euratom reste suffisamment fort pour jouer son rôle de moteur des progrès en sûreté et radioprotection ; de l'autre, éviter qu'une part trop importante du budget soit réservée au Centre commun de recherche de Petten et à la fusion. Il importe que la Commission et les États membres soient vigilants pour préserver la construction de l'Europe de la recherche dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

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 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, Jeanne Suhamy – Comité éditorial : Giovanni Bruna, Aleth Delatte, Jean-Michel Evrard, Dominique Franquard, Christine Goudedranche, Pascale Monti, Matthieu Schuler – Conception et réalisation : Aphania/Alfredo R. Fiale – 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'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.

Couverture : Vue de la zone de transfert en aval du four à haute température du banc expérimental Chip. © IRSN

SOMMAIRE

Édito

Par Matthieu Schuler

Avancées de la recherche

Page 3

L'impact de l'erreur de mesure sur l'évaluation du risque

FOCUS

Pages 4 à 6

Vers une meilleure prédiction des rejets d'iode en cas d'accident nucléaire



Formation par la recherche

Pages 7 à 10

L'effet de la RSI sur les propriétés du béton des enceintes de confinement

Le comportement de l'argilite face au CO₂

À l'interface du fer et de l'argilite

Mécanismes d'action des cellules souches adultes sur l'inflammation radio-induite

La vie de la recherche

Page 11

Neuf nouveaux projets européens impliquant l'IRSN

Résultats ANR Investissements d'avenir pour la sûreté et la radioprotection

Convention HAL

Soutenances, congrès

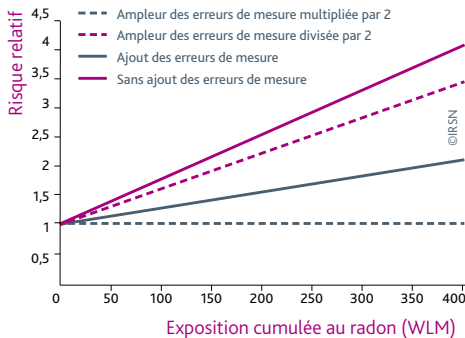
Glossaire^{GLO}

Page 12

L'IMPACT DE L'ERREUR DE MESURE SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE

De nombreuses difficultés méthodologiques doivent être surmontées pour évaluer chez l'homme les risques associés à des expositions chroniques aux faibles doses. En particulier, la qualité de l'estimation des expositions individuelles. La thèse de Rodrigue Allodji visait spécifiquement à prendre en compte les erreurs de mesure de l'exposition et à évaluer leur impact sur la quantification de la relation exposition-risque.

L'épidémiologie est l'un des outils utilisés pour quantifier les risques associés à de faibles doses de rayonnements ionisants chez l'homme. L'une des difficultés de cette approche est de disposer de données précises sur les doses auxquelles ont été exposées les personnes. En effet, les valeurs utilisées peuvent comporter des erreurs de mesure ou d'estimation qui influent sur la quantification de la relation entre la dose et l'effet. Afin d'améliorer cette évaluation, R. Allodji a mis en place durant sa thèse une méthode statistique pour évaluer l'impact des erreurs de mesure.



Exposition cumulée au radon (WLM)

Influence de l'ampleur des erreurs de mesure sur l'estimation du risque relatif de décès par cancer du poumon. Cette figure montre que la présence d'erreurs entraîne une sous-estimation de la relation exposition-risque, et que le biais est d'autant plus grand que l'ampleur de l'erreur est grande. Résultat obtenu grâce à l'étude de simulation.

Cette méthode a été appliquée aux données de l'étude épidémiologique que l'IRSN mène de longue date sur la cohorte des mineurs d'uranium français (5086 mineurs français, suivis pendant 30 ans entre 1946 et 1999), et plus précisément, sur l'estimation de la relation entre l'exposition au radon et le risque de décès par cancer du poumon.

[1000 cohortes simulées]

S'appuyant sur des archives et des interviews d'experts, R. Allodji a d'abord quantifié les erreurs sur la mesure de l'exposition au radon des mineurs. Avant 1970, leur ampleur pouvait dépasser 45 % des valeurs mesurées ; puis la précision de la mesure s'est améliorée au cours du temps puisqu'après 1982, leur ampleur n'était plus que de 10 %.

Puis, il a simulé des cohortes semblables à celle des mineurs d'uranium français. 1000 cohortes de 5086 mineurs ont été ainsi créées de façon statistique, avec des caractéristiques⁽¹⁾ notamment d'exposition, générées aléatoirement sur la base des distributions observées dans la cohorte réelle. R. Allodji a ensuite inséré dans la construction des cohortes simulées les erreurs de mesure estimées dans la première partie de son travail. Les résultats ont montré que, dans l'exemple étudié, la valeur moyenne de la relation dose-effet des cohortes simulées sans postuler d'erreurs de mesures est supérieure de près de 60 % à celle des cohortes simulées en prenant en compte ces erreurs. Négliger les erreurs peut donc conduire à sous-estimer la relation exposition-risque.

[Trois méthodes testées]

Enfin, R. Allodji a évalué l'efficacité de trois méthodes statistiques de correction recommandées dans la littérature. Elles rectifient partiellement le biais induit par les erreurs de mesure ; de plus, leurs performances sont tributaires de la bonne détermination de ces erreurs.

