

FOCUS**MODÉLISATIONS AVANCÉES
du comportement du COMBUSTIBLE
lors D'ACCIDENTS DE RÉACTIVITÉ****AVANCÉES**

La concentration
de tritium dans
les organismes
marins

**AVANCÉES**

Savoir quantifier
la contamination
des plantes agricoles par
le chlore, le sélénium
et l'iode radioactifs

LE COMBUSTIBLE, AU CŒUR DE LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE



© Olivier Segonzac/Agence Galeries Lafayette/IRSN

Afin d'assurer l'exploitation sûre des réacteurs – mais aussi des installations de l'aval du cycle – le combustible nucléaire se doit d'être robuste et fiable. Et ce, dans ses deux composantes principales : la matière nucléaire et son enveloppe qui a pour mission de la protéger, de l'isoler de l'environnement et d'en favoriser le refroidissement. Obtenir et valider les meilleurs paramètres de la robustesse et de la fiabilité du combustible est un enjeu majeur du présent et un challenge pour le futur. Plusieurs pistes de recherche et d'innovation industrielle

sont explorées ; elles incluent le dopage de la matière nucléaire avec des produits permettant d'en améliorer les qualités. Par exemple, en augmentant sa capacité à retenir les gaz qui s'accumulent au cours de sa vie dans le cœur ou en la rendant plus tolérante par rapport aux accidents (on parle alors d'ATF – *Accident Tolerant Fuel*).

De son côté, pour exercer son rôle institutionnel au service de la sûreté nucléaire, l'IRSN réalise des programmes de recherche, bien souvent en partenariat, afin d'être en mesure d'évaluer de manière indépendante les critères de performance de sûreté de ces combustibles. Ces programmes panachent la réalisation d'expériences intégrales et analytiques avec le développement de logiciels qui ont le double rôle de capitaliser la connaissance et de permettre l'exécution de travaux d'application et de contre-expertise.

L'article présenté dans ce numéro d'AKTIS traite un aspect extrêmement important, novateur aux niveaux national et international en ce qui concerne le comportement du combustible en situation accidentelle : la modélisation multi-échelle des matériaux très hétérogènes qui le composent. L'IRSN, avec sa grande expérience et son positionnement international, joue un rôle moteur dans ce domaine.

Giovanni Bruna,
Directeur scientifique

Aktis est la lettre d'information scientifique de l'IRSN. Elle présente les principaux résultats de recherches menées par l'Institut dans les domaines de la radioprotection, de la sûreté et de la sécurité nucléaire. Trimestrielle et gratuite, elle existe aussi en version électronique sur abonnement. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jacques Repussard - Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Giovanni Bruna, Matthieu Schuler - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Giovanni Bruna, Aleth Delattre, Jean-Michel Evrard, Christine Gouedranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano - Réalisation : www.groupeougouvif.fr - Impression : Idéale Prod, certifiée Imprim'Vert - ISSN : 2110-588X - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément à la loi N° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi N° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, tout utilisateur ayant déposé des informations directement ou indirectement nominatives, peut demander la communication de ces informations et les faire rectifier le cas échéant.



SOMMAIRE

ÉDITO

Giovanni Bruna

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- La concentration de tritium dans les organismes marins
- Savoir quantifier la contamination des plantes agricoles par le chlore, le sélénium et l'iode radioactifs

FOCUS

PAGE 6

Modélisations avancées du comportement du combustible lors d'accidents de réactivité

COLLABORATIONS

PAGE 9

- Une démarche internationale pour identifier les causes profondes des leucémies infantiles

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 10

- Gouvernance
- Habilitations à diriger des recherches
- Collaborations
- Thèses
- Installation de recherche
- Publications

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photo de couverture - Résultat de la modélisation avancée pour des volumes élémentaires de combustible : champ de déformation équivalente en condition de traction-compression.

© IRSN

LA CONCENTRATION de tritium dans les ORGANISMES MARINS

Comment le tritium rejeté de manière contrôlée dans la Manche par l'industrie nucléaire s'incorpore-t-il dans les organismes vivants de l'environnement marin ? Des chercheurs de l'IRSN ont étudié les différences de concentration de tritium dans l'eau de mer et dans plusieurs organismes marins au cap de La Hague.



CONTACTS

Bruno Fiévet
bruno.fievet@irsn.fr
Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC)

L'installation nucléaire de recyclage d'AREVA de La Hague est la principale source de rejets liquides contrôlés de tritium dans l'environnement marin du Nord-Cotentin⁽¹⁾. Le tritium est rejeté sous forme d'eau tritiée (HTO^{GL0}) qui, une fois dans l'environnement, entre dans le cycle biogéochimique^{GL0} de l'hydrogène. Le tritium s'incorpore à la matière organique à travers des processus biologiques tels que la photosynthèse, ainsi que par les échanges tritium/hydrogène dans les molécules organiques. Il est alors désigné sous le sigle TOL, pour tritium organiquement lié. Dans des conditions d'équilibre (concentration en tritium constante dans l'eau de mer) et en raison de la faible discrimination isotopique entre le tritium et l'hydrogène, le rapport entre ces deux éléments doit être le même dans les molécules organiques et dans l'eau.

En conséquence, les variations de tritium dans l'eau de mer sont lissées dans les organismes (voir figure).

