

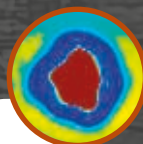
FOCUS

FUKUSHIMA: *localiser le COMBUSTIBLE FONDU* à l'aide de la SIMULATION



AVANCÉES

La chimie théorique
pour évaluer le
risque du béryllium
dans ITER



FORMATION

Mieux évaluer
la dose délivrée
en stéréotaxie

L'ANALYSE DES CŒURS FONDUS POUR CONTRIBUER À LA RÉSILIENCE DU SITE DE FUKUSHIMA



© Olivier Seguret/Almagi/Laboratoire IRSN

Les Japonais ont fait le choix de récupérer le site industriel de Fukushima à long terme. D'où l'importance d'envisager, définir et programmer les opérations nécessaires pour la décontamination ; la première d'entre elles étant le démantèlement des réacteurs dont le combustible a fondu, afin d'éviter tout risque de contamination accidentelle et/ou intentionnelle (acte de malveillance) de l'environnement et des hommes.

Pour ce faire, il est nécessaire de localiser le combustible à l'intérieur des réacteurs accidentés et le caractériser avec précision afin de prévoir les modalités pour y accéder et le traiter efficacement et dans des conditions sûres.

Le projet BSAF (*Benchmark Study of the Accident at the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station*) a été créé par l'AEN pour reconstituer le déroulement des accidents qui ont conduit à la fusion du cœur de trois réacteurs du site de Fukushima, afin de soutenir les Autorités japonaises dans cette tâche lourde et difficile.

Le projet regroupe de nombreux partenaires, dont l'IRSN, qui tirent profit de leur participation à l'exercice pour capitaliser les connaissances acquises afin d'affiner leurs méthodes de calculs respectifs et leurs logiciels, qui permettront d'améliorer leurs capacités d'analyse de sûreté.

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, Jean-Philippe Braly/Technoscope - Réalisation : www.grouperougevf.fr - 51986 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.



ÉDITO

Giovanni Bruna

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- La chimie théorique pour évaluer le risque du béryllium dans ITER
- Coupler les disciplines scientifiques pour mieux connaître les effets sanitaires de l'exposition professionnelle à l'uranium
- Les résultats de l'étude Inworks sur les leucémies confortent les radiements du système de radioprotection international

FOCUS

PAGE 6

Fukushima : localiser le combustible fondu à l'aide de la simulation

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

- Mieux évaluer la dose délivrée en stéréotaxie
- Une formule galénique efficace pour des contaminations cutanées par l'uranium

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Prix
- Collaboration
- Vidéos
- Soutenances: HDR et thèses

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photos de couverture :
Images prises à l'intérieur du réacteur n°1 de Fukushima-Daiichi par un robot mi-avril 2015. Elles montrent la plate-forme située autour du mur entourant la cuve du réacteur, sur laquelle des objets sont tombés.
© Tokyo Electric Power Company (TEPCO)

LA CHIMIE THÉORIQUE *pour évaluer le risque du BÉRYLLIUM dans ITER*

Le projet Bestair a récemment reçu le prix IRSN de la créativité en recherche exploratoire. Via une meilleure connaissance des formes chimiques associant le béryllium dans l'enceinte de l'installation ITER, son objectif était d'évaluer la potentialité de rejets de cet élément extrêmement toxique dans l'environnement en cas d'accident.

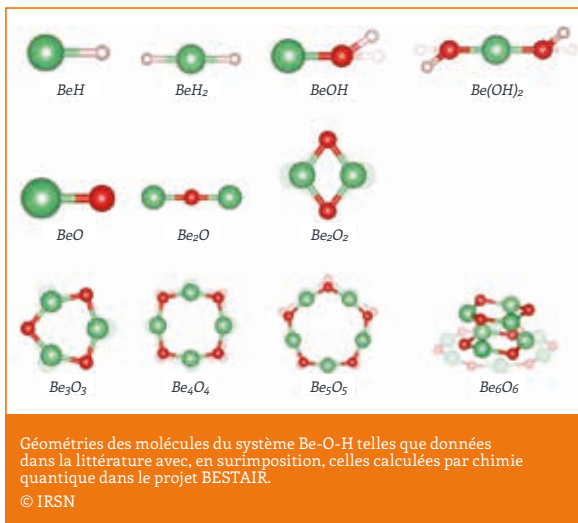
Le projet ITER vise à démontrer s'il est technologiquement possible de produire de l'énergie à partir de la fusion thermonucléaire. En fonctionnement normal, une partie du tritium « imbrulé » ainsi que des masses importantes de poussières de tungstène et de béryllium (produites par l'érosion des parois internes) s'accumuleront dans la chambre à vide d'ITER au fil des décharges. La conception prévoit que, si une entrée d'eau ou d'air s'y produisait accidentellement, les poussières et les gaz seraient retenus par des systèmes de filtration. Le rôle de l'IRSN est d'en évaluer l'efficacité. Pour cela, les espèces chimiques gazeuses (plus délicates à filtrer) présentes doivent être quantifiées et leur transport dans l'installation évalué.

Nouvelle interprétation des données

Le projet BESTAIR⁽¹⁾ a porté sur la thermodynamique des molécules gazeuses associant béryllium, oxygène, hydrogène et tritium (T). Sa nouveauté par rapport aux études antérieures réside dans la prise en compte simultanée du tritium et du béryllium pour évaluer les rejets accidentels de l'installation (le premier posant un problème radiologique et le second étant extrêmement toxique). Dans une première étape, les enthalpies de formation des oxydes (BeO , Be_2O , Be_nO_n avec $n < 7$), des hydroxydes (BeOH et $\text{Be}(\text{OH})_2$) et des hydrures (BeH , BeH_2) ont été réévaluées, sur la base de calculs des constantes structurales et vibrationnelles des molécules gazeuses et d'une nouvelle interprétation des données expérimentales spectrométriques disponibles dans la littérature.

