

N°33
AVRIL 2017

Le magazine de l'IRSN

REPERES



EN PRATIQUE

Niveaux de référence
diagnostiques : optimiser
les doses délivrées

DOSSIER

Criticité Simuler pour prévenir les risques d'accident



FAITS ET PERSPECTIVES

Que deviennent
les mines d'uranium ?



Le numéro 25 d'Aktis est paru

Au sommaire du dernier numéro d'Aktis : une présentation de Nuclea, base de données thermodynamiques pour les matériaux constituant le cœur du réacteur, l'évaluation de la « dose biologique » reçue en cas de contamination, les investigations géochimiques en aval d'anciennes mines d'uranium et l'utilisation de cellules souches pour traiter les douleurs viscérales radio-induites. Aktis est un trimestriel multimédia dédié à l'actualité de la recherche à l'Institut. www.irs.fr/aktis25

Guide pratique pour la réalisation des études dosimétriques

Ce guide pratique propose aux acteurs impliqués dans

la radioprotection du personnel – employeurs, personnes compétentes en radioprotection et médecins du travail – une approche méthodologique pour réaliser des études dosimétriques de poste de travail. Cette 4^e édition intègre la mise à jour des références réglementaires ainsi que deux nouvelles fiches : scanographie et curiethérapie. www.irs.fr/etude-poste-V4



La sûreté des réacteurs à eau sous pression

L'ouvrage de Jean Couturier et Michel Schwarz, experts à l'IRSN, expose les recherches menées depuis une quarantaine d'années sur la sûreté des réacteurs à eau sous pression : accidents de fusion de combustible, incendie, séisme, facteurs humains, etc. Pour chaque thème, ce livre aborde les incertitudes qui

demeurent et les connaissances à acquérir. Il vise également à diffuser les connaissances existantes en la matière.

* État des recherches dans le domaine de la sûreté des réacteurs à eau sous pression, éditions EDP Sciences, collection sciences et techniques.



Retrouvez le dossier sur le cristallin paru dans Repères n° 22

Paru dans Repères n° 22, le dossier « Cristallin : les yeux sous haute radioprotection » a connu un vif succès. Pour le retrouver, connectez-vous sur irs.fr/repères ! Toutes les versions digitales du magazine peuvent être consultées en ligne ou téléchargées. Vous pouvez aussi en obtenir un exemplaire papier en remplissant le formulaire de commande sur le site. www.irs.fr/Commander-Reperes

On line WEBMAG

www.irs.fr/R33



Inspection : un réacteur au peigne fin

Un écart détecté sur le moteur diesel du groupe électrogène



Prévenir l'accident de criticité et en limiter les conséquences



Les niveaux de référence diagnostiques : une porte d'entrée vers d'autres problématiques d'optimisation

Agenda

Du 18 au 20 avril 2017
Nîmes (Gard)

"Radioactivité : des centaines de questions, une exposition"

Cette exposition, réalisée par l'ASN et l'IRSN, contribue à répondre aux questions que le grand public se pose sur le nucléaire et la radioactivité. Présentée dans les lycées, les universités et les commissions locales d'information (CLI), elle voyage dans toute la France.

Plus d'information :
fabrice.ecrabet@irs.fr
genevieve.baumont@irs.fr

Du 7 au 9 juin 2017
Grand Palais de Lille (Nord)

"Congrès national de radioprotection"

Au programme, 55 communications orales, dont un tiers assuré par des experts de l'IRSN. Retrouvez, par ailleurs, sur le stand de l'Institut ses actions en faveur de la radioprotection des patients et des travailleurs, les activités du Laboratoire de dosimétrie (LDI) et les formations.

Plus d'information :
www.sfrp.asso.fr

Du 19 au 25 juin 2017
Le Bourget (Ile-de-France)

"Salon de l'aéronautique et de l'espace"

Lors du prochain Salon du Bourget, l'IRSN partagera un stand (hall 6, stand A1) avec l'Observatoire de Paris. L'Institut y présentera le système sievert PN, outil de calcul des doses individuelles des personnels navigants. À voir également, une « chambre à brouillard », un appareil permettant de « montrer » le rayonnement cosmique au grand public, auquel le Salon sera ouvert les 3 derniers jours.

Plus d'information
www.sievert-system.org

Abonnement

POUR VOUS ABONNER
irs.fr/rubrique_publications

Sommaire

En couverture : un ingénieur « calcul » en criticité visualise une modélisation d'un emballage de transport

TEMPS FORTS

Radiothérapie

Un traitement expérimental contre les séquelles sévères



Japon

Rendre la population experte pour mieux décider

FAITS ET PERSPECTIVES

Que deviennent les mines d'uranium ?

ZOOM

Des doigts de feu pris sur le vif

© Lucien Lung/IRSN

Criticité : l'enjeu de la recherche

Invisible, mais présent dès que l'on manipule des matières fissiles, le risque de criticité exige une vigilance permanente, comme l'explique le dossier de ce numéro de *Repères*.

Son évaluation nécessite des connaissances obtenues dans le cadre d'actions de recherche.

Après avoir utilisé les installations expérimentales du CEA à Valduc qui ont fermé en décembre 2013, l'IRSN a lancé le projet international Princess¹ qui a pour objectif d'établir des collaborations avec des pays disposant de moyens de recherche en criticité.

Des programmes expérimentaux sont d'ores et déjà engagés avec les États-Unis et des discussions sont en cours avec le Japon, la Belgique et la Russie.

1. *Project for IRSN Neutron physics and Criticality Experimental data for Supporting Safety*

Stéphane Evo

Chef du service de neutronique et des risques de criticité

Criticité
Simuler pour prévenir les accidents

Dossier du prochain N° :
La surveillance de la radioactivité dans l'air

EN PRATIQUE

Niveaux de référence diagnostiques : **optimiser les doses délivrées**



INTÉRÊT PUBLIC

Cartographie : où sont les zones de rémanence radioactives ?

REPORTAGE

Inspection

Un réacteur passé au peigne fin

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : www.irsn.fr – Courriel : reperes@irsn.fr – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la rédaction : Marie-Pierre Bigot – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Stéphanie Clavelle, Aleth Delattre, Pascale Monti – Comité de lecture : François Bréchignac, Georges Henri Mouton – Rédaction et réalisation : CITIZENPRESS – Iconographie : Marie-Laure Fior – Photos de couverture : © Levillain/Signatures/IRSN – Impression : Galaxy (72) – Imprimé sur Cyclus print – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (web) – avril 2017.

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

"Co-activité"

Le chantier du métro inspire les experts

Quel est le point commun entre le projet de centre d'enfouissement de déchets radioactifs Cigéo et le prolongement de la ligne 14 du métro parisien? Outre qu'il s'agit de lieux clos et souterrains, une partie de l'ouvrage sera exploitée tandis qu'une autre partie sera encore en construction. On appelle cette simultanéité la "co-activité". Quand les premières alvéoles de stockage de Cigéo seront en fonction, les suivantes seront creusées. Afin de comprendre les risques et les difficultés de "cohabitation" entre différentes zones de travail sans cesse en reconfiguration, mais censées ne jamais se rencontrer, l'IRSN a lancé un projet de recherche en sciences humaines et sociales¹, en partenariat avec la RATP et le Centre de sociologie des organisations (CSO-IEP de Paris). Elsa Gisquet, sociologue à l'IRSN, et Gwenaëlle Rot, sociologue au CSO, étudient l'organisation déployée par la RATP et ses intervenants dans le cadre du prolongement de la ligne 14. Ce projet de recherche se poursuit jusqu'en 2018.

1. Projet COSEA (CO-activité et sûreté en acte).

WWW Pour en savoir plus : www.irsn.fr/cosea

NIVEAUX DE RÉFÉRENCE (NRD)

88 %

C'est le taux de participation des services de médecine nucléaire à la collecte des données pour les NRD entre 2013 et 2015.

Ce taux est de 79 % en scanographie, et de seulement 29 % en radiologie conventionnelle.

- 40 %

Les NRD ont diminué en moyenne de 40 % entre 2011 et 2015. Ce résultat est le fruit des progrès technologiques mais aussi de l'amélioration des pratiques.

Santé

Cellules stromales mésenchymateuses provenant du tissu adipeux de rats encapsulées dans un biomatériau, avant injection au niveau du côlon irradié.

© 1996-98 AccuSoft Inc. All rights reserved

Radiothérapie

Un traitement expérimental contre les séquelles sévères

Inflammations, ulcères... 3 à 5 % des patients traités par radiothérapie pour des cancers de la zone abdomino-pelvienne développent des complications intestinales sévères cinq années après la fin des rayons. Pour soigner ces séquelles, un nouveau traitement est en cours d'expérimentation sur l'animal dans le cadre du projet Anthos, dirigé par Noëlle Mathieu, biologiste à l'IRSN. Il utilise les cellules stromales mésenchymateuses (CSM) de la moelle osseuse. Ces dernières sécrètent des molécules qui favorisent un micro-environnement propice à la régénération des tissus. L'injection intraveineuse de CSM a été d'abord proposée en dernier recours aux patients développant les séquelles les plus graves au début des années 2000 à la suite de l'accident d'Épinal¹ (Vosges). Les résultats étaient significatifs pour le patient : diminution des douleurs, diminution du nombre de transfusions sanguines... Mais beaucoup des cellules souches injectées se "perdaient" dans l'organisme sans atteindre leur cible.

Les chercheurs réunis au sein du projet Anthos ont eu l'idée d'appliquer les CSM directement au contact des lésions, par voie rectale par endoscopie. "Nous avons utilisé un biomatériau, capable de retenir ces cellules, de les protéger contre le système immunitaire du patient qui cherche à les détruire, tout en laissant diffuser les molécules actives, détaille Noëlle Mathieu. Ce biomatériau a été modifié pour pouvoir être injectable par coloscopie puis nous l'avons testé chez l'animal." Les résultats sont positifs : de nombreuses CSM sont encore présentes dans le côlon jusqu'à 21 jours après l'injection, les zones lésées sont réduites et le côlon retrouve sa fonction de barrière sélective. Les scientifiques cherchent à présent à préciser leurs observations sur le plan inflammatoire et à optimiser le protocole d'injection, avant de lancer des essais chez l'homme.

1. Surdosage de patients traités par radiothérapie au centre hospitalier Jean-Monnet.

WWW Pour en savoir plus : www.irsn.fr/anthos

International



Un employé d'une coopérative agricole de Date, près de Fukushima, contrôle la radioactivité des kakis.

“ Nous devons répondre aux interrogations des habitants ! ”

Japon

Rendre la population experte pour mieux décider

À Hirono, une ville située à une vingtaine de kilomètres du réacteur accidenté de Fukushima, des postes d'analyse des denrées alimentaires et des compteurs de radioactivité ont été mis en place dans les lieux publics. Ces outils visent à développer la co-expertise et la culture de radioprotection chez les habitants, des éléments clés de la gestion post-accidentelle...

Malgré les mesures de décontamination prises par la municipalité, seuls 50 % des exilés volontaires sont revenus à Hirono, située hors du périmètre d'évacuation obligatoire.

