

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

AKTIS

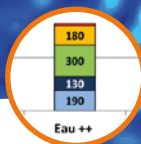
N° 22

L'actualité de la recherche à l'IRSN

octobre - décembre 2015

FOCUS

FAIRE PROGRESSER *la capacité d'évaluation des sollicitations SISMiques et de LEURS EFFETS sur les installations*



APPLICATIONS

Évaluation de la part due à l'alimentation dans l'exposition à la radioactivité naturelle



FORMATION

Modéliser la physico-chimie des aérosols de sodium lors d'un accident de cœur de RNR

DES CONNAISSANCES NOUVELLES ET PARTAGÉES POUR UNE MEILLEURE APPRÉCIATION INDIVIDUELLE DU RISQUE

L'exposition de la population aux rayonnements ionisants est la somme d'une part de radioactivité naturelle et d'une part issue de l'utilisation de la radioactivité à des fins médicales et industrielles ; ces parts sont variables pour chaque individu en fonction de ses lieu et mode de vie. Celle d'origine naturelle n'évolue pas dans sa caractérisation, mais sa quantification peut en être améliorée par les progrès de la métrologie et des études sur les habitudes. C'est ce que fait l'IRSN en vue de la mise à jour du bilan sur l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants.

Une des composantes de l'exposition provient de l'incorporation de radionucléides naturels *via* l'alimentation. Les précédentes éditions du bilan s'appuyaient – pour ce volet – sur des valeurs internationales moyennes. Afin d'en améliorer la connaissance, l'IRSN a travaillé sur une quantification scientifique plus fine, en distinguant différentes hypothèses d'habitudes alimentaires, par rapport auxquelles chacun pourra se situer.

En appliquant cette approche pour différentes voies de l'exposition individuelle (médicale, radon, trajet aérien en altitude...), l'IRSN vise à donner aux citoyens des clés pour se situer individuellement par rapport au risque.

Sans chercher à banaliser ou minimiser les expositions liées à l'industrie nucléaire en situation normale, voire accidentelle, les sources des rayonnements ionisants et les ordres de grandeur de l'exposition constituent les bases d'une culture en radioprotection, favorable à l'appréciation des risques et à la résilience dans toutes les situations. Raisons premières pour lesquelles l'IRSN investit à la fois dans ces études, et dans la manière de les partager.

Matthieu Schuler,

Directeur de la stratégie,
du développement et des partenariats

Aktis est la lettre d'information scientifique de l'IRSN. Elle présente les principaux résultats de recherches menées par l'Institut dans les domaines de la radioprotection, de la sûreté et de la sécurité 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 Goudedranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano, Isabelle Bellin/Technoscope - Réalisation : www.grouperougevit.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.



ÉDITO

Matthieu Schuler

APPLICATIONS DE LA RECHERCHE

PAGE 3

Évaluation de la part due à l'alimentation dans l'exposition à la radioactivité naturelle

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 5

Une technique de mesure avancée pour la validation d'ISIS, logiciel de simulation d'incendie

FOCUS

PAGE 6

Faire progresser la capacité d'évaluation des sollicitations sismiques et de leurs effets sur les installations

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

Modéliser la physico-chimie des aérosols de sodium lors d'un accident de cœur de RNR

PORTRAIT

PAGE 10

Jean-Christophe Sabroux : Des entrailles de la Terre au réacteur de fusion nucléaire ITER en passant par Mars

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

• Installations • Publication
• Séminaires • Prix • Soutenances

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photos de couverture : Amplification des ondes sismiques calculée par simulation numérique de la propagation des ondes sismiques dans le modèle zD représentant le bassin de Nice en couches hétérogènes.

© INRIA / Fabien Peyrusse

ÉVALUATION de la part due à l'alimentation dans l'exposition à la RADIOACTIVITÉ NATURELLE

L'IRSN actualise en 2015 le bilan de l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants grâce à de nouvelles analyses et notamment la prise en compte de données sur l'alimentation. Le précédent bilan, réalisé en 2010, reposait sur des données moyennes internationales. Si l'exposition médicale, c'est-à-dire liée à l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques, et l'exposition au radon sont les principaux contributeurs à ce bilan, l'incorporation par l'alimentation d'éléments radioactifs naturels y participe en moyenne à hauteur de 12 %, avec une variabilité dépendant surtout du type d'alimentation.

Les denrées alimentaires contiennent naturellement des radionucléides. Ceux-ci peuvent provenir des roches et des sols (radionucléides telluriques) : principalement le potassium 40 (^{40}K) et les descendants des uraniums 238 et 235 et du thorium 232. Sinon, il s'agit de radionucléides produits en permanence dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique (radionucléides cosmogéniques) : notamment le carbone 14 (^{14}C)⁽¹⁾. Ces radionucléides entrent dans la chaîne alimentaire par les racines et les feuilles de végétaux et sont ensuite transférés aux denrées d'origine animale (lait, viande et œuf) essentiellement par l'alimentation des animaux.

L'homme incorpore donc ces radionucléides naturels *via* son alimentation. L'exposition qu'ils génèrent est quantifiable par une dose exprimée en sievert par an (Sv/an), qui dépend de la teneur en radionucléides des denrées (activités massiques exprimées en Bq/kg), des quantités de denrées ingérées (kg/an), ainsi que de la radio-toxicité du radionucléide considéré, quantifiée par un facteur de dose exprimé en sievert par becquerel ingéré (Sv/Bq). Cette dose se répartit en trois composantes. La plus faible part, d'environ 20 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, provient des radionucléides cosmogéniques, peu radio-toxiques, dont la moitié est due au seul ^{14}C . La deuxième contribution à cette dose est due au ^{40}K . Elle est constante, car la teneur en potassium est constante dans l'organisme : 180 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ en moyenne pour un adulte.

