

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN



n° 8
Avril - Juin
2012



Mirte, pour étudier l'influence de certains matériaux sur le risque de criticité

> Applications

Oramed, pour mieux connaître l'exposition des yeux et des mains des personnels médicaux

page 3



> Collaborations

Trasse : la migration des radionucléides dans le sol et la roche

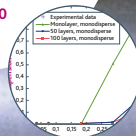
page 8



> Formation

Nouvelle modélisation de la remise en suspension de particules

page 10



ÉDITORIAL

Sur la « Trasse » du « Resoh »...

L'IRSN mène une recherche finalisée qui vise à améliorer la sûreté nucléaire et la radio-protection. Il en identifie les enjeux scientifiques, et ses laboratoires sont amenés à coopérer avec d'autres organismes scientifiques, pour répondre conjointement à certaines problématiques de recherche correspondantes.

Ces coopérations peuvent être définies ad-hoc dans le cadre de programmes concertés ou de consortia répondant à des appels à projets (ex. de Mirte ou d'Oramed), et elles peuvent aussi s'inscrire dans la durée, autour d'une collaboration plus durable. Le bilan du travail mené sur le GNR Trasse constitue une illustration du potentiel que recèlent de telles coopérations, au long cours et ouvertes sur la communauté scientifique académique.

C'est dans cette même optique de coopération structurelle que l'IRSN s'est tourné vers un autre outil de partenariat sous forme d'une chaire de recherche et d'enseignement supérieur, baptisée de l'acronyme prometteur de « Resoh » (pour Recherche en sûreté organisation hommes). L'Institut suit ainsi les recommandations de son comité d'orientation des recherches pour développer son action scientifique dans le domaine des facteurs organisationnels et humains. Il concrétise ainsi sa conviction que sa recherche sera d'autant plus efficace qu'elle s'enrichira d'autres approches scientifiques des risques, en France et à l'international.

Matthieu Schuler,

Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats



© IRSN

SOMMAIRE

Édito

Par Matthieu Schuler

Applications de la recherche

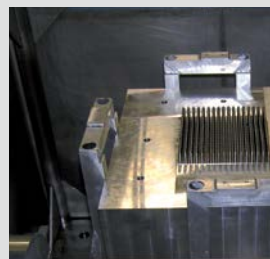
Pages 3 et 4

Oramed, pour mieux connaître l'exposition des yeux et des mains des personnels médicaux

FOCUS

Pages 5 à 7

Mirte, pour étudier l'influence de certains matériaux sur le risque de criticité



Collaborations

Pages 8 et 9

Trasse : la migration des radionucléides dans le sol et la roche

Formation par la recherche

Page 10

Nouvelle modélisation de la remise en suspension de particules

La vie de la recherche

Page 11

Glossaire^{GLO}

Page 11

Couverture : Dispositif du programme Mirte pour les expériences où le matériau est positionné autour des crayons d' ^{235}U pour réfléchir les neutrons. Le réseau de crayons est cloisonné sur ses quatre faces par des écrans d'aluminium ou de verre (SiO_2).

Crédit : © IRSN/CEA

2

Aktis est la lettre d'information scientifique de l'IRSN. Elle présente les principaux résultats de recherches menées par l'Institut dans les domaines de la radioprotection, de la sûreté et de la sécurité nucléaires. Trimestrielle et gratuite, elle existe aussi en version électronique sur abonnement.

Aktis est une publication trimestrielle de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Éditeur IRSN – standard : +33 (0)1 58 35 88 88 – www.irsn.fr – Directeur de la publication : Jacques Repusard – Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler – Rédactrice en chef : Sandrine Marano Comité de lecture : Michel Schwarz, Sylvie Supervil – Comité éditorial : Jean-Luc Chambon, Aleth Delattre, Alain Dubouchet, Dominique Franquard, Jean-Michel Frison, Christine Gouedranche, Pascale Monti, Michel Schwarz, Sylvie Supervil – Rédaction : Isabelle Bellin/Technoscope – Conception et réalisation : Aphanis/Alfredo R. Fiale – Impression : Idéale Prod, 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.

ORAMED, POUR MIEUX CONNAÎTRE L'EXPOSITION DES YEUX ET DES MAINS DES PERSONNELS MÉDICAUX

L'IRSN a participé au projet collaboratif européen Oramed (2008-2011).
Résultat : des recommandations pour optimiser l'exposition des personnels médicaux aux rayonnements ionisants lors des actes de radiologie et de cardiologie interventionnelles et de médecine nucléaire.

L'imagerie médicale, les interventions peu invasives ou certaines thérapies reposent de plus en plus sur l'utilisation de rayonnements ionisants (rayons X, gamma ou bêta). Or les doses de rayonnement reçues par les personnels médicaux dans ces spécialités peuvent être élevées pour les parties du corps difficiles à protéger. Ainsi, ces dernières années, des cas de cataracte radio-induite ont été identifiés chez des cardiologues interventionnels.

Des données manquent cependant pour évaluer les doses de rayonnements ionisants reçues et comprendre les facteurs influençant l'exposition. C'est pourquoi le projet collaboratif Oramed du 7^{ème} Programme cadre de recherche et développement européen (PCRD), rassemblant 9 pays, a lancé une étude d'envergure pour collecter des données expérimentales fiables et comparables en Europe à partir d'une méthode commune et robuste. Leur analyse, associée à des calculs par simulations, a permis d'établir des recommandations à l'usage des professionnels.