Depuis 2014, un séminaire international est organisé chaque année. La municipa-

lité souhaite ainsi donner des clefs aux habitants pour prendre la décision de revenir ou pas. Jean-Christophe Gariel, directeur de l'environnement à l'IRSN, a participé à son édition 2016 pour y présenter son retour d'expérience sur les 5 années de “Dialogues à Fukushima”, organisés par la CIPR (Commission Internationale de protection radiologique) entre les différentes parties prenantes (citoyens, experts, institutions).

Comme le souligne l'expert : “ Nous ne pouvons pas nous réfugier derrière des chiffres ou des graphiques, ou plus largement, la science. L'effort que nous avons à faire est de répondre aux interrogations des habitants plutôt qu'aux nôtres ! ”

Déchets radioactifs



Le “jeu” a été testé à Budapest en juin 2016.

Stockage de déchets radioactifs

Quand la société civile se prend au jeu

Pour interagir avec la société civile sur les problématiques de gestion des déchets radioactifs, des membres du projet européen SITEX-II¹ ont mis en place un outil participatif baptisé PEP (Pathway Evolution Process). Trente-cinq personnes, dont des experts, des représentants d'ONG et des membres de la société civile, l'ont testé en juin dernier à Budapest. Conçu comme un jeu de plateau, cet outil consiste à imaginer différents scénarios de gestion à long terme des déchets, joués au moyen de cartes “critères”

(sûreté, confiance du public...) et de cartes “éléments perturbateurs” (rupture financière, attaque terroriste...). “Avec cet outil, nous souhaitons que les citoyens s'approprient d'autres enjeux : l'autorisation de création et la qualification d'un stockage géologique ou la gestion des déchets radioactifs en situation post-accidentelle”, précise Delphine Pellegrini, experte des installations de stockage à l'IRSN.

1. SITEX-II : projet préparatoire à un réseau international d'expertise technique indépendant des exploitants sur le stockage géologique des déchets radioactifs.

Démantèlement

L'Italie consulte les experts

Comment aider l'Italie à démanteler ses centrales, à gérer ses déchets et à garantir sa sûreté nucléaire ? Ces questions ont été posées de l'assemblée d'experts réunis fin 2016 à Rome sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). “L'Italie s'est engagée à accélérer le démantèlement de ses centrales déjà à l'arrêt depuis 1987, et de nombreux challenges restent à relever”, explique Patrice François, expert senior en démantèlement à l'IRSN qui a piloté cette mission avec Ingemar Lund, de l'autorité de sûreté nucléaire suédoise. Selon les experts, l'autorité de sûreté italienne, récemment créée, devrait se doter des moyens et des compétences nécessaires pour mener à bien une nouvelle stratégie nationale d'assainissement et de démantèlement. Cette dernière inclurait la création d'installations d'entreposage et de stockage de déchets radioactifs. “Grâce à cette rencontre, nous avons échangé sur les bonnes pratiques des acteurs italiens, notamment pour la formation et la qualification des experts en radioprotection”, ajoute Patrice François.

FAITS ET PERSPECTIVES



Le Tail, en Vendée. Le site a été réaménagé après la fermeture de la Division minière de Vendée en 1991.

© Laurent Zylberman/Graphix-Images/IRSN



Une équipe de l'IRSN vérifie les informations du bilan environnemental du site de Traou ar Ru (Côtes-d'Armor) réalisé par Areva.

© Eric Rannou/PHOTO/QR/LE TELEGRAMME/MaxPPP

Programme Mimausa

Que deviennent les mines d'uranium ?

De 1949 à 2001, 250 sites ont été exploités dans l'Hexagone pour extraire de l'uranium de leur sous-sol. Les experts de l'IRSN évaluent l'impact résiduel de cette activité. Résultats des mesures réalisées sur place, historique de l'emprise minière... ces informations sont publiques.

En un peu plus d'un demi-siècle, près de 80 000 tonnes d'uranium ont été extraites sur le territoire français. Que sont devenus les anciens sites de production ? Comment sont-ils surveillés, contrôlés et sécurisés ? Le programme Mimausa (Mémoire et Impact des Mines d'urAniUm : Synthèse et Archives) mis en œuvre par l'IRSN répond à ces questions. L'histoire de l'extraction d'uranium français commence en 1949. La toute première mine est inaugurée en Haute-Vienne. Baptisée "la mine d'Henriette", elle sera la première d'une longue série. Deux cent cinquante sites seront ensuite mis en activité dans 27 départements. Cette activité se poursuivra à un rythme soutenu jusqu'à la fin des années 1980, pour décliner lentement puis s'achever définitivement en 2001, encore en Haute-Vienne, avec la fermeture de la dernière mine, dite du Bernardan. Pour extraire l'uranium de 50 millions de

tonnes de minerai, il aura fallu excaver 200 millions de tonnes de "stériles miniers", des roches ne contenant pas ou trop peu d'uranium. "Nombre de ces stériles ont été utilisés pour des travaux publics : remblais, terrassements, soubassements routiers...", précise Pascale Blanchart, experte en sciences de l'environnement à l'IRSN. Aujourd'hui, une partie des terrains a été rétrocédée à des particuliers, des communes ou des entreprises. Zones agricoles, parcs photovoltaïques, déchèteries, stands de tir, circuits de moto-cross, bases de loisirs aquatiques... et même un centre de plongée : leurs usages sont très divers !

Des sites sous surveillance régulière

À leur fermeture, toutes les anciennes mines ont été réaménagées : galeries condamnées, puits scellés, travaux souterrains et mines à ciel ouvert remblayés ou noyés, terrains reprofilés pour s'intégrer

au paysage, etc. L'ancien exploitant, Areva Mines, fournit un bilan environnemental des sites. Pour chacun d'entre eux, il donne des informations sur l'impact radiologique et chimique sur les eaux environnantes, l'air, le sol, la chaîne alimentaire, etc.

Sur certains sites, des arrêtés préfectoraux lui imposent une surveillance plus régulière, avec transmission des résultats aux directions régionales en charge de l'environnement (Dreal) : rayonnement gamma, teneur en radon dans l'air, en uranium et radium dans les eaux, etc. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les Dreal peuvent aussi faire des contrôles inopinés sur tous les sites, avec l'appui de l'IRSN si besoin.

"Le stockage des résidus radioactifs issus du traitement de minerai d'uranium concerne 16 anciens sites miniers clôturés, surveillés en permanence par Areva sous le contrôle des Dreal", précise Pascale Blanchart. Les



Un technicien de l'IRSN prélève de sédiments dans une retenue en forêt à l'aide d'un cône de Berthois

© Areva/Tailat Jean-Marie

eaux naturelles qui transitent sur la plupart d'entre eux sont traitées pour éliminer les contaminants éventuels – uranium, radium... – ou corriger leur acidité en relevant le pH. Placés dans des mines à ciel ouvert, des bassins ou des talwegs¹, ces

résidus sont recouverts par des stériles et de la terre végétale. Objectif : empêcher les émissions de rayons gamma et de radon en surface.

Des vérifications sur le terrain

“Depuis 2003, à la demande du ministère en charge de l'Environnement, l'IRSN met en œuvre le programme Mimausa”, ajoute Pascale Blanchart. Ses experts impliqués dans ce programme analysent les bilans environnementaux fournis par l'ancien exploitant. Sur le terrain, ils réalisent des contrôles complémentaires pour vérifier certaines données de ces bilans ou pour recueillir des données manquantes.

À l'automne 2015, une équipe s'est ainsi rendue sur des sites des Côtes d'Armor et du Morbihan. L'Institut a convié la Dreal, les maires et les propriétaires des terrains concernés et a impliqué les associations

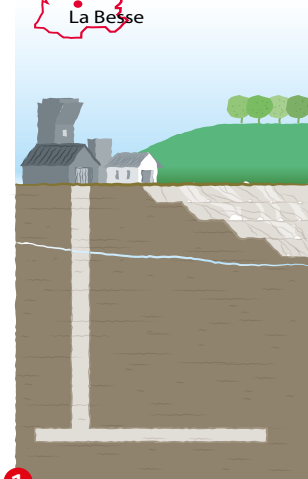
qui le souhaitaient. “Nous avons participé à la mission des Côtes d'Armor pour répondre à nos préoccupations : suspicion de présence d'arsenic dans une source déjà riche en radium, mesures de radioactivité surprenantes faites par notre association, crainte d'effondrement de rochers à l'entrée d'une galerie...”, explique Jean-Jacques Lohéac de l'association Sortir du nucléaire-Trégor.

Les informations et les résultats concernant ces anciennes mines sont intégrés par l'IRSN dans la base de données, également baptisée Mimausa, accessible à tous sur le site irsn.fr. “La dernière mise à jour, réalisée en février 2017, compile des données sur les 250 anciennes mines d'uranium, contre 187 en 2004”, indique Pascale Blanchart. Pour chacun des sites, on y trouve des informations répondant aux questions que tout citoyen, association, élu local ou représentant des pouvoirs publics peut se poser :

EN CLAIR

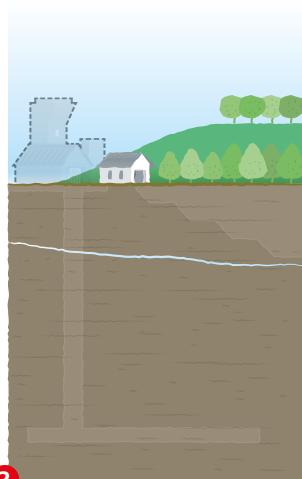
Des radionucléides détectés dans les abreuvoirs : une solution trouvée pour La Besse

Exploité durant 34 ans, l'ancien site minier corrézien de La Besse est aujourd'hui recouvert de pâturages et de cultures agricoles. Utilisés comme abreuvoirs pour bovins, certains points d'eau présentaient une teneur élevée en certains radionucléides. Une nouvelle source a donc été canalisée pour les alimenter.



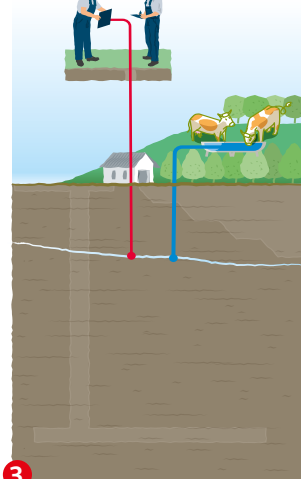
1 Exploitation (1960-1994)

La mine de La Besse possède plus de 10 km de galeries, un puits de 74 m et 6 mines à ciel ouvert. Areva y extrait 1046 tonnes d'uranium de 264 310 tonnes de minerais, soit 75 % de la production de la Corrèze.



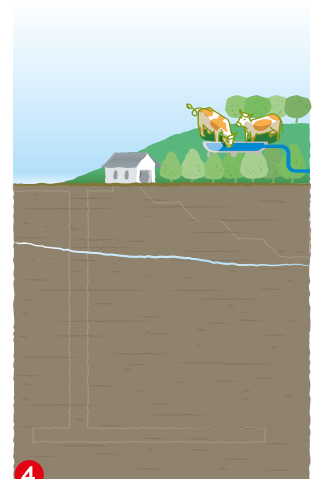
2 Réaménagement (1994-1995)

Après sa fermeture, la mine est réaménagée. Les installations sont démantelées et le terrain est remodelé et remblayé pour être recouvert de terre végétale. La surveillance radiologique réglementaire assurée par Areva Mines s'achève en 2009.