L'analyse a été complétée par des calculs de chimie théorique pour les espèces présentant les plus grandes incertitudes et pour les molécules tritiées. Ceux-ci ont été conduits avec dif-

férentes méthodes relevant de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT), pour prendre en compte les effets quantiques dits « d'échange et corrélation » résultant des interactions entre électrons dans les molécules. La comparaison avec les données expérimentales jugées comme les plus fiables a permis de sélectionner, pour l'ensemble des espèces du système chimique Be-O-H-T, une approche empirique⁽²⁾ pour exprimer le potentiel d'échange et corrélation en fonction du Laplacien de la densité électronique.



Les données thermodynamiques ainsi obtenues ont été intégrées dans le logiciel ASTEC^{GL0} récemment étendu à ITER. Le transfert des espèces chimiques depuis la chambre à vide vers différentes zones de l'installation a ainsi pu être simulé et les rejets potentiels quantifiés. Les travaux se poursuivent pour prendre en compte la présence de tungstène, et l'interaction chimique des gaz, notamment le tritium, avec les poussières de béryllium.

CONTACT

Marc Barrachin
marc.barrachin@irsn.fr

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

⁽¹⁾ *Beryllium Source Term due to an Accident in the ITER experimental reactor.*

⁽²⁾ *de type Meta-GGA, Van Voorhis T.V. and Scuseria G.E., Journal of Chemical Physics 2 (1998) 410.*

PUBLICATIONS

• Virof F., Barrachin M. *et al.* « Theoretical prediction of thermodynamic properties of tritiated beryllium molecules and application to ITER source term » *Fusion Engineering and Design* 89 (2014) 1544-1550.

Coupler les DISCIPLINES SCIENTIFIQUES pour mieux connaître les effets sanitaires de L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE à l'uranium

 IRSN (France), BIS (Allemagne), PHE, Nuvia Limited et AWE (Royaume Uni), SCK-CEN (Belgique), SURO (République tchèque), CREAL (Espagne), Institut Curie (France)

CONTACT

Dominique Laurier
dominique.laurier@irsn.fr

Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants – LEPID

⁽¹⁾ *Concerted Uranium Research in Europe*

⁽²⁾ *française, anglaise et belge*

⁽³⁾ *française, allemande et tchèque*

PUBLICATION

• Report for an integrated (biology-dosimetry-epidemiology) research project on occupational Uranium exposure. DOREMI. Disponible sur www.doremi-noe.net

 En savoir plus sur le projet CURE



Les connaissances sur les effets d'une exposition chronique à l'uranium butent sur les limites propres à chaque discipline qui s'y intéresse. Le projet CURE⁽¹⁾ propose une démarche scientifique couplant épidémiologie, biologie, toxicologie et dosimétrie pour dépasser ces limites.



Mineur d'uranium à Saint-Priest La Prugne – 1957
Archives historiques CEA @ CEA/Pierre Jahan - J123

Trois niveaux d'analyse

Un nouveau protocole de recherche a été élaboré avec trois niveaux d'analyse. Le premier est la réalisation d'un bilan épidémiologique de mortalité d'une puissance statistique importante qui met en commun trois cohortes ⁽²⁾ de travailleurs du cycle du combustible et trois cohortes ⁽³⁾ de mineurs d'uranium exposés à de faibles niveaux de radon, suivies sur une longue durée. Le projet CURE a démontré que l'analyse combinée de ces cohortes est possible. Le second niveau d'analyse concerne la quantification de la relation entre la dose reçue et le risque de décès par différentes pathologies (relation dose-réponse). Les analyses seront effectuées sur des sous-groupes des cohortes, pour lesquels les informations disponibles permettent de calculer la dose reçue par les organes.

Épidémiologie moléculaire

Enfin, les partenaires ont montré la faisabilité d'études d'« épidémiologie moléculaire », permettant l'analyse des effets observés en regard de marqueurs biologiques. Le protocole prévoit de sélectionner des groupes issus des cohortes, permettant de collecter des échantillons biologiques afin de constituer une biobanque. Deux types d'analyses sont envisagés : celle de biomarqueurs spécifiques d'organes connus comme étant des cibles de l'uranium ; et des analyses à large spectre à l'aide de techniques OMICS déjà explorées sur l'animal (*voir Aktis n°15*). Le protocole prévoit également une méthode harmonisée pour reconstruire les doses individuelles internes et externes reçues annuellement, et une méthode statistique adaptée à chaque niveau d'analyse. Le développement de ce protocole constitue une démarche scientifique pluridisciplinaire novatrice qui pourra être appliquée dans le cadre d'un futur projet Européen.

Les travailleurs dans les installations du cycle du combustible nucléaire sont potentiellement exposés à de faibles doses d'uranium, et ce, de manière chronique. La gestion de ce risque repose sur un suivi médical précis et l'application des règles de radioprotection internationales. Cependant, ce risque demeure scientifiquement insuffisamment caractérisé. Des programmes expérimentaux sur le rongeur ont mis en évidence des effets biologiques mais l'implication de ces résultats sur la santé humaine reste à clarifier. Quant aux études épidémiologiques disponibles, elles manquent de puissance statistique et de précision sur la reconstruction des doses dues à la contamination interne par l'uranium.