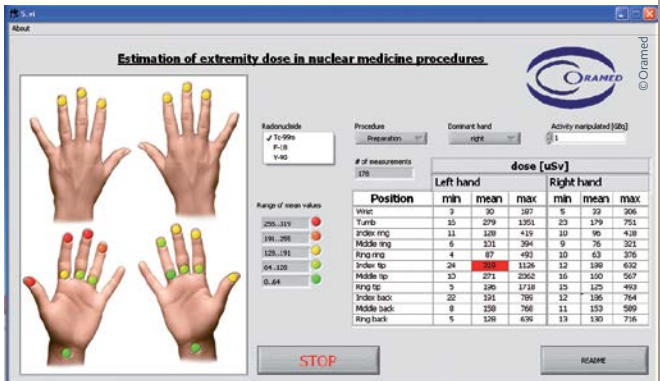
Ce travail a été complété par des études portant sur les dosimètres individuels utilisés pour le suivi du personnel.

[Les yeux, un organe particulièrement exposé en radiologie interventionnelle]

En radiologie et cardiologie interventionnelles, les opérateurs s'aident des images créées à partir de rayons X pour accéder à des parties du corps sans avoir recours à la chirurgie. Si une grande partie de leur propre corps est sous protection, les mains et les yeux sont particulièrement exposés, car les mains sont difficiles à protéger et les lunettes de protection rarement utilisées. Dans un premier temps, des données dosimétriques ont été recueillies dans plus de 40 hôpitaux de 6 pays européens : 1329 mesures ont été obtenues au moyen de 8 dosimètres portés au niveau des yeux, des jambes, des poignets et des doigts. L'analyse de ces données a notamment montré

que les plus fortes doses sont reçues par les doigts (dans 28 % des cas), le poignet (24 %) et les yeux (12 %), du côté gauche de l'opérateur, en général plus proche de la zone irradiée.

L'influence sur les doses reçues des paramètres liés aux types d'intervention (position de l'opérateur, de l'écran, etc.) a été étudiée en simulant l'exposition de l'opérateur pendant l'acte médical avec un modèle numérique anthropomorphe



Outil d'estimation de la dose aux mains reçue par le personnel de médecine nucléaire et développé durant le projet Oramed.

et le code Monte Carlo MCNPX qui simule le transport des particules dans la matière. Ces simulations ont notamment montré la grande sensibilité des doses à l'égard de l'orientation du tube émetteur de rayons X dans l'appareil utilisé. L'ensemble des résultats a permis de formuler des recommandations sur les précautions à prendre pour limiter l'exposition des opérateurs.

[La médecine nucléaire : les doigts fortement exposés]

De façon similaire, la répartition de l'exposition aux doigts et poignets (11 dosimètres par main) de 124 opérateurs de médecine nucléaire a été mesurée. Les résultats obtenus montrent que les doses reçues sont plus importantes pour l'étape de préparation du radiopharmaceutique que pour

celle de l'injection. Pour les radionucléides étu-
diés (^{99m}Tc , ^{18}F , ^{90}Y), l'index de la main non do-
minante reçoit la dose maximum (dans 25 à plus
de 60 % des cas), suivi par le pouce de la même
main (10 à 20 %). L'estimation des doses
annuelles reçues, faite pour les procédures dia-
gnostiques (^{99m}Tc et ^{18}F), a montré qu'elles
dépassent la limite annelle réglementaire
de 500 mSv pour environ 20 % des travail-
leurs (plus de la moitié sont au-dessus
de 150 mSv), le maximum atteignant
2,2 Sv.

L'impact sur les doses reçues du
type de protection utilisée et de
l'expérience de l'opérateur dans
l'acte pratiqué a été analysé par
des tests statistiques et des
simulations Monte Carlo. Il en
ressort qu'un meilleur
usage des écrans de protec-
tion et de tout instrument
permettant d'éloigner les
doigts de la source de rayonnements
(pincettes, injecteur automatique) pen-
dant la préparation peut réduire d'un
facteur 2 ou 3 les doses reçues.

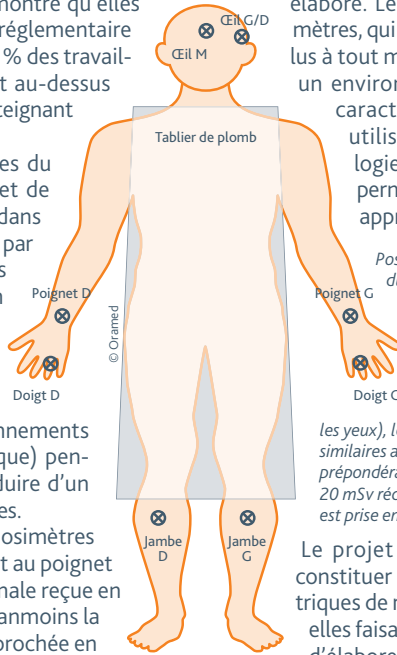
Il a aussi été vérifié que les dosimètres
habituels portés aux doigts et au poignet
sous-estiment la dose maximale reçue en
raison de leurs positions. Néanmoins la
dose maximale peut être approchée en
multipliant par 6 la dose enregistrée par
une bague située à la base de l'index de la main
non-dominante et orientée du côté de la paume.
Un outil informatique complémentaire, permet-
tant d'estimer la dose reçue sur les doigts selon
les procédures diagnostiques pratiquées, a été
développé dans le cadre de ce projet et intégré
à l'ensemble des recommandations sur les
bonnes pratiques en médecine nucléaire.

**[Améliorer les dosimètres pour assurer
un bon suivi]**

Le projet a également permis la conception d'un
nouveau système dosimétrique (dosimètre ther-
moluminescent, écrans et support à l'œil) adapté

au cristallin, notamment par le développement
d'un modèle plus réaliste de la tête et d'une pro-
cédure d'étalonnage adéquate.

Enfin, un guide pratique, présentant les résultats
de l'évaluation de 8 modèles de dosimètres élec-
troniques (dits actifs) utilisés en Europe, a été
élaboré. Le comportement de ces dosi-
mètres, qui ont l'avantage de pouvoir être
lus à tout moment, était mal connu dans
un environnement de champs pulsés,
caractéristiques des technologies
utilisées en radiologie et cardio-
logie interventionnelles. Le guide
permet de les utiliser de façon plus
appropriée.