3 Investigations (2009-2010)

En 2009, la Dreal demande à Areva d'effectuer des mesures dans des abreuvoirs pour bovins. De fortes concentrations en uranium et radium 226 y sont détectées. Ce que l'IRSN confirme via son programme de contrôle Mimausa, en 2010.



4 Actions (après 2010)

Inquiets de ces résultats, les agriculteurs et le maire, assistés par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), engagent des discussions avec Areva, qui condamne la source qui alimentait les abreuvoirs. Une autre source – celle qui alimente la fontaine du village voisin – est canalisée pour abreuver les bovins.

© Antoine Dagan/Citizen Press/Magazine Repères

FAITS ET PERSPECTIVES



Mesures physico-chimiques sur le terrain.

© Jean-Marc Bortom/IRSN

localisation précise de l'emprise minière sur une carte interactive, historique, situation actuelle, résultats des mesures et des études réalisées sur place, etc. Il est possible de poser des questions en ligne.

Conserver la mémoire des sites

Mimausa recense certaines actions menées à la suite de campagnes de terrain. Exemples? *“En Corrèze, sur des parcelles situées au-dessus de l'ancienne mine souterraine de La Besse utilisées en terrains agricoles, Areva a dû canaliser la source de l'ancienne fontaine du village pour alimenter des points d'eau utilisés comme abreuvoirs pour les bovins, indique Francis Hourtoulle, maire de Saint-Julien-aux-Bois. Des mesures confirmées par l'IRSN montraient une concentration plus élevée que la normale en uranium et radium 226 dans certains de ces points d'eau.”* (voir infographie p. 7). La base Mimausa garde ainsi la mémoire de ces sites pour les générations futures.

D'ici quelques mois, l'IRSN aura terminé tous ses contrôles de second niveau. *“À l'avenir, notre surveillance devrait se poursuivre via des constats à l'échelle des bassins-versants”,* conclut Pascale Blanchart. Le premier a eu lieu entre 2012 et 2015 sur le bassin de la Dordogne et a associé les acteurs locaux. Les résultats complets sont accessibles sur le site de l'IRSN. ■

1. Ligne de fond d'une vallée.



Pour en savoir plus :
Le programme Mimausa : www.irs.fr/mimausa.
La base de données : <https://mimausabdd.irs.fr>
Le Réseau national de Mesures de la radioactivité de l'environnement : www.mesure-radioactivite.fr

Comment travaillez-vous avec l'IRSN?

En 2013-2014, des experts de l'IRSN ont réalisé des contrôles Mimausa sur douze anciennes mines d'uranium en Pays de la Loire. En amont, nous leur avons communiqué les informations collectées localement pour affiner leur plan de mesures et de prélèvements d'eau, de sédiments et de terre.

Quelles actions avez-vous menées ensemble?

En juin 2016, j'ai assisté à une tierce-expertise de l'IRSN que

la Dreal avait demandée pour des mesures radon dans quatre habitations de Maine-et-Loire et de Vendée présentant de fortes concentrations. Il s'agissait de déterminer si ces concentrations provenaient de stériles d'anciennes mines d'uranium, réutilisés dans ces zones comme matériaux de remblais. Selon les études faites par Areva, le radon était d'origine naturelle. Les travaux de l'IRSN l'ont confirmé pour

les trois habitations de Maine-et-Loire. En revanche, pour l'habitation située en Vendée, ce sont les stériles miniers qui sont à l'origine des teneurs élevées en radon.

Peut-on améliorer l'information du public?

Oui, en mettant en place des commissions de suivi de site (CSS) dans les secteurs miniers qui n'en disposent pas encore. Ces commissions présentent au public les informations sur l'impact réel des anciennes mines sur l'environnement. Ils disposent ainsi des éléments nécessaires aux prises de décisions sur leur devenir. Il serait opportun de mettre en ligne les comptes-rendus des CSS sur les sites Internet des collectivités, des préfectures, des Dreal et de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

3 questions à...

Yoann Terliska

Chargé de la police des mines à la Dreal Pays de la Loire jusqu'en 2016 (en poste à l'ASN depuis 2017)



© Coll. personnelle

Restes d'opérations minières près de la base de Mont Garfield, dans le Colorado.



© Denise Dethlefsen/Alamy/Hemis

AILLEURS

Colorado : des mines abandonnées

“De nombreux anciens sites miniers uranifères ont été abandonnés par les sociétés qui les avaient exploités, indique Jérôme Guillevic, un expert IRSN qui avait participé en 2012 à une rencontre technique internationale organisée par l'AIEA au Colorado. *L'État américain a décidé de débloquer plus de 2 milliards de dollars pour la prise en charge des sites les plus prioritaires, en impliquant les populations concernées.*” Sur certains sites où des résidus d'uranium étaient

présents, le réaménagement a consisté à déplacer les résidus dans de nouveaux lieux de stockage, proches de nos installations françaises pour déchets dangereux. Des tests de couverture naturelle (végétalisation avec des espèces locales) sont également réalisés, pour prévenir les risques à long terme de diffusion hors de la mine. Aujourd'hui, pour un grand nombre d'anciennes mines d'uranium du Colorado, aucune disposition spécifique de traitement n'a encore été prise.



© IRSN

Des doigts de feu pris sur le vif

Aussi rare que grandiose, cette image montre la formation de doigts de feu, un phénomène que les chercheurs connaissent bien, mais qui restait peu photographié. Pour réaliser ce cliché, ils ont enflammé du tétrapropylène hydrogéné dans un petit bac métallique de 30 cm de diamètre. Cet hydrocarbure liquide est utilisé dans l'industrie, en particulier dans des installations de traitement de combustibles nucléaires usés comme celle de La Hague (Cotentin). Porté à une température de 230 °C, le tétrapropy-

lène hydrogéné projette des gouttelettes vers l'extérieur du bac. Celles-ci prennent feu lorsqu'elles traversent un front de flammes bien plus chaud – entre 800 et 1000 °C – avant de retomber en formant ces digitations visibles autour du bac. Ces expérimentations visent à mieux comprendre le processus de combustion d'un hydrocarbure et à caractériser les suies qu'il produit. Lors d'un incendie, ces suies peuvent obstruer des filtres de ventilation, altérer le fonctionnement d'équipements électroniques et remettre

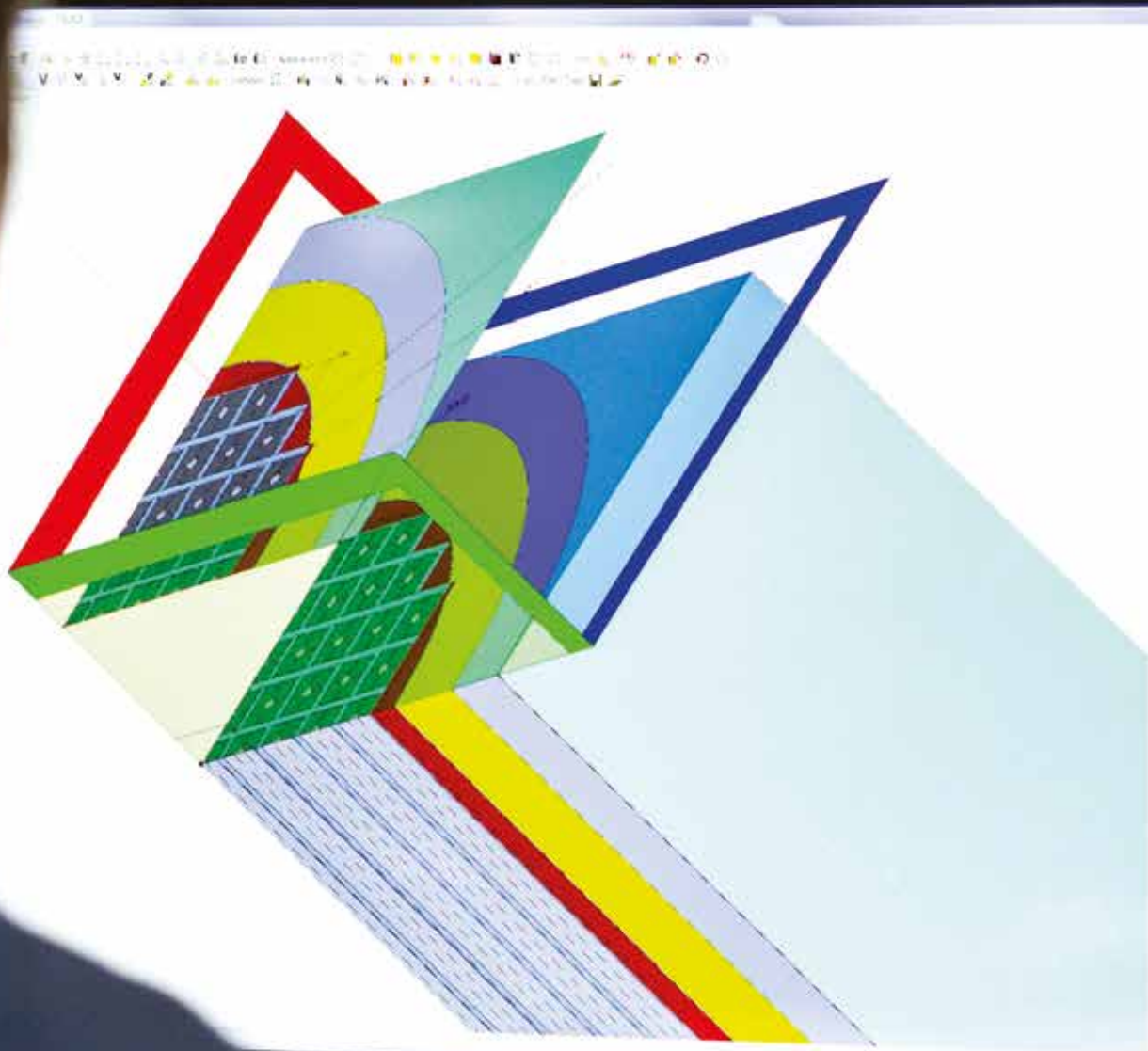
en cause la sûreté d'une installation. Les scientifiques tentent d'affiner les techniques et les outils pour les mesurer. Cette image a reçu, en 2008, un prix du symposium de l'International Association for Fire Safety Science (IAFSS). ■

Hugues Pretrel

Ingénieur-chercheur au laboratoire d'expérimentation des feux de l'IRSN

DOSSIER

Un ingénieur «calcul» en criticité affiche à l'écran la modélisation en 3D d'un emballage de transport d'assemblages de combustibles usés.



1 très exactement.

C'est la valeur du « facteur multiplicateur des neutrons » (keff) qu'il ne faut jamais dépasser. La réaction en chaîne de fission se déclenche dès cette valeur seuil et devient exponentielle au-delà. Les réacteurs en production maintiennent le keff de leur cœur nucléaire à 1. Les autres installations nucléaires restent en deçà avec des marges de sécurité.