L'action concertée européenne CURE développée dans le cadre du réseau européen DOREMI, visait à élaborer une nouvelle démarche scientifique en combinant les approches de l'épidémiologie, la biologie, la toxicologie, et la dosimétrie pour améliorer la quantification du risque sanitaire lié aux expositions professionnelles à l'uranium.

Les résultats de L'ÉTUDE INWORKS sur les LEUCÉMIES confortent les fondements du système de RADIOPROTECTION INTERNATIONAL

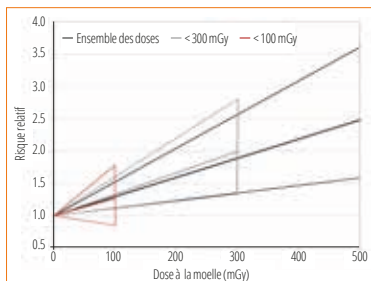
Le système international de radioprotection est fondé sur le risque de développer un cancer à la suite d'une exposition aux rayonnements ionisants qui a été estimé à partir des études sur les survivants des bombardements à Hiroshima et Nagasaki. Les résultats de l'étude INWORKS confortent ce fondement pour ce qui est du risque de leucémie.

Le système actuel de radioprotection des travailleurs est fondé sur une extrapolation des connaissances des risques radio-induits, qui sont issues du suivi épidémiologique des survivants des bombardements à Hiroshima et Nagasaki. La validation de cette extrapolation pour des expositions chroniques à de faibles doses de rayonnements (cas des travailleurs) était à ce jour limitée par les effectifs et les durées de suivi trop courtes des études épidémiologiques réalisées jusqu'ici. Le projet international INWORKS (*International Nuclear Workers Study*) a été élaboré pour mieux caractériser la relation entre une exposition prolongée à de faibles doses de rayonnements ionisants et la mortalité par cancers ou par maladies non cancéreuses.

308 297 travailleurs

Il s'agit de la première étude épidémiologique de cette puissance⁶¹⁰. Elle a été réalisée sur une cohorte de 308 297 hommes et femmes ayant travaillé dans l'industrie nucléaire à partir des années quarante, surveillés pour une exposition externe aux rayonnements et suivis en moyenne sur 27 ans. La cohorte est constituée des trois cohortes de travailleurs les plus riches en informations⁽¹⁾. Pour pouvoir réaliser ce rapprochement de cohortes et l'analyse conjointe des données, un protocole commun a été adopté en standardisant les critères d'inclusion des travailleurs et en vérifiant l'homogénéité et la qualité des données ; une méthode commune pour reconstituer les doses individuelles reçues aux organes a été appliquée. Les premiers résultats publiés indiquent 531 décès par leucémie (hors leucémie lymphoïde chronique - LLC) dans la cohorte. Ils montrent que le risque de décès par leucémie (hors LLC) est multiplié par un facteur 4 pour une augmentation de la dose reçue à la moelle osseuse

de 1 000 mGy, sachant que la dose moyenne à la moelle osseuse cumulée par ces travailleurs est de 16 mGy. Cette relation reste statistiquement significative pour les travailleurs ayant reçu une dose à la moelle osseuse en dessous de 300 mGy, qui représentent 99 % des individus inclus dans l'étude. En dessous de 100 mSv (94 % des individus inclus dans l'étude), la pente de la relation dose-risque est très similaire



mais elle n'est plus statistiquement significative, soulignant ainsi la persistance des incertitudes sur les effets d'expositions à de très faibles niveaux de dose.

Relation dose-mortalité

INWORKS montre qu'il existe bien une corrélation entre la dose reçue à la moelle osseuse et la mortalité par leucémie pour des adultes exposés à de faibles doses répétées de rayonnements ionisants. Cette relation est de plus similaire à la relation dose-réponse estimée pour les hommes exposés entre 20 et 60 ans aux bombardements japonais (87 % de la cohorte INWORKS sont des hommes). Ces premiers résultats confortent l'une des bases du système de radioprotection actuel : l'hypothèse d'une persistance d'un risque radio-induit aux faibles doses répétées délivrées à faibles débits de dose.



CONTACT

Klervi Leuraud
klervi.leuraud@irsn.fr
Laboratoire
d'épidémiologie
des rayonnements
ionisants - LEPID

Risque relatif de décès par leucémie (hors leucémie lymphoïde chronique) en fonction de la dose cumulée à la moelle osseuse (délai de latence de deux ans), pour des intervalles de doses restreints (représentés avec des intervalles de confiance à 90 %). INWORKS, 1943-2005.

© IRSN

⁽¹⁾ La française (travailleurs d'Areva, du CEA et d'EDF), l'anglaise (*National Registry of Radiation Workers - NRRW*) et l'américaine (travailleurs des *Departments of Energy and Defense*).

PUBLICATIONS

• Leuraud K. et al. « Ionizing Radiation and Leukaemia and Lymphoma: Findings from an international cohort study of radiation-monitored workers (INWORKS) », *the Lancet Haematology*, publiée en ligne le 21 juin 2015.