*Positionnement des 8 dosimètres portés
durant la campagne de mesures par les
opérateurs de radiologie et
cardiologie interventionnelles.
Si l'on compare les doses estimées
aux limites réglementaires
actuelles (500 mSv pour les mains,
poignets et jambes, 150 mSv pour
les yeux), les yeux sont exposés à des niveaux
similaires aux autres organes. Mais ils deviennent
prépondérants si la nouvelle limite annuelle de
20 mSv récemment recommandée par la CIPR
est prise en compte.*

Le projet Oramed a ainsi permis de
constituer une base de données dosimé-
triques de référence dans un domaine où
elles faisaient défaut jusqu'à présent, et
d'élaborer des recommandations et du
matériel de formation directement uti-
lisables par les professionnels. Les résultats de
cette étude pourront servir de base de travail aux
réflexions menées dans le cadre du réseau d'ex-
cellence européen sur les faibles doses Doremi,
et plus particulièrement pour la prévention des
cataractes radio-induites.

Contacts : Isabelle Clairand - isabelle.clairand@irsn.fr
(Laboratoire de dosimétrie
des rayonnements ionisants - LDRI)



SCK-CEN (Belgique) ; GAEC (Grèce) ; ENEA (Italie) ;
Centre hospitalier universitaire du Vaudois (Suisse) ;
Universitat Politècnica de Catalunya (Espagne) ; Laboratoire
national Henri Becquerel du CEA (France) ; Slovak Medical
University (Slovaquie) ; NIOM (Pologne) ; BfS (Allemagne) ;
RADCARD (Pologne) ; MGP Instruments.

+++ Publication : Ginjauve M., Vanhavere F.,
Carinou E., Gualdrini G., Clairand I. and Sans-
Merce M., Actes du colloque « International
Workshop on Optimization of Radiation
Protection of Medical Staff, ORAMED 2011 »,
Radiation Measurements, novembre 2011,
Volume 46, n° 11, pp. 1195-1334.



*Positionnement des 22 dosimètres portés
durant la campagne de mesures
par les opérateurs
de médecine nucléaire*

MIRTE, POUR ÉTUDIER L'INFLUENCE DE CERTAINS MATÉRIAUX SUR LE RISQUE DE CRITICITÉ

Mirte, un programme expérimental international de l'IRSN associant le DOE américain et Areva, lancé en 2005, a étudié et quantifié l'influence de certains matériaux placés autour ou entre des éléments de matière fissile, à l'égard du risque de criticité. Les données recueillies ont permis d'évaluer la précision avec laquelle certains logiciels de calcul tiennent compte de ces matériaux dans le calcul de ce risque, et de définir les corrections à apporter.

L'accident de criticité est l'emballement des réactions neutroniques en chaîne dans une installation nucléaire. C'est l'un des risques majeurs à évaluer pour la sûreté nucléaire des installations qui fabriquent ou traitent du combustible nucléaire, ou pour la sûreté nucléaire des transports de matières radioactives. Son déclenchement dépend notamment de la masse de matière fissile présente, de la configuration géométrique dans laquelle elle se trouve, de la présence de produits hydrogénés⁽¹⁾ et de celle des matériaux de structure de l'installation. Le programme expérimental Mirte (Matériaux interaction réflexion toute épaisseur) étudie depuis 2005 l'influence sur le risque de criticité de certains matériaux disposés autour ou entre des éléments de matière fissile.

Le risque de criticité est évalué à l'aide de logiciels qui estiment le coefficient de multiplication effectif des neutrons (k_{eff}), c'est-à-dire le rapport du nombre de neutrons produits sur le nombre de neutrons perdus (par fuite et/ou absorption) au sein du système. La criticité est atteinte lorsque ce coefficient est égal à 1. Ce calcul repose à la fois sur des modèles de propagation et d'interaction des neutrons avec la matière, et sur les données nucléaires qui définissent les probabilités d'interaction des neutrons avec celle-ci. Des schémas de calcul sont conçus pour simplifier les calculs et permettre d'obtenir rapidement des résultats avec une marge de sûreté suffisante. Ils induisent des approximations dont l'effet sur les résultats – désigné par le terme « biais » – doit être connu et pris en compte.

[Qualifier les logiciels de calcul]

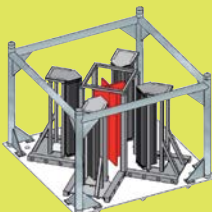
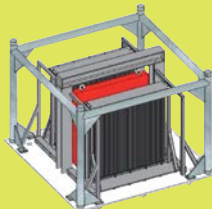
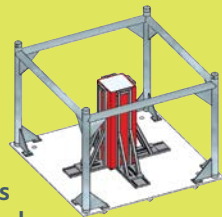
La puissance croissante des moyens informatiques donne aujourd'hui la possibilité d'utiliser des modèles plus complexes et donc plus précis ; ceci permet de décrire les matériaux de structure présents entre les éléments de matière fissile ou