Enfin, l'incorporation des descendants de l'uranium et du thorium constitue la principale contri-

bution à la dose due à l'ingestion de radionucléides naturels et la principale cause de variabilité. Elle est plus difficile à quantifier et très variable en fonction des denrées consommées. Jusque dans les années 1990, il existait très peu de données sur ces radionucléides dans l'alimentation. Lors de la précédente évaluation de l'exposition à la radioactivité naturelle, la dose n'avait pas pu être établie sur des données françaises et c'est la dose moyenne à l'échelle mondiale, de 230 μSv par an, estimée par l'UNSCEAR qui avait été utilisée. Grâce aux progrès métrologiques, de nouvelles données ont pu être recueillies *via* la surveillance de l'environnement ainsi que les différentes études et recherches menées par l'IRSN. Les activités massiques mesurées dans les denrées alimentaires provenant de l'ensemble du territoire pour quatre radionucléides naturels (le polonium 210, le plomb 210, le radium 226 et le radium 228) contribuent à plus de 90 % de la dose reçue par l'ingestion due aux descendants de l'uranium et du thorium.

Sur cette base, l'Institut a mené en 2014 une étude pour déterminer les teneurs de ces radioéléments dans les denrées produites en France, et évaluer les doses induites à l'aide d'enquêtes sur l'alimentation en France.

Dans les produits de la mer

L'analyse des données montre une grande variabilité des activités massiques mesurées. Contrairement à ce qui pouvait être attendu, celle-ci n'est pas liée à la teneur des sols en uranium et en thorium, mais principalement

CONTACT

Philippe Renaud
philippe.renaud@irsn.fr

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement – SESURE

⁽¹⁾ Parmi les autres radionucléides cosmogéniques, le tritium (^3H), le béryllium 7 (^7Be) et le sodium 22 (^{22}Na).

PUBLICATIONS

- Renaud P. et al. « ^{226}Ra and ^{228}Ra in French foodstuffs. » *Radioprotection* 50(2), 111-115, 2015.
- Renaud P. et al. « ^{210}Pb and ^{210}Po in French foodstuffs. » *Radioprotection* 50(2), 123-128, 2015.
- Renaud P. et al. « Doses to the French adult population linked to the intake of radionuclides of uranium and thorium decay-chains by ingestion of foodstuffs. » *Radioprotection* 50(2), 117-121, 2015.

⁽²⁾ Les références des publications concernant ces analyses et résultats sont listées dans les articles publiés dans Radioprotection, et référencés ci-contre.

aux types d'aliments (céréales, légumes-feuilles, fruits, viande, lait, poissons, coquillages). Les chercheurs ont mis en évidence que les activités massiques moyennes calculées, sur un an, pour chaque type de denrées sont représentatives de celles consommées par une personne, quel que soit l'endroit où elle réside.

Les activités massiques les plus élevées sont celles du polonium 210 dans les coquillages et les crustacés (en moyenne de 40 Bq/kg pour les coquillages, 10 à 20 Bq/kg pour les crustacés et les petits poissons). Elles résultent de la concentration de ce radionucléide dans le plancton, qui se répercute sur les animaux qui le consomment. Pour les autres types de denrées et les autres radionucléides, les teneurs sont entre 10 et 1 000 fois plus faibles que celles des produits de la mer.

À noter que les données françaises exploitées dans cette étude sont cohérentes avec les données bibliographiques internationales (notamment en Allemagne et au Royaume-Uni).

10 enquêtes alimentaires

Calculer la dose liée à l'ingestion de radionucléides naturels nécessite aussi de disposer d'éléments concernant les habitudes alimentaires des Français. Les résultats de 10 enquêtes alimentaires⁽²⁾ ont été comparés : 3 enquêtes alimentaires nationales menées

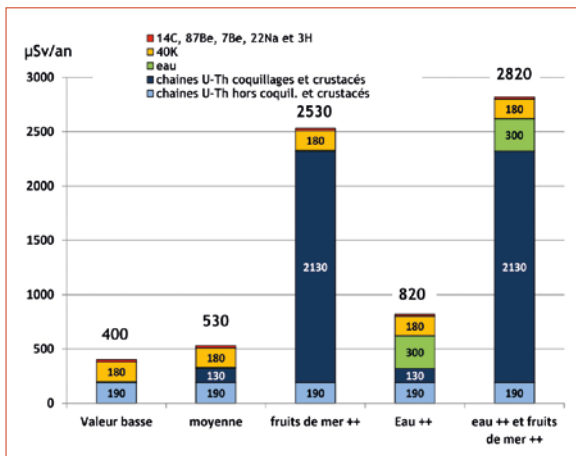
par l'INSEE et l'AFSSA (aujourd'hui ANSES), 6 enquêtes menées autour d'installations nucléaires dont 5 réalisées par l'IRSN, ainsi que l'enquête CALYPSO consacrée spécifiquement à la consommation de produits de la mer et menée par l'AFSSA et l'INRA.

Sur la base d'une ration alimentaire moyenne issue de ces enquêtes, la dose moyenne annuelle due à l'incorporation de descendants de l'uranium et du thorium est estimée à 320 µSv/an. Elle correspond à une consommation modérée de coquillages et crustacés de 4,6 kg/an (1 à 2 fois par mois) probablement représentative d'une large part de la population. Pour les personnes qui ne consomment jamais ces denrées, la dose minimale est de 190 µSv/an (provenant des autres aliments). Pour les personnes qui en consomment régulièrement (19 kg/an soit 1 à 2 fois par semaine), la dose serait de 720 µSv/an. Enfin, pour les personnes qui en consomment des rations importantes plusieurs fois par semaine (80 kg/an), la dose pourrait dépasser 2 400 µSv/an.

