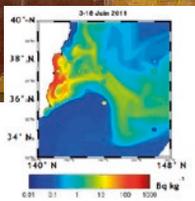
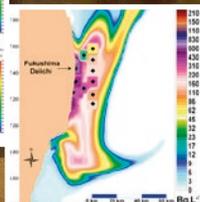
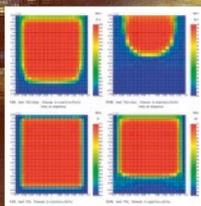


**NUMÉRO  
SPÉCIAL**

## LA RECHERCHE *sur* les accidents de réacteurs nucléaires, 5 ans après FUKUSHIMA





Photos de couverture:  
Réacteurs 1, 2 et 3 de la centrale  
de Fukushima-Daiichi, le 17 mars 2011.  
© TEPCO

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](http://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.groupeougevil.fr](http://www.groupeougevil.fr) - 52061 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

## PANORAMA

PAGE 3

La recherche sur les accidents de réacteurs nucléaires, après Fukushima

## AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGES 5 À 14

Efficacité et maîtrise d'une injection d'eau dans un cœur en fusion

Mieux prévenir le risque d'explosion d'hydrogène

Intercomparaison de résultats issus de modèles de dispersion de la contamination au Japon

Mieux modéliser la contamination des forêts pour soutenir la gestion du long terme

De l'importance d'estimer précisément les doses de rayonnement absorbées

Modéliser la contamination des poissons

La gestion de l'accident sous l'angle des facteurs organisationnels et humains

Comparaison de mesures faites par des lycéens en quête d'une culture de radioprotection

## VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 15

La stratégie scientifique de l'IRSN

## Glossaire <sup>GLO</sup>

PAGE 16

# LA RECHERCHE *sur les accidents* de réacteurs NUCLÉAIRES, après FUKUSHIMA

L'accident de Fukushima a mis en lumière une fenêtre de vulnérabilité des installations nucléaires, subsistant malgré les importants progrès réalisés en matière de sûreté : un cumul de circonstances, notamment d'origine naturelle, peut conduire à des rejets massifs de radioactivité aux conséquences très graves. Pour faire progresser la sûreté en cohérence avec les attentes de la société, les efforts doivent être portés selon trois axes interdépendants. Il faut d'une part renforcer le contrôle des installations nucléaires, cela a été mené dans le cadre des ECS<sup>(1)</sup>. Il est, d'autre part, nécessaire d'accroître les exigences internationales de certification des réacteurs (directives et normes). Il est enfin fondamental de poursuivre des efforts ciblés de recherche débouchant sur des améliorations concrètes pour les installations. La France est l'un des rares pays où cet axe a été soutenu par les pouvoirs publics à travers le Programme « Investissements d'avenir »<sup>(2)</sup>. L'IRSN a restructuré ses programmes dans l'objectif de ces recherches, et l'a inscrit dans la stratégie de recherche qu'il vient de publier.

La France est un pays qui œuvre de longue date pour anticiper l'éventualité d'un accident de fusion du cœur sur un réacteur nucléaire et savoir le maîtriser. D'importants programmes de recherche ont été menés à la suite de l'accident de Three Mile Island aux États-Unis en 1979, notamment par l'IRSN ou à son instigation. Les connaissances acquises ont permis de faire évoluer le niveau de sûreté des réacteurs existants et d'intégrer cette préoccupation dans le développement des nouveaux réacteurs, tant au niveau national qu'international. La sûreté est fondée sur le concept de « défense en profondeur » : des niveaux de protection successifs et autant que possible indépendants, créés à la conception de l'installation, visent à ramener à un niveau extrêmement faible le risque qu'un accident puisse avoir des conséquences graves à l'extérieur de la centrale.

Or, en provoquant la perte totale et prolongée de l'alimentation électrique des réacteurs de Fukushima, le tsunami a neutralisé la plus grande partie des dispositifs de contrôle et des systèmes de sauvegarde. Dès 2011, un audit des installations nucléaires, les ECS<sup>(1)</sup>, a été donc mené. Leur objectif était d'évaluer le comportement des installations nucléaires françaises en cas d'agression naturelle extrême, avec une perte totale du refroidissement ou de l'alimentation électrique sur plusieurs installations d'un même site. Pour améliorer leur niveau de sûreté, le concept de « noyau dur » a été inventé

par l'IRSN : des dispositifs permettant le refroidissement du cœur pendant au moins 72 heures doivent être identifiés et rendus résistants aux séismes et inondations les plus importants dans la zone. Ce laps de temps est nécessaire pour donner le temps d'agir à un groupe d'intervention opérationnel de l'exploitant, la FARN<sup>(3)</sup>.

## *Poursuivre l'amélioration des connaissances*

L'accident de Fukushima a aussi montré qu'il fallait impérativement poursuivre l'amélioration des connaissances dans plusieurs domaines. En France, l'Agence nationale pour la recherche (ANR) a lancé en 2012 un appel à projets dans le cadre du Programme « Investissements d'avenir »<sup>(2)</sup> en ce sens. D'autres acteurs, à savoir la Commission européenne (CE) et l'OCDE/AEN<sup>(4)</sup>, ont également soutenu ou favorisé l'émergence de projets. Les projets évoqués ci-après sont ceux dont l'IRSN a pris en main le pilotage.

Plusieurs thématiques investiguées avant Fukushima, et dont l'événement a confirmé l'importance, sont approfondies : les agressions externes tout d'abord, séismes (voir Aktis n° 22) comme inondations ; le développement d'études probabilistes de sûreté intégrant les agressions externes mêmes les plus improbables, compte tenu de leur impact potentiel ; l'efficacité de l'injec-

<sup>(1)</sup> *Évaluations complémentaires de sûreté, audit des installations nucléaires mené dès 2011 à la demande du Premier ministre.*

<sup>(2)</sup> *Le Programme « Investissements d'avenir » est porté par le Commissariat général aux Investissements d'avenir (CGI). Ce dernier a mandaté l'Agence nationale pour la recherche (ANR) pour lancer l'appel à projets « Recherches en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection » (RSNR).*

<sup>(3)</sup> *Force d'action rapide nucléaire disposant de moyens mobiles aéroportés.*

<sup>(4)</sup> *Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE.*

• Programmes sélectionnés par l'ANR et pilotés par l'IRSN : MITHYGÈNE, DENOPI, PERFOI, PROGRES, ICE, AMORAD, MIRE, PRIODAC, AGORAS, RESILIENCE

• Programmes soutenus par la Commission européenne/Euratom (PCRD 7 et H2020) : IVMR, FASTNET, PASSAM, CESAM, ERCOSAM, ASAMPSA-E

• Programmes soutenus par l'OCDE/AEN/CSNI : STEM (2011-2015), PRISME2, BSAF, SFP, THAI-2

+ Voir la description de ces programmes dans la rubrique La recherche du site Internet de l'IRSN



tion d'eau dans un cœur déjà dégradé (programme PROGRES - voir dans ce numéro) ; les explosions de vapeur (programme ICE - voir Aktis n° 14) ou d'hydrogène (programme MITHYGÈNE de l'ANR et programme THAI-2 de la CE - voir dans ce numéro). Autre axe de recherche majeur pour réduire les conséquences d'un accident : la maîtrise des rejets d'éléments radioactifs, notamment de l'iode et du ruthénium. L'IRSN a déjà acquis des connaissances importantes sur les mécanismes de leur relâchement. L'accent est maintenant mis sur l'étude de leur rétention par des filtrations plus efficaces. C'est l'objet du programme MIRE de l'ANR et du programme PASSAM de la CE. Ces travaux enrichiront ASTEC, le logiciel de simulation pour les accidents graves porté par l'IRSN.