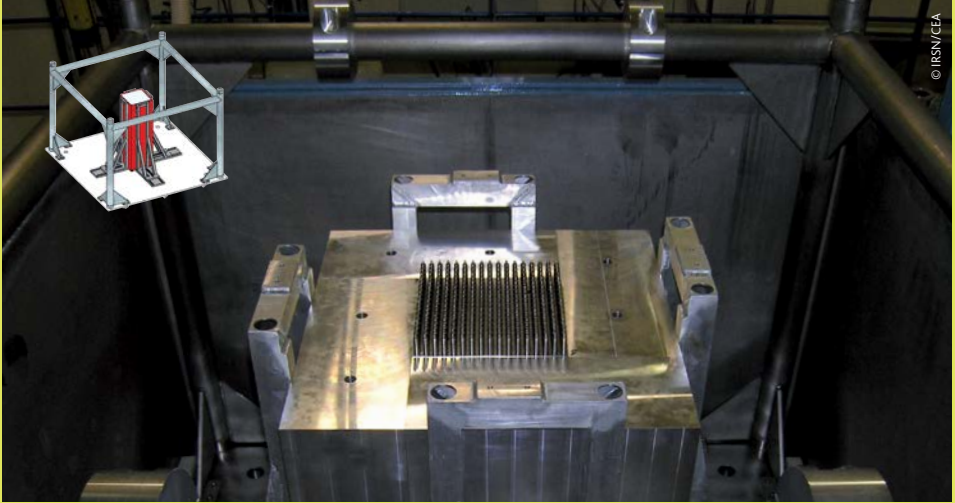
autour d'eux. Or, l'IRSN a pour mission d'évaluer les dossiers de sûreté que fournissent les détenteurs d'installations nucléaires, et, dans le cas du risque de criticité, d'évaluer les marges de sûreté. L'Institut doit donc connaître avec quel degré de fiabilité les matériaux sont pris en compte dans les calculs effectués à l'aide des logiciels d'évaluation de la criticité, et quantifier les écarts entre les simulations numériques et la réalité, afin de s'assurer que les marges sont suffisantes.

L'IRSN a ainsi lancé le programme Mirte pour confronter les résultats issus des logiciels de calcul associés à des bibliothèques de données nucléaires à ceux des expériences de criticité. Le principe des essais consistait à placer des assemblages de crayons combustibles et divers matériaux en situation de sous-criticité dans un dispositif dédié : l'appareillage B du CEA Valduc. Puis l'état critique était approché en faisant varier le niveau de l'eau dans laquelle baignent les crayons de combustible du dispositif expérimental, ce qui accroît l'efficacité de la réaction de fission, tout en restant légèrement sous-critique. Le niveau d'eau critique était ensuite déduit par extrapolation. Les essais ont ensuite été reproduits à l'aide de logiciels de calcul. La comparaison entre les valeurs calculées et extrapolées du k_{eff} a permis de déterminer si le risque de criticité était surestimé ou sous-estimé par les logiciels, les écarts ont été analysés afin d'en identifier les causes.

[43 expériences en moins de deux ans]

Les chercheurs ont réalisé 19 expériences de trois types différents entre fin 2008 et mi-2010 (voir les schémas). Pour chaque configuration, une expérience de référence sans matériau a aussi été menée (soit au total 10 expériences). Enfin,

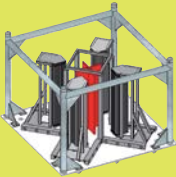




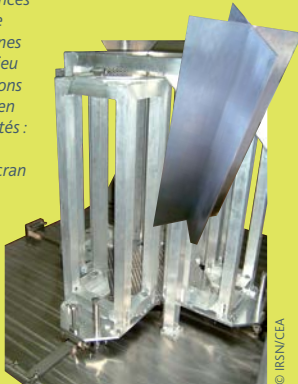
© IRSN/CEA

Dispositif des expériences où le matériau est positionné autour des crayons d' UO_2 pour réfléchir les neutrons. Le réseau de crayons est cloisonné sur ses quatre faces par des écrans d'aluminium ou de verre (SiO_2).

6

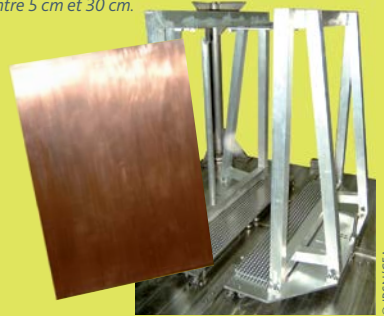
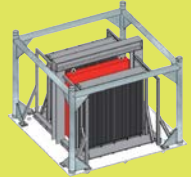


Dispositif pour les expériences avec un matériau de faible épaisseur sous forme de fines plaques positionné au milieu de quatre réseaux de crayons d' UO_2 avec lesquels il est en interaction. Matériaux testés : cuivre, nickel, fer et titane pour des épaisseurs de l'écran inférieures à 2 cm.



© IRSN/CEA

Dispositif des expériences où un matériau de forte épaisseur est positionné sous forme d'écran entre deux réseaux de crayons d' UO_2 avec lesquels il est en interaction. Matériaux testés : fer, nickel, zirconium, aluminium, plomb, cuivre ou béton pour différentes teneurs en eau (3 %, 6 %, 9 %) et pour des épaisseurs de l'écran variant entre 5 cm et 30 cm.



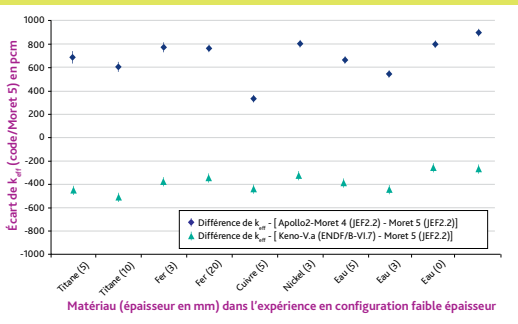
© IRSN/CEA

une partie des expériences avec matériau a été reproduite une ou plusieurs fois (14 expériences). Les matériaux ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques géométriques, neutroniques et chimiques, et de l'absence d'expériences de

criticité identifiées dans la littérature les mettant en œuvre. Neuf matériaux ont été testés sous forme d'écrans de différentes épaisseurs : l'aluminium, le cuivre, le fer, le zircaloy 4 (alliage qui constitue la gaine des crayons de combustible nucléaire), le nickel, le plomb, le titane, le verre et le béton. Un soin extrême a été apporté au dispositif et aux conditions d'expérience (fabrication du dispositif, caractérisation dimensionnelle, caractérisation des matériaux et des crayons), afin d'obtenir une incertitude globale sur les données expérimentales inférieure à 0,2 %.