Criticité

Simuler pour prévenir les accidents

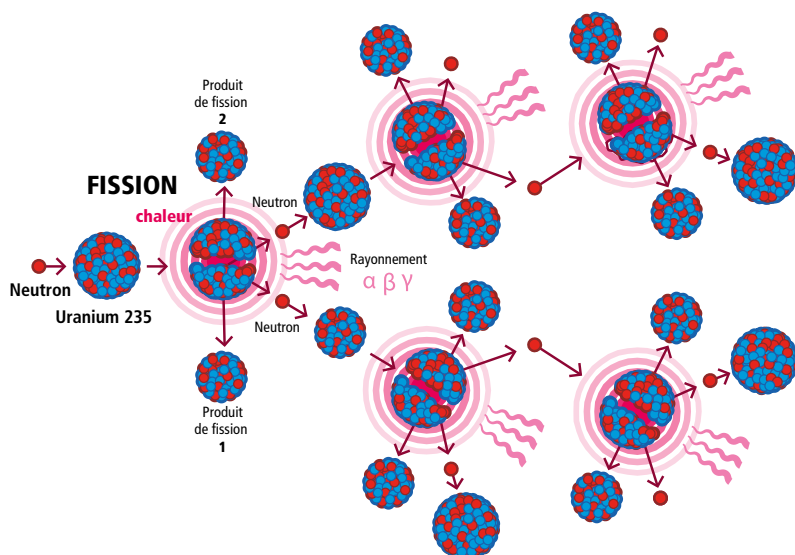
Soudain et redoutable pour les personnels, un accident de criticité peut survenir lorsque l'on manipule de la matière fissile. Pour le prévenir, les experts utilisent la simulation et analysent les situations redoutées. Expertise et recherche sont nécessaires pour exploiter les installations en conservant des marges de sécurité suffisantes.

EN CLAIR

Fission

Qu'est-ce qu'une réaction en chaîne ?

Une réaction de fission entraîne un dégagement d'énergie, la production de rayonnements gamma et l'émission de neutrons. Ces derniers peuvent, à leur tour, induire de nouvelles fissions.



Le keff

Le facteur de multiplication effectif des neutrons (ou "keff"), est le nombre moyen de neutrons issus d'une fission qui vont engendrer une nouvelle fission. Les autres sont absorbés par des atomes non fissiles ou fuient du système.

Les trois niveaux de criticité

- "État sous-critique" : $keff < 1$
Chaque fission en déclenche moins d'une autre : la réaction s'éteint d'elle-même.
- "État d'équilibre" : $keff = 1$
Chaque fission en déclenche exactement une autre : la réaction est entretenue.
- "Accident de criticité" : $keff > 1$
Chaque fission en déclenche plus d'une autre : la réaction s'emballe.

Invisible, instantané, potentiellement mortel : c'est l'accident de criticité. Autrement dit le déclenchement inopiné d'une réaction en chaîne de fission (voir infographie ci-contre) dans un endroit où elle n'est pas attendue. Autant dire partout, sauf dans le cœur des réacteurs ! Une telle réaction génère une forte dose de neutrons et de photons gamma, qui met en danger la vie des personnels à proximité. Elle provoque parfois un flash de lumière bleue qui prévient les personnels, mais trop tard.

La prévention repose sur la conception d'installations demeurant – en toutes circonstances et avec des marges – en deçà du seuil de criticité et sur des règles opératoires strictes.

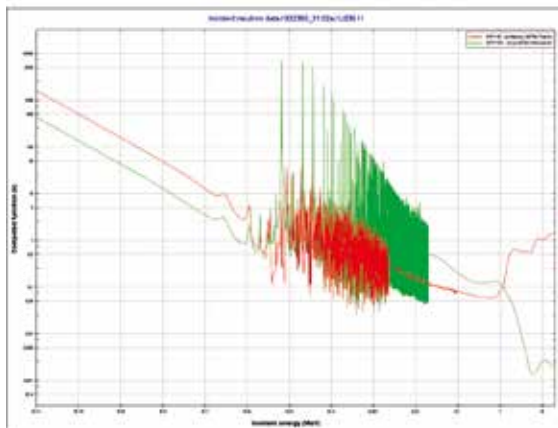
"Le rôle de l'IRSN est d'expertiser les démonstrations de sûreté des exploitants et d'analyser les incidents. Il mène des recherches pour améliorer les outils de prévention", explique Stéphane Evo, expert en sûreté-criticité.

L'eau est un facteur aggravant

Le risque existe dès lors que l'on manipule une quantité suffisante de matière fissile, comme de l'uranium 235 ou du plutonium. Il dépend de facteurs comme la masse de matière présente, mais aussi la géométrie. À titre d'exemple, la cuve du dissolvant de combustibles usés, à l'usine Areva de La Hague (Cotentin), présente une forme curieuse : haute de plusieurs mètres, elle mesure moins de 40 cm de large. "La maîtrise du risque de criticité impose cette géométrie particulière", souligne Stéphane Evo. De même, si une sphère de 60 kg d'uranium enrichi devient critique en présence d'eau, ce n'est pas le cas d'un assemblage de longs et fins "crayons" de combustible, malgré leurs 400 kg de matière fissile.

DOSSIER

Représentation d'une « courbe de section efficace » typiques des phénomènes rencontrés en criticité



Un expert IRSN et deux ingénieurs « calcul » en criticité d'Areva TN observent la maquette d'un emballage de transport d'assemblages de combustibles usés.

“La criticité ne se mesure pas, elle se constate... trop tard.”

L'eau – et plus généralement les matériaux hydrogénés – constitue un facteur aggravant car elle ralentit les neutrons, les rendant plus efficaces pour la fission. Des efforts de conception des équipements contenant de la matière fissile consistent à empêcher l'introduction accidentelle d'eau ou à limiter suffisamment la quantité de matière fissile contenue ou la géométrie de ces équipements.

“La criticité ne se mesure pas, ne prévient pas, elle se constate... trop tard”, explique Grégory Caplin, expert en évaluation des risques de criticité.

Il n'existe aucun moyen de mesurer le facteur multiplicateur des neutrons, appelé keff, qui doit en toutes circonstances, hors cœurs de réacteurs, demeurer inférieur à 1 avec des marges suffisantes. De plus, la réaction en chaîne de fission n'est précédée d'aucun signe annonciateur. On passe en une fraction de seconde d'une situation normale à un débit de rayonnements intense.

Modéliser les équipements

Pour apprécier le risque dans un colis de matières fissiles, une installation du cycle du combustible ou une “boîte à gants” d'un laboratoire de recherche, il faut recourir à la simulation.

S'appuyant sur des données de physique nucléaire, les logiciels modélisent les équipements présents dans l'installation ou le colis et calculent le keff. La confiance accordée à ces outils est primordiale. C'est pour cela que la simulation s'appuie sur des expériences permettant de qualifier les codes de calcul utilisés.

L'Institut a mis à disposition, en 2014, une nouvelle plateforme logicielle appelée Cristal V2. Développée avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), et une participation d'Areva, elle sera mise à la disposition de la

3150

expériences de référence ont été menées depuis 1963 au centre de Valduc sur un dispositif expérimental permettant de s'approcher de la criticité sans l'atteindre pour valider les codes de calcul.

communauté internationale en 2017, via l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), comme ses homologues américaine, russe ou japonaise. Cet ensemble logiciel s'appuie sur de nouvelles bibliothèques de données nucléaires et d'expériences de référence, et propose plusieurs voies de calcul du keff.

“Grâce à un nouvel outil dénommé Latec, il est possible de créer facilement le modèle de l'installation et de lancer n'importe quelle voie de calcul sans réécrire les données à chaque fois”, indique Stéphane Evo.

Alexandre Coulaud, référent calcul de sûreté chez Areva Projets, est l'un des premiers utilisateurs industriels à avoir testé le nouvel outil. Il précise : “Grâce à cette nouvelle interface homme-machine l'étude est réalisée de manière centralisée. En minimisant l'intervention humaine, les risques d'erreur diminuent.”

Des dispositifs représentatifs de situations réelles

“Puisque la sûreté repose notamment sur des calculs, nous devons qualifier nos codes”, insiste Stéphane Evo. Pour cela, il n'existe qu'une façon de procéder : créer en laboratoire des dispositifs représentatifs de situations réelles, comme des réseaux de crayons de matière fissile similaires aux assemblages de combustible. Il s'agit ensuite de déterminer les conditions d'atteinte de la criticité, par exemple en faisant monter le niveau d'eau dans le réseau de crayons. Pour valider un code, il est nécessaire de modéliser le dispositif expérimental et de calculer son keff pour le comparer aux résultats expérimentaux (voir infographie page de droite).

Après des essais pionniers à Saclay (Essonne), les expériences de criticité françaises, d'abord réalisées par le CEA puis par l'Institut, se sont déroulées au centre CEA de Valduc (Côte d'Or), le seul à disposer d'installations *ad hoc*. “En cinquante ans, plus de 3000 expériences y ont été effectuées”, rappelle Isabelle Duhamel, chercheuse en neutrologie-criticité.



Isabelle Duhamel, chercheuse en neutronique-criticité.

© Lucien Lung/IRSN

Beaucoup d'entre elles ont été intégrées à la bibliothèque d'expériences distribuée par l'OCDE, qui comprend plus de 4000 configurations. De quoi représenter l'ensemble des situations réelles possibles ? Pas vraiment, c'est pourquoi les programmes expérimentaux se poursuivent. *“Les calculs initiaux ont été faits en prenant d'importantes marges de sûreté ‘dans le doute’, explique Isabelle Duhamel. Or les industriels veulent optimiser leurs opérations, par exemple pouvoir placer plus d'assemblages usés dans le même colis de transport, ou manipuler du combustible dont l'enrichissement a augmenté, tout en conservant des marges de sûreté suffisantes. Ils doivent caractériser plus précisément les matériaux environnants.”*

C'était l'objet du programme expérimental Mirte de l'IRSN. Il a évalué le pouvoir d'absorption des neutrons de différents matériaux de structure – aluminium, fer, zircaloy, nickel, verre, béton, etc. – présents dans les emballages de transport ou les installations de stockage et insuffisamment pris en compte jusqu'ici dans les calculs.

Une collaboration avec les États-Unis

Autre nouveauté : la prise en compte de la perte de matière fissile et de la présence de produits de fission dans les combustibles usés, que l'on appelle le “crédit burn-up”.

Ces deux facteurs diminuent le keff des assemblages, mais sans pouvoir en apprécier précisément l'importance jusqu'à ce que l'Institut, avec le CEA et Areva, mène à Valduc des expériences de référence uniques au monde. *“Nous avons vendu les résultats aux Américains et aux Japonais, et d'autres candidats se présentent”,* souligne Isabelle Duhamel.

En 2013, les installations expérimentales de Valduc ont fermé. L'IRSN a alors lancé un programme de collaboration, dénommé Princess, qui associe des partenaires étrangers dont les États-Unis. Les premières expérimentations conjointes ont déjà démarré dans les installations américaines.

PROCESS

Comment sont validés les codes de calcul ?

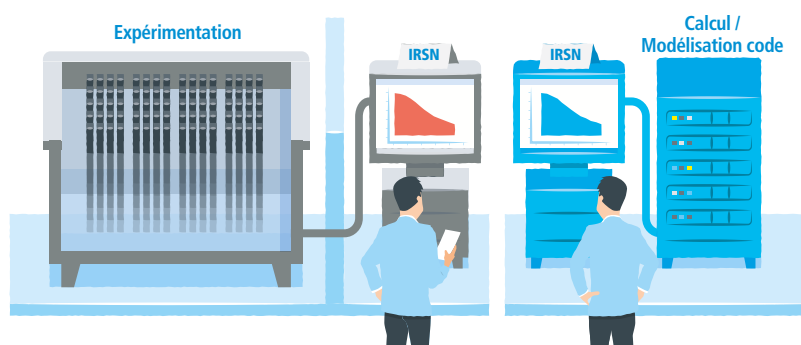
Avant leur utilisation, les codes de calcul du keff doivent être validés expérimentalement. C'est le rôle de chercheurs de l'IRSN qui utilisent des installations *ad hoc*, comme à Valduc.