Ce travail montre que l'estimation par l'épidémiologie du risque sanitaire des faibles doses de rayonnement est très sensible aux erreurs de mesure, et plus largement à la qualité des données. Il souligne l'importance de connaître précisément l'exposition des individus concernés mais aussi de mettre au point une méthode de correction fiable pour mieux quantifier les risques.

Contact : Dominique Laurier - dominique.laurier@irsn.fr
(Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants - Lepid)

⁽¹⁾ Dates de naissance et d'emploi, début et durée de l'exposition au radon, exposition cumulée et nombre de décès par cancer du poumon.



Inserm et Université de Rouen, Institut Pasteur, Université Paris 5.

+++ Prise en compte des erreurs de mesure dans l'analyse du risque associé à l'exposition aux rayonnements ionisants dans une cohorte professionnelle : application à la cohorte française des mineurs d'uranium. Thèse soutenue par Rodrigue S. Allodji le 9 décembre 2011 à l'Université Paris Sud, École doctorale de Santé publique Paris 11 et Paris 5, option biostatistiques.

VERS UNE MEILLEURE PRÉDICTION DES REJETS D'IODE EN CAS D'ACCIDENT NUCLÉAIRE

Mieux prédire le déroulement d'un accident dans un réacteur nucléaire dans le but de pouvoir limiter sa progression et ses conséquences est un des objectifs importants de la recherche en sûreté menée par l'IRSN. Les rejets d'iode volatil dans l'environnement font l'objet d'une attention toute particulière car, en cas d'accident conduisant à une perte des barrières de confinement^{GLO}, ce produit de fission serait le contributeur majeur aux conséquences radiologiques à court terme.

L'iode est un élément très réactif et la prédiction de ses rejets nécessite de bien cerner son comportement en explicitant des processus physico-chimiques complexes. Trois thèses réalisées à l'IRSN ont permis des avancées significatives sur la compréhension de l'évolution des formes chimiques prises par l'iode lors de son transport dans le circuit primaire du réacteur.

Le principal événement initiateur interne d'accidents dans les réacteurs nucléaires à eau sous pression serait une brèche dans le circuit de refroidissement⁽¹⁾ (dit circuit primaire). Si le refroidissement du cœur du réacteur n'était pas rapidement restauré, l'échauffement des crayons de combustible conduirait à la dégradation de leurs gaines et au relâchement dans le circuit primaire des radionucléides issus de la fission. Ces derniers pourraient arriver dans l'enceinte de confinement et être rejetés dans l'environnement. Au-delà de la gestion de l'accident, la prédiction de la quantité et de la forme chimique de ces radionucléides est essentielle pour proposer des moyens d'atténuation (ou « mitigation ») des rejets et évaluer leur efficacité.

Les conséquences radiologiques à court terme d'un accident seraient très majoritairement liées à l'iode au travers de son isotope ¹³¹I et, en particulier, de ses formes gazeuses. D'où la question : quelle est la fraction d'iode gazeux susceptible de se former lors de son transport dans le circuit primaire ? Les résultats des 5 essais du programme Phébus PF (expériences de simulation d'accident à échelle réduite) ont montré une grande variabilité de la réponse à cette question. Celle-ci est due à la complexité des réactions entre l'iode et plusieurs autres éléments présents à des concentrations différentes : oxygène, hydrogène, césium, molybdène, bore, cadmium, etc., dans des zones de variations brutales de température (de 1600° C à proximité du cœur à 150° C à la brèche) du circuit primaire.

[Identifier les réactions réellement influentes]

Pour développer une modélisation prédictive du comportement de l'iode dans le circuit primaire en condition accidentelle, l'IRSN a levé plusieurs verrous technologiques. La forte réactivité de l'iode implique que de très nombreuses réactions chimiques sont possibles : il faut donc se focaliser sur les seules réactions réellement influentes. Cette réactivité rend aussi les expériences très complexes à réaliser et à exploiter pour caractériser directement chaque réaction. L'IRSN a adopté une démarche mixte, expérimentale et théorique. Le versant expérimental mobilise les bancs Gaec et Chip qui reproduisent les conditions subies dans le circuit primaire par l'iode et les composés interagissant avec l'iode. Le versant théorique utilise des approches de chimie théorique pour caractériser les constantes des réactions prépondérantes, ainsi que le logiciel de simulation des accidents graves Astec^{GLO} qui permet de déterminer les réactions sur lesquelles les efforts de modélisation doivent porter.

La modélisation du comportement de l'iode a été réalisée par étapes en complexifiant progressivement les systèmes chimiques considérés : {I,O,H}, puis {Cs, I, O, H} puis {Mo, Cs, I, O, H}, puis {B, Cs, I, O, H}. À chaque étape, ce développement s'est appuyé sur des essais à l'aide des bancs Gaec et Chip. Trois thèses soutenues récemment à l'IRSN ont fourni des données expérimentales précises sur la réactivité de ces systèmes chimiques essentielles à la démarche de modélisation. Elles ont également contribué à surmonter les difficultés

technologiques rencontrées dans la réalisation de ces expériences. Le premier défi a concerné la conception des systèmes qui permettent d'injecter les produits simulant le relâchement des radioéléments à partir du cœur. Le second défi a été de construire un tube avec un gradient thermique contrôlé qui représente le circuit primaire, du cœur à la brèche et où sont transportés les éléments. Enfin, développer et qualifier les dispositifs (filtres-membrane, filtre quartz et pièges liquides de type alcalin ou à deux phases) qui permettent de déterminer la spéciation chimique des différents composés produits (sous forme aérosol ou gazeuse) a représenté le défi le plus complexe à relever. Les expériences ont été réalisées dans le cadre du programme International Source Term Programme (ISTP) conduit par l'IRSN et du laboratoire commun de recherche Combustion, cinétique chimique et réactivité (C³R).