[Approximation multigroupe et données nucléaires]

Cinq logiciels de calcul du k_{eff} associés à trois bibliothèques de données ont été confrontés aux expériences : deux logiciels (le français Apollo-2-Moret-4 développé par le CEA et l'IRSN, utilisé par les industriels, et l'américain Keno-V.a) qui ont des temps de calcul courts car ils utilisent des valeurs moyennes⁽²⁾ des données nucléaires contenues dans les bibliothèques (approximation multigroupe) ; et trois logiciels (les français Moret-5, Tripoli-4 et l'américain MCNPX-2.6) qui utilisent des valeurs non moyennées.



Valeurs des biais induits par le schéma de calcul utilisé dans les logiciels Apollo-2-Moret-4 et Keno-V.a, pour les configurations d'expérience mettant en œuvre les écrans de faible épaisseur de matériau (titane, fer, cuivre, nickel et eau)

Pour les logiciels qui utilisent l'approximation multigroupe, la comparaison avec les résultats des expériences avec et sans matériaux montre qu'ils évaluent parfois assez mal l'effet du matériau et surestiment le risque de criticité. Ces biais de calcul importants ont été quantifiés, notamment pour l'aluminium, le fer et le titane (figure ci-dessus). En revanche, cette tendance à la surestimation n'est pas observée pour les logiciels qui n'utilisent pas l'approximation multigroupe ; le k_{eff} calculé est donc très proche de celui de l'expérience. Pour évaluer l'influence des différentes bibliothèques de données nucléaires utilisées, les chercheurs ont ensuite comparé les valeurs expérimentales du k_{eff} avec celles obtenues avec

Pour deux expériences avec l'aluminium positionné en écran de réflexion et avec le verre : différence entre le k_{eff} calculé avec la bibliothèque JEF3.1 et celui calculé avec la bibliothèque ENDF/B-VI.7 (en rose) ; et différence entre le k_{eff} calculé avec la bibliothèque JEF2.2 et celui calculé avec la bibliothèque ENDF/B-VI.7 (en bleu). L'effet des données nucléaires est important pour l'aluminium et inexistant pour le verre.

un logiciel de calcul sans approximation et pour différentes bibliothèques. Pour le titane par exemple, le passage d'une bibliothèque à l'autre a montré que ses données nucléaires n'influencent pas, de façon significative, la valeur du k_{eff} . Ce n'est pas le cas pour le plomb, le zirconium, le silicium ou l'aluminium : les k_{eff} calculés ont montré des écarts significatifs selon la bibliothèque utilisée (figure ci-dessous).

Ces résultats contribueront à faire évoluer les données nucléaires pour ces matériaux, dans les bibliothèques gérées et mises à jour par des consortia internationaux (OCDE).

L'acquisition de connaissances se poursuit avec un second programme, Mirte-2, qui a déjà démarré et étudie l'effet d'autres matériaux, tout d'abord dans les mêmes configurations. Par la suite, un autre dispositif expérimental (un bloc en aluminium contenant une partie des crayons combustibles entourés de sur-gaines avec le matériau à tester) sera mis en œuvre, afin d'explorer un domaine énergétique où les neutrons sont moins ralentis.

Contact : Nicolas Leclaire - nicolas.leclaire@irsn.fr
(Laboratoire de recherche et de développement en neutronique du cycle - LNC)

⁽¹⁾ En entrant en collision avec l'hydrogène des matériaux hydrogénés, les neutrons perdent de l'énergie, on dit qu'ils sont ralentis ou « modérés », ce qui rend la probabilité de fission de l'uranium 235 plus grande.

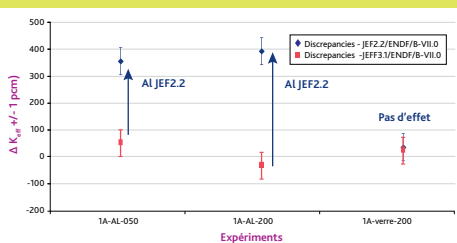
⁽²⁾ L'approximation de calcul multigroupe découpe la plage de variation de l'énergie des neutrons en plusieurs intervalles. Pour chacun de ces intervalles, on calcule la moyenne des données nucléaires correspondantes existant dans la bibliothèque, et c'est cette moyenne qui est utilisée comme donnée nucléaire dans le calcul.



CEA, Aрева, Andra, DOE.

+++ Publication : Leclaire N., Duhamel I., Le Dauphin F.X., Piot J., Villetard de Laguerie I., Lespinasse F., Briggs J. B. MIRTE : An experimental program designed to test the reactivity worth of several structural materials, congress ICNC 2011, 19-22 septembre 2011.

+++ Publication : MIRTE program - Four 4.738-WT.-%-enriched uranium dioxide fuel rod arrays in water separated by a cross-shaped screen of titanium (5mm and 10 mm thick), rapport NEA/NSC/DOC/(95)03/IV - Volume IV - septembre 2011.



Déchets radioactifs

TRASSE : LA MIGRATION DES RADIONUCLÉIDES DANS LE SOL ET LA ROCHE

Le numéro spécial d'*Applied Geochemistry* qui va paraître en juin est en grande partie consacré aux résultats du Groupement national de recherche (GNR) Trasse, créé pour étudier les transferts de radionucléides dans les sols, les sous-sols et vers les écosystèmes. Ces résultats pourront à terme être utilisés, tant pour évaluer les risques liés au stockage profond des déchets radioactifs, que pour mieux appréhender les conséquences sur l'environnement d'un accident nucléaire majeur.