FUKUSHIMA: localiser le COMBUSTIBLE FONDU à l'aide de la SIMULATION

 1^{re} phase de BSAF : seize organisations issues de huit pays (France, Allemagne, Corée, Russie, Espagne, Suisse, États-Unis et Japon). 2^{ème} phase de BSAF avec aussi le Canada, la Chine et la Finlande


CONTACTS

Hervé Bonneville
herve.bonneville
@irsn.fr

Bureau d'études
et d'expertises en
accident grave et rejets
radioactifs - B2EGR

Didier Jacquemain
didier.jacquemain
@irsn.fr

Service des accidents
graves - SAG

 En savoir plus
sur BSAF



Après l'accident de Fukushima, l'un des enjeux technologiques pour le gouvernement japonais est d'assainir le site sachant que le cœur de trois des réacteurs a fondu. Extraire ce combustible fondu de structures fortement endommagées dans une ambiance de radioactivité extrême nécessite de pouvoir le localiser et d'en connaître les caractéristiques. Le ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie a fait appel à l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) pour mobiliser les acteurs disposant de logiciels de simulation d'accidents graves. À l'aide de ces outils, le projet BSAF lancé par l'AEN vise à reconstituer par la simulation la progression de l'accident des réacteurs de Fukushima. Pour l'IRSN, il constitue une opportunité unique d'accéder aux données d'une situation réelle afin de vérifier la capacité de simulation des logiciels. L'IRSN participe à ce programme avec le code ASTEC, validé notamment à l'aide des expériences Phébus menées par l'Institut entre 1986 et 2004. La première phase du projet BSAF s'est achevée fin 2014, fournissant des éléments de compréhension sur la progression de l'accident dans les réacteurs 1 à 3.

Le projet BSAF (*Benchmark Study of the Accident at the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station*) a été lancé par l'AEN en octobre 2012 pour aider les autorités japonaises à reconstituer le déroulement des accidents de fusion du cœur qui se sont déroulés en mars 2011 sur les réacteurs 1 à 3 de la centrale de Fukushima-Daiichi. Il s'agit entre autres de préparer le démantèlement des réacteurs dans les années futures notamment en localisant le combustible fondu. Le projet rassemble les équipes qui ont développé, depuis l'accident de Three Mile Island, des logiciels de simulation d'accidents graves. Le projet BSAF a également pour objectif de permettre un benchmark pour ces logiciels à partir des données issues de cette situation réelle, afin d'en améliorer les méthodes et les modèles intégrés.

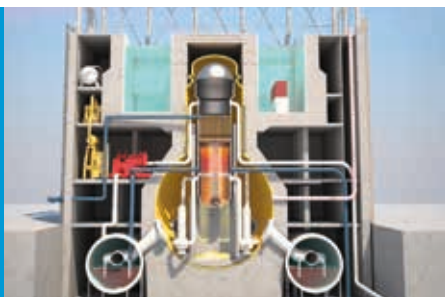
Le projet se déroule en deux phases. La première, qui s'est achevée à la fin de 2014, visait à reconstituer les phénomènes physiques qui se sont déroulés sur une période de six jours, en particulier la dégradation du cœur dans la cuve et, le cas échéant, la rupture de la cuve puis la progression du cœur fondu dans l'enceinte. La seconde phase, qui va plus loin dans la reconstitution de l'accident, vient de commencer.

Programmes expérimentaux intégraux

L'équipe de l'IRSN utilise le logiciel ASTEC^{GLO}, qui est développé de longue date par l'Institut et par son homologue allemand *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GmbH* (GRS) pour constituer la référence européenne en matière de simulation des accidents graves. La pertinence des simulations d'ASTEC repose sur des modèles qui ont été validés sur un large spectre d'expériences, dont des expériences dites intégrales, qui permettent de reproduire la majeure partie des phénomènes pouvant survenir dans un réacteur lors d'un accident de fusion du cœur. Il s'agit notamment de celles réalisées entre 1986 et 2004 dans le cadre des programmes Phébus CSD et Phébus PF. Le programme Phébus CSD, réalisé avec du combustible neuf, a permis d'étudier le début de la dégradation du cœur ; le

Schéma
d'un réacteur
de Fukushima
après
l'accident.

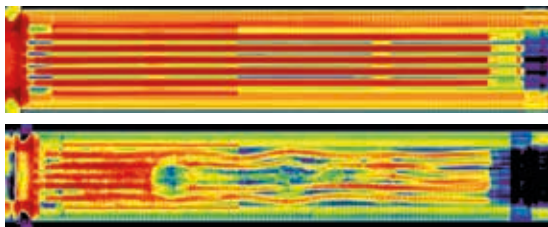
© IRSN /
Xavier
Corbeau



programme Phébus PF, réalisé avec du combustible irradié, a analysé la dégradation avancée du cœur, jusqu'à la formation d'un bain de corium, ainsi que le comportement des produits de fission dans le réacteur. Les modèles de dégradation du cœur ont été aussi validés sur des essais tels que CORA et QUENCH réalisés en Allemagne par le Karlsruhe Institute of Technology. L'un des principaux résultats des programmes PHEBUS a été que les interactions entre le combustible et les matériaux de structure (en particulier le Zirconium des gaines) contribuent, même en conditions oxydantes, à la fusion du cœur vers 2 200 °C, bien en dessous de la température de fusion de l'UO₂, à 2 800 °C. Par ailleurs, les expériences MASCA et RASPLAV réalisées en Russie ont complété le panel des données pour ce qui concerne le comportement du corium en fond de cuve. Ces essais ont été réalisés à échelle réduite, et le projet BSAF offre une opportunité de vérification à l'échelle du réacteur des capacités des logiciels et notamment d'ASTEC à décrire la progression des accidents graves.