Eau de boisson

L'eau du robinet et les eaux embouteillées contiennent également des radionucléides descendants de l'uranium et du thorium. Leurs activités volumiques y sont encore plus variables. Contrairement aux denrées solides pour lesquelles les activités massiques moyennes nationales sont représentatives de celles consommées par un individu, l'eau consommée par une personne est soit son eau de distribution (du robinet) soit l'eau embouteillée de son choix. Les analyses effectuées dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux de boissons⁽²⁾ montrent que la dose reçue par 99,8 % des Français (adultes) *via* la consommation d'eau est inférieure à 100 µSv/an ; pour 0,2 % de la population (habitant dans des régions uranifères ou consommant une eau embouteillée parmi les plus riches en radionucléides naturels) elle peut atteindre au maximum 300 µSv/an.

Tous radionucléides confondus, la dose par ingestion de radionucléides naturel en France va de 400 µSv/an pour les personnes ne consommant pas de coquillages et crustacés, à plus de 2 820 µSv/an pour celles cumulant une forte consommation de ces denrées avec celle d'une eau très chargée en radionucléide.



Contribution des différents radionucléides naturels aux doses liées à l'ingestion de denrées, pour différentes habitudes alimentaires.

© IRSN

Une TECHNIQUE de MESURE AVANCÉE pour la VALIDATION D'ISIS, logiciel de simulation d'incendie

Au-delà des effets directs qu'un incendie induit dans une installation nucléaire, ses fumées peuvent provoquer des dysfonctionnements des systèmes de sauvegarde et gêner l'intervention. Anticiper ces effets constitue un enjeu de sûreté, qui passe essentiellement par la simulation de la propagation des fumées, réalisée à l'IRSN par le logiciel ISIS.

L'étude des écoulements de fumée dans une installation en cas d'incendie nécessite d'utiliser un logiciel, dit de type CFD⁽¹⁾, prenant en compte l'aspect multidimensionnel de l'écoulement. La validation de ces logiciels est réalisée à partir de données locales, obtenues dans des expériences à grande échelle. Pour valider son logiciel ISIS, l'IRSN a mis en œuvre la technique de Vélocimétrie par Image de Particules en Stéréoscopie ou SPIV. Elle permet de mesurer les champs de vitesse des écoulements à contre-courant de fumées et d'air frais pouvant s'établir au niveau d'un passage de porte en cas d'incendie.

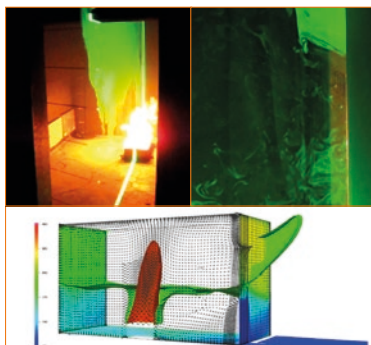
Deux enceintes expérimentales

L'application à grande échelle de cette méthode de mesure optique en trois dimensions aux fumées d'un incendie est un défi majeur en raison de leur caractère agressif (température des gaz élevée et présence de suies) et de la dimension de la zone d'investigation.

La méthode a été mise en œuvre dans deux enceintes expérimentales, une à échelle réduite (NYX, 1 m³) et une à échelle réelle (HYDRA, 21 m³), chacune comprenant une ouverture de porte et étant équipée d'un système de ventilation mécanique. Un feu de propane a été utilisé pour générer dans le passage de porte des écoulements à contre-courant.

Influence de la puissance de l'incendie

Les écoulements dans le passage de porte ont été étudiés pour différents états de la ventilation ; les sections de passage des écoulements entrants (air frais) et sortants (fumées), les zones de cisaillement ainsi que les zones à forte intensité turbulente en



La technique PIV permet la mesure non intrusive et instantanée d'un champ de vitesse, en visualisant, à l'aide de caméras, le déplacement de particules injectées dans l'écoulement et éclairées par un faisceau laser plan.

© IRSN

partie haute de la porte ont été caractérisées. Les mesures en trois dimensions ont permis d'évaluer la valeur instantanée des débits de fumées et d'air frais et de mieux comprendre l'influence de la puissance de l'incendie et de la ventilation mécanique sur la structure des écoulements. Des comparaisons entre les résultats expérimentaux et les prédictions du logiciel ISIS ont été réalisées dans le cas de l'enceinte NYX dans plusieurs configurations de feu et de ventilation. Elles ont montré l'aptitude du logiciel, (avec un modèle de turbulence de type k-ε), à prédire les champs de vitesses dans le passage de porte et ont démontré l'importance des forces de flottabilité sur la production de turbulence.

La technique de mesure SPIV est maintenant appliquée à d'autres types d'écoulements tels que ceux développés dans les passages d'une trémie horizontale et pour lesquels des régimes instables sont souvent observés.

CONTACT

Hugues Pretrel
hugues.pretrel@irsn.fr

Laboratoire
d'expérimentation
des feux - LEF

⁽¹⁾ CFD ou Computational Fluid Dynamic, désigne l'étude multidimensionnelle de l'écoulement d'un fluide à partir de la résolution numérique des équations, le plus souvent de Navier-Stokes, régissant l'écoulement.