L'accident de Fukushima a aussi montré une vulnérabilité des piscines qui stockent le combustible dans les centrales. Le programme DENOPI de l'ANR a pour objectif de comprendre comment se dégraderaient les combustibles si les piscines de stockage n'étaient plus refroidies.

Enfin, l'analyse de la crise à Fukushima sous l'angle des facteurs humains et organisationnels (voir dans ce numéro) permettra d'améliorer la gestion de crises extrêmes. Le programme AGORAS de l'ANR vise à mieux intégrer les facteurs humains et organisationnels dans les différents volets de la sûreté nucléaire. Et le programme SHINRAI est mené en collaboration avec Science Po et Tokyo Tech pour étudier à partir de la situation à Fukushima les conditions gouvernant la confiance de la population dans les institutions.

### Gérer les territoires contaminés et leur impact sur la santé

Du point de vue de la protection de l'environnement et de l'homme, l'accident de Fukushima a montré que les outils de l'IRSN permettent d'évaluer la contamination de l'air et de la mer de manière réactive (l'IRSN a été le premier à publier des cartes de contamination), et pertinente (voir dans ce numéro). Un nouveau modèle a été développé en complément pour évaluer les rejets à partir de données simplifiées (voir Aktis n° 16). Des collaborations se poursuivent avec le Japon pour tenir compte de toutes les données météorologiques dans l'évaluation des dépôts (brouillard et neige) et tester différents modèles de rabattement par

la pluie. Il reste aussi à mettre au point un modèle opérationnel dans le domaine marin (projet STERNE). Par ailleurs, pour adapter les modalités de prise d'iode à un accident présentant des rejets multiples, le programme PRIODAC est soutenu par l'ANR.

Enfin, la complexité des décisions à prendre, et les incertitudes sur les seuils à partir desquels une évacuation des territoires contaminés est nécessaire pour la santé publique, renforcent le besoin de mieux comprendre les effets des expositions chroniques à de très faibles doses de rayonnements. Cet axe de recherche fait partie des principales attentes de la société.

Au-delà de l'urgence, les territoires contaminés et l'impact qu'ils peuvent avoir sur la santé doivent être gérés. Après l'accident de Tchernobyl, plusieurs outils ont été développés pour simuler le transfert des radionucléides dans le sol et les plantes, afin de reconstruire l'état de la contamination et d'évaluer l'impact sur l'homme et les populations animales. Des programmes complémentaires de recherche ont été lancés peu de temps après l'accident de Fukushima, en collaboration avec les Japonais ; le projet Freebird par exemple, qui a étudié les populations d'oiseaux. Ce sujet a été repris récemment pour évaluer quelles doses menaient à un effet visible (voir dans ce numéro). L'un des programmes les plus importants est AMORAD, soutenu par l'ANR et mené avec 13 partenaires dont l'université de Tsukuba. Son objectif est d'améliorer les modèles de dispersion et l'évaluation de l'impact des radionucléides dans l'environnement, utilisables en périodes de crise et post-accidentelles dans trois domaines qui n'ont pas ou peu été traités depuis l'accident de Tchernobyl : l'écosystème forestier (voir dans ce numéro) ; les transferts de radionucléides vers les rivières et les fleuves jusqu'à la mer (dont érosion et sédiments) ; le transfert des radionucléides dans les sédiments et dans les organismes marins (voir dans ce numéro). Un autre programme, EDOFU, vise à aller au-delà, et prédire l'évolution du débit de rayonnement gamma ambiant au fil du temps (voir dans ce numéro).

Le système de recherche français dans ces domaines, dont l'IRSN, a fait ses preuves. Il aidera à relever le défi de ces nouvelles connaissances à acquérir, avec le soutien des pouvoirs publics et des industriels, en prenant appui sur les coopérations scientifiques nationales et internationales.

# EFFICACITÉ et MAÎTRISE d'une INJECTION D'EAU dans un cœur en fusion

La fusion du cœur d'un réacteur nucléaire résulte d'une perte prolongée de son refroidissement. L'enjeu pour la gestion d'un accident de ce type est de le restaurer par tous les moyens. Une possibilité d'injecter de l'eau étant rétablie, comment s'assurer de son efficacité et de la bonne maîtrise des risques associés ?

**A** Fukushima, l'injection d'eau dans les cuves des réacteurs en fusion a probablement été l'une des mesures pertinentes pour arrêter la progression de l'accident. Pour évaluer l'efficacité d'une telle opération tout en contrôlant les risques de relâchement d'hydrogène, de production de vapeur et de montée de pression – qui peuvent générer des explosions et endommager l'enceinte – l'IRSN a lancé dès 2007 le programme PROGRES dont l'objectif est d'analyser et de modéliser les phénomènes physiques qui se produisent après cette injection tardive.

Dans un premier volet du programme, les essais de refroidissement ont été effectués à petite échelle (installation PRELUDE) avec des billes représentant l'amoncellement des matériaux fondus dit « lit de débris », chauffées par induction pour simuler la chaleur de la puissance résiduelle (voir Aktis n° 5 et n° 17). Dans le deuxième volet, est utilisée l'installation PEARL<sup>(1)</sup> de plus grandes dimensions qui représente mieux les conditions d'accident d'un réacteur. Pour les premiers tests, le lit de débris était simulé par des billes d'acier de 4 mm de diamètre, entourées de billes de quartz de 8 mm de diamètre, contenues dans un cylindre de quartz ; ces dernières figurent une zone plus poreuse et moins chaude (observée lors de l'accident de Three Mile Island en 1979) dite zone de « by-pass » où l'eau peut dans certaines conditions passer plus facilement, et contourner la partie endommagée fondue du cœur et donc sans efficacité pour son refroidissement.

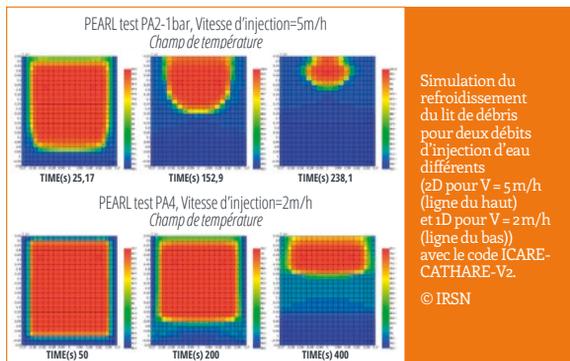
## Effet de seuil sur les écoulements d'eau et de vapeur

Ces essais effectués à pression atmosphérique ont permis de mieux comprendre les paramètres qui régissent la trajectoire de l'eau et de sa vapeur au sein du lit de débris, et la modéliser. Ils ont notam-

ment confirmé<sup>(2)</sup> qu'il existe un seuil de débit d'eau injectée au-dessous duquel l'eau pénètre uniformément dans le lit de débris et participe globalement au refroidissement : le renoyage, peut alors être modélisé à l'aide d'un modèle d'écoulement à une dimension (1D). Pour un débit supérieur au seuil, l'eau s'écoule préférentiellement par le by-pass, rejointe par une partie de la vapeur produite dans la partie chauffée du lit de débris. Cette configuration nécessite un modèle d'écoulement à deux dimensions (2D). Ces résultats ont permis de définir un critère<sup>(3)</sup> de transition entre le comportement 1D et 2D et de mettre au point un modèle d'écoulement diphasique eau-vapeur dans le lit de débris. Ces travaux ont été récompensés au congrès Nureth 2015 ; ils se poursuivent pour étudier l'effet de la pression. Au-delà d'une meilleure compréhension des phénomènes, ces progrès dans la modélisation vont contribuer à identifier les conditions d'injection d'eau les plus efficaces.

## PUBLICATION

• Chikhi N. *et al.* « First experimental results of large scale debris bed relood tests in the PEARL facility », *Nureth-16*, 30 août - 4 septembre 2015, Chicago (États-Unis).