Modélisation dynamique

Ainsi, lorsque la concentration de HTO dans l'eau de mer baisse rapidement, la concentration en TOL des organismes diminue moins vite, la situation n'est plus à l'équilibre et le rapport est transitoirement plus élevé. La situation est inverse en cas d'augmentation rapide de la concentration de HTO dans la mer (en cas d'accident, par exemple). Ces résultats confirment que le rapport entre le tritium et l'hydrogène dans l'eau de mer en conditions d'équilibre est conservé dans les organismes vivants. Cependant, en cas de variation rapide de HTO dans l'eau de mer, une modélisation dynamique^{GL0} est nécessaire pour tenir compte de l'effet de lissage et prédire de façon réaliste les transferts de tritium sous forme de TOL dans les organismes de l'écosystème.

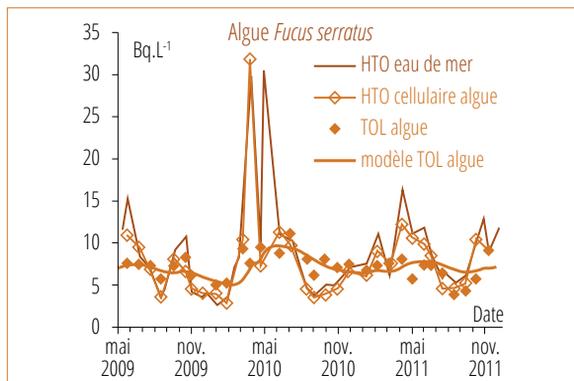
⁽¹⁾ L'installation de La Hague rejette avec ses effluents liquides 10¹⁶ Bq/an de tritium, 100 fois plus que les rejets liquides des centrales nucléaires situées à proximité.

PUBLICATIONS

• Fiévet B. et al.
«Transfer of tritium released into the marine environment by French nuclear facilities bordering the English Channel», *Environmental Science & Technology*, 2013, 47, 6696-6703.

Cinétique des échanges

Les chercheurs de l'IRSN ont analysé les concentrations de tritium dans l'eau de mer, dans l'eau cellulaire extraite de différents organismes (algues, mollusques) prélevés en Manche ainsi que dans la matière organique (TOL) de ces échantillons. Ils se sont intéressés aux différents mécanismes de transfert du tritium : en premier lieu, les échanges du tritium entre l'eau de mer et l'eau de l'organisme. Ils ont montré que l'équilibre est atteint très rapidement ; la concentration en tritium dans l'eau cellulaire suit donc fidèlement les variations dans l'eau de mer. Ils se sont ensuite penchés sur la cinétique de l'incorporation et des échanges du tritium entre l'eau et la matière organique. En effet, dans certaines conditions, des écarts sont observés entre le rapport tritium/hydrogène dans l'eau (HTO) et celui dans la matière organique (TOL). Les chercheurs ont montré que ces processus sont beaucoup plus lents, de l'ordre de plusieurs mois (ils résultent de diverses réactions ayant des vitesses très variables).



Courbe représentant les variations de la concentration de tritium mesurée dans l'eau de mer (HTO en marron), dans l'eau cellulaire de l'algue (HTO losanges ouverts) et dans la matière organique de l'algue (TOL losanges pleins), ou modélisée dans l'algue (TOL trait plein orange).

© IRSN

Savoir quantifier LA CONTAMINATION DES PLANTES AGRICOLES par le chlore, le sélénium et l'iode radioactifs

 Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (Andra), Ukrainian Institute of Agricultural Radiology (IUAR)

CONTACTS

Pascale Henner
pascale.henner@irsn.fr

Laboratoire de biogéochimie, biodisponibilité et transferts des radionucléides – LzBT

PUBLICATIONS

• Henner P. *et al.*
« Translocation of ^{129}I , ^{75}Se and ^{36}Cl to edible parts of radish, potato and green bean following wet foliar contamination under field conditions », *Journal of Environmental Radioactivity* 124 (2013) 171-184.

• Hurtevent P. *et al.*
« Translocation of ^{129}I , ^{75}Se and ^{36}Cl to wheat edible parts following wet foliar contamination under field conditions », *Journal of Environmental Radioactivity* 121 (2013) 43-54.

Le comportement du chlore, du sélénium et de l'iode radioactifs dans les systèmes agricoles n'a fait jusqu'à présent l'objet que d'études et de documentation limitées dans le domaine de la radioécologie. C'est cette lacune de connaissances que le projet Fortress, cofinancé par l'IRSN et l'Andra, a cherché à combler en déterminant, en conditions expérimentales, les coefficients de translocation^{GL0} de ces radionucléides, des feuilles vers les organes consommés des plantes.

Au-delà de l'analyse critique des démonstrations de sûreté des installations nucléaires et des sites de stockage, l'IRSN travaille à l'acquisition des connaissances permettant de connaître voire de limiter les conséquences de leurs éventuelles défaillances, même de très faible probabilité.

Dans un scénario où l'eau utilisée pour l'irrigation contiendrait des radionucléides issus d'un site de stockage de déchets radioactifs, quelle serait la contamination des plantes agricoles ? L'une des voies de contamination serait le transfert foliaire, qui se produirait avec une irrigation par aspersion. Lors d'un transfert foliaire, les radionucléides se déposent sur les parties aériennes des plantes puis migrent, dans une proportion plus ou moins grande, vers les parties qui sont consommées. Ce processus induit une part importante de la contamination des végétaux, qui est plus intense – bien que plus limitée dans le temps – que celle provenant du transfert racinaire depuis un sol contaminé. La concentration de radionucléides qui restent dans la plante dépend de plusieurs facteurs, et notamment les suivants : la concentration et la forme chimique des radionucléides dans l'eau, la quantité d'eau adsorbée sur les feuilles, les processus de lessivage ultérieurs de la plante par les précipitations, le degré de maturité de la plante et notamment du feuillage au moment de la contamination, et le coefficient de translocation^{GL0} propre à chaque radionucléide pour chaque catégorie de plante, qui représente la part de radionucléides retenue par les feuilles qui migre dans le reste de la plante.