PUBLICATIONS

• Koched A. *et al.*
« Experimental determination of the discharge flow coefficient at a doorway for fire induced flow in natural and mixed convection », *Fire and Materials*, Article first published online: 16 octobre 2014

• Suard S. *et al.*
« Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 81, February 2015, Pages 578-590

➕ En savoir plus sur le logiciel ISIS



FAIRE PROGRESSER la capacité d'évaluation des sollicitations SISMQUES et de LEURS EFFETS sur les installations

 Royal Observatory of Belgium, Renard Centre of Marine Geology, Vlaams Instituut voor De Zee (Belgique), Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London (Royaume-Uni), Université Lille 1 - Lab. Géosystèmes UMR 8217, IFSTTAR, INRIA, CEREMA - DTerMed Laboratory of Nice (France), ISTerre, CEA

CONTACTS

Christophe Clément
christophe.clement@irsni.fr

Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations - BERSIN

⁽¹⁾ L'approche déterministe évalue les mouvements sismiques pour des séismes analogues aux plus forts observés dans le passé sur la zone concernée, en postulant des hypothèses pénalisantes pour l'installation. L'approche probabiliste consiste, elle, à explorer l'ensemble des séismes envisageables en attribuant à chacun une probabilité de survenue puis à évaluer la probabilité de dépasser un niveau de mouvement de sol donné.

⁽²⁾ Séisme d'intensité^{gLO} estimée de VII-VIII à Calais et à Douvres, de VI à Londres, et mouvements ressentis jusqu'à Cologne, qui s'est produit en 1580 dans le détroit du Pas-de-Calais (Manche).

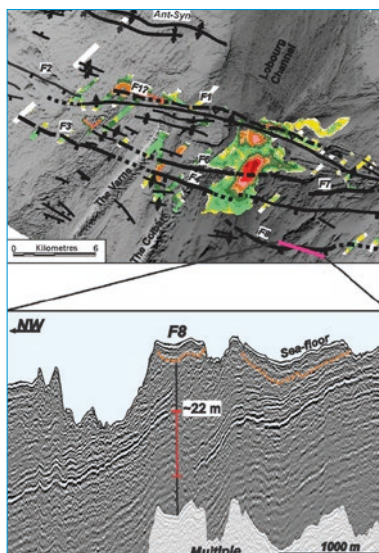
Comme l'accident de Fukushima l'a brutalement rappelé en mars 2011, la sûreté nucléaire nécessite une protection adéquate des installations contre toutes les formes d'agressions, et en particulier celles associées aux aléas naturels. Les séismes dont les conséquences peuvent affecter simultanément tous les systèmes de protection d'une installation bénéficient d'une attention toute particulière. Exploitées sur de longues périodes, les installations nucléaires ont été construites en tenant compte de ce risque, selon l'état de l'art et des connaissances au moment de leur conception, et en intégrant des marges de sécurité. Le retour d'expérience de l'accident japonais, et les grands rendez-vous que sont les réexamens décennaux des installations, donnent l'occasion de vérifier si ces dispositions retenues à la conception (niveau d'aléas et marges) restent suffisantes, au regard de l'évolution des connaissances scientifiques. Dans le même temps, l'IRSN joue au titre de sa mission de recherche, un rôle moteur dans le progrès de ces connaissances afin de porter la prévention des risques au meilleur niveau.

Évaluer l'aléa sismique pour une installation nucléaire consiste à quantifier les mouvements sismiques susceptibles d'être transmis à l'installation, là où elle est implantée. Cette quantification est nécessaire pour concevoir l'installation et pour vérifier sa sûreté. L'aléa sismique peut être évalué selon deux types d'approches, le cas échéant mises en œuvre de manière complémentaire : une approche déterministe et une approche probabiliste⁽¹⁾. Quelle que soit la méthode, il faut connaître les séismes survenus dans le passé et les failles susceptibles d'en générer dans la région d'étude. À partir des caractéristiques des séismes possibles dans une région, les mouvements du sol qu'ils produiraient sur un site spécifique sont estimés à l'aide d'équations de prédiction. Ces dernières sont développées à partir des bases de données d'enregistrements de mouvements du sol existant pour l'Europe et d'autres régions du monde. Ces calculs sont complétés par des informations sur les propriétés des couches géologiques ; celles-ci peuvent en effet modifier les mouvements sismiques à la surface du sol, phénomène communément appelé « effet de site ». Une fois définis par les spécialistes de l'aléa sismique, les mouvements de sol sont utilisés par les ingénieurs pour évaluer le comportement des structures et des équipements qui y seraient

soumis et les conséquences associées. L'IRSN mène ainsi des recherches sur l'aléa pour disposer des connaissances nécessaires à l'évaluation du risque.

Activité tectonique quaternaire

L'IRSN est l'un des spécialistes reconnus dans le domaine des séismes et des failles actives ; il est co-producteur, avec le BRGM et EDF, de SISFRANCE (www.sisfrance.net), base de données nationale de la sismicité historique dont la constitution a démarré il y a plus de trente ans, et dont l'actualisation se poursuit aujourd'hui encore. Ainsi, le BERSIN a récemment participé à l'étude des failles au voisinage de l'épicentre estimé d'un séisme historique important⁽²⁾ présumé lié au système de failles dit « Nord-Artois » (Manche), et plus précisément à la faille de Sangatte, dont la géométrie et l'activité tectonique au quaternaire étaient mal connues. Une équipe de chercheurs, menée par l'Observatoire royal de Belgique, a collecté de nombreuses données de sismique réflexion^{gLO} ainsi que des données bathymétriques^{gLO} sur une étendue de 300 km² lors de plusieurs campagnes en mer. L'analyse des couches géologiques fournies par les profils reconstitués sur une tranche de 100 m au-dessous du fond de la mer et les corrélations entre les différents types de données acquises ont permis de construire une carte géologique et structurale détaillée de la zone.



Section d'un profil de sismique réflexion monocanal (ligne rose sur la carte) permettant l'imagerie des failles dans le détroit du Pas-de-Calais (Manche). La ligne rouge indique le décalage des strates du Wealdien (étage du Crétacé inférieur) par la faille F8. La ligne pointillée orange indique la base des dépôts quaternaires préservés dans des paléo-chaenaux et paléo-bassins.