1 Expérimentation

Les chercheurs de l'IRSN créent des dispositifs expérimentaux représentatifs des installations réelles, ici des assemblages de combustible. Leur géométrie est connue. Ils les “poussent” à la limite de la criticité, par exemple en faisant monter le niveau d'eau. Un compteur de neutrons vérifie que l'on s'approche de la criticité. Il donne indirectement le keff.

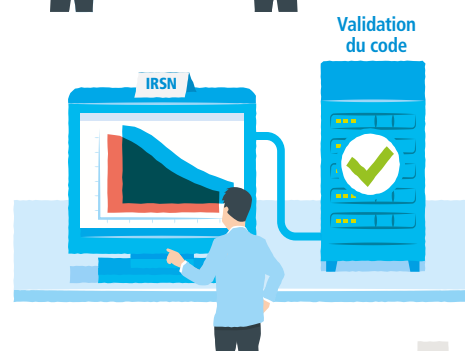
2 Simulation

En parallèle de l'expérimentation, le même dispositif est simulé par le code à valider. Cette phase de modélisation permet de calculer un autre keff.



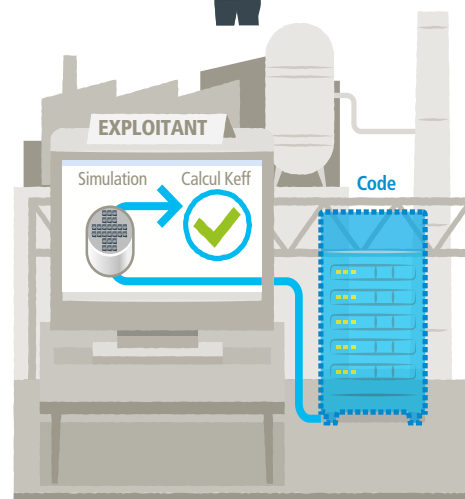
3 Validation du code

Les chercheurs comparent le keff calculé et celui issu de l'expérience. Les courbes représentent sa variation en fonction de paramètres comme l'enrichissement de l'uranium, l'épaisseur des parois isolantes, etc. Pour valider un code sur un cas d'application, il convient de choisir des expériences représentatives et de déterminer les écarts entre les keff calculés et ceux issus des expériences. L'analyse des écarts peut conduire à retenir un biais.



4 L'utilisation du code

L'exploitant simule des situations pouvant exister pour évaluer leur keff. Dans l'exemple d'un emballage de transport d'assemblages de combustibles, l'ingénieur saisit ses paramètres – dimensions, matériaux, enrichissement du combustible, etc. Le code calcule un keff. Une fois validé pour cette configuration, ce résultat – majoré du biais éventuel – est considéré comme fiable.



Les règles de sûreté évoluent grâce à l'analyse

Les incidents de criticité sont relativement fréquents, mais les accidents sont très rares. Leur analyse et les programmes de recherche font évoluer les règles de sûreté.

Les accidents de criticité sont heureusement très rares. Le dernier a eu lieu en 1999 au Japon. À ce jour, aucun n'est survenu en France. *“En revanche, nous enregistrons une vingtaine d'incidents chaque année dans le pays”,* précise Grégory Caplin, expert IRSN en évaluation de la criticité.

Les incidents correspondent à des situations où des paramètres ont été dépassés, des consignes opératoires n'ont pas été respectées, entraînant une dégradation de la prévention des risques de criticité, sans conséquence pour les travailleurs ou l'environnement. Il s'agit de « signaux faibles » que l'exploitant doit analyser pour en tirer les enseignements.

Les experts de l'IRSN analysent les incidents les plus significatifs, tel celui survenu, en 2011, dans l'usine Areva de Romans-sur-Isère (Drôme) qui fabrique des assemblages de combustibles pour les réacteurs. Des dépôts importants et non prévus de pous-



Le lendemain de l'accident de Tokai Mura, des milliers de personnes se précipitent dans les centres médicaux installés en urgence pour mesurer leur exposition aux rayonnements.

sière de matière fissile y ont été décelés dans des gaines de ventilation, après la modification d'un dispositif d'aspiration d'air.

Les accidents sont recensés

Cet incident, qui n'a eu aucune conséquence, a fait l'objet d'un avis de l'Institut. Il a été traité, plus globalement, en 2016 dans le cadre du réexamen de sûreté de l'installation. L'Institut a préconisé une surveillance renforcée des réseaux de ventilation et des mesures de maîtrise des accumulations de matière fissile. Pour faire évoluer les procédures vers plus de sûreté, l'IRSN développe et utilise des bases de données, appelées Sapide et Logic. Elles recensent les quelque 500 incidents de criticité déclarés depuis les années 1950 en France.

Une banque similaire existe au niveau international : les exploitants y inscrivent les événements intéressants pour la communauté. *“Les Américains sont venus nous voir récemment pour échanger; ils ont eux aussi rencontré des dépôts dans des gaines de ventilation d'une installation similaire à celle de Romans”,* se souvient Grégory Caplin. Depuis 1945, à l'échelle mondiale, il s'est produit 22 accidents de criticité dans des installations industrielles et une qua-

rantaine dans des laboratoires de recherche. La plupart ont eu lieu aux États-Unis et dans l'ex-URSS, surtout durant la Guerre froide. *“Chaque accident est unique, d'où l'importance de l'analyse. Une seule constante, la quasi-totalité d'entre eux a concerné des procédés en phase liquide, lorsque la matière fissile était en solution. Ce n'est jamais arrivé durant un transport ni en entreposage”,* relève Matthieu Duluc, expert en criticité à l'Institut. Pourquoi en phase liquide ? À cause de la présence d'eau – qui peut favoriser le processus de fissions – mais aussi d'un changement de géométrie du système, qui devient inopinément critique, comme lors d'un transvasement. Enfin, parce que c'est le moment où des transformations physico-chimiques sont réalisées sur la matière fissile. Cela peut modifier défavorablement ses caractéristiques pour l'appréciation du risque de criticité.

Comprendre les causes avant d'intervenir

Le dernier accident documenté est survenu le 30 septembre 1999 à Tokai-Mura (Japon), une usine japonaise de fabrication de combustibles nucléaires à base d'oxyde d'uranium.

Trois employés insuffisamment qualifiés

ACCIDENT

Un flash dû à la négligence

Le 2 janvier 1958, lendemain de fêtes sur le centre nucléaire de Mayak, en ex-URSS, des opérateurs doivent pomper la solution fissile contenue dans une cuve fixe de grand diamètre à destination d'autres récipients plus petits. Pour effectuer cette tâche plus rapidement, ils dévissent la cuve de son support afin de la transvaser manuellement ! Ce faisant, ils modifient la géométrie du liquide et créent une réaction en chaîne de fission. Avertis par le flash, ils lâchent immédiatement la cuve, ce qui arrête l'accident. Les trois opérateurs ayant tenu la cuve meurent dans les jours suivants, le quatrième, posté un peu plus loin, restera aveugle.

préparaient un lot d'uranium inhabituel, destiné à un réacteur expérimental et nettement plus enrichi en isotope 235 que les lots généralement mis en œuvre. La criticité a été atteinte lors du remplissage d'une cuve avec une solution de nitrate d'uranyle, effectué sans tenir compte des procédures de sécurité. Une réaction en chaîne de fission s'est déclenchée, irradiant fortement les trois employés. Les deux plus atteints sont morts en quelques mois. L'accident a duré une vingtaine d'heures, soit le temps nécessaire pour comprendre les causes, puis définir et effectuer une intervention pour arrêter la réaction en chaîne. En l'occurrence, il a fallu vidanger l'eau présente dans l'enveloppe de refroidissement entourant la cuve.

"Il existe deux types d'accidents. Ceux qui durent quelques secondes, parce que la géométrie change immédiatement, et ceux qui ne s'arrêtent pas tant qu'une intervention humaine n'a pas eu lieu", explique Matthieu Duluc. Une fois les conditions d'atteinte de la criticité réunies, différents phénomènes physiques – par exemple ceux liés à l'échauffement du système – vont gouverner l'évolution de la réaction en chaîne. Après une phase transitoire, ces phénomènes peuvent trouver un équilibre entraînant l'installation de l'accident dans le temps. Le plus long a duré six jours dans une installation de recherche en Russie... avant d'être arrêté par l'envoi d'un robot téléguidé. Dans la plupart des cas, l'intervention consiste à injecter un "poison neutronique", par exemple du bore, ou à modifier la géométrie du système. Les experts s'appuient sur des codes de calcul pour s'assurer de l'efficacité de l'intervention prévue avant de la réaliser.

Réexaminer les opérations à fortes contraintes

Les experts analysent les accidents pour améliorer les connaissances. Cela peut mener à des exigences nouvelles de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). L'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) avait estimé que l'accident de Tokai-Mura était dû en partie aux fortes contraintes conduisant, *in fine*, les opérateurs à s'affranchir des procédures de sécurité pour respecter les délais. L'Autorité a émis en janvier 2000 un "Rex de Tokai-Mura". Ce retour d'expérience enjoignait aux exploitants de réexaminer les opérations suppo-

sant de fortes contraintes d'exploitation, de revoir leurs systèmes de détection des accidents de criticité et de prévoir des moyens d'arrêter un éventuel accident. *"Beaucoup de ces demandes ont été reprises dans la réglementation de l'ASN parue en 2014",* pointe Grégory Caplin.

Tokai-Mura a été l'occasion pour l'Institut d'engager une réflexion sur les moyens de détecter et de caractériser les accidents au plus vite, afin d'évacuer le personnel et d'améliorer la prise en charge des personnes touchées. Les appareils dédiés, coûteux et complexes, présentent en effet des limites, comme les fausses alarmes en cas d'incendie ou la non-détection de l'accident dans certaines situations spécifiques. L'IRSN a lancé un programme de recherche pour tester l'utilisation d'autres appareils de mesure normalement présents dans les installations, mais non

spécifiquement conçus pour fonctionner en cas d'accident de criticité, telle l'instrumentation de radioprotection (dosimètres personnels, balises fixes, compteurs portables) ou l'instrumentation nucléaire du procédé.