[Impact du césium]

La thèse de Yathis Délicat s'est focalisée sur l'étude des réactions à haute température de l'iode avec l'oxygène et l'hydrogène, d'abord à l'aide d'un brûleur à flamme plate. Puis des essais à une échelle supérieure ont été réalisés sur le banc expérimental Gaec. L'ensemble des résultats expérimentaux montre qu'en présence d'hydrogène seul l'iodure d'hydrogène gazeux (HI) se forme ; mais s'il y a aussi de la vapeur d'eau, l'iode moléculaire gazeux (I₂) apparaît en majorité. Ces essais ont été simulés avec le logiciel Astec, muni d'un modèle tenant compte de la cinétique des réactions, qui a été mis au point grâce à l'approche de chimie théorique. La thèse de Yathis Délicat a ainsi permis de montrer que le système {I, O, H} n'est pas à l'équilibre thermodynamique dans les conditions expérimentales étudiées, et de valider son modèle réactionnel.

Compte tenu de la quantité importante de césium qui serait relâchée par le cœur en cas d'accident, et de sa propension à former de l'iodure (CsI), le césium avait été clairement identifié comme un élément influant sur la chimie de l'iode. Les résultats expérimentaux sur le système {Cs, I, O, H} ont

confirmé qu'aucun composé iodé gazeux n'était produit. Le système a été complexifié en ajoutant d'autres radioéléments relâchés par le combustible, le molybdène et le bore. En effet ceux-ci peuvent réagir préférentiellement avec le césium limitant ainsi la formation d'iodure de césium et favorisant la formation d'iode gazeux. C'est à cette caractérisation expérimentale des systèmes complexes {Mo, Cs, I, O, H} et {B, Cs, I, O, H} que se sont consacrées les thèses de Marion Lacoue-Nègre (voir *Aktis* n° 6) et de Mélyan Gouëlle.

[Production de polymolybdates]

Les essais ont été réalisés sur le banc Gaec. De l'iode de césium a été injecté simultanément avec d'une part, de l'oxyde de molybdène et, d'autre part, de l'acide borique sous vapeur d'eau. En présence de molybdène, des analyses par microspectrométrie Raman ont permis

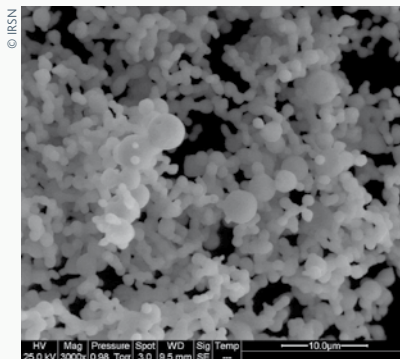


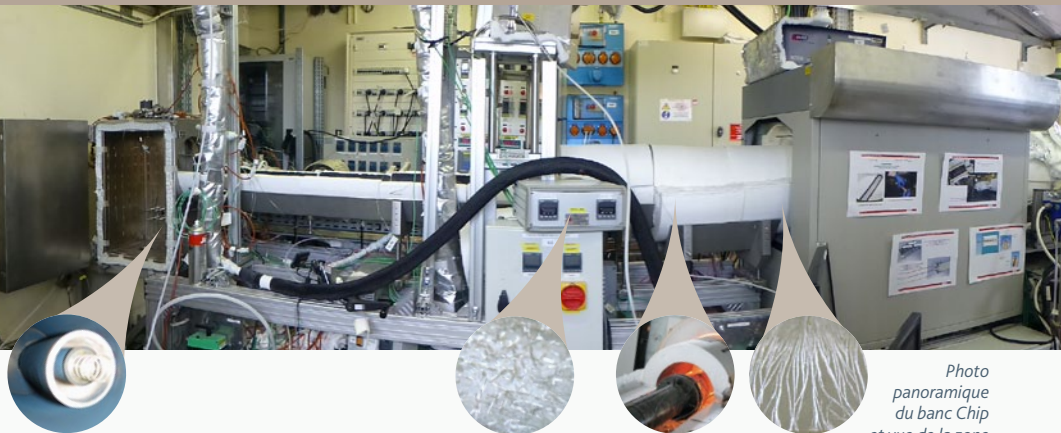
Image au microscope électronique des particules d'iodure de césium collectées sur un filtre de sortie à 150°C du banc Gaec (thèse de M. Gouëlle).

d'identifier des polymolybdates de césium. Ceux-ci résultent d'une réaction concurrente de celle qui forme de l'iodure de césium. Ils limitent ainsi la formation de ce dernier, et contribuent donc à augmenter la fraction d'iode gazeux à la brèche. Le modèle développé pour {Mo, Cs, I, O, H} à l'aide de ces résultats permet de simuler la production des polymolybdates de césium et la spéciation chimique de l'iode gazeux relâché (majoritairement de l'I₂).

