



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

REPÈRES

EN PRATIQUE

Quelles précautions lors du transport
de radiopharmaceutiques ?

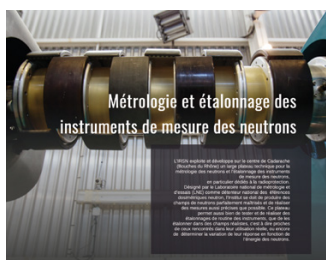
DOSSIER

Filtration des aérosols

Assurer la performance

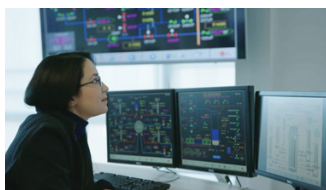
REPORTAGE

La sûreté des chaufferies
d'un sous-marin à Toulon



Mesure des neutrons

Découvrez en images le plateau technique pour la métrologie et l'étalonnage des instruments de mesure des neutrons, situé à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Les installations Cezane et Amande y produisent tout type de champs neutroniques de référence, utilisés pour des instruments dédiés à la radioprotection de l'homme. www.irsn.fr/moyens-experimentaux



La défense en profondeur en vidéo

En sept minutes, découvrez les grands principes de la défense en profondeur, élément clé

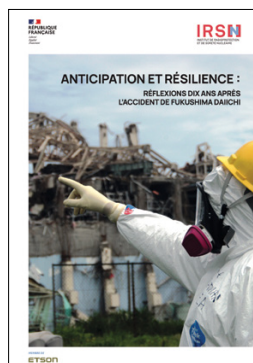
de la sûreté introduit dans les années 1970. Des animations didactiques sur les cinq niveaux de défense, des interviews de spécialistes, un retour sur les deux accidents à l'origine de ce concept – Three Mile Island et Fukushima Daiichi –, ainsi que sur le noyau dur mis en œuvre en France à la suite de l'accident japonais... www.irsn.fr/defense-profondeur



Suivi dosimétrique des travailleurs

Vous manipulez quotidiennement des sources radioactives ? Découvrez en images comment l'IRSN assure la mesure de l'éventuelle contamination radiologique des travailleurs. Laboratoires fixes et mobiles, mesures de la contamination du corps entier et de la thyroïde, intervention en cas d'accident radiologique...

Une courte vidéo résume l'accompagnement de l'Institut. www.irsn.fr/Ytb-Anthropo



Anticipation et résilience, le bilan

Comment les acteurs du nucléaire peuvent-ils mieux prévenir un accident majeur ou y répondre ? Prendre en compte les hommes et les organisations est primordial, montre le rapport *Anticipation et résilience*, destiné à tous ceux que la gestion des risques intéresse. Dix ans après l'accident de Fukushima Daiichi au Japon, ce bilan invite à s'interroger sur les pratiques et à envisager de nouvelles approches pour la maîtrise des risques. www.irsn.fr/Resilience-Fukushima

Agenda

Agenda sous réserve de la tenue des événements, en raison de la crise liée à la Covid-19.

20 septembre 2021

Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine)

OpenRadiation, la journée des utilisateurs

Vous êtes intéressé par le projet de sciences participatives OpenRadiation ? Rendez-vous à la journée de la communauté des utilisateurs, pour tout savoir sur la mesure citoyenne de la radioactivité ambiante. L'événement est ouvert à tous.

Inscriptions : contact@openradiation.org

5 octobre 2021

Distanciel

Microscopie électronique

Découvrez les opportunités de la microscopie électronique lors de la journée des plateformes scientifiques de l'IRSN. Au programme : cas concrets, conférences et ateliers pour s'informer sur les innovations du secteur. Lors des sessions à distance, vous pourrez poser vos questions et échanger avec des utilisateurs de votre domaine.

Contact et informations : JPSI@irsn.fr

Abonnement

POUR VOUS ABONNER

www.irsn.fr

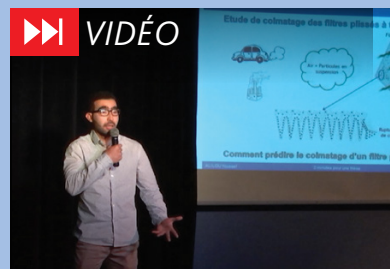
Rubrique l'IRSN > Publications > Magazine Repères

On line WEBMAG

www.irsn.fr/R50



Dossier Quelle est l'efficacité des filtres en métal ?