© David Garcia-Moreno

L'activité tectonique quaternaire du système de faille étudié a ainsi pu être évaluée. Si l'origine précise du tremblement de terre de 1580 n'a pu être déterminée en raison de limites inhérentes à ces données, l'étude a montré que des séismes d'une magnitude^{GL0} égale ou supérieure à celle de ce séisme historique semblent avoir été extrêmement rares dans cette zone. Elle a par ailleurs mis en évidence la présence d'un réseau de failles complexe, susceptibles de générer des séismes de magnitude allant jusqu'à 7 compte tenu de sa géométrie et de sa taille.

Équations de propagation

Outre la connaissance des failles à l'origine des séismes, le calcul de l'aléa doit aussi prendre en compte l'effet des propriétés mécaniques du sol sur lequel sont construits les bâtiments concernés. Certaines configurations géologiques peuvent en effet modifier significativement les mouvements de sol, en allonger la durée et en augmenter l'amplitude, comme ce fut notamment

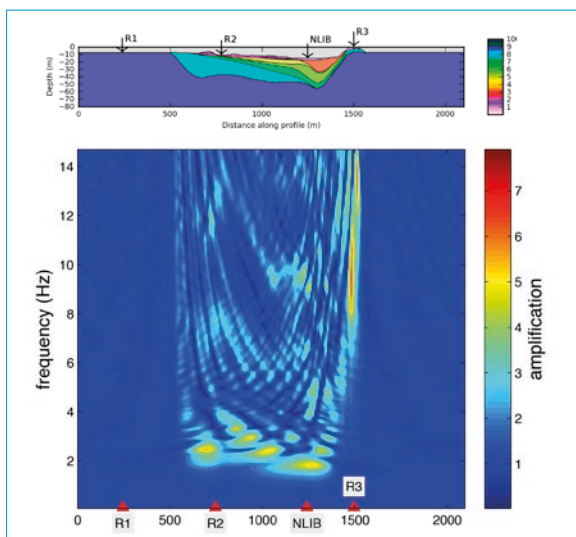
le cas lors du séisme qui a dévasté la région de Mexico en 1985. Pour évaluer cet « effet de site », de nombreuses études ont été réalisées sur la propagation des ondes sismiques, notamment dans les bassins sédimentaires. Afin d'évaluer le mouvement sismique en surface dans un bassin sédimentaire en tenant compte de la topographie environnante, l'une des solutions consiste à réaliser des simulations numériques de la propagation des ondes sismiques, la difficulté étant de définir la méthode numérique la plus adaptée pour résoudre les équations de propagation. Une équipe de chercheurs à laquelle l'IRSN était associé, a testé les résultats obtenus par une méthode aux éléments finis spécifique (Galerkin discontinue) et par une méthode aux différences finies pour résoudre ces équations, dans une topographie proche de la réalité et en tenant compte des pertes d'énergie non élastiques (par frottement) dans le milieu. La comparaison des simulations obtenues par les deux méthodes a d'abord été réalisée pour une configuration géologique fictive comportant sept couches sédimentaires de propriétés mécaniques différentes ; la très bonne concordance entre signaux sismiques simulés a permis de vérifier la pertinence des méthodes. La même opération a été réalisée avec une représentation en deux

En savoir plus sur le BERSISS



PUBLICATIONS

- Garcia-Moreno D. *et al.* « Fault activity in the epicentral area of the 1580 Dover Strait (Pas-de-Calais) earthquake (northwestern Europe) », *Geophysical Journal International*, (2015) 201, 528–542
- Peyrusse F. *et al.* « A nodal discontinuous Galerkin method for site effects assessment in viscoelastic media—verification and validation in the Nice basin », *Geophysical Journal International*, (2014) 199, 315–334.



En haut, modèle 2D représentant le bassin de Nice en couches hétérogènes le long de la coupe passant par NLIB. En bas, amplification des ondes sismiques calculée par simulation numérique de la propagation des ondes sismiques dans ce modèle.

© INRIA/Fabien Peyrusse

⁽⁴⁾ Collectés lors des différents séismes enregistrés à travers le monde (France, Italie, Japon, Etats-Unis, Nouvelle-Zélande...)

PUBLICATION

• Lancieri M. et al.
« Strategy for the selection of input ground motion for inelastic structural response analysis based on naïve Bayesian classifier », *Bulletin of Earthquake Engineering* (2015) 13:2517–2546

dimensions du bassin sédimentaire de Nice, en tenant compte des reliefs environnants. Plusieurs modèles représentant le bassin ont été testés, puis les simulations obtenues ont été comparées avec des enregistrements de séismes réels : les modèles représentant le bassin en couches hétérogènes aboutissent à des valeurs de l'amplification et de la fréquence des ondes sismiques proches de celles observées à partir des enregistrements. Les simulations réalisées montrent une amplification importante des ondes sismiques dans le bassin de Nice, avec une réverbération sur les côtés liée au piégeage des ondes dans le bassin. Une bonne connaissance de la géométrie et des propriétés du sol en profondeur est donc nécessaire dans ce type de configuration géologique pour assurer une meilleure évaluation de l'aléa sismique.

Sélectionner les enregistrements adéquats

Pour ensuite évaluer les effets de l'aléa sur les bâtiments, les ingénieurs du génie civil effectuent usuellement un calcul linéaire où les structures sont modélisées par des ressorts : la réponse des bâtiments est établie pour l'accélération maximale attendue, et ce pour toutes les fréquences de résonance possibles de bâtiments. Cette méthode permet de savoir à quel niveau de sollicitation les bâtiments sont endommagés compte tenu de leur fréquence propre. Ce type de calcul utilise directement la description du mouvement sismique issue du calcul de l'aléa.