## CONTACT

Nourdine Chikhi  
nourdine.chikhi@irsn.fr

Laboratoire d'expérimentation en mécanique et matériaux - LE2M

<sup>(1)</sup> PEARL a été mise en service fin novembre 2014. La section d'essai est un cylindre en quartz d'une hauteur de 2,66 m et d'un diamètre de 540 mm. Le lit de débris est constitué d'environ 500 kg de billes métalliques.

<sup>(2)</sup> Déjà constaté lors des essais du premier volet du programme.

<sup>(3)</sup> dépendant notamment du débit d'injection d'eau et de la température initiale du lit de débris.

En savoir plus sur le Best Paper Award



# Mieux PRÉVENIR le RISQUE d'explosion D'HYDROGÈNE



Programme THAI2, Institut Jülich, CNRS/lcारे

## CONTACT

Ahmed Bentaïb  
ahmed.bentaïb@irsns.fr

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

**Avec quatre explosions aux conséquences majeures sur les bâtiments de la centrale, l'accident de Fukushima a confirmé que le risque d'explosion d'hydrogène, pouvant mener à une défaillance précoce du confinement, doit être considéré avec une grande attention. Des travaux de R&D par le passé ont conduit à installer dans les réacteurs français des recombinateurs<sup>(3)</sup> pour limiter le risque d'explosion. L'accident japonais incite à renforcer les connaissances dans deux directions : identifier les limites de performance des recombinateurs et mieux caractériser les régimes de combustion pouvant survenir en situation accidentelle afin de distinguer – en vue de les éviter – ceux qui sont les plus endommageants pour le confinement des matières radioactives et pour les équipements nécessaires à la gestion d'un accident grave.**

<sup>(1)</sup> Programme « Investissements d'avenir » dans le domaine « Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection (RSNR) ».

<sup>(2)</sup> Lors d'un accident avec fusion du cœur, l'hydrogène provient de l'oxydation des gaines du combustible nucléaire par la vapeur d'eau, puis de l'interaction hors cuve entre le béton de l'enceinte de confinement et le combustible fondu (ou corium).

<sup>(3)</sup> Les recombinateurs autocatalytiques passifs catalysent la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène présent dans l'atmosphère, produisant de la vapeur d'eau, et en limitant ainsi la concentration.

<sup>(4)</sup> Le benchmark ISP49 a été organisé dans le cadre de l'OCDE/AEN en 2010 ; d'autres benchmarks ont été organisés dans le cadre du réseau européen SARNET en 2010 et 2012.

Lors de l'accident survenu en 2011 dans la centrale de Fukushima Daïchi au Japon, quatre explosions d'hydrogène se sont produites et ont endommagé à des degrés divers les bâtiments. L'explosion est une combustion dont la flamme se propage de quelques centaines de mètres par seconde (on parle alors de déflagration, cas probable des tranches 1, 2 et 4 à Fukushima) à plus de mille mètres par seconde (il s'agit alors d'une détonation après un régime de transition (TDD)), qui correspond au cas du réacteur 3. L'accident a mis en exergue la nécessité d'approfondir les connaissances en matière d'explosion d'hydrogène et de ses conséquences. Ainsi, dans le domaine du « risque hydrogène », pouvant conduire à la perte du confinement par explosion d'hydrogène<sup>(2)</sup>, l'Institut a renforcé sa participation au programme THAI de l'OCDE (THAI 2007-2010 et THAI2 2011-2014). Dans ce cadre, l'IRSN a analysé les performances, dans des situations extrêmes, des recombinateurs autocatalytiques passifs (RAPs)<sup>(3)</sup> qui équipent déjà les réacteurs français en exploitation. Il a par ailleurs approfondi la compréhension des mécanismes régissant la propagation de flammes.

Les expériences réalisées dans le cadre de ces programmes ont mis en évidence l'impact d'un déficit en oxygène sur le comportement et les performances des recombinateurs. De plus, il est apparu que dans certaines conditions, le catalyseur et son support sont portés à une température suffisante pour enflammer l'hydrogène à l'intérieur du dispositif. En analysant ces expériences à l'aide de son logiciel de simulation SPARK<sup>GL0</sup>, l'IRSN a caractérisé la composition des mélanges (H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O) menant à cette situation. Il est apparu que ces

inflammations conduisent à des régimes de combustion lente avec des charges en pression non dommageables pour l'enceinte de confinement, mais avec des charges en température dont les effets sur les structures et équipements nécessaires à la gestion d'un accident grave devraient être évalués.

## Modélisation des recombinateurs

Pour étendre ces investigations à une large palette de situations d'accident grave, notamment dans la phase tardive, l'IRSN collabore avec l'Institut Jülich dans le cadre du programme allemand REKO<sup>GL0</sup>. L'objectif de ce programme est d'étudier l'influence du monoxyde de carbone ou CO (général en même temps que l'hydrogène par l'interaction hors cuve du combustible fondu sur le béton) sur l'efficacité des recombinateurs. En effet, le CO peut, selon les cas, empêcher la recombinaison de l'hydrogène en bloquant les sites actifs situés sur les plaques catalytiques des RAPs ou réagir avec l'oxygène pour produire du CO<sub>2</sub>. Une première série de 33 expériences réalisées en 2014 montre, d'une part, que la recombinaison de l'hydrogène n'est pas affectée par celle du monoxyde de carbone et, d'autre part, que la recombinaison du CO est significativement moins efficace et rapide que celle de l'hydrogène. Ces observations ont été confortées par des investigations menées notamment à l'aide du logiciel SPARK.

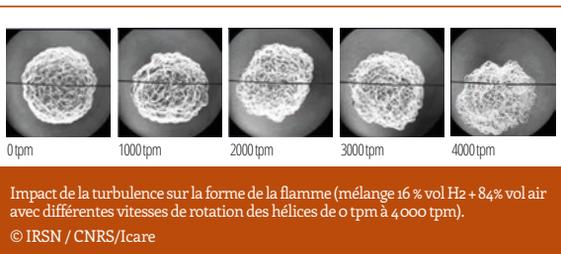
L'ensemble de ces résultats a permis d'une part de faire bénéficier SPARK des améliorations apportées à la modélisation des recombinateurs pour une évaluation plus performante du risque hydrogène. Par ailleurs, ces résultats pointent une perte

des performances des RAPs dans les atmosphères représentatives des phases tardives d'un accident grave (atmosphères pauvres en oxygène et contenant de l'H<sub>2</sub> et du CO) ; ce qui met en évidence le risque de transfert de gaz riches en hydrogène et en CO de l'enceinte de confinement vers les bâtiments annexes et, par conséquent, de formation d'atmosphère risquant d'exploser dans ces bâtiments. La consolidation de ces résultats, ainsi que l'investigation de quelques points encore incertains, font partie des recherches à venir.

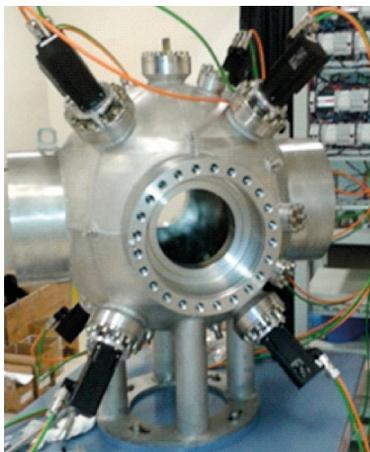
### Description de vitesse de flamme

Après l'accident de Fukushima, le gouvernement français a lancé un appel à projets<sup>(1)</sup> pour approfondir les connaissances dans le domaine de la sûreté. Parmi les lauréats, le projet MITHYGÈNE est coordonné par l'IRSN. Il vise à mieux évaluer le risque d'occurrence d'une explosion en tenant compte des moyens de mitigation et à mieux en estimer les conséquences sur le confinement et sur le fonctionnement des équipements nécessaires à la gestion d'un accident grave.