Dossier Colmatage : étude des filtres plissés à très haute efficacité



Reportage Rade de Toulon : la grue et l'alimentation électrique sont vérifiées

Sommaire

En couverture : Mathieu Barrault (à gauche) et Soleiman Bourrous (à droite), spécialistes en filtration des aérosols, retirent un caisson de filtration d'un banc d'essai.

P.4 TEMPS FORTS

Radiobiologie
L'intelligence artificielle en cas d'urgence

Écotoxicologie
Mieux prédire les variations du carbone 14 dans les poissons

P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Éléments de sûreté nucléaire
Un nouvel ouvrage pour 25 années d'expérience

P.9 ZOOM

Le ver nous éclaire

DOSSIER P.10

**Dossier du prochain N° :
Médicaments radiopharmaceutiques en sûreté**

**Filtration des aérosols
Assurer la performance**

P.17 EN PRATIQUE

Transport de radiopharmaceutiques
Multiplier les précautions

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**Tritium dans la Loire :
une nouvelle étude avec la société civile**

P.22 REPORTAGE

Référent essais
La sûreté des chaufferies d'un sous-marin

© Clément Herbaux



Filtration L'IRSN a la fibre

La filtration des aérosols met en jeu des mécanismes complexes. Elle intéresse de nombreux secteurs industriels, qu'il s'agisse de protéger un procédé – dans l'agroalimentaire ou la microélectronique –, l'opérateur et la population – dans le nucléaire –, voire les deux – dans le médical.

Avec la pandémie, elle est au cœur de l'actualité. La filtration est inscrite dans les gènes de la sûreté nucléaire et *a fortiori* ceux de l'Institut, qui joue un rôle majeur dans ce domaine. Les premiers textes normatifs impliquant le Laboratoire d'expérimentations sur le comportement des équipements et de la ventilation (Lecev) datent des années 1970. *Repères* illustre dans le dossier de ce numéro le continuum entre la recherche – académique et prénormative –, l'élaboration de référentiels et l'expertise. Il met en exergue la complexité de la filtration et la variété de situations auxquelles elle doit faire face, par exemple en cas d'accident : vieillissement, incendie, vapeurs nitreuses, humidité... Il expose les équipements dédiés, souvent uniques en France. Aujourd'hui, le défi est d'améliorer la prédictivité du comportement des filtres. Dans cette perspective, les modélisations complexes, couplant efficacité et colmatage, sont capitales.

Jean-Claude Laborde

Chargé de mission auprès du directeur de la recherche en sûreté

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Membre d'Etson MEMBER OF **ETSON** – 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 communication : Marie Riet-Hucheloup – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Octavia Véry, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Sophie Léonard – Photos de couverture : © Joseph Gobin/Médiathèque IRSN – Impression : Handiprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – septembre 2021.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Contamination à l'uranium Mesurer trois isotopes en trois jours

Une contamination interne peut survenir en cas d'incident – source brisée, perte d'étanchéité d'une enceinte, etc. Grâce à la technique ICP-MS¹, le temps de mesure des trois isotopes principaux de l'uranium (234, 235 et 238) chez les travailleurs passe de trois semaines à trois jours. Son principe repose sur le dosage pondéral² des trois isotopes, là où la technique conventionnelle par spectrométrie alpha mesure une activité en becquerel. L'ICP-MS est effectuée sur les urines et les selles. Elle nécessite un volume d'échantillon plus faible. Les coûts d'analyse sont réduits, ainsi que la consommation de réactifs polluants. « *La mise au point de l'accréditation a pris trois ans*, observe la biologiste Christine Bartizel. *Elle a mobilisé le LBMA [Laboratoire opérationnel de biologie médicale] et le LRSI [Laboratoire de recherche en radiochimie]* ». L'IRSN a le seul laboratoire en France possédant l'accréditation ISO 15189 pour cette méthode, obtenue en 2020.

1. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif.*
2. *Caractérisation par la masse, rapportée à l'unité de volume ou de masse de l'échantillon.*

FILTRATION DES AÉROSOLS

99,98 %

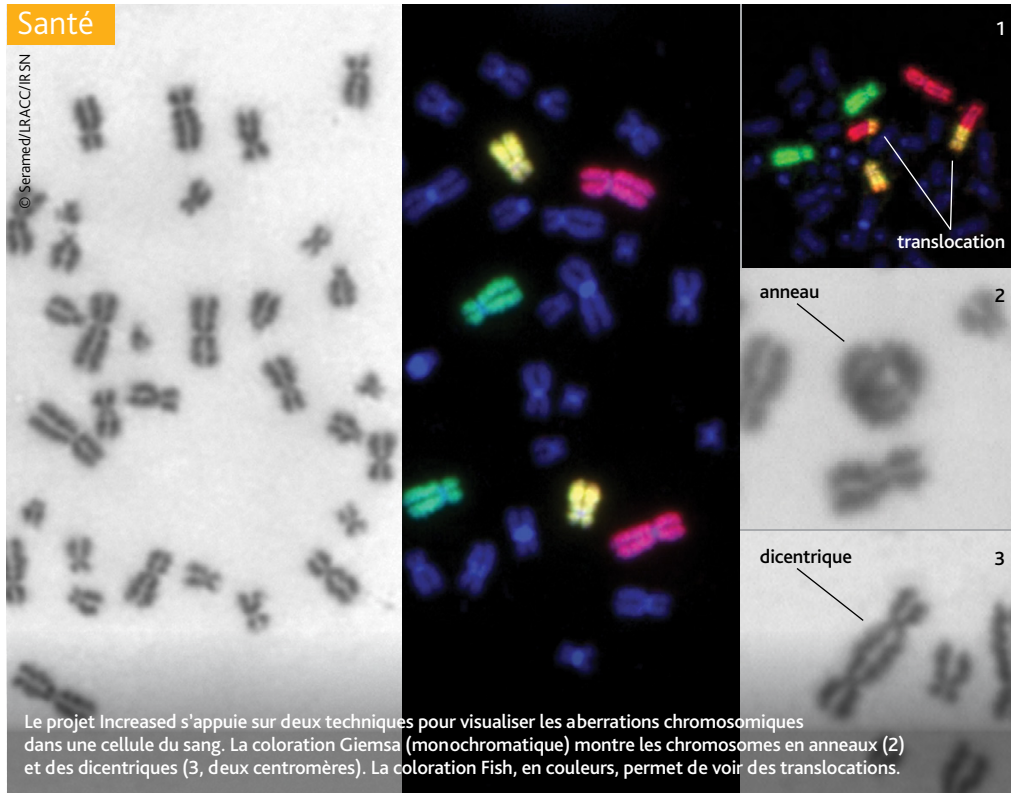
C'est l'efficacité minimale d'un filtre THE (très haute efficacité), homologué CTHEN (Centre technique d'homologation des équipements nucléaires).

+ 50

C'est le nombre de techniciens, chercheurs, ingénieurs, docteurs, thésards qui travaillent à l'Institut dans le domaine de l'aérodispersion des polluants.

Retrouver le dossier
« Filtration des aérosols » en page 10

Santé



Radiobiologie

L'intelligence artificielle en cas d'urgence

Automatiser la détection des chromosomes avec des aberrations pour accélérer le tri et la prise en charge de personnes potentiellement irradiées en cas d'accident radiologique, tel est l'objectif du projet Increased*. Il est mené par le Laboratoire de radiobiologie des expositions accidentelles (LRACC) à Fontenay-aux-Roses (Essonne).

Aujourd'hui, cette analyse est assurée par des experts. Elle est longue, car il faut douze heures pour réaliser un diagnostic. Elle repose sur l'examen microscopique d'échantillons de sang de sujets irradiés. Les biologistes comptabilisent, cellule par cellule, le nombre de malformations chromosomiques. « *Notre objectif est de l'automatiser grâce à l'intelligence artificielle [IA]* », indique le radiobiologiste Gaëtan Gruel.

Apprentissage profond

Le projet exploitera la technique dite « d'apprentissage profond » (*Deep Learning*), « *pour la reconnaissance automatique d'objets sur des photos* », précise le spécialiste. Le programme sera entraîné sur une base de données d'images annotées depuis dix ans par les experts. Partenaire, l'Inria* apportera son expertise sur les aspects algorithmiques.