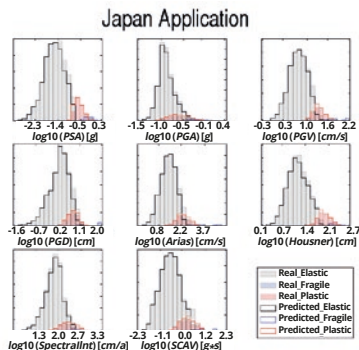
Une approche alternative consiste à réaliser des calculs non linéaires. Ceux-ci permettent d'étudier l'effet du séisme sur les structures pendant toute la durée de l'évènement et non plus seulement au moment de l'accélération maximale. Il est nécessaire pour cela de disposer d'enregistrements de l'accélération du sol en fonction du temps : en effet, pour ce type d'analyse, d'autres facteurs tels que la durée ou l'énergie du séisme peuvent influencer sur le niveau d'endommagement des structures. Toute la question est de fournir aux ingénieurs en charge du calcul des structures les enregistrements adéquats qui leur permettront d'étudier l'endommagement. Il faut pour cela les sélectionner dans les bases de données d'accélérogrammes⁽⁵⁾.

Pour les aider dans ce travail, les chercheurs de l'IRSN ont développé un algorithme de classification « naïve bayésienne » permettant de sélectionner les mouvements sismiques en fonction de leur impact sur un modèle simplifié de structure, à savoir un oscillateur à un degré de liberté (comportement décrit par le modèle élasto-plastique de Takeda). Ce modèle a été soumis à 6 373 mouvements sismiques, décrits chacun par un ensemble d'indicateurs représentatifs des propriétés du signal (énergie, amplitude, durée) produisant des effets classés selon trois types : intact, légèrement endommagé ou ruiné. Les mouvements et leurs effets ont été utilisés comme données d'entrée de l'algorithme statistique qui réalise la classification « naïve bayésienne ». Son développement s'est décomposé en trois phases. Dans la phase d'apprentissage, l'algorithme a établi des règles permettant d'associer les différents paramètres descriptifs du mouvement à leurs effets sur les modèles de structures. Dans la phase de validation, les mouvements sismiques utilisés pour l'apprentissage ont été classés en fonction des effets. Dans la phase d'application, l'algorithme a été appliqué sur une autre base de données comprenant 7 000 mouvements sismiques enregistrés au Japon. La plupart des données a été correctement classée avec des pourcentages de succès variant de 70 % à 90 % en fonction du modèle de structure. Cette méthode s'avère donc permettre de sélectionner correctement et rapidement dans une base de données enregistrées, les accélérogrammes en fonction de leurs effets sur une structure.

C'est grâce à l'éclairage des différents travaux de recherche évoqués précédemment que l'IRSN est en mesure de conduire les expertises qui lui sont confiées et de vérifier que les évaluations du risque sismique produites par les exploitants sont suffisamment robustes, tout en restant réalistes, pour garantir un haut niveau de sûreté.

Application de l'algorithme de classification « naïve bayésienne » à la base d'accélérogrammes enregistrés au Japon. Les diagrammes représentent les distributions des différents paramètres en fonction de l'impact sur la structure. Distributions observées : histogrammes pleins (en gris structure intacte, en rouge structure légèrement endommagée, en bleu structure ruinée). Distributions obtenues en appliquant l'algorithme : histogrammes vides (trait noir structure intacte, trait rouge structure légèrement endommagée, trait bleu structure ruinée).

© IRSN



Modéliser la PHYSICO-CHIMIE des AÉROSOLS de SODIUM lors d'un ACCIDENT de cœur de RNR

Dans la perspective d'analyser le rapport de sûreté d'un prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) refroidi au sodium, une thèse menée récemment à l'IRSN a permis de mieux comprendre le comportement des aérosols de sodium.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité industrielle d'une 4^e génération de réacteurs nucléaires⁽¹⁾ en France, le CEA a engagé un projet de démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium liquide baptisé ASTRID. L'un des scénarios d'accident grave étudié pour un tel réacteur est une fusion généralisée du cœur accompagnée d'un dégagement d'énergie projetant du sodium pulvérisé, ainsi que des produits de fission, dans l'enceinte de confinement. Le sodium s'enflamme au contact de l'air et produit des aérosols d'oxyde de sodium toxiques et contaminés. Pour mieux appréhender les risques chimiques et radiologiques associés à ce type d'accident, l'IRSN a notamment engagé le développement du logiciel ASTEC-Na, qui étend à cette technologie son savoir-faire en simulation numérique d'accidents. La thèse menée par Emmanuel Mathé avait ainsi pour objectif de modéliser l'évolution physico-chimique des aérosols de sodium seuls, puis avec les produits de fission présents dans l'enceinte.

Feux de Na pulvérisé

Il a d'abord amélioré la modélisation des feux de sodium pulvérisé susceptibles de se produire durant ce type d'accident en enrichissant un logiciel de calcul existant. Après une validation à l'aide de résultats d'expérience existants, il a utilisé le logiciel pour évaluer la quantité d'aérosols d'oxydes de sodium pouvant être produite durant ces feux. Ces aérosols d'oxydes de sodium évoluent dans le temps en hydroxyde puis carbonate et bicarbonate de sodium. E. Mathé a par ailleurs modélisé ces transformations et leurs cinétiques afin d'évaluer les formes chimiques finales, dont la part chimiquement toxique. Pour valider ces modèles, il a conçu l'expérience ESSTIA dans le cadre du projet européen JASMIN coordonné



Le dispositif expérimental ESSTIA comprenant deux boîtes à gants.