Des radionucléides très peu étudiés

Les principaux radionucléides à étudier dans ce cas sont le chlore 36, le sélénium 79 et l'iode 129,

isotopes radioactifs à vie longue d'éléments chimiques dont la mobilité dans l'environnement incluant l'incorporation à la chaîne alimentaire humaine, est *a priori* supérieure à celle du césium ou du strontium. Si les données expérimentales abondent pour le transfert de ces derniers par les feuilles, elles étaient inexistantes pour le ^{36}Cl , le ^{79}Se et l' ^{129}I .

Le projet Fortress (*Foliar transfers of radionuclides in agricultural ecosystems, 2007-2010*) a permis de pallier ces carences. Son objectif était d'obtenir expérimentalement des valeurs réalistes, et avec une précision importante (10 %), pour les facteurs de translocation aux organes consommés de quatre catégories de plantes cultivées : le blé pour la catégorie des céréales, le radis pour celle des légumes racines, le haricot pour celle des légumes fruits, et la pomme de terre pour les tubercules ; et ce, pour le ^{36}Cl , le ^{75}Se et l' ^{129}I , les trois isotopes utilisés dans l'étude pour des raisons pratiques. Le ^{25}Se et l' ^{125}I ont dans les plantes le même comportement que le ^{29}Se et le ^{129}Se , respectivement.

Protégées des précipitations

Les plantes ont été cultivées en plein champ dans un site expérimental de l'IUAR implanté dans la zone d'exclusion de Tchernobyl, sur un sol non contaminé prélevé en dehors de la zone d'exclusion. Pour s'assurer de caractériser les facteurs de translocation seulement dus à la voie foliaire, le sol était protégé en permanence pendant la contamination afin d'éviter tout transfert racinaire ultérieur. Par ailleurs, les cultures ont été protégées des précipitations afin d'éviter le lessivage du feuillage. La contamination a été réalisée en aspergeant globalement et sans ruissellement le feuillage des quatre plantes choisies. Deux à cinq



À gauche, mise en place des protections du sol (en haut) puis contamination du blé par aspersion. À droite, haricots et blé au stade de floraison, protégés des précipitations par des bâches.

© IRSN

stades de développement clés (dits « stades phénologiques »^{GL0}) ont été étudiés selon les plantes ; ils correspondent aux phases de développement précoce puis plus avancé des feuilles et des tiges, à la floraison, au développement des épis ou des fruits ou tubercules, et à la maturation. La contamination a été ponctuelle (à un stade clé) ou chronique (tous les stades successivement). Les cultures ont été réalisées entre les mois de mai et d'août de deux années successives (2009 et 2010) pour prendre en compte les variations climatiques.

Stades de croissance clés

De fait, l'année 2010 ayant été plus chaude que 2009, les stades de croissance clés ont été atteints plus précocement. Les résultats obtenus montrent que la variabilité interannuelle des paramètres climatiques a une incidence importante sur l'intensité des transferts mesurés, alors qu'elle n'est pas prise en compte dans les paramètres actuels de transfert aux plantes.

Des prélèvements de feuilles ont été effectués après chaque contamination. La surface globale des feuilles et la biomasse étaient également évaluées à chaque contamination afin de suivre la croissance. À la récolte, les pommes de terre et les parties consommables et aériennes de chaque catégorie de plantes ont été prélevées. Les trois radionucléides ont été mesurés dans tous les prélèvements.

Deux stades phénologiques critiques

À partir de la base de données ainsi constituée, les facteurs de translocation des trois radionucléides ont été établis pour chaque catégorie de plante. L'iode possède un facteur de translocation entre 0,1 % et 2,6 %, soit une mobilité faible, il se fixe dans

les feuilles et une part se volatilise probablement. Pour le chlore, le facteur de translocation varie entre 0,5 % et 31,5 % selon les plantes, le plus important étant pour la pomme de terre ; cet élément a une très forte mobilité et se diffuse rapidement dans toute la plante. Enfin, le sélénium présente également des facteurs de translocation entre 1,6 % et 32,6 % donc une très forte mobilité ; de plus, ce radionucléide est métabolisé^{GL0} dans la plante, probablement en utilisant les voies du soufre, et sa translocation est donc plus intense aux stades critiques de développement. Le chlore et le sélénium apparaissent ainsi comme étant autant voire plus mobiles que le césium, qui est une référence en termes de mobilité. Deux stades phénologiques critiques ont été identifiés : la floraison, en raison de l'intensité des transferts internes existant pour la mise en place des organes reproducteurs et de réserve (la translocation est favorisée), et le stade de développement précoce (l'absorption foliaire est favorisée). Enfin, l'analyse de ces résultats montre que si on ne dispose pas de données spécifiques pour un couple plante-stade/radionucléide, le facteur de translocation le plus élevé calculé par une contamination ponctuelle permet une évaluation conservative pour la contamination chronique.

Une base de données expérimentales inédite

Ces travaux ont permis de constituer une base de données expérimentales inédite sur la translocation du ³⁶Cl, du ⁷⁹Se et de ¹²⁹I. Les facteurs de translocation ainsi obtenus sont des valeurs maximales, qui permettront notamment d'encadrer l'estimation des doses reçues par l'homme *via* l'ingestion de denrées agricoles contaminées par ces radionucléides.