Le GNR Trasse, créé en 2008 par le CNRS et l'IRSN dans le cadre du programme Pacen⁽¹⁾, avait pour objectif d'approfondir la compréhension et de modéliser la migration des radionucléides dans les sols, et plus généralement dans l'environnement, en faisant appel à la communauté scientifique ouverte sur le monde académique. Ce GNR a bénéficié des investigations menées sur deux sites expérimentaux exploités par l'IRSN : l'un à Tchernobyl, dans la zone d'exclusion autour de la centrale accidentée, l'autre en Aveyron, dans l'ancien tunnel ferroviaire de Tournemire creusé dans une roche (argilite) comparable à celle retenue par l'Andra, à l'Est de la France, pour étudier la possibilité de stocker les déchets nucléaires de haute activité et à vie longue.

[Modèles de transport des radionucléides]

À Tchernobyl, la plateforme expérimentale déployée par l'IRSN depuis 1999 a permis de suivre la migration de certains radionucléides, depuis une tranchée où sont enterrés des déchets radioactifs générés par l'accident (débris de combustible, déchets de la centrale, arbres contaminés). Les résultats obtenus servent notamment à nourrir des modèles prédictifs dont l'objectif est de déterminer l'évolution de la concentration des radionucléides relâchés dans les sols et les aquifères. Dans le cadre de Trasse, les chercheurs ont mis en évidence que la migration des radionucléides vers l'aquifère (en particulier le césium 137 ou ¹³⁷Cs et le strontium 90 ou ⁹⁰Sr⁽²⁾) était gouvernée par la dissolution progressive des particules de combustible dans la tranchée suivie par leur transport via l'infiltration des eaux de pluie et les variations du niveau de la nappe. Des modèles de transport des radionucléides relâchés ont été élaborés sur la base des connaissances ainsi acquises. Les simulations effectuées indiquent que le retour dans l'aquifère du ⁹⁰Sr à une concentration équivalente

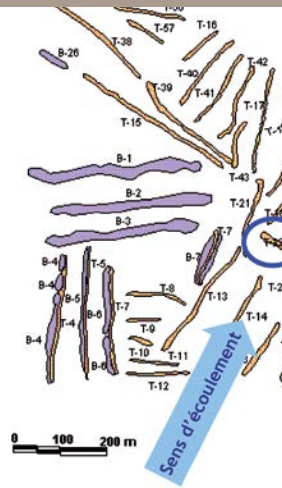
à celle d'une eau potable – le ⁹⁰Sr étant le plus mobile des deux radionucléides – ne pourra être atteint avant 200 ans.

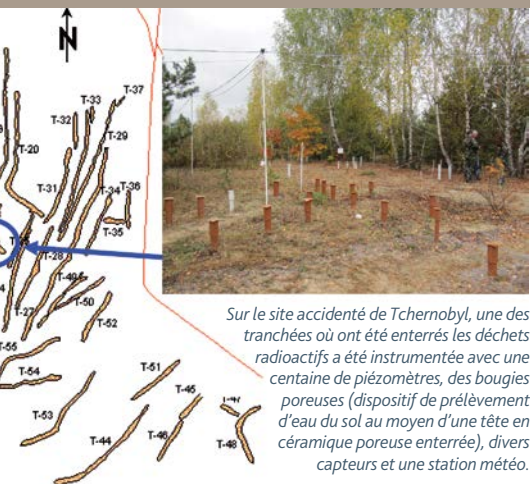
[Absorption par les racines]

Les recherches ont également montré que la concentration du ⁹⁰Sr dans l'aquifère était significativement influencée par son absorption par les racines des plantes, puis son cycle de retour au sol via la dégradation des feuilles et des épinés après leur chute (voir *Aktis* n° 2). Les modèles de transport ont été modifiés en conséquence. Les études réalisées sur la plateforme de Tchernobyl ont aussi abordé la question des effets possibles de la radioactivité sur la biosphère. Elles ont montré en particulier que les communautés bactériennes se sont adaptées à la contamination du substrat sans toutefois développer de résistance spécifique.

[Composition chimique des eaux porales]

S'agissant des transferts dans les milieux géologiques profonds, la station de Tournemire, exploitée par l'IRSN depuis le début des années 90, fournit aux chercheurs un site expérimental en vraie grandeur pour étudier les propriétés des roches argileuses en tant que milieu d'accueil possible pour le stockage de déchets radioactifs. Dans le cadre de Trasse, les chercheurs ont travaillé sur la modélisation des transferts de radionucléides qui pourraient être relâchés par les colis de déchets dans la roche hôte. À cet égard, la composition chimique des eaux porales^{GLO} de la roche a été reconstituée à l'aide d'un modèle géochimique établi à partir de mesures sur des échantillons de roche, la très faible perméabilité de l'argilite excluant le prélèvement direct de l'eau contenue dans la porosité. Ces résultats ont permis





Sur le site accidenté de Tchernobyl, une des tranchées où ont été enterrés les déchets radioactifs a été instrumentée avec une centaine de piézomètres, des bougies poreuses (dispositif de prélèvement d'eau du sol au moyen d'une tête en céramique poreuse enterrée), divers capteurs et une station météo.

aux chercheurs d'évaluer l'efficacité de l'osmose chimique, un des mécanismes du transport des radionucléides au sein des argilites (voir *Aktis* n° 4).

[Les bactéries dans les argilites]

Par ailleurs, des travaux ont été menés afin d'identifier les bactéries susceptibles de se développer dans les argilites. En effet, certaines espèces pourraient altérer les matériaux utilisés pour la construction du stockage. Dans le cadre de ces travaux, des bactéries anaérobies^{GL0} ont été mises en évidence, y compris dans la roche non perturbée, milieu a priori très défavorable au développement microbien. En particulier, des bactéries sulfato-réductrices^{GL0} ont été observées dans une zone fracturée humide. Leur étude au contact direct d'échantillons métalliques est en cours, afin d'identifier leur capacité à corroder localement des métaux susceptibles d'être utilisés dans un stockage.