En effet, malgré la présence des recombineurs, les études réalisées à l'IRSN montrent que le risque d'explosion d'hydrogène lors d'un accident grave ne peut pas être définitivement éliminé. Aussi, l'IRSN développe des outils de calcul permettant d'évaluer les charges en pression et en température résultant d'une explosion d'hydrogène, afin d'évaluer les conséquences sur la tenue du confinement. La combustion y est décrite à l'aide de modèles de vitesse de flamme dits BVM (Burning Velocity Model) ajustés à partir d'expérimentations. Ce type d'approche est utilisé dans la plupart des logiciels modélisant l'explosion de gaz. Les benchmarks ISP49 et SARNET<sup>(4)</sup> ont mis en évidence la difficulté des logiciels actuels (adoptant ou non un BVM) à prédire de manière satisfaisante les phases d'accélération et de décélération de flammes de prémélange d'hydrogène ainsi que leur incapacité à prédire les extinctions de flamme. Ces benchmarks ont montré la nécessité d'améliorer les modèles de vitesses de flammes, et incité l'IRSN à développer un outil de simulation, P<sup>2</sup>REMICs, destiné à modéliser une explosion et ses conséquences. Une thèse menée par Jules Goulier a contribué à cette modélisation en caractérisant des régimes de turbulence des flammes. Les expériences ont été menées en collaboration avec le CNRS/Icare. Jules Goulier a conçu une



« bombe » sphérique originale équipée de ventilateurs permettant de créer des flammes dans un milieu turbulent isotrope et de contrôler l'intensité de la turbulence initiale. Les résultats de la thèse ont permis de vérifier et de valider les modèles de vitesses de flammes laminaires<sup>GLO</sup>, et de proposer un modèle de vitesse de flamme turbulente<sup>GLO</sup> en fonction de l'intensité de la turbulence. Le modèle de vitesse de flamme turbulente ainsi élaboré, sera implanté notamment dans les outils utilisés à l'IRSN ; il sera validé sur la base des résultats des expériences de déflagration, de TDD et de détonation qui seront réalisées dans le cadre du projet MITHYGÈNE dans l'installation ENACCEF2 en cours d'installation dans les locaux du CNRS/Icare. Ces travaux permettront *in fine* d'améliorer la capacité des logiciels de l'IRSN à prédire les accélérations, les décélération et les étouffements des flammes ainsi que la transition vers les régimes de détonation.



Bombe sphérique équipée d'hélices pour l'étude de flamme turbulente.

© IRSN/CNRS/Icare

En savoir plus sur le programme THAI



### PUBLICATIONS

- Meynet N. *et al.* « Impact of oxygen starvation on operation and potential gas-phase ignition of passive auto-catalytic recombiners », *Combustion and Flame* 161 (2014) 2192-2202.
- Bentaïb A. *et al.* « Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues », *Nucl Eng Techno* 47, issue 1 (2015) 26-32.
- Klauk M. *et al.* « Passive auto-catalytic recombiners operation in the presence of hydrogen and carbon monoxide: Experimental study and model development », *Nuclear Engineering and Design* 266 (2014) 137-147.
- Comportements aux limites de flammes de prémélange hydrogène/air/diluants. Etude de la transition flamme laminaire-flamme turbulente, these soutenue par Jules Goulier le 2 novembre 2015 à l'université d'Orléans.

# INTERCOMPARAISON *de résultats* ISSUS *de* MODÈLES *de* DISPERSION *de la* CONTAMINATION AU JAPON



## CONTACTS

**Pascal Bailly du Bois**  
pascal.bailly-du-bois  
@irsrn.fr

Laboratoire de  
radioécologie de  
Cherbourg-Octeville -  
LRC

**Damien Didier**  
damien.didier  
@irsrn.fr

Bureau de modélisation  
des transferts dans  
l'environnement  
pour l'étude des  
conséquences des  
accidents - BMCA

**En juillet 2012, l'Académie des sciences japonaise a organisé la comparaison des résultats produits par des modèles existants, au niveau international, pour la dispersion des matières radioactives dans l'environnement. L'IRSN a participé à cet exercice dans les domaines atmosphérique et marin.**

L'Académie des sciences japonaise a organisé la comparaison des niveaux de contamination après l'accident de Fukushima donnés par neuf modèles de dispersion atmosphérique, six modèles globaux et onze modèles de dispersion océanique de la radioactivité (2012-2014). L'IRSN a été sollicité pour la dispersion atmosphérique, le dépôt de la contamination à l'échelle du Japon (logiciel IdX) et pour la dispersion marine (modèle MARS3D de l'Ifremer<sup>(1)</sup>). Contrairement aux intercomparaisons usuelles, cette étude a été menée sans fixer les données d'entrée, chaque participant utilisant les données qu'il considérait les plus fiables en sa possession.

La météorologie japonaise comprenait une partie d'océan. L'IRSN a fourni les résultats de calculs obtenus à l'automne 2011. Pour que les résultats puissent être comparés, les outils testés n'ayant pas tous le même maillage, les Japonais ont réalisé des interpolations des résultats et des données mesurées. La plupart des calculs ont abouti à un dépôt de 1,3 à 3,8 petabecquerels (1 PBq =  $10^{15}$  Bq) de césium 137 sur la portion de terre ferme étudiée, valeurs assez proches des mesures ; et un dépôt de 0,9 à 5,5 PBq de césium 137 sur l'océan près de la côte. Le logiciel IdX de l'IRSN était dans la fourchette haute des calculs. Depuis, l'amélioration des données relatives à la météo et aux rejets a permis d'affiner les simulations. Une nouvelle intercomparaison est prévue dans ce domaine.

## Interpolation des résultats et des données

Dans le domaine atmosphérique, l'objectif était de comparer le dépôt calculé entre le 12 mars et le 1<sup>er</sup> avril 2011 sur une zone déterminée du ter-

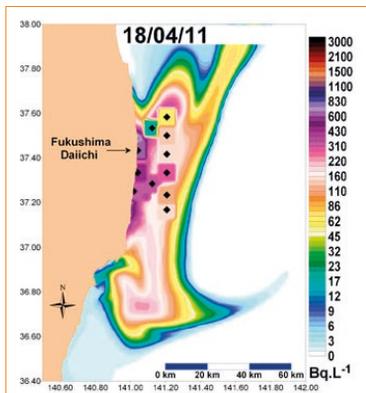
## Modèles hydrodynamiques

Les apports de césium 137 dans l'océan ont aussi été estimés par chaque participant<sup>(2)</sup>. Sa dispersion a été simulée pour deux périodes de dix jours : du 22 au 31 mars et du 21 au 30 avril 2011. Les tendances générales des distributions de césium 137 sont similaires pour les différents modèles utilisés : concentration importante le long de la côte de Fukushima, qui tend à dériver vers le sud fin mars, puis se disperse au large vers le nord-est fin avril. Les concentrations simulées par l'IRSN près des côtes sont du même ordre de grandeur que celles mesurées. Des différences relativement importantes apparaissent à plus petite échelle et dans le temps entre les modèles. L'IRSN avait adapté pour l'occasion le modèle numérique de dispersion hydrodynamique<sup>(1)</sup> utilisé en routine pour les mers côtières de la métropole. L'intercomparaison a permis de confirmer qu'il peut être appliqué ailleurs dans le monde et qu'il donne des résultats comparables aux autres modèles internationaux. Le rapport japonais conclut à la nécessité d'un effort international et coordonné de développement dans ce domaine.