En savoir plus sur le projet Fortress



MODÉLISATIONS *avancées* du comportement du COMBUSTIBLE lors D'ACCIDENTS DE RÉACTIVITÉ

 Laboratoire de mécanique et de génie civil (LMGC), Laboratoire de Micromécanique et intégrité des structures, laboratoire commun IRSN/LMGC/Univ. Montp. II (MIST), Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille (CINaM)

CONTACT

Marc Petit
marc.petit@irsn.fr
Service de maîtrise des incidents et accidents (SEMIA) de l'IRSN.

⁽¹⁾ Lors de l'utilisation du logiciel SCANAIR dans le cadre d'évaluations de sûreté, des marges sont adoptées pour tenir compte des hypothèses de départ et des approximations.

 En savoir plus sur le logiciel SCANAIR



La maîtrise des risques engendrés par les accidents d'injection de réactivité (RIA) impose le respect de propriétés spécifiques de résistance aux combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires. En effet, ces accidents se traduisent par une augmentation rapide de la puissance générée par les réactions de fission qui, dans des conditions extrêmes, peut conduire la gaine du combustible à se rompre. Or celle-ci est la première barrière qui confine les éléments radioactifs à l'intérieur du réacteur. Une des missions de l'IRSN est d'évaluer si les combustibles nucléaires répondent aux exigences de sûreté vis-à-vis de ces accidents. Pour estimer les risques de rupture, l'Institut a développé un logiciel qui modélise le comportement du combustible. Les modèles actuels sont construits avec des hypothèses et des approximations⁽¹⁾ que l'avancée des connaissances permet d'affiner progressivement. L'IRSN a ainsi engagé, depuis plusieurs années, des travaux de modélisation multi-échelle de ces matériaux très hétérogènes. Ces travaux contribuent à réduire les incertitudes des modèles de comportement du combustible.

L'accident d'injection de réactivité ou RIA (*Reactivity Initiated Accident*), qui est pris en compte dans la conception des réacteurs⁽²⁾, se traduit par une brutale génération d'énergie au sein du combustible. Elle y entraîne des transformations. D'une part, il gonfle, en raison des effets de dilatation, et en raison de l'expansion des gaz produits en fonctionnement normal par les fissions nucléaires (essentiellement Krypton et Xénon) qui restent emprisonnés dans sa matrice. Ce gonflement induit une pression mécanique sur la gaine. D'autre part, une partie des gaz de fission est relâchée par le combustible et se répartit dans les interstices existant entre les pastilles de combustible et la gaine, contribuant à l'augmentation de la pression exercée sur cette dernière.

Expériences globales

Lors de l'étude du RIA, il est primordial d'évaluer quelles conditions entraîneraient la rupture de la gaine. Pour les connaître, l'IRSN réalise des programmes expérimentaux et développe le logiciel SCANAIR dont l'objectif est de prévoir le comportement thermomécanique des crayons de combustible en RIA.

Les modèles utilisés dans le logiciel représentent les comportements thermiques et mécaniques des matériaux constituant le combustible. Ils prennent également en compte la présence de gaz de fission. Ils ont été établis à partir d'approches théoriques, puis validés par des expériences globales simulant des accidents de RIA (notamment celles réalisées dans le réacteur CABRI). Cependant, aucun de ces modèles ne peut être validé indépendamment des autres, car il n'est techniquement pas possible de réaliser des expériences séparées individualisant chaque phénomène : on ne peut donc garantir l'absence de biais dans le couplage des modèles, difficilement identifiable à partir d'une expérience globale.

Phénomènes élémentaires

Pour réduire les incertitudes des modèles et identifier les améliorations à y apporter, l'IRSN a de ce fait mis en œuvre des méthodes de modélisation

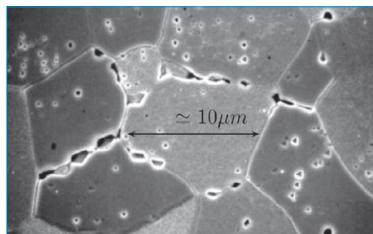
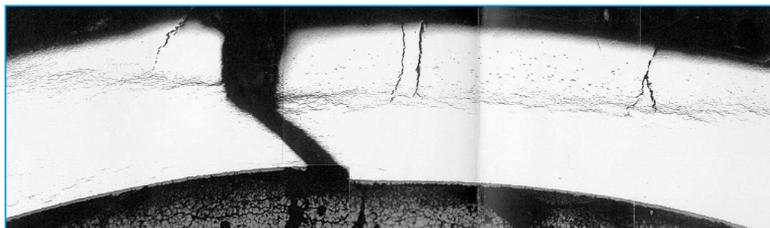


Image du combustible irradié où sont visibles les petites bulles sphériques dans les grains du matériau et les bulles aplaties entre les grains.

© IRSN



Photographie au microscope optique d'une gaine de combustible qui s'est rompue au cours de l'essai REP-Na8 simulant un accident de réactivité, réalisé dans le réacteur CABRI.

© IRSN

dite avancée. L'une d'elles est l'homogénéisation multi-échelle. L'idée est de modéliser chaque phénomène élémentaire à l'échelle où il se produit, pour en déduire la loi de comportement global du matériau à l'échelle supérieure, tenant compte du phénomène élémentaire. Cette démarche est bien adaptée à la modélisation du combustible irradié, matériau fortement hétérogène. Elle permet de tenir compte des détails de la structure des matériaux dans un modèle macroscopique, compatible avec le niveau de description de SCANAIR qui décrit le comportement moyen du combustible.