Avec le bore (ratios molaires B/Cs de 15 à 90 et Cs/I de 1), les résultats expérimentaux sont moins tranchés. Ils semblent indiquer que le bore a un effet notable sur la fraction d'iode gazeux : la proportion d'iode gazeux détectée représente environ 30 à 40 % de l'iode injecté et s'avère être majoritairement de l'I₂.



Brûleur à flamme plate utilisé pour l'étude des réactions de l'iode avec l'oxygène et l'hydrogène (thèse de Y. Délicat).



Lamelles de quartz utilisées pour recueillir les polymolybdates de césium et d'oxyde de molybdène caractéristiques d'un essai avec le système {Mo, Cs, I, O, H} à gauche dans la zone moins chaude [$\sim 500^\circ\text{C}$], à droite la plus chaude [$\sim 750^\circ\text{C}$]. À l'extrême gauche, filtre de sortie tapissé des mêmes composés.

Photo panoramique du banc Chip et vue de la zone de transfert en aval du four à haute température.

[Sur le banc Chip]

Ces expériences sur les systèmes à 5 éléments ont ensuite été reproduites dans le banc Chip, plus représentatif des conditions en réacteur, car il permet d'injecter du césium et de l'iode avec des ratios molaires Cs/I de l'ordre de 2 à 4 plus proches des conditions accidentelles. L'essai avec le molybdène a confirmé ceux effectués sur le banc Gaec : environ 70 % de l'iode collecté se présente sous forme gazeuse.

L'essai réalisé avec le bore a abouti à une faible fraction d'iode moléculaire gazeux à 150°C , représentant environ 1 % de l'iode collecté. Ce résultat demande à être consolidé car, dans des conditions similaires, on a observé 30 à 40 % d'iode gazeux sur le banc Gaec.

Des travaux complémentaires expérimentaux et de modélisation sont actuellement en cours pour

mieux comprendre le rôle du bore sur la spéciation de l'iode. Ces compléments sont essentiels à l'interprétation finale d'un des essais Phébus PF (FPT3) où le bore était présent en forte quantité et où l'iode a été mesuré majoritairement sous forme gazeuse à la sortie du circuit primaire.

D'autres éléments – qui n'ont pas encore été pris en compte à ce jour comme l'argent, l'indium et le cadmium (issus des barres de contrôle AIC) et qui seraient présents dans le circuit primaire en cas d'accident – pourraient également influencer significativement sur la chimie de l'iode. L'étude expérimentale de leur impact est en cours. Elle permettra de finaliser le modèle de chimie de l'iode dans le circuit primaire du logiciel Astec. Ce modèle sera ensuite validé sur les données des essais Phébus-PF, clôturant ainsi une question de sûreté essentielle.

6

Contacts :

Anne-Cécile Grégoire - anne-cecile.gregoire@irsn.fr

Sandrine Morin - sandrine.morin@irsn.fr

(Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie - L2EC)

Laurent Cantrel - laurent.cantrel@irsn.fr

Frédéric Cousin - frederic.cousin@irsn.fr

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

⁽¹⁾ Le circuit primaire permet d'évacuer la puissance générée par les réacteurs nucléaires et la décroissance radioactive dans le cœur du réacteur contenant le combustible nucléaire.



Via le laboratoire Combustion, Cinétique Chimique et Réactivité (C³R), commun à l'IRSN, au CNRS et à l'Université de Lille 1 ; le laboratoire de spectrochimie IR et Raman, UMR-CNRS 8516 l'Université de Lille 1 ; le laboratoire de Science et ingénierie des matériaux et procédés, CNRS Saint Martin d'Hères.

+++ Étude de la réactivité de l'iode transporté dans un mélange $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ en conditions de combustion dans des flammes basse pression pré-mélangées. Thèse soutenue par Yathis Délicat, le 5 juin 2012 à l'université de Lille, École doctorale Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement, filière optique et lasers, physico-chimie, atmosphère.

+++ Chimie de l'iode et composition des aérosols dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave. Thèse soutenue par Melany Gouëlle le 6 novembre 2012 à l'Université de Grenoble, École doctorale I-MEP² (Ingénierie, matériaux, mécanique, énergétique, environnement, procédés, production).

+++ Xerri B. et al. « *Ab initio* calculations and iodine kinetic modeling in the reactor coolant system of a pressurized water reactor in case of severe nuclear accident », *Computational and Theoretical Chemistry*, 990 (2012) 194–208.

L'EFFET DE LA RSI SUR LES PROPRIÉTÉS DU BÉTON DES ENCEINTES DE CONFINEMENT

Troisième et dernière barrière de sûreté, l'enceinte de confinement en béton qui abrite un réacteur nucléaire doit présenter des qualités de résistance mécanique aux agressions (externes et internes), mais aussi d'étanchéité pour confiner la radioactivité. L'IRSN étudie les effets des « pathologies » du béton qui peuvent modifier ces performances, notamment la réaction sulfatique interne (RSI).

La réaction sulfatique interne (RSI) fait partie des « pathologies »^{GL0} du béton. Elle peut se développer dans les bétons préfabriqués traités thermiquement et dans les structures massives, telles les enceintes de confinement des centrales nucléaires. Elle provoque le gonflement⁽¹⁾ et la fissuration du béton. La RSI n'est pas à ce jour suffisamment caractérisée, en raison de la complexité des mécanismes qui la gouvernent.