Fusion complète du cœur du réacteur 1

Pour réaliser la première phase du projet BSAF, les équipes sont parties des enregistrements des opérations et des mesures réalisées pendant l'accident par l'exploitant, ainsi que des événements survenus sur les trois réacteurs accidentés. La difficulté des calculs réside dans la très grande incertitude sur certaines données et dans leur nombre limité, ce qui nécessite de poser des hypothèses *a priori*. Pour le réacteur n°1, les différents logiciels utilisés donnent des résultats concordants sur l'état du réacteur. Ils concluent à une fusion complète du cœur et des structures internes, constituant une sorte de magma appelé corium, et une rupture de la cuve du réacteur dans la nuit du 11 au 12 mars. La dégradation du cœur s'est accompagnée d'une importante production d'hydrogène qui varie selon les évaluations entre 350 et 1 000 kg. Une partie a fui de l'enceinte, en raison de la pression et de la température trop élevées, et s'est accumulée dans le local où se trouve la piscine d'entreposage des combustibles usagés entraînant l'explosion qui a endommagé la partie supérieure du bâtiment réacteur. Ils prédisent par ailleurs qu'une quantité très importante de corium s'est écoulée sur le radier en béton de l'enceinte de confinement qui a été partiellement érodé.



Les expériences sur le réacteur Phébus ont été menées avec des cœurs constitués de 21 tronçons de crayons de combustible et 1 barre de contrôle, d'une longueur de 0,80 à 1 m. Ici, une radiographie du cœur avant et après la troisième expérience de la seconde série (FPT3).

© IRSN

Le comportement des réacteurs 2 et 3 durant l'accident est plus difficile à expliquer et la distribution finale des débris de combustible reste très incertaine, en particulier sur le réacteur 2. Ces incertitudes sont liées, d'une part, aux systèmes de secours qui ont injecté de l'eau une quarantaine d'heures sur le réacteur 3 et presque trois jours sur le réacteur 2, sans que les caractéristiques précises de leur fonctionnement soient connues. D'autre part, lorsque ces systèmes se sont arrêtés, de l'eau a été injectée à l'aide de camions de pompiers mais les quantités réellement déversées dans les cuves sont imprécises. Il y a cependant consensus pour considérer que ces injections ont débuté alors que les cœurs étaient déjà fortement dégradés mais que le corium ne s'était pas encore écoulé au fond de la cuve.

Corium en fond de cuve

Les simulations numériques permettent également d'obtenir des informations sur la composition du corium. Celles-ci seront utiles pour définir les opérations de découpe et de collecte du corium avec des marges de sûreté suffisantes vis-à-vis des risques de départ d'incendie (pyrophoricité du zirconium, notamment) ou de retour en criticité. La composition du corium peut être affectée en fond de cuve par un phénomène observé au cours des essais MASCA et désormais modélisé dans ASTEC. En fonction du taux d'oxydation des gaines en zirconium du combustible, une partie de l'oxyde d'uranium peut se transformer en uranium métal et former avec l'acier et le zirconium une couche liquide qui va alors modifier la localisation du point de rupture de la cuve. Dans les simulations menées avec ASTEC, cette couche peut représenter de 18 à 30 % de la masse d'uranium en fond

En savoir plus
sur ASTEC



PUBLICATIONS

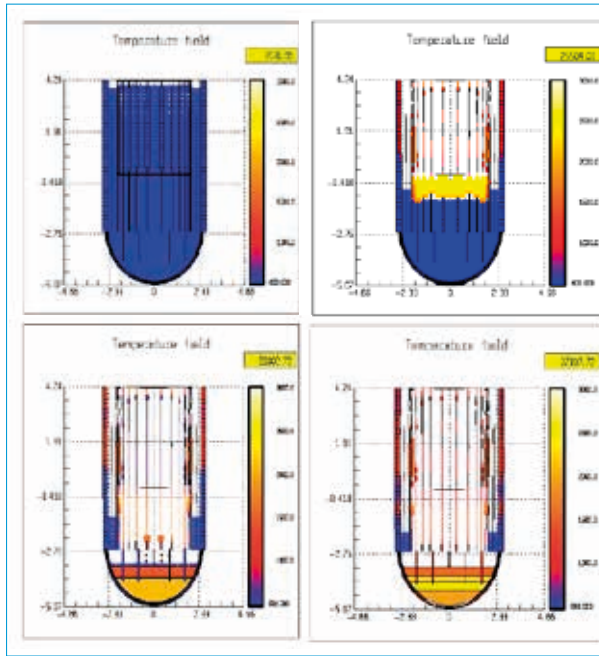
- De Luze O. *et al.* « Early phase fuel degradation in Phébus FP: Initiating phenomena of degradation in fuel bundle tests » *Annals of Nuclear Energy* 61 (2013) 23-35.
- Barrachin M. *et al.* « Late phase fuel degradation in the Phébus FP tests » *Annals of Nuclear Energy* 61 (2013) 36-53.
- Haste T. *et al.* « A comparison of core degradation phenomena in the CORA, QUENCH, Phébus SFD and Phébus FP experiments » *Nuclear Engineering and Design* 283 (2015) 8-20.

PUBLICATIONS

• Clément B., Zeyen R. « The objectives of the Phébus FP experimental programme and main findings » *Annals of Nuclear Energy* 61 (2013) 4-10.

• Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Summary Report - June 2015 - Disponible sur le site de l'AEN www.oecd-nea.org/jointproj/bsaf.html

• Bonneville H., et al « Fukushima core melt composition simulation with ASTEC », *Nureth-16*, 30 août-4 septembre 2015, Chicago, Etats-Unis.