Dans les modèles existants du logiciel, les incertitudes les plus importantes proviennent des modèles de gaz de fission dont le comportement n'est pas accessible à la mesure. La modélisation avancée a donc d'abord été développée à l'IRSN pour cela.

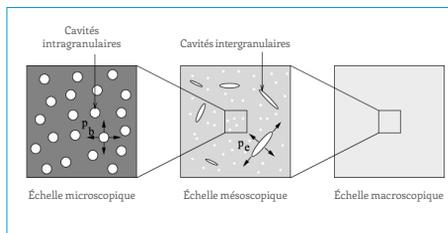
Du micro au macro

Le combustible nucléaire irradié contient des porosités, des gaz, des précipités de produits de fission. L'une des questions est de savoir quelle influence les bulles présentes dans le combustible ont sur son comportement mécanique global durant le RIA. Les chercheurs ont utilisé une méthode de modélisation multi-échelle. Ces bulles sont de deux types : des bulles sphériques de quelques nanomètres contenues dans les grains^{GL0} du matériau ; et des bulles en forme de lentille de quelques micromètres localisées entre les grains. Pour modéliser le comportement global du combustible en prenant correctement en compte l'effet de ces bulles, deux étapes d'homogénéisation successives sont réalisées. La première étape vise à obtenir le modèle de comportement homogène équivalent du grain contenant des bulles, à l'échelle intermédiaire (ou mésoscopique). Il faut représenter à l'échelle du micromètre le comportement d'une matrice (le grain) qui contient des

bulles sphériques nanométriques. Le modèle a d'abord été réalisé avec des bulles vides de gaz, puis il a été modifié pour prendre en compte la pression interne des bulles. La seconde étape permet quant à elle de passer à l'échelle du matériau global (échelle macroscopique) : on modélise le comportement d'une matrice possédant les propriétés équivalentes à celles déterminées à la première étape et qui contient des bulles lenticulaires à l'échelle du micromètre. La difficulté majeure à surmonter ici est la prise en compte de la forme particulière des bulles.

Se pose ensuite la question de valider les modèles analytiques ainsi obtenus. La validation a été réalisée en calculant directement le comportement de volumes élémentaires du matériau en résolvant des équations de la mécanique des milieux continus (en utilisant ici des transformées de Fourier rapides). Dans ces volumes élémentaires, la porosité globale est imposée et tous les détails de la structure du matériau (bulles intra et intergranulaires) sont représentés. Ces calculs directs sont inutilisables à l'échelle du réacteur car trop complexes et coûteux en temps de calcul. La comparaison entre les contraintes mécaniques déterminées par les calculs directs et celles issues de l'approche par homogénéisation prenant en

⁽³⁾ L'accident d'injection de réactivité, plus simplement appelé accident de réactivité ou encore RIA (Reactivity Initiated Accident), qui est pris en compte dans la conception des réacteurs, résulte de la défaillance d'un mécanisme pilotant une grappe de commande, qui contribue à la régulation de la réaction nucléaire. Il se traduit par une rapide et violente génération d'énergie au sein du combustible.

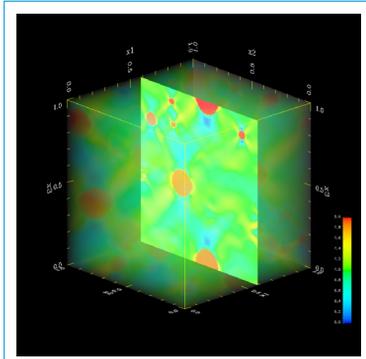


Les trois échelles de modélisation du combustible contenant des bulles de gaz.

© IRSN

PUBLICATIONS

- Moal A. *et al.* « SCANAIR: A transient fuel performance code: Part One: General modelling description », *Nuclear Engineering and Design*, Volume 280, December 2014, Pages 150-171
- Georghentou V. *et al.* « SCANAIR a transient fuel performance code Part two: Assessment of modelling capabilities », *Nuclear Engineering and Design*, Volume 280, December 2014, Pages 172-180
- Vincent P.-G. *et al.* « Effective flow surface of porous materials with two populations of voids under internal pressure: I. A GTN model », *International Journal of Plasticity*, Volume 56, May 2014, Pages 45-73
- Vincent P.-G. *et al.* « Effective flow surface of porous materials with two populations of voids under internal pressure: II. Full-field simulations », *International Journal of Plasticity*, Volume 56, May 2014, Pages 74-98
- Jelea A. *et al.* « An atomistic modeling of the xenon bubble behavior in the UO₂ matrix », *Journal of Nuclear Materials*, Volume 444, Issues 1-3, January 2014, Pages 153-160



Résultat de la modélisation avancée pour des volumes élémentaires de combustible : champ de déformation équivalente en conditions de traction-compression illustrant la localisation des déformations.

© IRSN

compte les différentes échelles (multi-échelles) montre que les formules analytiques établies sont très précises.