© IRSN

par l'IRSN qui permet de mesurer les cinétiques de consommation de CO₂. Ces modèles seront prochainement intégrés dans le logiciel ASTEC-Na.

Interaction iode-hydroxyde

Enfin, le doctorant a initié des calculs d'interactions entre les aérosols de sodium et les produits de fission, en ne considérant en première approche que l'hydroxyde de sodium et l'iode. Ces réactions peuvent en effet notamment modifier la fraction d'iode volatile dont la rétention dans l'enceinte de confinement sera plus difficile que sous forme aérosol. En utilisant une méthode de chimie théorique, la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT), il a montré que des composés d'hydroxyde de sodium et d'iode ne sont pas stables à haute température, rendant possible en cas de feu de sodium le relâchement de l'iode initialement piégé dans le sodium. Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une nouvelle thèse débutée en 2015.

 Laboratoire de PhysicoChimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère (PC2A), Université de Lille 1; programme JASMIN


CONTACT

Nathalie Girault
nathalie.girault@irsn.fr
Service des accidents graves - SAG

⁽¹⁾ Cinq autres types de réacteurs à neutrons rapides sont envisagés dans le monde.

PUBLICATIONS

- *Comportement des radiocontaminants dans les confinements d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium en situation accidentelle*, thèse soutenue par Emmanuel Mathé le 17 octobre 2014 à l'Université de Lille, école doctorale « Science de la matière, du rayonnement et de l'environnement ».
- *Improved Modelling of Sodium-Spray Fires and Sodium-Combustion Aerosol Chemical Evolution*, ICAPP 2015, Nice, France, 3-6 mai 2015.

 En savoir plus sur le programme JASMIN



JEAN-CHRISTOPHE SABROUX:

Des entrailles de la Terre au RÉACTEUR DE FUSION NUCLÉAIRE ITER en passant par Mars

CONTACT

Jean-Christophe Sabroux
jean-christophe.sabroux
@irsn.fr

Chercheur éclectique et ingénieur de formation, Jean-Christophe Sabroux est avant tout un passionné des sciences de la Terre.

Spécialiste de la physico-chimie des gaz volcaniques, il aime créer des passerelles entre des univers scientifiques qui s'ignorent.

À l'IRSN depuis 1992, il a ainsi contribué à de belles découvertes scientifiques et à la conception de plusieurs outils pour la recherche ou l'industrie.



Jean-Christophe Sabroux, expert senior de l'IRSN en physico-chimie et métrologie des polluants, chercheur au Service du confinement et de l'aérodispersion des polluants (SCA)
© IRSN

toujours sur la physico-chimie des gaz. Retrouvant son âme d'ingénieur, il contribue à qualifier des recombineurs d'hydrogène pour prévenir une explosion d'hydrogène en cas d'accident grave. Ils sont imposés depuis 2007 dans toutes les centrales françaises.

Nommé en 2006 expert senior de l'IRSN, il peut à loisir décroiser les recherches. C'est ainsi qu'il imagine une méthode inattendue pour évaluer la présence d'eau dans le sous-sol martien... à partir de la mesure du radon-222, élément sur lequel il avait travaillé pour la radioprotection dans les mines d'uranium françaises et pour prévoir les éruptions volcaniques et les tremblements de terre. « Avec Pierre-Yves Meslin, brillant doctorant cofinancé par le CNES, nous avons pu vérifier la présence de radon sur Mars et établir la carte de l'uranium martien. » Il étudie aujourd'hui le risque d'explosions dans les tokamaks du réacteur ITER avec Anthony Rondeau qui soutiendra sa thèse en décembre 2015. Son autre terrain de jeu actuel concerne l'amélioration des pièges à iode, que l'IRSN a remis sur le métier après l'accident de Fukushima. « Nous travaillons avec des spécialistes des atmosphères marines, riches en iode, produit par les algues. »

Il foisonne aussi d'idées de recherches exploratoires. Comme la tomographie par muons utilisée par Nolwenn Lesparre, en post-doctorat, pour caractériser la densité des roches autour des galeries de Tournemire, le laboratoire souterrain d'étude des conditions de stockage géologique de déchets radioactifs de l'IRSN. Et des chercheurs japonais ont eu la même idée pour visualiser... le cœur fondu des réacteurs de Fukushima ! Les grandes idées se rencontrent.

« Un bon chercheur est un ultraspecialiste ouvert aux autres domaines de recherche, car la science a souvent déjà été explorée par d'autres avec un autre objectif » : le parcours de Jean-Christophe Sabroux illustre fort bien sa propre définition, au gré de ses travaux en volcanologie ou en sûreté nucléaire, alimentées ou tirant parti de la recherche spatiale, cosmique ou marine, toujours en lien avec les sciences de la Terre.

• Parmi les descendants de l'uranium-238, le radon-222 est le seul élément radioactif gazeux.

• L'iode-131, radioactif et cancérigène, est un des composants qui peut être libéré massivement lors d'un accident nucléaire.

• Nous baignons dans un flux constant et quasi-isotrope de muons, particules élémentaires issues des rayons cosmiques. L'analyse de ce flux, ralenti par la matière traversée, permet de révéler les différences de densité.