Des expériences sur leur comportement en situation d'accident de criticité ont été menées en 2013 et 2014 à Valduc. D'autres sont programmées en 2017 au Nevada Test Site (États-Unis). *"Nous collaborons avec des instituts de recherche américains et britannique sur l'amélioration des 'fiches accident type'. Elles fournissent une indication des doses subies en cas d'accident, afin d'améliorer encore l'évacuation et l'intervention",* complète Grégory Caplin. ■

 **À lire sur le webmagazine**
Prévenir l'accident et en limiter les conséquences.

AILLEURS

Japon

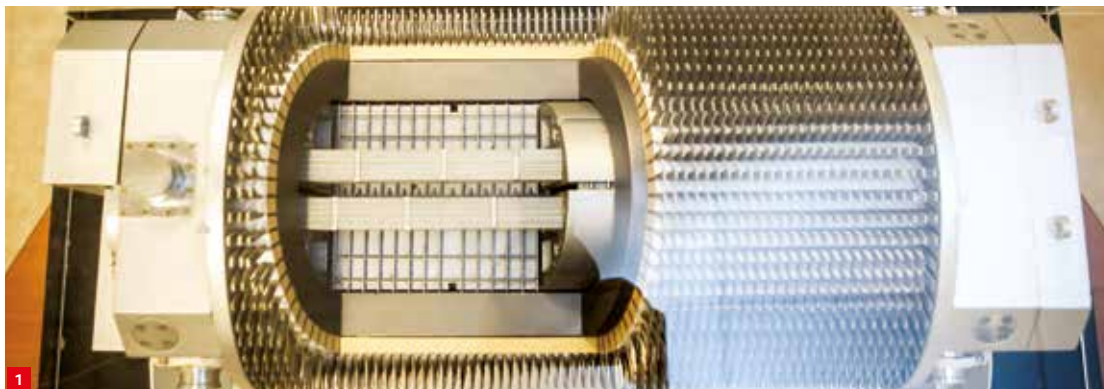
Un programme expérimental pour récupérer le corium de Fukushima

Un travailleur près d'une cuve d'eau contaminée, sur le site de la centrale de Fukushima



Comment récupérer, conditionner et transporter sans risque de criticité le corium – un mélange de plusieurs tonnes de matériaux de structure et de combustibles fondus – reposant au fond des réacteurs endommagés de Fukushima? Pour travailler sur les "lits de débris", l'agence japonaise pour l'énergie atomique (JAEA) a redémarré une installation expérimentale appelée Stacy. Similaire à celle de Valduc, elle avait été arrêtée dans les années 1990. Des expériences

de criticité seront menées avec des crayons de combustible de composition variée, représentative de ce que l'on peut trouver dans le corium. *"Le JAEA nous a demandé un soutien pour la remise en marche de l'installation et la conception du programme expérimental, révèle Isabelle Duhamel, chercheuse en neutronique-criticité. Un de leurs collaborateurs viendra à l'Institut pour travailler sur le dimensionnement des expériences."*



REPORTAGE Areva TN, la branche "logistique nucléaire" de l'industriel, fait évoluer en permanence ses emballages de transport et d'entreposage de combustibles usés. Pour justifier le respect du haut niveau de sûreté, ses modélisations tiennent compte de l'usure du combustible en réacteur.

Combustibles usés

Modéliser pour adapter les conteneurs de transport



A Montigny-le-Bretonneux (Yvelines), dans les bureaux d'Areva TN, une dizaine d'ingénieurs spécialistes de radioprotection et de criticité modélisent des emballages utilisés pour le transport et l'entreposage de combustibles usés. Pourquoi étudier encore des emballages existants, alors qu'ils sont en service depuis de nombreuses années ? Parce que la réglementation régissant les transports et les besoins des clients évoluent : par exemple en termes de conception ou de composition (enrichissement, teneur) des assemblages combustibles. "Pour les études de criticité, nous nous focalisons sur l'aménagement interne – les paniers – où sont insérés les assemblages combustibles, explique Marcel Tardy, expert en criticité chez Areva. Les autres exigences concernent la résistance mécanique, le confinement, la radioprotection ou l'évacuation de la chaleur." Sur les écrans apparaissent des modèles en trois dimensions et des courbes de variation du keff. Dans les serveurs de calcul tourne le formulaire de criticité Cristal V2. Très vite, devant la maquette en écor-

ché d'un conteneur, la discussion porte sur le "crédit burn-up"¹, dont la mise en œuvre est possible grâce à ce même formulaire. "L'utilisation de cette méthode répond à une demande de nos clients qui souhaitent charger plus d'assemblages dans un même emballage tout en préservant le très haut niveau de sûreté. Elle permet de prolonger l'utilisation d'emballages existants, alors que l'enrichissement des combustibles à transporter a augmenté", justifie Stéphane Nallet, responsable du service calcul.

L'industriel a obtenu en 2013 les autorisations pour l'utilisation du "crédit burn-up" pour des emballages en France et en Allemagne. Marcel Tardy estime que la mise à disposition à l'international, en 2017, du formulaire Cristal V2 facilitera l'expertise des dossiers par les autorités de sûreté étrangères. ■

1. Marge de keff liée à l'usure du combustible :
un combustible irradié est moins réactif qu'un combustible neuf.

1 Maquette d'un emballage de transport d'assemblages de combustibles usés. A chaque extrémité, un capot amortisseur sert à protéger le colis en cas d'accident de transport. Les ailettes d'aluminium sont destinées à évacuer la chaleur résiduelle du combustible.

2 De gauche à droite, Marcel Tardy, expert chez Areva TN, Grégory Caplin, expert IRSN en criticité et Aurélien Dalesme, ingénieur « calcul » en criticité et radioprotection chez Areva TN, devant une modélisation.

3 Les ingénieurs observent, à l'aide de l'outil Cristal, un détail de la modélisation d'un emballage de transport d'assemblages de combustibles usés.

■ BIBLIOGRAPHIE

- "L'uranium, matière fissile et risque de criticité", V. Rouyer, dans *L'Uranium, de l'environnement à l'Homme*, coordonné par H. Métivier, coll. IPSN, EDP Sciences 2001, ISBN : 2-86883-530-9

- "Fission nucléaire, réaction en chaîne et criticité", P. Reuss, coll. Quintessences, EDP Sciences 2016, ISBN : 978-2-7598-1672-9

- *A Review of Criticality Accidents*, T.P. McLaughlin et al., LA-13638, May 2000

- « Physique nucléaire et Sûreté », *Clefs CEA* n° 45, Automne 2001, ISSN 0298-6248

WWW Pour en savoir plus

Sur le site de l'IRSN
- base de connaissances : www.irsn.fr/surete-criticite
- dossier téléchargeable : www.irsn.fr/criticite
- une page et un film sur le programme Mirte : www.irsn.fr/mirte
Sur le site de l'ASN
- la décision de 2014 : www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN

■ CONTACTS

stephane.evo@irsn.fr
gregory.caplin@irsn.fr
isabelle.duhamel@irsn.fr
matthieu.duluc@irsn.fr



Une manipulatrice à la console de visualisation lors d'un scanner cérébral. En pédiatrie, les NRD ont permis d'optimiser les pratiques, en adaptant les protocoles au poids des patients.

© Philippe Castano/IRSN

Niveaux de référence diagnostiques

Optimiser les doses délivrées

L'ESSENTIEL Grâce aux niveaux de référence diagnostiques (NRD), les doses délivrées aux patients au cours des actes médicaux à visée diagnostique ont pu être diminuées de 40 % depuis 2011. Ces niveaux aident les professionnels à affiner leurs pratiques.

TÉMOIGNAGE Une physicienne médicale à l'Assistance publique-Hôpitaux de Marseille.

DÉCRYPTAGE Un outil pour trouver la juste dose. **AVIS D'EXPERT** Un spécialiste de la radioprotection médicale.



Émeline Bigand

Physicienne médicale en imagerie médicale à l'Assistance publique-Hôpitaux de Marseille (AP-HM), qui regroupe quatre établissements utilisant radiologie conventionnelle et interventionnelle, scanographie et médecine nucléaire, chez l'adulte et l'enfant.

TÉMOIGNAGE "Nous avons réussi à diminuer les doses de rayons utilisées en pédiatrie"

« Les niveaux de référence diagnostiques (NRD) permettent aux professionnels de santé – manipulateurs radio, cadres de santé, médecins... – de savoir si leurs protocoles et leurs critères de qualité d'images sont optimisés. Je mets en œuvre les NRD dans les services dont je suis responsable en choisissant, avec les équipes, les examens que nous allons évaluer : examens connus pour être fréquents et/ou irradiants. L'an dernier, nous avons constaté que nous étions au-dessus des valeurs de référence pour les radios du thorax pour deux gammes de poids en pédiatrie. En travaillant ensemble, en menant une étude dosimétrique et en changeant certains paramètres d'acquisition – réduction du champ d'irradiation, distances... – nous avons réussi à diminuer les doses de rayons utilisées et à redescendre sous l'indicateur défini par les NRD. La mise en place comme le suivi sont assez contraignants. Au début, les professionnels ont parfois du mal à adhérer à cette démarche. Puis, ils

prennent progressivement conscience de son intérêt pour améliorer la radioprotection des patients. Notre étude dosimétrique concernait les radios du thorax au sein des deux services de radiopédiatrie. Elle avait pour objectif de corréler la dose la plus faible possible avec une image interprétable. Les manipulateurs étaient impliqués dans le recueil des données, les cadres et les physiciens pour la mise en place et l'interprétation de l'étude, et les médecins pour estimer la qualité de l'image et son 'interprétabilité'. Nous sommes en train d'en finaliser les conclusions pour améliorer nos pratiques. Les formations en santé intègrent de plus en plus les notions de justification et d'optimisation de l'usage des rayonnements. Dans certains pays européens, la culture de la radioprotection est ancrée depuis longtemps. En France, les mentalités évoluent. L'optimisation des doses devient peu à peu une priorité. » ■



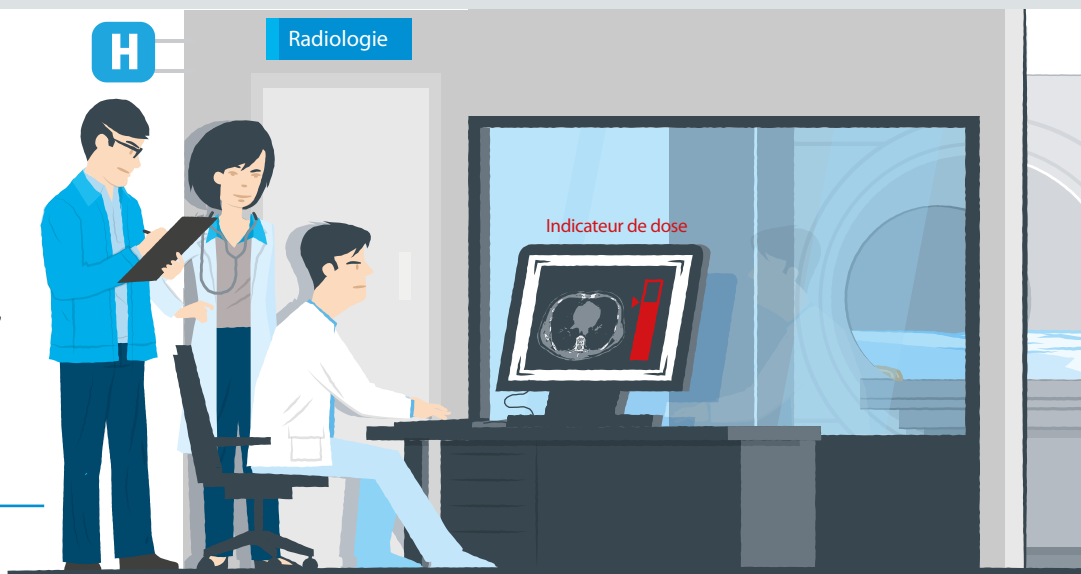
À lire sur le webmagazine
Le témoignage d'un physicien externe

NRD : un outil pour aller vers la juste dose

Au sein d'un service d'imagerie, le physicien ionisants dans leurs applications diagnostiques l'un des outils dont il dispose pour évaluer la démarche d'optimisation des doses.