La pression des gaz de fission

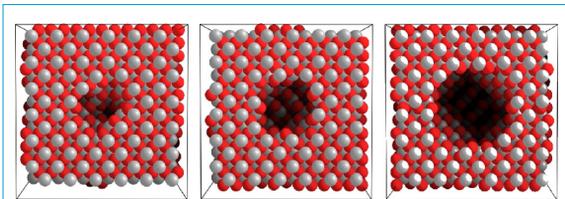
Compte tenu de la très petite taille des bulles intragranulaires et de la forte pression qui y règne, il faut s'interroger sur la validité, à cette échelle, de la notion de pression. Pour déterminer l'équation qui la régit, les scientifiques ont choisi d'utiliser une méthode de modélisation avancée, dite approche atomistique, dans laquelle sont représentées les interactions individuelles entre les atomes. Le modèle développé pour représenter le comportement des bulles de gaz piégées dans la structure cristalline du combustible repose sur la dynamique moléculaire, technique qui permet de simuler les mouvements

d'un ensemble d'atomes au cours du temps. Les forces entre les atomes sont dérivées de potentiels interatomiques issus de la littérature et adaptés à ce type d'application. En premier lieu, l'impact de la bulle elle-même, sans gaz, a été étudié. Ceci a permis de modéliser la distorsion de la matrice de dioxyde d'uranium (le matériau du combustible nucléaire) sous l'effet du voisinage de la bulle (effet de confinement). Puis des simulations comportant quelques centaines, voire quelques milliers d'atomes d'uranium et d'oxygène et quelques dizaines d'atomes de xénon ont été réalisées. La pression à l'intérieur de la bulle a été évaluée en prenant en compte non seulement les interactions entre atomes de xénon, mais aussi les interactions xénon-uranium et xénon-oxygène.

Pression interne des bulles

La nécessité de déterminer la pression interne des bulles a soulevé la question de sa modélisation dans les deux étapes d'homogénéisation décrites plus haut. En effet, les développements initiaux considèrent l'hypothèse d'un comportement gazeux alors que l'approche atomistique montre qu'aux températures typiques du RIA, le xénon sous forte pression dans les plus petites bulles se comporte comme un matériau dense et non comme un gaz. De plus, les effets de surface associés à la déformation du réseau cristallin ne peuvent pas être négligés. Ces résultats montrent que la modélisation habituelle reposant sur les lois d'état simples (loi des gaz parfaits, loi de Van Der Waals) n'est pas adaptée au cas des bulles intragranulaires et qu'elle doit être revue. Ces travaux se poursuivent actuellement dans le cadre d'une thèse.

Ces méthodes de modélisation avancée dans le domaine du RIA permettent d'élaborer, dans une démarche structurée et rigoureuse, des modèles macroscopiques du combustible nucléaire dans lesquels les effets de la microstructure sont pris en compte. Ces modèles sont intégrés dans le logiciel SCANAIR. Cette approche permet, d'une part d'aborder avec une confiance accrue la question de la transposition des résultats expérimentaux à l'échelle du réacteur, d'autre part de capitaliser un savoir-faire en termes de modélisation qui s'accommodera mieux des évolutions des combustibles qui sont susceptibles d'être proposées par les exploitants dans l'avenir.



Exemples de modèles utilisés dans les calculs de dynamique moléculaire : de gauche à droite, représentation de cavités d'un rayon de 4, 6 et 8 Å dans l'oxyde d'uranium (atomes d'U en gris, atomes d'O en rouge).

© IRSN

UNE DÉMARCHE INTERNATIONALE pour identifier les causes profondes des LEUCÉMIES INFANTILES

La résidence près d'un site nucléaire est un des facteurs de risque étudiés pour les leucémies infantiles. L'IRSN et BfS ont rassemblé des scientifiques de plusieurs disciplines sous l'égide de l'association européenne Melodi^{GLO} pour faire le point sur les études épidémiologiques existantes, leurs apports, leurs limites, et identifier les voies d'analyse et de recherche pour apporter des réponses plus robustes.

Si les leucémies constituent le type de cancers infantiles le plus fréquent⁽¹⁾, leur origine n'est en général pas connue. Depuis qu'un « cluster »^{GLO} de leucémies infantiles a été identifié près de l'installation anglaise de Sellafield dans les années 1980, vivre près d'une installation nucléaire figure parmi les nombreux facteurs de risque envisagés⁽²⁾. De multiples études épidémiologiques ont été réalisées, sans conclusion probante. Leurs résultats soulèvent des questions auxquelles ni les connaissances actuelles sur les rayonnements ionisants, ni celles sur d'autres facteurs de risques des leucémies, ne permettent de répondre.

Large palette de disciplines

L'idée a alors émergé de rassembler les principaux acteurs scientifiques du domaine en Europe et aux États-Unis, pour réfléchir aux limites des études réalisées et proposer des pistes d'amélioration. Un *workshop* de consensus a été organisé en France par BfS et l'IRSN en juin 2012, sous les auspices de l'association européenne Melodi^{GLO}, et a rassemblé 42 scientifiques.

Le premier objectif du *workshop* était d'établir une revue des études réalisées (résultats et limites méthodologiques) formalisée dans un article scientifique. Cette analyse suggère un risque plus élevé de leucémies pour les enfants de 0-4 ans, vivant dans les 5 km autour d'une installation nucléaires sans que puisse être établi scientifiquement un lien de causalité entre le lieu de résidence et l'excès de risque de leucémie. En effet les études reposent sur de petits effectifs ; et leurs différences méthodologiques sont considérables et ne permettent pas d'additionner les résultats simplement.

Autre point qui interpelle les scientifiques : dans la classe d'âge 5-14 ans, les résultats n'indiquent pas d'élévation du risque.

Mieux caractériser l'exposition des enfants

Au vu de cette analyse, les participants au *workshop* ont estimé nécessaire de compléter les études existantes, en caractérisant le plus précisément possible, et de façon harmonisée, l'exposition des enfants. De plus, les facteurs de risque doivent être analysés en relation avec une caractérisation plus précise des tumeurs. Les profils génétiques/épigénétiques des sous-types de leucémies infantiles sont nécessaires.