Champ de température dans la cuve pour 4 temps caractéristiques différents (en secondes à partir du tremblement de terre, dans les cartouches jaunes) : lorsque le niveau d'eau atteint le haut des assemblages de combustible (en haut à gauche) ; lorsque la plupart des matériaux endommagés se sont écoulés juste au-dessus de la plaque support du cœur (en haut à droite) ; au moment de l'effondrement juste après la rupture de la tuyauterie (en bas à gauche) ; et au moment du percement de la cuve (en bas à droite)

© IRSN

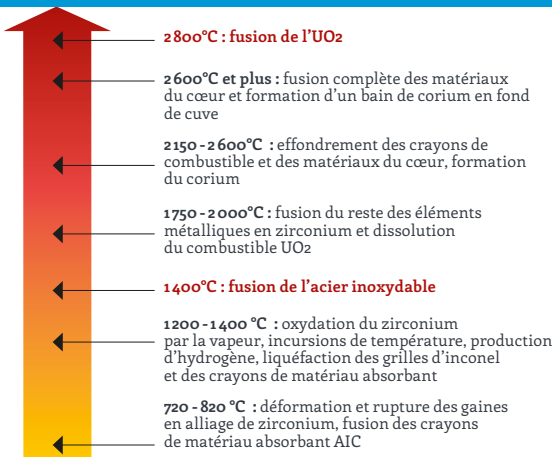
de cuve selon qu'il s'agisse des réacteurs 1, 2 ou 3. Lors de l'interaction avec le béton, l'uranium métallique sera, comme le zirconium, rapidement oxydé mais si la cuve n'est pas percée ou que l'ouverture reste de petite taille, ce qui est possible sur les réacteurs 2 et 3, de l'uranium métallique pourrait subsister dans la cuve.

Le projet BSAF a ainsi fourni des résultats sur la localisation du cœur dégradé et des débris formés dans les trois zones importantes (le cœur, le fond de cuve et l'enceinte de confinement) et des indications importantes pour élaborer des stratégies de démantèlement. La comparaison des résultats de calculs menés par les différentes équipes met en lumière à la fois les incertitudes sur les scénarios supposés de l'accident (quels équipements fonctionnaient ? à quel moment ? quelles ont été les actions des opérateurs ?) et celles relatives à la modélisation des phénomènes physiques, pointant les améliorations à apporter aux logiciels.

La seconde phase du projet BSAF vise à poursuivre les simulations sur une plus longue période de temps et à traiter également du relâchement et du transfert des produits radioactifs vers l'environnement pour les trois réacteurs accidentés ce qui devrait permettre d'affiner les résultats en discriminant différents chemins de fuite.

En parallèle, des réflexions ont été engagées dans le cadre de l'AEN pour définir les examens, prises d'échantillons et analyses qui pourraient fournir de nouvelles informations et accroître les connaissances sur les accidents de fusion du cœur pour mieux les maîtriser.

Principaux phénomènes physiques en jeu lors de la fusion d'un cœur de réacteur nucléaire



Mieux ÉVALUER la DOSE délivrée en STÉRÉOTAXIE

Les techniques et protocoles de dosimétrie actuels ne sont pas complètement adaptés aux mini-faisceaux utilisés en radiothérapie stéréotaxique. Une thèse menée à l'IRSN a permis d'évaluer les performances de différents dosimètres et d'algorithmes utilisés pour calculer la dose à délivrer, en vue d'améliorer ces traitements.

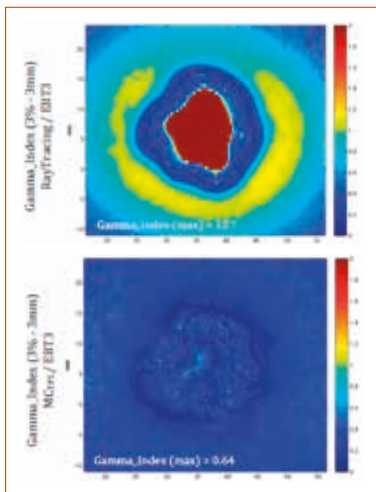
Basée sur des mini-faisceaux de photons, la radiothérapie stéréotaxique cible très précisément des tumeurs difficiles d'accès. Cependant, les techniques de dosimétrie actuelles ne permettent pas d'évaluer de manière assez fiable la dose réellement délivrée au patient. En 2006-2007, ceci avait conduit à un surdosage pour 145 patients à l'hôpital Rangueil de Toulouse. Dans le cadre d'un programme de recherche sur ce sujet initié par l'IRSN en 2009, une thèse vient d'être conduite sur deux appareils de radiothérapie stéréotaxique. Elle a permis d'établir des facteurs de correction pour différents dosimètres et d'évaluer deux algorithmes utilisés pour calculer la dose à délivrer au patient.

Les films radiochromiques fiables

Le doctorant Cyril Moignier a d'abord déterminé le plus précisément possible les données dosimétriques de base de ces deux appareils, tel le facteur d'ouverture du collimateur (FOC) ; la fiabilité de ces données est cruciale car elles servent à paramétrer le logiciel de planification de traitement (TPS) qui calcule la dose à délivrer au patient. Pour y parvenir, il a modélisé les appareils grâce à un code Monte-Carlo qui simule le transport de particules. En comparant les données simulées à celles mesurées par différents dosimètres, il a ainsi pu déterminer les facteurs correctifs à leur appliquer. Résultat : seuls les dosimètres passifs de type films radiochromiques peuvent être utilisés sans facteur correctif.