1 Recueillir les données

Charles D. est physicien dans un service de radiologie. Chaque année, il choisit deux examens avec l'équipe. Ils peuvent sélectionner un des examens les plus souvent pratiqués ou un examen qu'ils suspectent d'être particulièrement irradiant (utilisation d'un appareil un peu ancien par exemple). Cette année, ils vont analyser les données pour les scanners du thorax et du rachis lombaire. Charles D. relève les doses indiquées par l'appareil d'imagerie pour 30 patients au moins par type d'examen.



2 Évaluer les performances du service et analyser les résultats

Charles D. calcule les moyennes et les compare aux NRD. Il réunit ensuite le service de radiologie (médecins, manipulateurs...) pour analyser les données. Ils constatent que les NRD ont été dépassés pour l'examen du thorax de face et recherchent les causes : défaut de réglage d'un appareil, procédure mal suivie...



© Antoine Dagan/Citizen Press/Magazine Repères

Un examen en radiologie pédiatrique



© Philippe Castano/RSN

QUE SONT LES NRD ?

Les examens diagnostiques utilisant des rayonnements ionisants – radiologie, scanographie et médecine nucléaire – exposent les patients de façon variable selon la procédure mise en œuvre, la technologie de l'installation et la morphologie du patient. Cette exposition doit être aussi basse que possible, sans remettre en cause la qualité diagnostique de l'examen.

Afin d'aider les professionnels de l'imagerie à optimiser les doses qu'ils délivrent à leurs patients, la réglementation définit

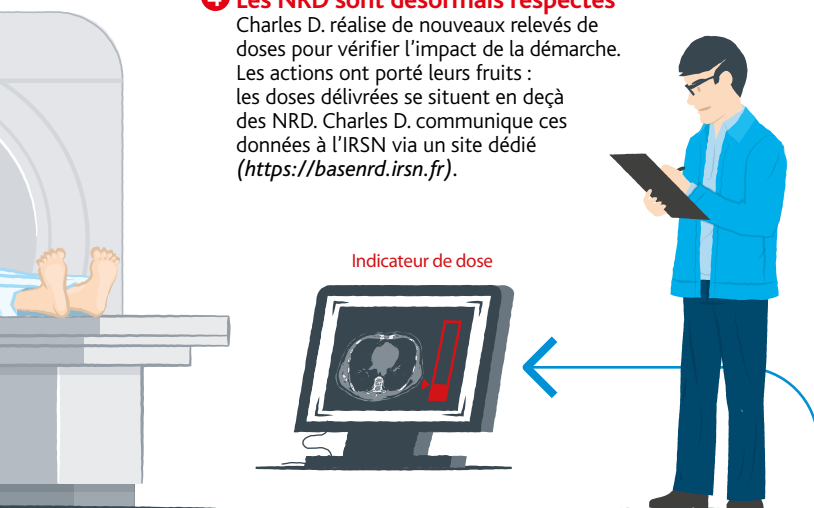
des niveaux de référence diagnostiques (NRD) nationaux pour les actes d'imagerie médicale diagnostiques les plus courants. Les professionnels évaluent chaque année leurs pratiques, du point de vue dosimétrique, en les comparant à ces références.

Les niveaux de référence diagnostiques ne doivent pas être assimilés à des "limites de dose", ni à des "doses optimales". En pratique, ces niveaux sont établis pour des examens standardisés et des patients types. Ils ne devraient pas être dépassés sans justification, en moyenne pour une installation et un examen donnés.

Le médecin s'assure du bon usage des rayonnements ionisants et thérapeutiques. Les NRD sont des pratiques professionnelles et mesurer l'efficacité de

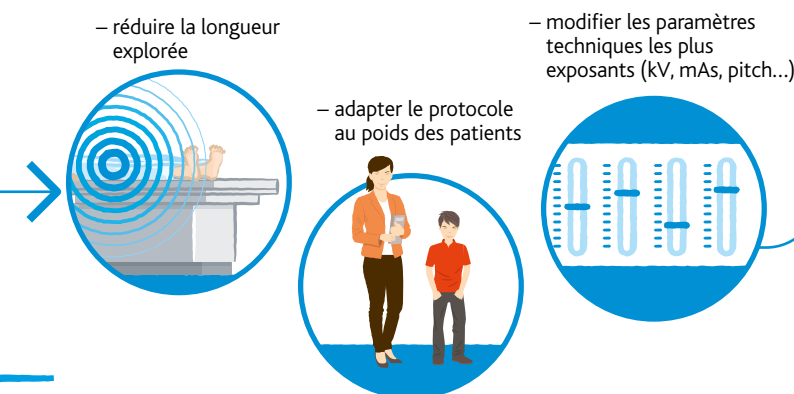
4 Les NRD sont désormais respectés

Charles D. réalise de nouveaux relevés de doses pour vérifier l'impact de la démarche. Les actions ont porté leurs fruits : les doses délivrées se situent en deçà des NRD. Charles D. communique ces données à l'IRSN via un site dédié (<https://basenrd.irsn.fr>).



3 Apporter des actions correctrices

Avec l'équipe du service de radiologie, en s'assurant que la qualité des images n'est pas altérée, Charles D. met en oeuvre des actions correctrices.



EN CHIFFRES

Pour les scanners du thorax, les NRD sont de 15 mGy pour l'indice de dose scanographique au volume et 475 mGy.cm pour le produit dose x longueur. Sur la base des données récentes, ils peuvent être abaissés respectivement à 10 mGy et 350 mGy.cm.

RÉGLEMENTATION

Les NRD sont définis pour les actes d'imagerie médicale diagnostiques les plus courants depuis 2004. Ils figurent dans l'arrêté du 24 octobre 2011.

CINQUIÈME BILAN POUR L'IRSN

En novembre 2016, l'IRSN a publié son cinquième bilan (2013-2015). Il préconise d'actualiser la réglementation et de renforcer l'adhésion des professionnels à cette démarche, particulièrement en radiologie conventionnelle.

Consulter le dernier rapport sur

www.irsn.fr/NRD-bilan

Consulter le site dédié aux NRD sur

<http://nrd.irsn.fr>

AVIS D'EXPERT



Patrice Roch

Expert en radioprotection médicale

"D'année en année, les chiffres s'améliorent"

Depuis 2004, les établissements doivent, réglementairement, recueillir des données dosimétriques, les comparer à ces niveaux de référence nationaux, puis adresser leurs résultats à l'IRSN. Ces chiffres nous permettent de proposer des mises à jour de ces niveaux en adéquation avec les technologies et les pratiques les plus récentes. Ces propositions tiennent compte de facteurs prépondérants de radioprotection tels que l'âge des patients – lorsqu'il s'agit d'enfants – et le niveau d'exposition potentielle issu des techniques utilisées. Nous mesurons l'évolution des doses délivrées, examinons la participation des établissements au dispositif des NRD et publions un bilan tous les trois ans. Tous les cinq ans environ, les pouvoirs publics s'appuient sur nos bilans pour mettre à jour les niveaux de référence, le plus souvent à la baisse. D'année en année, les chiffres s'améliorent, mais les pratiques peuvent encore être optimisées. D'ici à fin 2017, de nouveaux NRD devraient entrer en application et de nouveaux actes d'imagerie devraient disposer de niveaux de référence. Il s'agit notamment d'actes de radiologie interventionnelle – combinant des techniques d'imagerie et des objectifs thérapeutiques proches de la chirurgie – qui sont de plus en plus utilisés."



CONTACT

Patrice Roch

Tél. : 01 58 35 78 31

patrice.roch@irsn.fr

Cartographie : où sont les zones de rémanence radioactives ?

Certains territoires métropolitains présentent encore des niveaux de radioactivité artificielle significatifs. Pour situer ces “zones de rémanence”, deux cartographies complémentaires ont été réalisées, l’une par l’IRSN, l’autre par une association citoyenne.

1 Que sont les zones de rémanence et pourquoi les cartographier ?

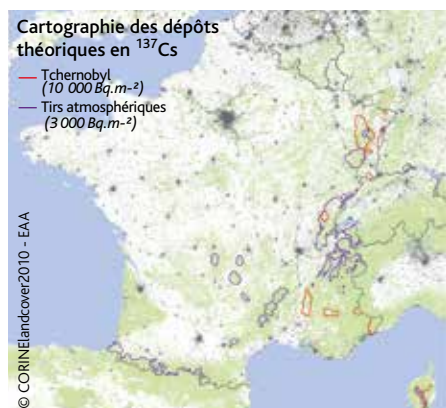
La rémanence se définit comme la persistance dans l’environnement de polluants radioactifs provenant des retombées des essais atmosphériques d’armes nucléaires – effectués au cours des années 1950 à 1980 – et de l’accident de Tchernobyl d’avril 1986. Une “zone de rémanence” est définie sur le constat, établi par la mesure, que des radionucléides sont encore présents dans ces régions.

Il s’agit en particulier du césium 137 (^{137}Cs) provenant des retombées de l’accident de Tchernobyl ; le strontium 90, le plutonium 239, le plutonium 240 ou l’américium 241 provenant, quant à eux, des essais nucléaires. Tous les compartiments de l’environnement sont-ils concernés par ces polluants ?

Lesquels exposent le plus la population, et à quel niveau ? Les trouve-t-on dans notre environnement quotidien aujourd’hui ? Quelles denrées alimentaires sont encore contaminées ? Pour le savoir, un travail de cartographie était nécessaire.

À deux reprises, l’IRSN a rencontré associations, syndicats, CLI¹, Anccli², citoyens et experts... pour échanger sur le sujet. L’IRSN a exposé les résultats du constat radiologique “zones de rémanence”, et l’Acro (Association pour le contrôle de la radioactivité dans l’Ouest), les résultats de sa cartographie citoyenne.

1. CLI : commissions locales d’information
2. Anccli : Association nationale des comités et commissions locales d’information



2 En quoi consistent ces travaux ?

Les équipes de l’IRSN ont procédé à des prélèvements divers – sols, herbages, baies, champignons, lait, fromages et gibiers – sur les zones les plus touchées de l’Hexagone : Vosges, Jura, Mercantour, Est de la Corse, Pyrénées... Au total, l’IRSN a prélevé 350 échantillons entre 2013 et 2014, et les analyses ont porté sur l’ensemble des radionucléides concernés. Des mesures directes d’irradiation (débit-dose) ont également été menées, afin d’évaluer l’exposition de la population qui en résulte. Pour établir sa “cartographie citoyenne”, l’Acro s’est appuyée sur un réseau d’une centaine de préleveurs volontaires issus de 13 pays différents en Europe. L’association a reçu 362 échantillons pour analyse. La liberté laissée aux bénévoles sur le choix des échantillons et des lieux de prélèvements a permis d’analyser des indicateurs rarement étudiés et de révéler des zones contaminées qu’on pouvait imaginer relativement épargnées par les retombées.