Le second objectif du *workshop* était d'identifier quelles connaissances manquaient pour clarifier le risque autour des installations nucléaires, et le cas échéant de proposer de nouvelles pistes de futures recherches. Les spécialistes se sont accordés sur la nécessité de mieux comprendre les causes de la leucémie infantile (clones pré-leucémiques, cause infectieuse), et de mieux déterminer la distribution de ces causes dans la population infantile. Le *workshop* s'est conclu en recommandant fortement que ces travaux soient coordonnés à un niveau multinational, favorisant l'harmonisation des études, dans le cadre de Melodi.



Les institutions partenaires

BfS - Bundesamt für Strahlenschutz (Allemagne), STUK Radiation and Nuclear Safety Authority (Finlande), Institut national de la santé et de la recherche médicale - Inserm (France), Université de Madrid - CSIC/UAM (Espagne), German Childhood Cancer Registry - CCCR (Allemagne), National Academy of Sciences (USA), Institute of Social and Preventive Medicine (Suisse), Epidemiology and Cancer Statistics Group - ECSG (Angleterre), Scientific Institute of Public Health (Belgique), Dalton Nuclear Institute (Angleterre).



10 institutions
partenaires

CONTACT

Dominique Laurier
dominique.laurier@
irsn.fr

Laboratoire
d'épidémiologie
des rayonnements
ionisants - Lepid

⁽¹⁾ 30 % des cancers
diagnostiqués
chez les enfants sont
des leucémies.

⁽²⁾ Les autres facteurs
de risques sont
le syndrome de
Down, le sexe, la
chimiothérapie, et
une exposition aiguë
aux rayonnements
ionisants à moyenne
ou forte dose.

PUBLICATIONS

• D. Laurier *et al.*
« Childhood leukaemia
risks: from unexplained
findings near nuclear
installations to
recommendations for
future research », 2014
J. Radiol. Prot. 34 R53.



En savoir plus
sur la publication.



En savoir plus sur le renouvellement du conseil scientifique



En savoir plus sur les HDR



En savoir plus sur le RIO5



GOUVERNANCE

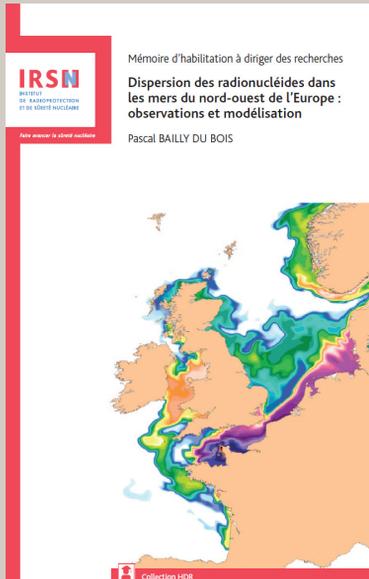
RENOUVELLEMENT DU CONSEIL SCIENTIFIQUE

Les nouveaux membres du Conseil scientifique de l'IRSN ont été nommés pour cinq ans par arrêté conjoint de six ministres (Environnement, Recherche, Santé, Défense, Travail et Industrie), en date du 29 décembre 2014 (publié au Journal officiel le 3 janvier 2015). Le nouveau président est Pierre Toulhoat, directeur scientifique de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris).

HABILITATIONS À DIRIGER DES RECHERCHES

MÉMOIRE DE PASCAL BAILLY DU BOIS

Le mémoire de HDR, soutenu par Pascal Bailly du Bois en octobre 2013 vient de paraître. Intitulé *Dispersion des radionucléides dans les mers du nord-ouest de l'Europe : observations et modélisation*, il présente les travaux et perspectives du chercheur au sein du Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville (LRC-Oct).



SOUTENANCES

Patrick Boyer a soutenu son habilitation à diriger des recherches sur le thème de la modélisation des transferts de radionucléides dans les rivières le 23 janvier 2015 au centre d'études nucléaires de Cadarache (Bouches du Rhône).

Jean Desquines a soutenu son HDR intitulée *Contribution à l'analyse de la rupture des composants mécaniques polycristallins* le 30 janvier 2015 également à Cadarache.

COLLABORATIONS

LE RIO5, NOUVEAU GROUPE DE TRAVAIL INTERNATIONAL SUR LA RADIOACTIVITÉ MARINE

À l'instigation d'un groupe d'experts internationaux piloté par l'Institut océanographique de Woods Hole, un nouveau groupe de travail (GT), *Radioactivity in the ocean, 5 decades later* (RIO5), a été créé pour étudier la radioactivité dans les océans à l'échelle de la planète. Unique par son envergure, il est né des questions posées après l'accident de Fukushima sur l'ampleur des contaminations océaniques, qui ont réveillé l'intérêt d'observer à l'échelle globale la radioactivité marine.

THÈSES

SUJETS 2015

Les nouveaux sujets pour les thèses débutant fin 2015 sont en ligne sur le site de l'IRSN.