Centrien, il opte d'emblée pour une voie originale, la recherche, avec une thèse au CEA sur les polluants atmosphériques. Il y rencontre Haroun Tazieff et se passionne pour la volcanologie et ses rejets gazeux au cours de nombreuses missions dont l'Erebus en Antarctique. Chercheur au CNRS pendant quinze ans, il comprend vite la richesse des analogies interdisciplinaires auprès d'un autre grand nom, Jacques Labeyrie, spécialiste des datations radioactives. Après deux ans d'expatriation en Indonésie, pays de volcans, il rejoint le CEA, en 1992, pour travailler à l'IPSN (aujourd'hui IRSN) sur la sûreté nucléaire, mais

INSTALLATIONS

DIVERGENCE DU RÉACTEUR CABRI

Mardi 20 octobre 2015, après douze ans d'une modification profonde et de rénovations en vue de permettre la réalisation, à l'instigation de l'IRSN, des essais en conditions réelles (en eau et sous pression), le réacteur CABRI, exploité par le CEA à Cadarache a divergé pour la première fois dans sa nouvelle configuration. Des essais de démarrage doivent maintenant valider le fonctionnement complet du réacteur, avant la réalisation à partir de 2017 du programme CIP (CABRI International Programme) piloté par l'IRSN.

PUBLICATION

VERSION ANGLAISE DU LIVRE

« LES ACCIDENTS DE FUSION DU CŒUR DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES DE PUISSANCE »



L'IRSN a publié en septembre la version anglaise de son ouvrage, « *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance. État des connaissances* » dans la Collection sciences et techniques.

Ce dernier, édité en 2013 par EDP Sciences, compile l'une des sommes de connaissances les plus complètes jamais réalisées sur la phénoménologie des accidents graves. Les deux versions, française et anglaise, sont accessibles en format PDF sur le site, et peuvent être commandées auprès de l'éditeur pour ceux souhaitant une version papier, en application d'une politique précisée en matière d'édition respectueuse du développement durable.

SÉMINAIRES

« FRICTION, FRACTURE, FAILURE / MICROSTRUCTURAL EFFECTS » EN OCTOBRE

À l'occasion des 10 ans du renouvellement de leur laboratoire de micromécanique et intégrité des structures (MIST), l'IRSN et le LMGC (CNRS-Université de Montpellier) ont organisé un *workshop* international sur le thème « Friction, fracture, failure / Microstructural effects ». Le *workshop* s'est déroulé sur trois jours, du 12 au 15 octobre 2015, à Montpellier.

PROCHAIN SÉMINAIRE DU GDR FEUX À CADARACHE

L'IRSN accueillera le prochain séminaire du groupe de recherche « Feux » du CNRS. Il se déroulera à Cadarache les 28 et 29 janvier 2016,

et comprendra notamment une visite du Laboratoire d'expérimentation des feux de l'Institut. Rassemblant de 100 à 150 personnes issues des laboratoires universitaires, des centres techniques et du monde industriel, ce séminaire semestriel fait le point sur les avancées de la communauté scientifique française dans le domaine des feux.

PRIX

BEST PAPER AWARD À NURETH-16

Une équipe de chercheurs du pôle de sûreté nucléaire de l'IRSN a reçu le prix du meilleur article (Best Paper Award) lors de la dernière conférence Nureth-16 qui s'est tenue du 30 août au 4 septembre 2015 à Chicago (États-Unis). Ce papier titré « First results of large scale debris bed reflood in PEARL facility » présente à la fois des résultats expérimentaux et des travaux d'interprétation et de modélisation des phénomènes physiques observés réalisés dans le cadre du programme PROGRES. L'objectif de ce programme est d'étudier les conditions de refroidissement d'un cœur de réacteur accidenté.

SOUTENANCES

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR)

Frédérique Eyrolle-Boyer, a soutenu son HDR « *Origine, comportement et devenir des radionucléides en milieu aquatique continental* » le 17 novembre 2015 à l'Université d'Aix-Marseille.

THÈSES

Soutenances de thèse.

- **Rémi Clavier**, le 6 novembre 2015 à Saint-Paul-lez-Durance : *Étude expérimentale et modélisation des pertes de pression lors du renoyage d'un lit de débris.*
- **Alicia Cuvier**, le 6 novembre 2015 à Toulouse : *Accumulation et source de l'uranium, de ses descendants et des éléments traces métalliques autour des anciens sites miniers uranifères.*
- **Jules Goulier**, le 2 novembre 2015 à Orléans soutiendra sa thèse *Comportements aux limites de flammes de prémélange hydrogène/air/diluants. Étude de la transition flamme laminaire-flamme turbulente.*
- **Julien Trincal**, le 30 octobre 2015 à Saint-Paul-lez-Durance : *Modélisation du comportement de l'iode dans l'atmosphère.*
- **Nicolas BAUDIN**, le 26 octobre 2015 à Toulouse : *Étude expérimentale et modélisation de l'ébullition transitoire.*
- **Xavier HALLER**, le 23 octobre 2015 à Montpellier : *Modélisation du comportement élastique des matériaux nanoporeux : application au combustible UO_2 .*
- **Mokrane BELHARET**, le 6 octobre 2015 à Toulouse : *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).*

En savoir plus sur le livre « *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance* » En anglais



En français



BATHYMÉTRIE :

Mesure des profondeurs et du relief de l'océan pour déterminer la topographie du fond de la mer.

INTENSITÉ D'UN SÉISME :

Mesure de la sévérité des effets de la secousse sismique (ressenti des personnes, dégâts sur les constructions, modifications du paysage), sur une échelle de degrés notés en chiffres romains. Plusieurs échelles existent, celle utilisée en Europe en général est l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik ou MSK.

MAGNITUDE D'UN

SÉISME : Mesure de la quantité d'énergie libérée au foyer d'un séisme (le plus puissant séisme enregistré avait une magnitude de 9,5).

SISMIQUE RÉFLEXION :

Technique de prospection qui utilise la réflexion des ondes sur les interfaces entre différents milieux géologiques pour obtenir des informations sur la structure du sous-sol. En sismique marine, les ondes acoustiques sont produites dans l'eau par des canons à air et les ondes réfléchies sont enregistrées par des cables d'hydrophones tirés par un navire.

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