Un algorithme à privilégier

Cyril Moignier a ensuite évalué deux algorithmes de calcul implémentés dans le TPS. Pour cela, il a développé un protocole basé sur les films radiochromiques pour mesurer la dose délivrée à un patient fictif ayant une tumeur au poumon. Cette « mesure »



Évaluation des algorithmes : comparaison entre la mesure par films radiochromiques EBT3 et le calcul par le TPS (algorithme 1 en haut et 2 en bas) à l'aide du critère de gamma index (plus l'accord est bon, plus le gamma index doit tendre vers 0).

© C. Moignier / IRSN

a été utilisée pour valider les algorithmes. Le premier est souvent privilégié par les cliniciens car il est rapide, mais il procède par approximations ; le second est plus précis mais nécessite des temps de calcul non compatibles avec les contraintes de la clinique. Bilan : le premier a tendance à surestimer la dose dans le volume cible et à la sous-estimer hors champ (organes sensibles environnants). Le second est en accord avec la mesure et est donc à privilégier pour ce type de tumeur ; des développements seront toutefois nécessaires pour rendre ses temps de calcul plus compatibles avec la clinique.

Cette thèse a donc contribué à l'établissement d'un protocole de mesure des FOC et fournit des éléments clés pour développer des dosimètres actifs adaptés aux mesures dans les conditions de la stéréotaxie.



CONTACT

Christelle Huet
christelle.huet@irsn.fr
Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants - LDRI

PUBLICATIONS

• *Dosimétrie des faisceaux de photons de petites dimensions utilisés en radiothérapie stéréotaxique.* Thèse soutenue par Cyril Moignier le 10 octobre 2014 à Paris.



• Moignier C. *et al.*, « Determination of the $k(f_{clin}, f_{msr})$ (Qclin, Qmsr) correction factors for detectors used with an 800 MU/min CyberKnife® system equipped with fixed collimators and a study of detector response to small photon beams using a Monte Carlo method », *Med. Phys.*, 2014, 41(7).
• Moignier C. *et al.*, « Determination of small field output factors and correction factors using a Monte-Carlo method for a 1000 MU/min CyberKnife® system equipped with fixed collimators », *Radiat. Measur.*, 2014, 71, 287-292.

CONTACT

Guillaume Phan
guillaume.phan
@irsu.fr

Laboratoire de
radiochimie - LRC

⁽¹⁾ Substance qui peut fixer des ions métalliques en constituant avec eux un composé soluble et stable

⁽²⁾ Du 1,3,5-OCH₃-2,4,6-OCH₂COOH-p-tertbutylcalix[6]arène

PUBLICATIONS

• Étude de la toxicité *in vitro* et de l'efficacité *ex vivo* et *in vivo* de formes galéniques de calixarène développées pour le traitement des contaminations cutanées dues à des composés d'uranium, thèse de Sophie Grivès soutenue le 13 mars 2015.



Une formule galénique efficace pour des CONTAMINATIONS CUTANÉES par L'URANIUM

Testée sur des rats, une nanoémulsion contenant un chélateur de la famille des calixarènes s'est avérée bien plus efficace qu'un traitement d'urgence standard à base d'eau savonneuse. Son innocuité est confirmée *in vitro* sur de l'épiderme humain.

Dans l'industrie nucléaire, l'un des principaux risques de contamination est la voie cutanée, particulièrement préoccupante si la peau présente des lésions. À l'heure actuelle, le seul traitement consiste en un rinçage immédiat à l'eau savonneuse. Depuis 2006, l'IRSN et l'Institut Galien Paris Sud développent une nanoémulsion contenant un chélateur⁽¹⁾ de la famille des calixarènes capable de piéger l'uranium⁽²⁾ (voir *Aktis* n°6). Objectif : éviter son passage dans le sang à partir duquel il peut ensuite se fixer dans les reins et les os, avec un risque de voir se développer à terme des pathologies au niveau de ces organes. Sophie Grivès a mené une thèse pour confirmer l'efficacité de cette nanoémulsion *ex-vivo*, la tester *in vivo*, et s'assurer de sa non toxicité *in vitro*.

95 % d'uranium
en moins dans les reins

La doctorante a d'abord confirmé la capacité de cette nanoémulsion à extraire plus de 90 %

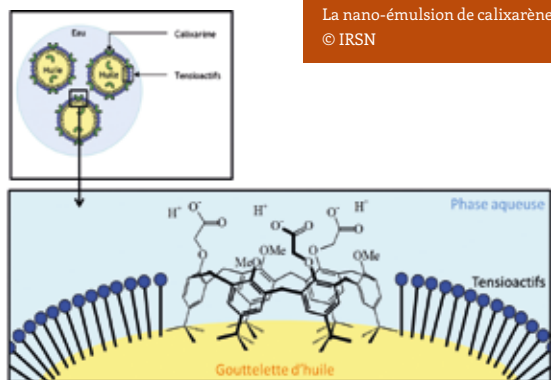
de l'uranium déposé sur des explants de peau de porc (très proche de la peau humaine), et présentant un plus large éventail de lésions cutanées superficielles : excoriations, micropiqûres et microcupures. Mais surtout, les chercheurs ont étudié son efficacité *in vivo* sur des rats, en contaminant leur peau par de l'uranium. Comparée à l'application immédiate du savon liquide actuellement préconisé, celle de la nanoémulsion sur les rats excoriés a réduit de 85 % la teneur en uranium qui se fixe au niveau de leurs fémurs, de 95 % dans leurs reins et de 93 % dans leurs urines. Sur des rats présentant des micropiqûres, la teneur en uranium a également été réduite de 94 % au niveau des reins.