La thèse menée par Mohamad Al Shamaa s'est focalisée sur l'impact des principaux facteurs intervenant dans le développement de la RSI (humidité, conditions thermiques, constitution du béton). Ses travaux ont permis de quantifier à l'échelle expérimentale l'influence de cette pathologie sur les performances de résistance et d'étanchéité du béton.

[Une perméabilité plus élevée]

Pour ce faire, des expériences ont été menées sur des « éprouvettes » de béton, qui ont été chauffées et conservées en atmosphère plus ou moins humide, voire dans l'eau. Sur des éprouvettes affectées par la RSI, une perte de 23 % de la résistance en compression a été constatée lorsque le gonflement caractéristique de la RSI évolue de 0,08 % à 0,20 %. Par ailleurs, la perméabilité au gaz du béton atteint de RSI apparaît significativement plus élevée que celle du béton initial (d'un facteur 20 pour un gonflement de 0,27 %). Cette augmentation résulte de la formation de microfissures qui sont susceptibles de former un réseau connecté, créant ainsi des chemins de fuite préférentiels dans le béton.

[Hygrométrie et RSI]

L'impact de l'hygrométrie du béton sur le développement de la RSI a aussi été étudié, et la relation entre l'humidité environnante et le gonflement a été caractérisée. L'étude montre notamment que les courbes d'évolution du gonflement sont quasiment identiques pour des éprouvettes immergées dans l'eau ou maintenues

à 100 % d'humidité. La RSI peut donc se déclencher sans immersion dans l'eau mais avec une humidité proche de la saturation. Cette situation correspond au cas de structures massives. En effet, l'eau présente dans le béton ne s'évacue que très lentement

(séchage) et la cinétique est d'autant plus lente que la masse de béton est importante.

Les résultats établissent clairement que le squelette granulaire du béton a une forte influence sur la cinétique et l'amplitude du gonflement.

L'enjeu est à présent d'étudier de quelle manière les résultats obtenus durant cette thèse peuvent être transposés à l'échelle des ouvrages réels. C'est un nouveau thème de recherche qu'il convient d'explorer pour permettre d'évaluer la tenue dans le temps des enceintes de confinement lors des réexamens de sûreté des réacteurs.

Contact : Georges Nahas - georges.nahas@irsn.fr
(Bureau d'expertise du génie civil - BEGC)

⁽¹⁾ Le gonflement qui accompagne la RSI est attribué à la formation de cristaux d'ettringite (hydrate de sulfate, de calcium et d'aluminium).



IFSTTAR, ENS Cachan.

+++ Étude du risque de développement d'une réaction sulfatique interne et de ses conséquences dans les bétons de structure des ouvrages nucléaires. Thèse soutenue par Mohamad Al Shamaa le 3 décembre 2012 à l'IRSN.

Éprouvettes
cylindriques
de béton
(diam. : 11 cm,
long. : 22 cm).
En haut,
béton sain.
En bas,
béton atteint
de RSI.



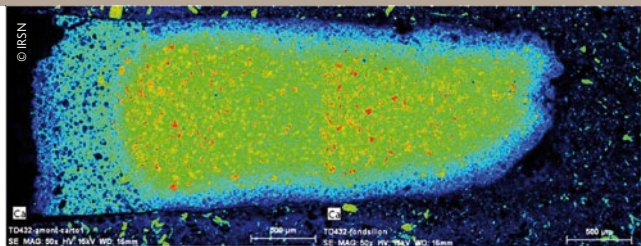
LE COMPORTEMENT DE L'ARGILITE FACE AU CO₂

Afin de renforcer sa capacité à évaluer la sûreté d'un stockage en profondeur de déchets radioactifs de haute activité, l'IRSN mène ses propres programmes de recherche sur l'argilite. Le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans le stockage étant susceptible de modifier les propriétés de l'argilite, l'institut a cofinancé une thèse sur ce sujet.

Des volumes limités de dioxyde de carbone seront emprisonnés dans un stockage de déchets radioactifs construits dans l'argilite, tel que le projet Cigéo de l'Andra qui fait actuellement l'objet d'un débat public. Or, le CO₂ en solution génère de l'acide carbonique qui peut dissoudre les minéraux carbonatés de cette roche, ce qui peut avoir un impact sur sa capacité de confinement. Pour comprendre ce phénomène, l'IRSN a cofinancé la thèse de Guillaume Berthe qui porte sur les propriétés de confinement de l'argilite utilisée pour le stockage des déchets mais également envisagée pour celui du CO₂⁽¹⁾. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Coliner de l'Agence nationale de la recherche, dont l'objectif était d'évaluer les capacités de l'argilite à assurer l'étanchéité des stockages de CO₂.

[Points de faiblesse]

G. Berthe a étudié trois faiblesses de l'argilite vis-à-vis de la réactivité au CO₂ : la composition minéralogique, l'existence de fissures naturelles remplies de calcite et la présence d'interfaces argilite/ciment (existant au niveau des puits d'injection de CO₂). Afin de tester ces différents facteurs, des argilites de différentes minéralogies (i.e. teneur en carbonate), recoupées ou non par une veine de calcite (minéral particulièrement sensible à l'acide carbonique) et en interface ou non avec une pâte de ciment, ont été sélectionnées. Les échantillons étudiés proviennent de la station expérimentale de Tournemire (Aveyron) de l'IRSN. Grâce à un montage expérimental original utilisant le principe de la « through diffusion »^{GL0}, la diffusion de différents éléments chimiques a été quantifiée avant et après que la roche a été mise en présence d'une solution d'acide carbonique, dans des conditions de pression et température représentatives du milieu argileux.