Une autre étude a montré que l'interaction entre l'argilite et le béton, source de fluides basiques, pourrait initier des transformations minéralogiques et modifier ainsi les conditions de migration pour les radionucléides en champ proche (quelques dizaines de centimètres). Cette interaction a été étudiée au moyen de traceurs isotopiques tels que $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

[Fracturation de la roche]

Enfin, l'effet du creusement de l'ouvrage sur l'endommagement de la roche d'accueil a été examiné. L'étendue de la zone endommagée a été évaluée autour des ouvrages souterrains à partir de carottes d'argilite dégazées pour leur teneur

en hélium-4, un gaz léger, dissous, très sensible à la fracturation et produit naturellement par la roche. Les résultats ont permis de vérifier que l'endommagement est une fonction de l'âge et de la forme de l'ouvrage. À Tournemire, l'extension de la fracturation est de près de 2 m autour du tunnel centenaire, et en épouse la forme, et de seulement 70 cm autour des galeries plus récentes avec des fissures de désaturation parallèles à la stratification. La simulation des profils d'hélium-4 a permis de montrer que, au-delà des zones endommagées, la diffusion était dominante par rapport à d'autres formes de transport.

Le GNR Trasse a ainsi permis de progresser dans la connaissance des transferts de radionucléides dans la géosphère et l'environnement, sujet clé pour évaluer la sûreté des modes de gestion des déchets, ainsi que les conséquences à long terme des situations accidentelles ou résultant de pollutions passées. Les plateformes expérimentales de l'IRSN ont fourni à cet égard un cadre idoine pour rassembler recherche finalisée et recherche académique autour de sujets d'intérêt commun. Un nouveau cycle d'études et de recherches, dans les « traces » de Trasse, est en cours d'élaboration dans un nouveau dispositif interdisciplinaire du CNRS succédant au programme Pacen.

Contacts : Jean-Michel Matray - jean-michel.matray@irsn.
(Laboratoire d'étude et de recherche sur les transferts et les interactions dans les sols - Letis)

(1) Pacen : programme interdisciplinaire du CNRS sur l'aval du cycle de l'énergie nucléaire mis en place suite à la loi de 2006 sur les déchets.

(2) L'activité totale de ces deux radionucléides s'élève dans la tranchée à des valeurs comprises entre 10^5 à 10^6 Bq/kg.



UIAR : (National Ukrainian Institute for Radioecology) ; IGS : (Ukrainian Institute of Geological Sciences) ; CNRS (CAREN-Géosciences, CEREGE, CNAB, GIS, IDES, IPGS, HydrASA, ISTO, IVV, LEGOS, LGIT, LIPM, LMTG, LSCE, LTHE, MIGP, MNHN, SISYPHE, IMFT) ; IRSN.

+++ Publication : *Applied Geochemistry* (à paraître le 6 juin 2012).

Instrumentation permettant de suivre l'évolution de la roche suite à un forage.



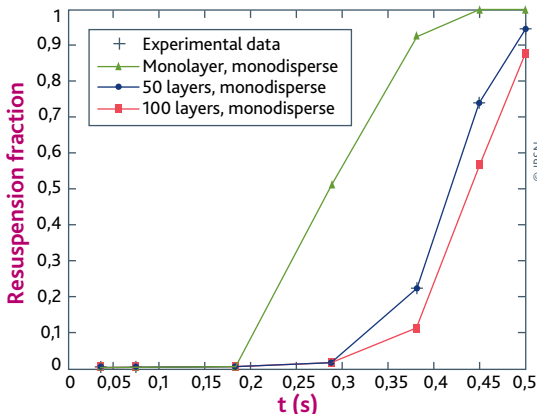
NOUVELLE MODÉLISATION DE LA REMISE EN SUSPENSION DE PARTICULES

Une nouvelle modélisation développée dans le cadre de la thèse de Fan Zhang permet de simuler de façon plus réaliste la remise en suspension, par un écoulement turbulent, de fines particules déposées sur une surface.

En cas d'accident dans une installation nucléaire, des particules déposées peuvent être remises en suspension par des flux gazeux. Si elles sont contaminées, elles peuvent accroître le rejet de radioéléments vers l'environnement. De plus, dans les installations créant de grandes quantités de poussières comme les réacteurs HTR (réacteur à haute température refroidi à l'hélium) ou l'installation expérimentale Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor), les poussières en suspension en s'oxydant peuvent également induire un risque d'explosion. Fan Zhang a amélioré la modélisation de la cinétique de remise en suspension des particules de diamètre inférieur à 10µm qui sont les plus critiques pour ces deux risques.

[Fluctuations turbulentes et interactions entre couches]

Le modèle de mise en suspension le plus évolué appelé Rock'n'Roll tient compte de l'accumulation de l'énergie transmise par le flux gazeux, énergie qui contribue au détachement de la particule de la surface. Fan Zhang s'est consacré à deux facteurs de la remise en suspension mal décrits par le modèle Rock'n'Roll : les fluctuations turbulentes du flux et les interactions entre les couches successives de particules.



Comparaison du nouveau modèle hybride aux résultats d'un essai du programme Bise de l'IRSN montrant la pertinence d'une approche multicouche.

Les particules déposées subissent des forces aérodynamiques induites par les fluctuations de vitesse de l'écoulement du gaz. Or ces fluctuations ne sont pas mesurables expérimentalement à l'échelle de la dizaine de microns. En l'absence d'information sur l'évolution de ces forces, le modèle Rock'n'Roll en présupposait une distribution gaussienne. Fan Zhang a évalué ces fluctuations de vitesse par DNS^{GLO} et en a déduit une modélisation des forces aérodynamiques basée sur des distributions stochastiques pour tenir ainsi compte de la réalité de l'écoulement.

[Une approche érosive]

Les particules se déposent sur une surface selon une structuration complexe multicouche. Dans le modèle Rock'n'Roll, les forces d'adhésion entre les différentes couches de particules n'étaient pas évaluées et une correction devait être appliquée au modèle sur la base d'expériences. Avec une approche dite érosive, Fan Zhang a modélisé les phénomènes d'adhésion entre couches qui influent sur le délai inhérent à la remise en suspension des couches inférieures.