Aucune toxicité sur des épidermes humains reconstitués

La toxicité de la nanoémulsion a ensuite été évaluée sur des épidermes humains reconstitués *in vitro* par culture de cellules humaines, via trois tests différents permettant de mesurer le potentiel irritant, l'intégrité des membranes cellulaires et l'inflammation. Les chercheurs n'ont observé ni irritation, ni dommage cutané ou d'effet inflammatoire ; et ce même après application prolongée de la nanoémulsion, jusqu'à 24 heures.

Dans l'optique d'une application clinique, plusieurs étapes devront encore être franchies afin de se rapprocher de l'homme : des tests complémentaires sur des explants de peau humaine et des études *in vivo* sur d'autres modèles animaux que le rongeur. La molécule de calixarène ayant également un pouvoir complexant vis-à-vis d'autres actinides tels le plutonium, il serait utile de vérifier l'efficacité de la formule galénique pour élargir son spectre d'application.

La nano-émulsion de calixarène
© IRSN



PRIX

THÈSES

Nadia Benabdallah doctorante en 1^{re} année de thèse à l'IRSN a reçu le prix du meilleur poster lors du congrès de la Société française de radioprotection (SFRP) qui s'est tenu du 16 au 18 juin 2015, sur l'étude du premier médicament radiopharmaceutique émetteur alpha qui a reçu une autorisation de mise sur le marché (AMM), le dichlorure de radium 223 (ou Xofigo).

Lors de ce même congrès, une ancienne doctorante de l'IRSN, **Alice Petitguillaume**, a reçu le 2^e prix Henri Jammet du jeune professionnel de la radioprotection. Sa présentation récompensée « Dosimétrie Monte Carlo personnalisée pour la planification et l'évaluation des traitements de radiothérapie interne : application aux traitements des cancers hépatiques par 90Y-microsphères » porte sur ses travaux sur la radiothérapie interne sélective.

COLLABORATION

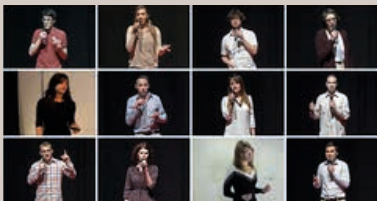
L'IRSN RENFORCE SES RELATIONS AVEC LE NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH (NIH)

L'IRSN vient d'obtenir un financement du NIH (*National Institutes of Health*), agence nationale de recherche en santé et en biomédecine (États-Unis), pour un projet-pilote d'un an sur l'évaluation des effets thérapeutiques des exosomes dans le syndrome gastro-intestinal.

VIDÉOS

NOUVELLES VIDÉOS EN LIGNE « 3 MINUTES POUR UNE THÈSE »

Le premier concours « 3 minutes pour une thèse » de l'IRSN s'est déroulé le 31 mars pendant les Journées des thèses, séminaire dédié aux



doctorants de l'Institut. Dix concurrents se sont mesurés pour présenter leurs trois années de thèse en trois minutes, de la façon la plus intéressante et la plus claire possible. Les vidéos sont mises en ligne à raison d'une nouvelle tous les 15 jours.

D'UNE GÉNÉRATION À L'AUTRE, COMMENT LA RECHERCHE A-T-ELLE ÉVOLUÉ ?

Un échange filmé entre **Hélène Langevin-Joliot**, fille de Frédéric Langevin et d'Irène Joliot-Curie, docteur d'État en physique nucléaire fondamentale, et **Alexandra Moignier**, docteur en physique, spécialisée en physique médicale, et qui a mené une thèse sur la dosimétrie cardiovasculaire à l'IRSN. Les vidéos tentent de répondre à la



question de l'évolution de la recherche scientifique d'une génération à l'autre sous quatre angles : le rapport entre science et société ; sciences et engagement ; honnêteté et éthique ; conseils aux femmes pour leur carrière.

SOUTENANCES

HDR

Emmanuel Porcheron a soutenu son HDR *Diagnostics des milieux multiphasiques en conditions hostiles : Application à l'aérodispersion des polluants gazeux et particulaires*, jeudi 11 juin 2015 à Saclay.

THÈSES

Deux doctorants de l'IRSN ont soutenu leur thèse avant l'été.

- **Adrien Margerit**, le 22 juin 2015 à Saint-Paul-lez-Durance, *Étude des effets combinés de l'uranium et du cadmium chez le nématode Caenorhabditis elegans*
- **Sarah Baghdadi**, le 27 mai 2015 à Orsay, *Analyse en situation de crise des actinides dans les urines par couplage entre les colonnes calix[6]arènes et un spectromètre de masse à plasma induit.*

+

En savoir plus sur la thèse de Nadia Benabdallah et d'Alice Petitguillaume



+

En savoir plus sur l'accord avec le National Institutes of Health (NIH)



+

Voir les nouvelles vidéos en ligne « 3 minutes pour une thèse »



+

Voir les vidéos de l'échange entre Hélène Langevin-Joliot et Alexandra Moignier



+

En savoir plus sur la soutenance d'Emmanuel Porcheron



ASTECC :

le système de logiciels ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) simule les phénomènes qui interviendraient au cours d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression, depuis l'événement initiateur jusqu'à l'éventuel rejet de produits radioactifs (dit « terme source ») à l'extérieur de l'enceinte de confinement. ASTEC est développé en commun depuis de nombreuses années par l'IRSN et par son homologue allemand *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit GmbH* (GRS).

PUISSANCE STATISTIQUE D'UNE ÉTUDE :

dans le cas de cette étude, indique la capacité de l'étude à détecter un excès de leucémies associé à la dose reçue par les travailleurs.

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