<sup>(1)</sup> Le modèle MARS3D est appliqué en France par l'Ifremer et l'IRSN pour la dispersion côtière, il a été validé par les mesures de radionucléides solubles en Manche et mer du Nord.

<sup>(2)</sup> Il comprend le césium rejeté dans l'atmosphère et qui s'est déposé à la surface de l'eau (son volume et sa répartition dépendent donc des modèles de dispersion atmosphérique utilisés) soit environ 3 PBq, et celui rejeté directement dans la mer par la centrale, évalué entre 3,5 et 26,9 PBq.

En savoir plus  
sur la publication



Comparaison entre les résultats de simulation (panaches colorés) et les points de mesure (carrés colorés avec marques noires).

© IRSN

# Mieux MODÉLISER la CONTAMINATION des FORÊTS pour SOUTENIR la GESTION du LONG TERME

Après un accident nucléaire, et une fois passée la phase d'urgence, les zones contaminées doivent être correctement identifiées et gérées sur le long terme pour optimiser l'exposition de l'homme et des écosystèmes. En prévoyant l'évolution spatiale et temporelle de la contamination au sein de la biosphère, la modélisation apporte des éléments scientifiques indispensables à cette gestion. Suite à l'accident de Fukushima, elle s'est développée pour comprendre et anticiper l'évolution des débits de dose ambiants dans les forêts notamment. L'IRSN pilote deux projets importants dans ce domaine, AMORAD et EDOFU.

Lors du passage du panache de particules radioactives, le césium est intercepté par la canopée des arbres, c'est-à-dire le haut des branches et les feuilles, dans une proportion d'autant plus grande qu'elle est développée. L'accident de Fukushima ayant eu lieu en mars, les arbres à feuillages caducs ont été peu concernés. En revanche, les nombreuses plantations de conifères, notamment de cèdres du Japon (*Cryptomeria japonica*) et de cyprès du Japon (*Chamaecyparis obtusa*), ont intercepté la majorité du césium  $^{137}\text{Cs}$  déposé au niveau de l'écosystème forestier japonais. 75 % des territoires contaminés par le césium radioactif sont forestiers. Les processus les plus rapides de transfert du césium, essentiellement des arbres vers le sol, se produisent dans les 18 premiers mois suivant le dépôt ; ils conditionnent la situation forestière pour de longues années. Il s'agit de la chute des feuilles, aiguilles, brindilles, et branches sénescentes qui constituent la litière de la forêt, du « lessivage » des feuilles et aiguilles, et dans une bien moindre mesure du « lessivage » des troncs. Le terme de « lessivage » agrège lui-même différents processus : l'entraînement de césium par des gouttes d'eau de pluie ruisselant sur la feuille, la remise en suspension par le vent, et des processus biologiques tels que la desquamation des feuilles.

## Décontamination naturelle des canopées

Pendant cette phase, les flux sont dynamiques et donc hors d'équilibre ; leur modélisation est complexe. Elle constitue l'un des objets du projet AMORAD sélectionné dans le cadre du programme

« Investissements d'avenir » post-Fukushima, piloté par l'IRSN et mené en collaboration avec de nombreux autres organismes. De récents travaux ont permis notamment de tester un modèle développé depuis plusieurs années à l'IRSN, le modèle TREE4 (Transfert des radionucléides et exposition externe en forêts). Les résultats qu'il fournit ont été confrontés à deux jeux de données : d'une part des mesures réalisées dans une forêt d'épicéas en Allemagne en 1986-1987 pendant et après les dépôts de l'accident de Tchernobyl ; et d'autre part, les mesures effectuées entre mars et septembre 2011 dans une forêt de cyprès du Japon dans la préfecture de Tochigi (environ 180 km au sud-ouest de la centrale de Fukushima). Le second jeu de données constituait une opportunité unique de confronter la modélisation des processus de cette première phase à des observations réelles. TREE4 a été configuré avec une majorité de paramètres génériques (c'est-à-dire applicables à n'importe quelle forêt) notamment le taux de « lessivage » de la canopée, et avec un nombre limité de paramètres spécifiques au site (dépôt total, pluviométrie lors du dépôt, densité du couvert végétal, index de surface foliaire, durée de vie du feuillage). Il a permis de reproduire de manière satisfaisante l'interception initiale et la cinétique de transfert au sol pour les deux situations, en paramétrant séparément chacun des trois processus impliqués dans la décontamination naturelle de la canopée.

## Forêts de conifères

D'autres travaux ont analysé plus finement le comportement du  $^{137}\text{Cs}$  intercepté par la canopée, en



### CONTACTS

Philippe Calmon  
philippe.calmon@irsn.fr

Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité dans l'environnement - LEREN

Frédéric Coppin  
frederic.coppin@irsn.fr

Laboratoire de biogéochimie, biodisponibilité et transferts des radionucléides - LzBT

Marc-André Gonze  
marc-andre.gonze@irsn.fr

Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité dans l'environnement - LEREN

### PUBLICATIONS

- Calmon et al. « Modeling the early-phase redistribution of radiocesium fallouts in an evergreen coniferous forest after Chernobyl and Fukushima accidents », *Science of the Total Environment* 529 (2015) 30-39
- Loffredo et al. « Equation to predict the  $^{137}\text{Cs}$  leaching dynamic from evergreen canopies after a radio-caesium deposit », *Journal of Environmental Radioactivity* 147 (2015) 100-107
- Gonze et al. « Modelling the dynamics of ambient dose rates induced by radiocaesium in the Fukushima terrestrial environment », *Journal of Environmental Radioactivity*, in press (2015) 1-13

## Décroissance des débits de dose



En savoir plus sur AMORAD



En savoir plus sur EDOFÚ



modélisant sa plus ou moins grande facilité à être lessivé. Les paramètres de ce modèle ont été reliés à la surface de la canopée (ou degré de fermeture) d'une part, et à l'intensité des épisodes pluvieux d'autre part. Les paramètres du modèle obtenu ont été ajustés à l'aide de mesures réalisées sur deux parcelles de cèdres du Japon situées à Kawamata (préfecture de Fukushima) instrumentées à partir de juillet 2011, juste après les dépôts de l'accident de Fukushima. Puis le modèle a été utilisé avec succès pour décrire le lessivage d'autres forêts de conifères (cyprés, pins, autre parcelle de cèdres du Japon). Ainsi, pour les conifères, 80 % du césium intercepté et sensible au lessivage reste en moyenne trois mois dans la canopée. Ces recherches ont permis de mieux comprendre l'évolution du césium dans les premiers mois suivant l'accident, échelle de temps qui n'avait pu être suivie lors de l'accident de Tchernobyl.

Dans le cadre du programme EDOFU, la modélisation a également permis de comprendre pourquoi les débits de dose mesurés par les autorités japonaises montraient, entre avril 2011 et décembre 2012, une décroissance deux fois plus rapide que celle prédite par la décroissance physique des radionucléides déposés. Les Japonais ont établi de multiples cartographies de la région située à moins de 80 km autour de la centrale à l'aide de mesures effectuées par des détecteurs aéroportés à l'aplomb des forêts, à une altitude comprise entre 100 et 300 m environ. Pour comprendre l'apparente incohérence entre les mesures et les principes physiques, des simulations numériques du transfert des radionucléides et l'évolution des débits de dose ambiants au sein des différents milieux constitutifs de la région de Fukushima (i.e. forêts, rizières, pâtures, zones habitées, etc.) ont été réalisées à l'aide d'un simulateur dédié à cette étude, développé dans la plate-forme logicielle SYMBIOSE de l'IRSN et incluant le modèle TREE4. Les calculs de dosimétrie externe ont reposé sur l'utilisation de coefficients de dose estimés, à différentes altitudes de vol et pour chacun des milieux survolés, à l'aide du logiciel MCNP<sup>(1)</sup>. Ces simulations montrent qu'en milieu forestier les débits de dose aux altitudes de vol considérées ont décliné d'à peu près 40 % par an en 2011 et 2012 (en cohérence avec les mesures), cette décroissance étant induite pour moitié par la décontamination progressive des canopées et l'atténuation des rayonnements mesurés par les détecteurs aéroportés accrue par le couvert végétal. À l'inverse, les simulations montrent que, en milieu forestier, les débits de dose au voisinage du sol ont légèrement augmenté durant cette même période, la contamination du sol ayant augmenté en raison de la décontamination des canopées. Ces programmes de recherche se poursuivent, et contribuent à améliorer la capacité des modèles opérationnels à prédire l'évolution de la contamination et des débits de dose pour différentes échelles de temps post-accidentel, à moyen et long termes. L'objectif est ainsi de soutenir, par des outils scientifiques, les problématiques de gestion de ces territoires forestiers contaminés en césium pour lesquels ni les modèles utilisés en crise ni des campagnes de mesure *in situ*, ne sont adaptés.