Cliché au microscope électronique à balayage du gradient de calcium obtenu sur un échantillon d'argilite de Tournemire coupée par un sillon rempli de pâte de ciment (forme de doigt) après mise en présence de l'acide carbonique. L'argilite n'a pas réagi, en revanche, le ciment montre une zone bleue pauvre en calcium.

[Mécanismes de fuite]

Les expériences ont montré que, quelle que soit la proportion de minéraux carbonatés de la roche, la diffusion des traceurs utilisés (chlorure et deutérium notamment) augmente lors d'une attaque à l'acide carbonique. Par ailleurs, la présence de fissures naturelles remplies de calcite engendre systématiquement des courts-circuits favorisant le passage de l'eau. Enfin, il s'avère que la dégradation des propriétés de confinement de l'argilite est compensée, à l'échelle de cette étude, par l'amélioration de celles du ciment induite par la précipitation de carbonates.

Ces résultats contribuent à caractériser les mécanismes de fuite à travers une roche-couverture de type argilite. De plus, ces données expérimentales améliorent la modélisation du transport d'éléments au sein des argilites.

Contact : Charles Wittebroodt- charles.wittebroodt@irsn.fr
(Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sols - Letis)

⁽¹⁾ L'une des solutions envisagées pour limiter l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est de capter le dioxyde de carbone rejeté par les industries les plus émettrices, et de le stocker en couche géologique profonde. Les zones de stockage envisagées sont des réservoirs naturels type gisements de gaz ou d'hydrocarbures en fin d'exploitation ou veines de charbon inexploitées. Pour éviter toute fuite de gaz vers les couches géologiques supérieures et la surface, la présence d'une roche-couverture (argile, sel...) assurant l'étanchéité est indispensable.



Lafarge, Total, CEA, FAST, CSIC,
Géoscience Montpellier.

+++ Évolution des propriétés de confinement des roches-couvertures type argilite soumises à des fluides enrichis en CO₂ : Impact des discontinuités naturelles et artificielles. Thèse soutenue par Guillaume Berthe le 20 décembre 2012 à l'Université d'Orsay.

À L'INTERFACE DU FER ET DE L'ARGILITE

Afin de pouvoir évaluer la sûreté d'une installation de stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité, l'IRSN mène ses propres recherches sur les caractéristiques de la roche hôte, en l'occurrence l'argilite. L'un des axes d'étude concerne l'évolution des propriétés de confinement de l'argilite lorsqu'elle est mise en contact avec d'autres matériaux, tels que l'acier des conteneurs.

Les caractéristiques de l'argilite et ses qualités de confinement peuvent être modifiées par tout élément étranger à la roche. C'est le cas en particulier de l'acier qui est le constituant principal des conteneurs de déchets, de leur sur-conteneur et du tubage des alvéoles qui vont les accueillir. De même, la résistance à long terme de l'acier

peut être altérée au contact de l'argilite. Dans le but de caractériser ces phénomènes, Anaïs Maillet a étudié durant sa thèse les interactions entre l'argilite et le fer métal dans la zone de contact entre ces deux matériaux.

[Interface acier/argilite]

Son travail a porté sur des disques d'acier au carbone placés en 2000 dans une zone saturée en eau, au cœur de l'argilite, sur le site expérimental de l'IRSN à Tournemire (Aveyron). Les prélèvements qu'elle a effectués aux interfaces acier/argilite en 2010 (d'autres avaient été faits en 2002 et 2006) montrent que l'acier au carbone est corrodé jusqu'à 0,2 mm de profondeur, entraînant la diffusion de fer dans l'environnement argileux. Ce panache perturbe l'argilite naturelle en moyenne sur quelques microns mais peut diffuser jusqu'à 5 mm. Les mécanismes chimiques identifiés

induisent des évolutions opposées dans les microstructures de l'acier et de l'argilite. Ainsi, l'acier a acquis jusqu'à 15 % de porosité dans sa zone de corrosion ; inversement l'argilite est partiellement colmatée par la précipitation d'oxyhydroxydes de fer.

[Zone enrichie en soufre]

Ces phénomènes dépendent fortement de la durée pendant laquelle il reste de l'oxygène disponible (période appelée transitoire oxydant). Pour déterminer cet élément clé, A. Maillet a réalisé des modélisations couplant la chimie et le transport des solutés au travers des pores de la roche, en utilisant les évolutions observées à 2, à 6 et à 10 ans dans l'acier et dans l'argilite. Elle a ainsi identifié que l'oxydation dure entre 4 et 6 ans, c'est-à-dire plus longtemps que prévu initialement.

Enfin, elle a également systématiquement constaté qu'après 10 ans d'interaction, la zone de corrosion de l'acier s'est enrichie en soufre, en lien avec la présence de bactéries (bactéries sulfato-réductrices). Leur présence peut expliquer l'épaisseur conséquente d'acier corrodé.