3 Ces deux approches sont-elles complémentaires ?

Le travail de l'Acro s'inscrit dans une démarche de sciences participatives afin de répondre aux interrogations sur la qualité radiologique des lieux de vie et de l'alimentation. Avec des moyens plus importants, l'IRSN peut donner des mesures très précises et rechercher un spectre plus large de radionucléides

polluants. Il montre notamment qu'en France, pour la quasi-totalité de la population, l'exposition interne, liée à l'ingestion de denrées, résulte de leur contamination par le strontium 90 issu des retombées des essais nucléaires, et non du césium 137 de Tchernobyl.



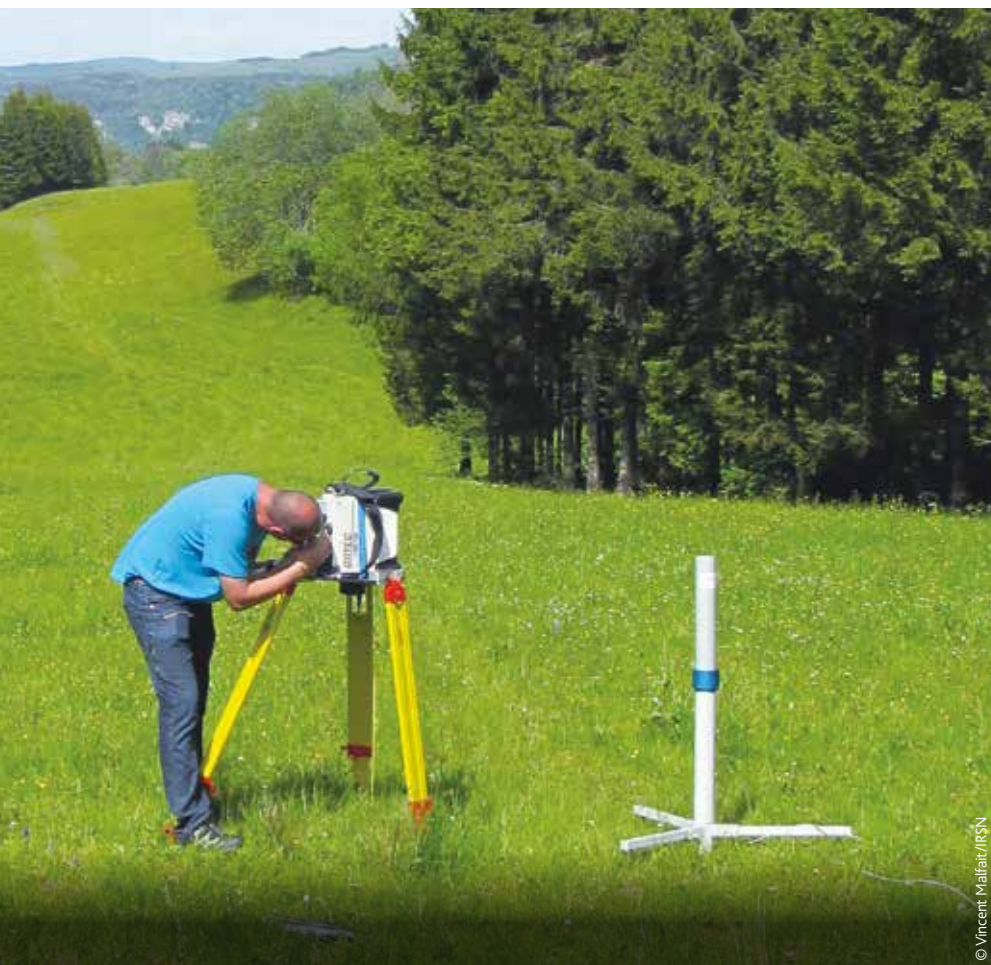
Le lac Bleu, dans le massif de Belledonne en Savoie. Les Alpes font partie des régions françaises les plus touchées par les retombées de Tchernobyl.

© Daniel Couteller/Terra

4 Les résultats de ces cartographies concordent-ils ?

Ils sont globalement cohérents. En France, les niveaux de contamination les plus élevés sont observés dans les zones les plus touchées par les retombées de Tchernobyl : les sols des massifs de l'est du territoire (Vosges, Jura, Alpes du Sud et Corse). Les denrées sauvages – champignons, baies et gibiers – y présentent des taux de contamination 1 000 fois plus élevés que les denrées agricoles et excèdent parfois les limites de commercialisation. Dans le Mercantour, il existe des "points chauds", dont les surfaces n'excèdent pas 1 mètre carré, mais où la concentration en ^{137}Cs est particulièrement élevée : l'activité surfacique peut y atteindre de 425 000 à 1 500 000 Bq/m². Cette activité radioactive très hétérogène a été confirmée par les prélèvements de l'Acro dans les Alpes du Sud et en Savoie.

www Pour en savoir plus : le rapport de l'IRSN : www.irsn.fr/remanence



© Vincent Malat/IRSN



Des champignons ont été prélevés et analysés aussi bien par l'Acro que par l'IRSN. Ici, un bolet.

© Istock

5 Pourquoi des niveaux de radioactivité différents sur la même zone ?

Prenons l'exemple d'un champignon – constitué en réalité d'un large réseau de fins filaments analogues à des racines – poussant à très faible profondeur sur quelques mètres carrés. S'il pousse au pied d'arbres qui ont reçu de la pluie contaminée en 1986, son activité en ^{137}Cs est plus élevée que celle de champignons poussant à quelques mètres de là mais à

l'écart des grands arbres. De même, deux sangliers de la même région présenteront des résultats de contamination extrêmement différents selon les champignons qu'ils auront mangés !

www Pour en savoir plus : le rapport de l'ACRO <http://tchernobyl30.eu.org/wp-content/uploads/2016/04/BILAN-TCHE30.pdf>

Inspection

Un réacteur passé au peigne fin

Lors de leur arrêt périodique, les centrales nucléaires françaises sont inspectées par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), avec l'appui technique de l'IRSN.

Réacteur n° 1 de la centrale du Blayais, située en bord de Gironde. L'inspectrice de l'ASN et David Girardeau, expert de l'IRSN chargé de site, accompagnés par un représentant de l'exploitant, sont sur place pour examiner les opérations de mise en conformité de l'installation et la maintenance des équipements de la centrale. Cette inspection de chantier programmée se déroule pendant un "arrêt de tranche" : le réacteur est mis à l'arrêt pour recharger du combustible et effectuer la maintenance. *"L'objectif de l'inspection de chantier du réacteur n° 1 était d'auditer un maximum d'interventions réalisées sur les matériels importants pour la sûreté, relate David Girardeau. Nous avons également observé des chantiers où les intervenants doivent réaliser les gestes techniques adéquats. Et, bien sûr, nous vérifions que les consignes de propreté radiologique sont correctement appliquées."*

Une centaine d'écarts traités

À chaque anomalie détectée, lors de la maintenance d'un équipement par exemple, EDF ouvre une "fiche d'écart". Au total, une centaine de fiches ont été ouvertes et traitées lors de cette période d'arrêt du réacteur. *"Nous avons par exemple détecté un défaut de fixation au sol des châssis des armoires LNE¹ qui permettent une alimentation sans coupure d'équipements du contrôle-commande du réacteur. Des protections en tôle ont été ajoutées au-dessus des câbles d'alimentation de cette armoire. Ces ajouts ne sont pas conformes aux plans d'origine et pourraient venir aggraver ces câbles en cas de séisme",* explique David Girardeau, de l'IRSN. Ces écarts ont été traités avant le redémarrage du réacteur.

Demande de justification

Un peu plus loin, une autre anomalie est relevée sur les durites du moteur diesel d'un groupe électrogène de secours en cas de perte des alimentations électriques externes. *"Lors de l'inspection, nous avons constaté visuellement que les pièces en question étaient*



Sur le chantier, l'inspectrice de l'ASN et l'expert de l'IRSN passent en revue les interventions réalisées pendant l'arrêt du réacteur. C'est notamment l'occasion de vérifier la réalisation de modifications des robinets du système d'alimentation en eau des générateurs de vapeur.

désalignées", explique David Girardeau. L'inspectrice demande alors à EDF de justifier la disponibilité du moteur diesel. Si nécessaire, l'ASN peut contraindre l'exploitant à remplacer les durites avant le redémarrage du réacteur. Au vu des justifications fournies ultérieurement et du réaligement des durites, EDF réalisera un remplacement après l'arrêt,

avec l'accord de l'ASN. Lors de l'arrêt de réacteur suivant, les inspecteurs ont pu constater que ces pièces avaient effectivement été remplacées. ■

1. LNE : matériel destiné à produire et distribuer du courant alternatif 220 V sans coupure pour le contrôle-commande ou des équipements auxiliaires.



DIAPORAMA

Retrouvez tous les reportages !



Lors de l'inspection, un écart détecté sur le moteur diesel du groupe électrogène.



L'IRSN en appui technique de l'ASN

L'inspectrice de l'ASN mène cette inspection. Elle s'assure que les modalités du chantier sont conformes aux réglementations. À ses côtés, David Girardeau, ingénieur IRSN, l'appuie sur les aspects plus techniques. Leurs rôles sont complémentaires.



Un écart sur un moteur diesel

Les groupes électrogènes à moteur diesel servent de source électrique de secours en cas de perte des alimentations électriques externes. Ce jour-là, David Girardeau constate un écart sur les durites du circuit de refroidissement.



Un mur de protection radiologique

Ce dispositif provisoire est installé pendant les opérations de maintenance. Il permet de protéger des rayonnements ionisants toutes les personnes qui interviennent sur les chantiers voisins.



Une piscine pour manutentionner le combustible

Cette piscine est remplie d'eau lorsque le réacteur est à l'arrêt. L'exploitant réalise sous eau les opérations de manutention du combustible nucléaire, qui est encore très fortement radioactif. La zone à proximité est interdite d'accès au personnel pour éviter la chute de corps étrangers (objets divers, liquides, vis...) dans le bassin.



Mesure de la radioactivité

L'inspectrice et l'expert viennent de contrôler deux chantiers dans le local d'un groupe motopompe primaire. Il s'agit d'une zone du bâtiment abritant le réacteur, qui présente un risque de contamination. En sortant de ce local, lors du passage du "saut de zone", les inspecteurs procèdent à la vérification de l'absence de contamination de leur tenue à l'aide d'un radiamètre.



Maîtrisez le risque incendie

Vous souhaitez réaliser des expérimentations, des essais ou des recherches portant sur la maîtrise des risques d'incendie, dans des installations industrielles ? L'IRSN vous propose ses plateformes expérimentales de pointe. Situé à Cadarache, le Laboratoire d'expérimentation des feux (LEF) dispose de plusieurs plateformes d'essais regroupées sous le nom de « Galaxie ». Elles permettent, de par leur diversité, d'étudier des feux de différentes natures et tailles dans de multiples configurations. L'installation Diva, par exemple, est dédiée à la réalisation de feux pouvant simuler des conditions représentatives d'installations industrielles. D'autres plateformes permettent de simuler des feux dans un environnement sous-oxygéné (Caducée) ou d'étudier la combustion en atmosphère libre de foyers (Saturne).



Pour en savoir plus

Laboratoire d'expérimentation
des feux (LEF)
Tel : +33 (0)4 42 19 92 20
Contact : william.le-saux@irsn.fr