<sup>(1)</sup> Code Monte-Carlo de calcul de transport de particules et d'interaction avec la matière.

# De L'IMPORTANCE d'estimer précisément les DOSES de RAYONNEMENT ABSORBÉES

**Une publication de l'IRSN écrite en collaboration avec deux écologues de renom démontre qu'en estimant précisément les doses absorbées par les oiseaux des territoires contaminés après l'accident de Fukushima, les effets observés sur cette communauté sont en accord avec les connaissances scientifiques actuelles sur les relations dose-effets.**

Diverses études dédiées aux conséquences des accidents nucléaires concluent à l'existence d'effets notables sur la faune et la flore à des débits de doses de rayonnements ionisants très faibles, en décalage avec les connaissances actuelles en radiobiologie. Afin d'investiguer cette apparente contradiction, l'IRSN a proposé à deux écologues de renom de travailler en collaboration sur la base des données<sup>(1)</sup> qu'ils ont collectées sur les oiseaux dans la région de Fukushima.

## Doses absorbées

Jusqu'à la présente étude, les effets observés chez les organismes exposés avaient été mis en relation avec le débit de dose<sup>ambiant</sup> mesuré sur les sites d'observation. Ceci était vu comme un point faible par la communauté scientifique des radioécologistes. La présente étude estime qu'une interprétation précise des données nécessite de tenir compte de la dose effectivement absorbée par les organismes étudiés. Le calcul de cette dernière dépend des espèces, de leur mode de vie, des ra-

dionucléides inhalés ou ingérés, et de l'exposition externe à la contamination sur un site donné. Les débits de dose auxquels sont exposés les oiseaux ont été reconstruits en combinant mesures de radionucléides (<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>131</sup>I) et modèles. Il est apparu qu'ils peuvent être jusqu'à 20 fois supérieurs au débit de dose ambiant ; ils varient d'un facteur 8 entre les 57 espèces examinées, et d'un facteur 44 au sein d'une même espèce en fonction des sites d'observation. 90 % des espèces sont exposées de manière chronique à un débit de dose susceptible d'altérer leur reproduction<sup>(2)</sup>.

## Analyse statistique

L'évolution du nombre d'oiseaux dans les 50 km autour de la centrale accidentée de Fukushima entre 2011 et 2014 a été analysée à l'aide d'un modèle statistique représentant au mieux l'ensemble du jeu de données et prenant en compte les variables descriptives des conditions environnementales<sup>(3)</sup>. Elle montre que la dose totale absorbée (reconstruite) a un effet négatif sur la reproduction : pour la zone et la période d'étude, le nombre total d'oiseaux baisse de 22 % lorsque la dose absorbée augmente de 10 à 100 mGy. Par extrapolation, la dose qui entraînerait une baisse de 50 % du nombre d'oiseaux est estimée à 550 mGy.

Ce travail confirme que la juste évaluation de la dose absorbée par les organismes étudiés contribue à garantir la crédibilité scientifique des conclusions auxquelles aboutissent les études concernant les relations entre le niveau d'exposition aux rayonnements ionisants et la réponse biologique et écologique observée. Combiner reconstruction dosimétrique et statistiques avancées pour traiter les jeux de données écologiques est prometteur pour améliorer la compréhension de ces relations.

 Anders Pape Møller, (Laboratoire d'écologie, systématique et évolution, CNRS UMR 8079)

Timothy A. Mousseau, (Department of Biological Sciences, University of South Carolina)

Christian Ritz (Department of Nutrition, Exercise and Sports Faculty of Science, University of Copenhagen)

## CONTACTS

**Karine Beaugelin**  
karine.beaugelin@irsn.fr

Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans l'environnement - LRTE

**Jacqueline Garnier-Laplace**  
jacqueline.garnier-laplace@irsn.fr

Pôle radioprotection environnement

<sup>(1)</sup> Chaque année depuis l'accident, à la période de reproduction (juillet), les espèces présentes et leur nombre d'individus ont été répertoriés selon des méthodes standardisées.

<sup>(2)</sup> En référence à la qualité et à l'intensité des effets induits pour ces niveaux d'exposition, publiés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR, 2008).

<sup>(3)</sup> Température, heure de l'observation, couvert nuageux, type de paysage.

 En savoir plus sur la publication



Cettia diphone, l'une des espèces d'oiseaux observées lors de cette étude.

© Rémi Bigonneau

# MODÉLISER la contamination des POISSONS

Laboratoire d'aérologie de Toulouse, partenaires dans le cadre du programme AMORAD

## CONTACT

Sabine Charmasson  
sabine.charmasson  
@irsn.fr

Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans l'environnement - LRTE

<sup>(1)</sup> *Modèle NPZD (nutrient-phytoplankton-zooplankton-détritus).*

<sup>(2)</sup> *Concentrations estimées d'environ 4 ordres de grandeurs supérieures à celles observées avant l'accident.*

## PUBLICATIONS

• *Modélisation numérique du transfert du radiocésium dans les chaînes trophiques pélagiques marines suite à l'accident nucléaire de Fukushima Dai-ichi (Côte Pacifique du Japon)*, thèse soutenue par Mokrane Belharet le 6 octobre 2015 à Toulouse.



• Belharet M., Estournel C., Charmasson S., « Ecosystem model-based approach for modeling the dynamics of <sup>137</sup>Cs transfer to marine plankton populations: Application to the Western North Pacific Ocean after the Fukushima nuclear power plant accident. » *Biogeosciences*, vol 12, 2016.

**Pour prédire l'évolution de la contamination des produits de la mer à moyen ou long terme après un accident nucléaire, ce qui permettra d'éclairer sur une base scientifique la gestion de leur commercialisation, la modélisation est nécessaire. Dans le cadre du programme AMORAD, une thèse a permis de développer celle de la contamination de certains poissons marins.**

L'accident de Fukushima a conduit à un niveau de contamination radiologique jamais atteint en milieu marin posant la question de la contamination des produits de la pêche. Des modèles opérationnels permettent de décider des interdictions de consommation durant la crise ; en revanche, il n'en existe pas d'assez précis pour prédire l'évolution de la contamination dans la faune marine à moyen et long termes, en vue de préparer d'éventuelles mesures de commercialisation. Afin de construire cette modélisation, Mokrane Belharet a mené une thèse co-dirigée par l'IRSN et LA Toulouse sur le transfert du césium dans les organismes marins pélagiques<sup>GL0</sup> de la côte Est du Japon (phytoplankton, zooplankton, poissons planctonivores, et poissons carnivores).

## Décrite par ses générations

La méthode la plus adaptée s'est avérée de coupler un modèle de l'écosystème composé des cycles du plancton<sup>(1)</sup> et de la circulation régionale des courants, avec un modèle radioécologique, spécifiquement développé pour étudier la contamination des poissons pélagiques<sup>GL0</sup>.