Ces travaux améliorent significativement la prédiction de la cinétique de remise en suspension de particules fines mesurée expérimentalement notamment dans l'installation Bise de l'IRSN pour des dépôts isolés et multicouches. Cette modélisation sera encore améliorée pour tenir compte de la formation d'amas de particules, si ceux-ci sont confirmés par des travaux expérimentaux à venir à l'IRSN.

Contact : Martin Kissane - martin.kissane@irsn.fr
(Laboratoire d'étude du corium et du transfert des radioéléments - LETR)



Université de Newcastle (GB) ; École centrale de Lyon.

+++ Publication : Zhang F., Reeks M., Kissane M. « Particle resuspension modeling in turbulent flows. » Actes de la *International Aerosol Conference*, septembre 2010, Helsinki.

+++ Publication : Zhang F. *The modelling of particle resuspension in a turbulent boundary layer*. Thèse soutenue à l'École centrale de Lyon le 20 oct. 2011.

+++ Publication : Kissane M.P., Zhang F., Reeks M.W. « Dust in HTRs: its nature and improving prediction of its resuspension. » *Nucl. Eng. Des.* 2011 (sous presse).

Facteurs organisationnels et humains

RESOH : UNE CHAIRE DE RECHERCHE POUR ÉTUDIER LES RELATIONS DE SOUS-TRAITANCE

Une chaire de recherche et d'enseignement consacrée aux aspects organisationnels et humains des relations de sous-traitance et de co-traitance vient d'être créée à l'École des Mines de Nantes. Elle vise à les étudier dans le domaine nucléaire, et plus largement dans d'autres secteurs industriels confrontés à la gestion des risques. En cohérence avec les recommandations de son comité d'orientation des recherches, l'IRSN va impliquer ses chercheurs dans des travaux développés avec des acteurs universitaires et académiques. Cette création répond à une préoccupation actuelle et croissante partagée par plusieurs acteurs du nucléaire puisque cette chaire résulte d'un partenariat impliquant l'IRSN, Areva et le groupe DCNS comme co-financeurs. Outre l'attention portée à cette thématique au moment des évaluations complémentaires de sûreté des installations françaises suite à l'accident de Fukushima, celle-ci s'intègre dans l'un des axes scientifiques du nouveau Laboratoire de recherche en sciences humaines et sociales créé en janvier 2012 à l'IRSN. Le titulaire de la chaire est Benoit Journé, professeur de gestion et chercheur à l'Institut d'économie et de management de Nantes-Atlantique de l'Université de Nantes.

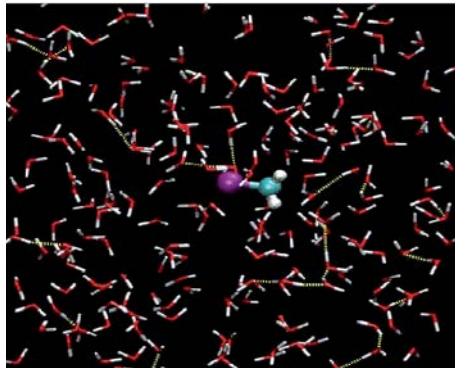
Sûreté nucléaire

LANCEMENT DE SARGEN IV

La réunion de lancement du projet européen Sargen IV s'est déroulée les 30 et 31 janvier 2012 à Fontenay-aux-Roses. Ce projet du 7^{ème} Programme cadre de recherche et développement (PCRD) travaille à définir une méthode d'évaluation de sûreté commune en Europe pour les futurs réacteurs dits de 4^{ème} génération et se déroulera sur deux ans. Plusieurs configurations de ces réacteurs (à neutrons rapides refroidis au sodium, au gaz ou au plomb) sont actuellement à l'étude. Sargen IV permettra aussi d'identifier les besoins de recherche en sûreté pour améliorer les concepts existants et de mettre en application la méthode proposée. Piloté par l'IRSN, Sargen IV réunit 22 partenaires : organismes de sûreté (dont les sept membres du réseau Eton), centres de recherche, universités, et industriels-concepteurs.

Physique/Chimie

L'IRSN PARTENAIRE DE DEUX LABEX, CAPP A ET ICOME2



Calcul de dynamique moléculaire d'interaction entre une molécule de CH_3I et un solvant, H_2O réalisé par le C³R.

L'IRSN est partenaire de deux laboratoires d'excellence (labex), dont la liste a été publiée le 14 février 2012 par le commissariat général aux investissements d'avenir : le Laboratoire Physique et chimie de l'environnement atmosphérique (CaPPA) et le Centre interdisciplinaire sur les matériaux multi-échelle pour l'énergie et l'environnement (Icome2). L'IRSN participe au labex Cappa par le laboratoire Combustion, cinétique chimique et réactivité (C³R), un laboratoire commun entre l'Institut et l'Université de Lille 1. Quant au labex Icome2, l'IRSN y est impliqué avec son Laboratoire physique et thermomécanique des matériaux (LPTM). Les lauréats des appels à projets « labex » se voient attribuer des moyens financiers pour accroître leur visibilité internationale, attirer des chercheurs de renommée et construire une politique de recherche de haut niveau.

BACTÉRIES SULFATO-RÉDUCTRICES

Bactéries dont le métabolisme s'accompagne de la formation de sulfure d'hydrogène, agent chimique très corrosif.

BACTÉRIE ANAÉROBIE HÉTÉROTROPHE

Bactérie capable de vivre dans un environnement sans oxygène et se nourrissant de composés organiques produits par d'autres organismes.

DNS

Simulation numérique résolvant l'ensemble des équations de la mécanique des fluides.

EAU PORALE

Eau piégée dans les minuscules pores de la roche.

© IRSN

11

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, rubrique La Recherche.

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