En termes de sûreté, les mécanismes réactifs susceptibles de se produire aux interfaces fer/argilite après fermeture des alvéoles de stockage ont ainsi été identifiés. Ces résultats complètent les bases de données utilisées pour les modélisations à long terme de l'évolution du stockage.

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



CNRS/Université de Poitiers,
CNRS/Université de Nantes, EDF.

+++ Interactions argilite de Tournemire/fer métal en contexte in situ : résultats à 10 ans de contact. Thèse soutenue par Anaïs Maillet le 12 décembre 2012 à l'Université de Poitiers ; École doctorale Gay Lussac, secteur de recherche « Terre solide et enveloppe superficielle ».



Échantillons d'argilite avec des disques d'acier au carbone (a) ; en (b), vue de l'interface inférieure qui montre une forte corrosion de l'acier ; en (c), échantillon d'argilite avec de l'acier réfractaire.

MÉCANISMES D'ACTION DES CELLULES SOUCHES ADULTES SUR L'INFLAMMATION RADIO-INDUITE

La radiothérapie, incontournable pour traiter les cancers de la zone pelvienne, est un compromis entre le contrôle de la tumeur et les dommages aux tissus sains situés dans le champ d'irradiation, qui peuvent entraîner des complications gastro-intestinales parfois très invalidantes. Les recherches de l'IRSN visent à comprendre la physiopathologie des lésions radio-induites afin de proposer des traitements mieux adaptés à la protection des tissus sains.

Dans la zone pelvienne, la radiothérapie entraîne la mort des cellules souches du côlon⁽¹⁾ et une inflammation du tissu. Pour 3 à 15 % des patients, des lésions chroniques fibrotiques apparaissent : inflammation, processus cicatriciel exagéré et réponse vasculaire anormale, pour lesquelles il n'existe pas de traitement efficace. Trouver de nouvelles thérapies nécessite de comprendre les liens entre les lésions induites par les rayonnements ionisants et l'inflammation.

[Panorama in vivo]

La thèse de Raphaëlle Bessout a d'abord établi un panorama *in vivo* de l'effet de l'irradiation sur les cellules et molécules de l'immunité. Des rats ont été irradiés au niveau de la zone colorectale à une dose de 27 Grays. Elle a montré que l'irradiation du côlon induit une réaction immunitaire forte avec une augmentation de la présence de cellules de l'immunité innée^{GLO} (globale et immédiate) et adaptative^{GLO} (cellules spécifiques-lymphocytes T) ainsi que l'augmentation de certaines molécules inflammatoires. L'analyse détaillée des cellules de l'immunité adaptative a montré que les lymphocytes T sont nombreux, avec un taux d'activation élevé en local (côlon) et global (sang et ganglions mésentériques).

À l'aide d'un marqueur spécifique, l'expression d'une enzyme du métabolisme des glucocorticoïdes-anti inflammatoires (HSD11 β 1) par les CSM est analysée par immunofluorescence. Des études d'inhibition *in vitro* ont démontré que les glucocorticoïdes sont impliqués dans l'immunosuppression des lymphocytes T par les CSM.

[Le rôle des lymphocytes T]

Afin de démontrer l'implication des lymphocytes T dans les lésions colorectales, ces cellules ont été artificiellement inhibées chez des rats irradiés. Pour ces animaux, la réparation naturelle des tissus s'est avérée meilleure que chez les animaux irradiés témoins. Ces résultats démontrent que les lymphocytes T participent au maintien des lésions radio-induites du côlon. Une thérapie qui les ciblerait améliorerait donc la guérison des lésions radio-induites.

R. Bessout a par ailleurs étudié l'effet d'une injection de cellules stromales mésenchymateuses (CSM) sur les lésions radio-induites du côlon. Les CSM sont en effet connues pour leurs facultés de cicatrisation des tissus et d'action anti-inflammatoire (voir *Aktis* n° 2 et 12). Elles ont déjà permis de traiter avec succès des brûlures radiologiques cutanées sévères. R. Bessout a observé que l'injection de CSM réduit significativement les lésions de la muqueuse du côlon. De plus, elle a noté que le traitement par CSM diminue le nombre et l'activation des lymphocytes T par rapport aux animaux irradiés non traités. Enfin, elle a mis en évidence pour la première fois un nouveau mécanisme de régulation : l'augmentation de la synthèse de corticostérone (molécule anti-inflammatoire) suite au traitement par CSM.

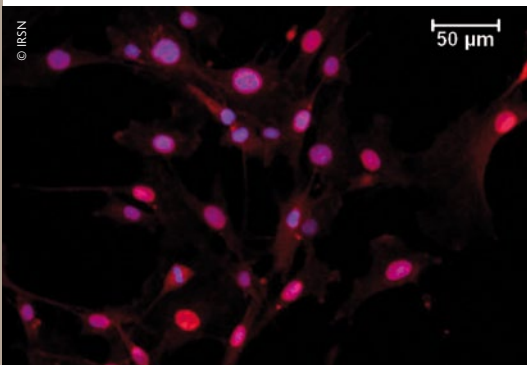
Cette thèse a ainsi permis de mieux cerner le mécanisme d'apparition des lésions colorectales radio-induites, tout en confirmant l'intérêt de la thérapie cellulaire par CSM.