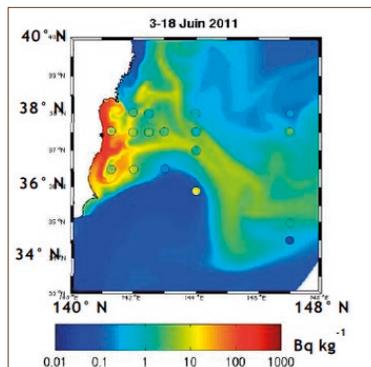
Chaque espèce y est décrite par ses générations, dont le nombre dépend de sa longévité et de sa fréquence de reproduction. Les organismes sont classés par tailles, auxquelles sont associés un taux d'ingestion de nourriture et un régime alimentaire, paramètres qui évoluent dans le temps avec la taille de l'individu.

À partir des données sur la dispersion du césium 137 sur la côte Pacifique du Japon, le modèle a d'abord été appliqué aux populations planctoniques, notamment aux alentours de la centrale<sup>(2)</sup> : il aboutit à des niveaux de contamination assez élevés. En dépit de cela, le débit maximal de la dose absorbée<sup>GL0</sup> reste largement au-dessous de la valeur à partir de laquelle des effets apparaissent sur les populations planctoniques.

Cette étude a aussi montré que le zooplankton accumule le césium surtout par la voie alimentaire, et qu'il existe une légère bioamplification<sup>GL0</sup> avec les classes de tailles croissantes de zooplankton.

## Mouvements migratoires

Les résultats concernant les poissons montrent que les niveaux de contamination calculés pour les différentes espèces sont largement supérieurs à ceux observés avant l'accident, avec une tendance à l'augmentation lorsque la taille de l'individu augmente, sans doute en raison de la bioamplification *via* une alimentation plus 'carnivore'. Par ailleurs, il apparaît important de prendre en compte les mouvements migratoires de certaines espèces de poissons dans ce type de modèle. Celui-ci a été validé dans les conditions d'équilibre pré-accidentelles ainsi que dans les conditions post-accidentelles, et les résultats obtenus sont satisfaisants. Il reste à présent à prendre en compte les poissons vivant sur les sédiments qui restent les plus contaminés aujourd'hui.



Confrontation entre les concentrations du <sup>137</sup>Cs dans le zooplankton estimées par le modèle SYMPHONIE (fond de la carte) et celles observées sur le terrain et reportées par Buesseler et al.(2012).

© IRSN/LA Toulouse

# La GESTION de L'ACCIDENT sous l'angle des FACTEURS ORGANISATIONNELS et HUMAINS

**Convaincu de l'importance de la compréhension du rôle des facteurs humains et organisationnels pour la maîtrise des risques, l'Institut a créé en 2012 un laboratoire dédié à la recherche en sciences humaines et sociales. À l'évidence, une situation accidentelle pèse sur le comportement de l'ensemble des acteurs. L'accident de Fukushima a donc incité l'IRSN à approfondir sa compréhension des composantes humaines et organisationnelles de la gestion des accidents nucléaires.**

Quel est le rôle des facteurs organisationnels dans la gestion d'un accident grave qui place l'ensemble des acteurs face à une situation totalement inédite ? Dans le cadre de cette étude, les chercheurs de l'IRSN ont analysé le déroulement de l'accident de Fukushima, lorsque, en l'absence d'alimentation électrique, l'équipe de conduite a dû gérer l'accident, plongée dans le noir total, sans plus aucun cadre procédural pour guider ses actions.

Jusqu'à quel point les acteurs pouvaient agir et coordonner leurs actions devant une situation aussi inédite et dramatique ? Les chercheurs ont travaillé à partir des rapports officiels, de témoignages, et de précédents travaux de recherche<sup>(1)</sup>. Ils ont analysé la gestion de crise en considérant trois niveaux. Le niveau de l'équipe de conduite : comment donner du sens aux événements malgré le chaos ? Alors qu'il était impossible de connaître l'état des réacteurs, l'instrumentation étant hors-service, les opérateurs ont dû trouver des solutions pour gérer cette incertitude alors même que leur vie pouvait être en danger. Ils sont ainsi parvenus à mobiliser des valeurs collectives (par exemple en excluant les opérateurs les plus jeunes des missions dangereuses), et ont renforcé l'autorité de la hiérarchie présente. En revanche, ils ont été handicapés par leur manque d'entraînement à la gestion de crise.

## Soutenir une solution innovante

Le deuxième niveau étudié est celui de la centrale : quelles conditions ont permis de reconnaître et soutenir une solution innovante pour parer à une situation critique ? Le recours aux pompes des camions de pompier pour injecter de l'eau afin



Salle de contrôle lors de l'accident.  
© Nuclear and Industrial Safety Agency

de refroidir le cœur du réacteur n° 1 est proposé très rapidement par le directeur de la centrale<sup>(2)</sup>. La décision de mise en œuvre de cette solution innovante a été prise seulement après que tous les systèmes de secours prévus se sont révélés inopérants. Une fois la décision prise, une coordination centralisée a facilité sa mise en œuvre, en attribuant des fonctions précises aux acteurs et en constituant une équipe d'intervention dédiée à la prise en charge de tâches mal définies.

Le dernier niveau étudié est celui du politique : quelle a été son implication ? Au fil de l'accident, une centralisation du pouvoir s'affirme, du fait du Premier ministre mais aussi du fait d'une position de retrait de TEPCO, l'exploitant de la centrale, face au poids des responsabilités. Cependant, les tentatives de régulation du gouvernement sont limitées en raison des difficultés de communication avec les représentants de TEPCO et les experts nationaux et de l'isolement croissant qui en résulte.

Cette analyse doit permettre d'alimenter la réflexion relative à l'amélioration de la gestion de crise en France.

## CONTACT

Elsa Gisquet  
elsa.gisquet@irsn.fr

Laboratoire de recherche en sciences humaines et sociales - LSHS

<sup>(1)</sup> Travaux de Perrow (1999) sur la centralisation-décentralisation des décisions; travaux de Weick (1988, 1993, 1995) sur le sense making.

<sup>(2)</sup> Cette proposition repose sur l'expérience qu'il a acquise en juillet 2007 lors de la gestion des effets du séisme de Chu-Etsu-Oki sur la centrale de Kashiwazaki-Kariwa.

## PUBLICATION

• Gisquet E.  
« Interrogations to learn from the Fukushima accident » International Conference on Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety – Exploring 30 Years of Safety Culture. AIEA, 26 février 2016.



# COMPARAISON de MESURES faites par des LYCÉENS en quête d'une CULTURE de RADIOPROTECTION

 CEPN, lycéens concernés

## CONTACT

Sylvie Charron  
sylvie.charron  
@irsn.fr

Service d'ouverture  
à la société

**Le post-accident à Fukushima a confirmé qu'une culture pratique de radioprotection favorise la gestion par chacun de son exposition aux rayonnements. Depuis 2007, des lycéens en France et dans des pays partenaires se sensibilisent à cette culture, soutenue par l'IRSN. Des mesures effectuées dans ce cadre par des lycéens japonais, français, biélorusses et polonais ont donné lieu, après interprétation, à une publication scientifique: un bel apport du « crowd sourcing » pour une approche réaliste des doses.**

<sup>(1)</sup> *Analogie dans son principe aux dispositifs utilisés pour la surveillance des travailleurs exposés.*

## PUBLICATION

• Collectif  
« Measurement and comparison of individual external doses of high school students living in Japan, France, Poland and Belarus – the D-Shuttle project », *Journal of radiological protection*, 36 (2016) 49-66.