SOUTENANCES

Les dix dernières thèses soutenues par les doctorants de l'IRSN

- Damien Drubay, le 6 février 2015 à Villejuif sur *L'analyse de la relation dose-réponse pour les risques de mortalité par cancer et par maladie de l'appareil circulatoire chez les mineurs d'uranium*
- Romain Suchet, le 9 janvier 2015 à Montpellier sur *La gestion du nucléaire en crise. Une étude à travers les représentations des gestionnaires de crise*
- Alice Dufresne, le 18 décembre 2014 à Marseille sur *La modélisation atomistique de la précipitation des hydrides de zirconium : méthodologie de développement d'un potentiel en liaisons fortes*

- Assia Bouarouri, le 12 décembre 2014 à Gif-sur-Yvette sur *Le développement d'un système de mesure à 10 Hz de concentration d'aérosol atmosphérique*
- Élise Vi Nhu Ba, le 12 décembre 2014 à Paris sur *La détection des zones de failles par tomographie en transmission : application à la station expérimentale de Tournemire*
- Zakaria Mana, le 9 décembre 2014 à Saclay, sur *L'étude de la suspension de particules à l'intérieur d'un local sous l'effet de la marche d'un opérateur*
- Adeline Buisset-Goussen, le 8 décembre 2014 à Saint-Paul-Lez-Durance, sur *L'étude des effets multigénérationnels d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants chez un organisme modèle : le nématode *Caenorhabditis elegans**
- Soleiman Bourrous, le 8 décembre 2014 à Nancy, sur *L'étude du colmatage de filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion*
- Pierre Marchal, le 26 novembre 2014 à Saclay, sur *L'étude des particules émises lors d'opération de découpe dans le cadre du démantèlement et de leur impact dans les réseaux de ventilation*
- Christiane Dufresne, le 24 novembre 2014 à La Valette du Var, sur *La compréhension et analyse des processus hydrosédimentaires dans la baie de Toulon.*

JOURNÉES DES THÈSES

L'IRSN organise chaque année un séminaire consacré au travail des doctorants et post-doctorants accueillis dans ses laboratoires de recherche. En 2015, ces journées des thèses ont lieu du 31 mars au 2 avril à l'Isle-sur-la-Sorgue. Les doctorants de 2^e et 3^e années présentent leurs travaux oralement, et ceux de 1^{re} année sous forme de poster. Un temps est par ailleurs dédié aux travaux de recherche exploratoire menés par les chercheurs de l'Institut.

INSTALLATION DE RECHERCHE

PEARL, CONSACRÉE AU RENOYAGE DE LITS DE DÉBRIS

L'installation Pearl, mise en service fin novembre 2014 à Cadarache, a été créée pour étudier expérimentalement la réinjection d'eau sur les débris d'un cœur de réacteur endommagé par



© Jean-Marc Henoux/Sgma/IRSN

En savoir plus sur les thèses



En savoir plus sur le renoyage de lits de débris



un accident grave (accident de fusion de cœur). Ses caractéristiques, de taille notamment, en font un outil unique au monde. Elle est utilisée dans le cadre du programme de recherche de l'IRSN « Renoyage de lits de débris », qui a pour but de mieux comprendre les écoulements d'eau et de vapeur au sein d'un milieu poreux à très haute température dans des conditions représentatives de celles d'un accident grave. Les connaissances acquises permettront d'optimiser l'injection d'eau pour refroidir un cœur de réacteur fortement endommagé.

PUBLICATIONS

NUMÉRO SPÉCIAL ERMSAR 2013

La revue *Annals of Nuclear Energy* a publié un numéro spécial en décembre dernier sur la conférence *European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2013)* qui s'est déroulée du 2 au 4 octobre 2013 à Avignon. Cette conférence a fait le bilan de quatre ans de travail dans le cadre du réseau Sarnet (*Severe Accident Research NETWORK of excellence* – Réseau d'excellence en recherche sur les accidents graves) des 6^e et 7^e programmes cadres de la Commission européenne.

CLUSTER : en épidémiologie, groupe de cas d'une maladie proches les uns des autres dans le temps et dans l'espace.

CYCLE BIOGÉOCHIMIQUE : cycle qu'effectue tout composé naturel ou artificiel libéré dans l'environnement entre les divers compartiments de la biosphère dont la biomasse continentale et (ou) océanique.

GRAIN : volume de matière dans lequel l'orientation cristallographique est homogène. Les grains sont séparés par des joints de grain.

HTO : dans l'eau tritiée, un tritium remplace un hydrogène de la molécule d'eau, soit HTO.

MELODI : association européenne pour la recherche sur les faibles doses de rayonnements ionisants.

MÉTABOLISER : assimiler par le métabolisme, un ensemble de transformations biochimiques qui se déroulent dans un organisme vivant.

MODÉLISATION DYNAMIQUE : modélisation qui prend en compte les aspects cinétiques des transferts entre le milieu et les organismes.

STADE PHÉNOLOGIQUE D'UNE PLANTE : étape de développement de la plante défini par des critères morphologiques externes (identification visuelle) tels que l'état de développement des feuilles ou l'apparition des fleurs.

TRANSLOCATION : transfert d'un radionucléide d'un organe de la plante à un autre, ici de la feuille aux parties consommées.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est un organisme public d'expertise et de recherche pour la sûreté et la sécurité nucléaires et la radioprotection. Il intervient comme expert en appui aux autorités publiques. Il exerce également des missions de service public qui lui sont confiées par la réglementation. Il contribue notamment à la surveillance radiologique du territoire national et des travailleurs, à la gestion des situations d'urgence et à l'information du public. Il met son expertise à la disposition de partenaires et de clients français ou étrangers.

Pour consulter la version numérique d'Aktis, accéder aux publications scientifiques et aux informations complémentaires en ligne, et pour s'abonner, rendez-vous sur le site Internet de l'IRSN : www.irsn.fr/aktis



SIÈGE SOCIAL
31 avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
France
RCS Nanterre B 440 546 018

TÉLÉPHONE
+33 (0)1 58 35 88 88

COURRIER
BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex - France

SITE INTERNET
www.irsn.fr