Contact : Noëlle Mathieu - noelle.mathieu@irsn.fr
(Laboratoire de radiopathologie et de thérapies expérimentales - LRTE)

⁽¹⁾ Les cellules souches du côlon permettent le renouvellement de la muqueuse.

+++ Traitement des lésions colorectales radio-induites par injection de Cellules stromales mésenchymateuses (CSM) : Implication du processus inflammatoire, thèse soutenue par Raphaëlle Bessout le 26 novembre 2012. École doctorale physiologie et physiopathologie de l'Université Pierre et Marie Curie.

10

50 μ m

COLLABORATIONS

Neuf nouveaux projets européens

Neuf projets européens impliquant l'IRSN ont été retenus au dernier appel d'offres du 7^{ème} Programme cadre (PC). En pleine transition entre le 7^{ème} et le 8^{ème} PC, une majorité de ces projets visent un approfondissement de la coordination au sein des plateformes européennes : c'est le cas des projets Operra et Comet en radioprotection, en lien avec l'Alliance en radiécologie et Melodi ; c'est aussi le cas de Nugenia Plus, Esni-Plus, NC2i-R en sûreté nucléaire, en lien avec la plateforme SNE-T/P. Les autres projets (Eagle, Sarah2020, WinSR) vont contribuer au développement des travaux dans ce nouvel environnement européen. Le neuvième projet AsamPSA-E, piloté par l'IRSN, concerne l'harmonisation des méthodes d'études probabilistes de sûreté.

Résultats ANR Investissements d'avenir pour la sûreté et la radioprotection

14 projets impliquant l'IRSN, dont 7 pilotés par l'Institut, ont été retenus en mai 2013 suite à l'appel à projets du programme d'investissements d'avenir « nucléaire de demain ». Celui-ci a été lancé par l'État pour renforcer l'expertise et approfondir les recherches en sûreté nucléaire et en radioprotection suite à l'accident de Fukushima. Doté de 50 millions d'euros, cet appel à projets privilégiait le financement de projets collaboratifs, incluant des partenaires universitaires et industriels.

CONGRÈS

Water Rock Interaction

L'IRSN a participé à l'organisation du symposium Water Rock Interaction qui s'est déroulé à Avignon du 9 au 14 juin 2013. Les travaux ont porté sur les processus chimiques et physiques qui contrôlent la composition des systèmes eau-roche naturels et l'impact des intrusions anthropiques.

Neudos 12

Organisée par l'IRSN, en coopération avec l'AIEA et le réseau Neudos, la 12^{ème} édition du symposium Neudos s'est tenue à Aix-en-Provence du 3 au 7 juin 2013. Ce symposium rassemble tous les 3 à 4 ans les spécialistes de la dosimétrie des neutrons.



Intervention de Jacques Repussard, président de l'association Melodi et directeur général de l'IRSN au symposium « Benefits and Limitations of Nuclear Fission for a Low Carbon Economy », à Bruxelles les 26-27 février 2013.

Convention HAL



L'IRSN a signé le 2 avril 2013 la convention de partenariat soutenue par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche en faveur des archives ouvertes et de la plateforme mutualisée HAL (Hyper articles en ligne). Cette initiative vise à améliorer l'archivage et l'accès (en mode « open access ») aux publications scientifiques et aux thèses émanant d'établissements de recherche. 25 établissements publics ont signé cette convention.

(11)

SOUTENANCES

HDR

Deux habilitations à diriger des recherches ont été soutenues durant le deuxième trimestre 2013 : Olivier Simon le 9 avril 2013 sur le thème de l'*Intégration de l'étude de la biodistribution des polluants dans l'évaluation du risque écologique. Vers l'émergence d'une valeur seuil de bioaccumulation toxique.* Rodolphe Gilbin le 24 juin 2013 sur le thème : *Biodisponibilité des éléments traces métalliques et des radionucléides en milieu aquatique continental : Implications pour l'évaluation du risque écologique dans un contexte de multi-contamination.*

Thèse

Jean-Victor Lacavé-Lapalun a soutenu sa thèse de doctorat intitulée *Réponse immunitaire induite par l'irradiation colorectale : manipulation thérapeutique des « toll like receptors »* le 16 mai 2013 à l'école de médecine de l'hôpital St. Antoine à Paris.

ASTEC

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

BARRIÈRES DE CONFINEMENT

Les réacteurs nucléaires à eau sous pression français présentent trois barrières successives de confinement des radionucléides : la gaine des crayons de combustible, le circuit de refroidissement du réacteur, dit circuit primaire, et l'enceinte de confinement.

IMMUNITÉ INNÉE

Système de défense qui induit une réponse cellulaire rapide dirigée contre des antigènes communs à un large spectre de pathogènes.

IMMUNITÉ ADAPTATIVE

Réponse cellulaire spécifique pour un antigène donné. On distingue la réponse humorale assurée par les lymphocytes B (génération d'anticorps) et la réponse cytotoxique assurée par les lymphocytes T (destruction des cellules infectées).

PATHOLOGIE DU BÉTON

Par analogie au domaine médical, évolution liée soit au matériau, soit à des facteurs externes, qui dégrade les propriétés du béton.

THROUGH DIFFUSION

Le principe de la diffusion traversante, ou through-diffusion, repose sur la diffusion d'un traceur à travers une tranche d'échantillon poreux.

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