Depuis huit ans, des lycéens français et étrangers étudient durant l'année, sous la houlette de leurs professeurs, des thèmes de radioprotection avec l'appui de scientifiques notamment de l'IRSN. L'objectif est de les sensibiliser à la démarche scientifique et de les familiariser avec la culture de radioprotection. En 2014, des lycéens de la préfecture de Fukushima ont proposé d'établir des comparaisons de mesures dosimétriques relevées dans leur région avec celles d'autres régions du Japon et de l'étranger. 216 lycéens et professeurs venant de 24 établissements ont participé : six de la préfecture de Fukushima ; six d'autres régions japonaises, non touchées par l'accident ; quatre de France et huit de Pologne ; et deux de Biélorussie, région de Gomel, impactée par l'accident de Tchernobyl. Pour cette étude, chaque personne a porté pendant deux semaines un dosimètre électronique individuel mesurant et enregistrant les doses horaires reçues par son porteur (dosimètre D-Shuttle). En parallèle, chaque participant tenait un journal de ses activi-

tés (quoi, où et quand). Grâce à ces informations, les doses mesurées ont été extrapolées à une dose moyenne annuelle. Cette démarche a ainsi abouti à une valeur du niveau d'exposition tirée directement de la réalité quotidienne.

## Doses moyennes annuelles réalistes

Résultats : la dose moyenne annuelle « réaliste » ainsi estimée dans la préfecture de Fukushima se situait entre 0,63 et 0,97 millisievert par an (mSv/an) ; entre 0,55 et 0,87 mSv/an hors région de Fukushima ; et entre 0,51 et 1,10 mSv/an en Europe (0,09 mSv/an au Bélarus). Dans ce cadre, on observe que les doses externes reçues par les participants dans la région de Fukushima et au Bélarus ne se démarquent pas des doses reçues par les participants des autres régions, exposés seulement à la radioactivité naturelle. Plusieurs facteurs à cela : le niveau de la contamination dans la ville même de Fukushima, les actions menées pour la faire baisser, et le fait que les habitants ont appris à éviter, dans leurs activités quotidiennes, les zones les plus contaminées (forêts par exemple).

Cette étude montre que le relevé de mesures individuelles associées à une description de l'activité des porteurs de dosimètres est un outil puissant pour une estimation réaliste de l'exposition et permet d'identifier les activités les plus exposées. Enfin, elle a été pour les lycéens japonais le moyen de comparer leur situation à d'autres régions du Japon et du monde, ainsi de se rassurer, et surtout de se prendre en charge. Au-delà, elle pourrait être utilisée pour que les personnes vivant dans des territoires contaminés disposent d'une quantification du risque.



Les lycéennes japonaises participant aux ateliers ont été accueillies par les élèves du lycée de Boulogne suite aux rencontres internationales de la radioprotection en 2015.

© DR

# La stratégie scientifique de l'IRSN

**Pour remplir ses missions d'expertise et de recherche, l'IRSN doit disposer des meilleures connaissances pour la maîtrise des risques nucléaires et radiologiques et les faire progresser. Pour guider ces progrès, il a identifié les défis par domaines, à l'instar de la stratégie nationale de recherche, et ainsi élaboré une véritable stratégie scientifique, désormais rendue publique. La conception de ce document a bénéficié des réflexions du Comité d'orientation des recherches et du Conseil scientifique de l'Institut.**

La stratégie scientifique de l'IRSN, qui vient d'être formalisée, vise essentiellement à poser les grands défis auxquels répondent les activités scientifiques et techniques de l'Institut. Son explicitation contribue à faciliter le dialogue de l'IRSN avec l'ensemble des parties prenantes, autour des grandes questions retenues comme prioritaires pour le progrès et la capitalisation des connaissances, et ainsi pour l'amélioration de la sûreté nucléaire et de la protection contre les rayonnements ionisants. Au nombre de 18, à la fois scientifiques et sociétales, ces questions s'articulent autour de deux enjeux fondamentaux : d'une part, garantir une exploitation sûre des installations nucléaires afin d'éviter un accident majeur ; d'autre part, mieux faire porter les efforts en matière de radioprotection, et les coûts élevés associés, là où il existe de réels enjeux.

En matière de radioprotection, la stratégie regroupe deux volets. Le premier consiste à comprendre l'impact sur le vivant (homme, animaux, plantes et leurs écosystèmes) d'expositions chroniques à de faibles doses de rayonnements ionisants, notamment sur des territoires contaminés. Le second concerne les personnes potentiellement soumises à une exposition aiguë aux rayonnements ionisants : patients et personnels de santé ; personnes exposées lors d'un accident ou d'un acte de malveillance. Plus généralement, la maîtrise des risques nucléaires et radiologiques renvoie à s'interroger sur l'efficacité de la préparation à la gestion d'un accident et de ses conséquences.

Dans le domaine de la sûreté et de la sécurité nucléaires, les questions prioritaires sont justifiées par le besoin de limiter l'impact des quelque 180 installations nucléaires françaises, civiles ou de défense, ainsi que des sources et des transports de matières radioactives. Quatre enjeux majeurs ont été identifiés. Tout d'abord, l'exploitation sûre des installations nucléaire au quotidien, tout au long de leur vie jusqu'à leur

démantèlement. Le deuxième enjeu est l'impératif d'éviter un accident majeur, et si néanmoins il se produisait, d'en limiter les conséquences. Le troisième est d'anticiper les problèmes de sûreté posés par le vieillissement des matériaux et structures. Enfin, le quatrième vise à maîtriser les questions de sûreté posées par les innovations technologiques.

Les travaux scientifiques à venir pour répondre à ces questions sont guidés par des lignes de forces. Il s'agit par exemple – l'IRSN ne pouvant répondre seul à ces questions – d'inscrire ces recherches dans le contexte national et international, par des partenariats tant académiques qu'industriels. La stratégie scientifique vient s'inscrire en cohérence avec les documents de gouvernance de l'IRSN : la charte d'éthique et de déontologie, le Contrat d'objectif et le Plan à moyen terme.

## CONTACT

**Véronique Rouyer**  
veronique.rouyer  
@irsn.fr

Direction de  
la stratégie, du  
développement et des  
partenariats - DSDP

En savoir plus  
sur La stratégie  
scientifique de l'IRSN  
pour faire progresser  
la sûreté nucléaire,  
la sécurité nucléaire et  
la radioprotection



**BIOAMPLIFICATION**

**D'UN POLLUANT :** augmentation de la concentration d'un polluant au fur et à mesure qu'il circule vers les maillons supérieurs d'un réseau trophique. La concentration est ainsi supérieure dans le prédateur que dans sa proie.

**DÉBIT DE DOSE AMBIANT :**

quantité d'énergie (due aux rayonnements ionisants) mesurée en un point de l'environnement du fait de la radioactivité des composantes présentes (sol, végétation, etc.), généralement exprimée en sievert par heure (Sv/h).

**DÉBIT DE DOSE**

**ABSORBÉE :** quantité d'énergie absorbée par unité de masse de matière exposée et par unité de temps, exprimée en gray par heure (Gy/h) où 1 Gy vaut 1 Joule par kg.

**FLAMME LAMINAIRE :**

flamme lente, avec une vitesse de l'ordre du mètre par seconde.

**FLAMME TURBULENTE :**

flamme accélérée en raison des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence créée notamment par la configuration des lieux. La flamme accélérée peut se muer en détonation avec une vitesse de l'ordre du kilomètre par seconde.

**POISSON PÉLAGIQUE :**

un poisson est appelé pélagique lorsque son mode de vie est inféodé à la colonne d'eau.

**REKO : REKOMBINATOR**

**SPARK :** Simulation for Passive Autocatalytic Recombiners' risks

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](http://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](http://www.irsn.fr)