À la fin du projet, prévue en 2023, la technologie développée augmentera la réactivité et les capacités d'analyses de l'IRSN en situation d'urgence, tout en améliorant la fiabilité des résultats. L'Institut pourrait diffuser son usage dans d'autres contextes : « *Le développement de nouvelles molécules pharmaceutiques nécessite des analyses toxicologiques, comme la détection d'anomalies chromosomiques, illustre Gaëtan Gruel. Ce type d'analyses est coûteux. Avec l'IA, nous pourrions lever ce verrou.* »

* *Coopération avec l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) et l'Institut de recherche biomédicale des armées (Irba), soutenue par l'ANR-Astrid.*

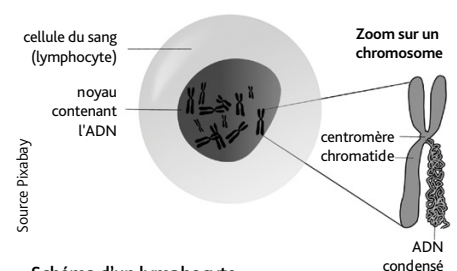


Schéma d'un lymphocyte dont le cycle de division a été bloqué au stade de la métaphase.



Sûreté

La maquette de piscine de stockage est haute de 6,8 mètres.

“L’installation Midi explore la phase finale de l’accident, quand les pompes aspirent de l’eau quasi-bouillante.”

Entreposage de combustibles usés

Une maquette simule les accidents de perte de refroidissement

Les études thermo-hydrauliques viennent de commencer au sein de l’installation Midi¹. Cette maquette – à l’échelle 1/6 – d’une piscine d’entreposage de combustibles usés fait partie du projet de recherche post-Fukushima, Denopi². Sa vocation : simuler des accidents de perte des systèmes de refroidissement dans une piscine.

« En 2011, le tsunami a endommagé le circuit de refroidissement », rappelle Benoit Migot, chercheur en mécanique des fluides au Laboratoire d’expérimentation en mécanique et matériaux (LE2M) de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Ce scénario mènerait à l’échauffement puis à l’ébullition de l’eau. Depuis l’accident japonais, des possibilités

renforcées d’appoint en eau des piscines sont déployées pour limiter le risque de dénoyage.

Munie de cartouches chauffantes reproduisant la puissance résiduelle des assemblages, Midi permet d’étudier la répartition des flux de chaleur, les mouvements du fluide dans la piscine et les mécanismes de vaporisation de l’eau dans cette situation.

Ces expérimentations servent à valider les logiciels utilisés dans les études et à s’assurer de l’absence de risques associés à l’ébullition.

1. Maquette instrumentée pour l’étude du dénoyage des piscines de combustibles.

2. Dénoyage accidentel de piscine d’entreposage de combustible nucléaire www.irsn.fr/denopi



Environnement

Carpe commune (*Cyprinus carpio*) élevée au Laboratoire d’écotoxicologie des radionucléides (Leco), isolée dans un aquarium.

Écotoxicologie

Mieux prédire les variations du carbone 14 dans les poissons

Vingt-quatre heures après avoir fait ingérer à des carpes des nutriments marqués au carbone 14, environ un quart de la radioactivité est incorporé dans leurs tissus, selon la thèse d’Audrey Souloumiac, écotoxicologue. Le carbone 14 est le radionucléide – avec le tritium – le plus rejeté dans les cours d’eau lors du fonctionnement normal des centrales. Ses teneurs dans les poissons des fleuves nucléarisés sont faibles, mais leurs variations sont difficiles à expliquer. Les travaux de la doctorante^{1,2}, cofinancés par EDF, améliorent les modèles de transfert de cet isotope vers les poissons, selon les saisons et le niveau de rejets radioactifs.

Ils reposent sur l’étude de carpes communes (*Cyprinus carpio*), nourries avec du glucose ou un acide aminé essentiel au carbone 14 pendant plusieurs jours. L’incorporation du radionucléide est suivie au fil du temps. Les variations sont analysées à l’aide du modèle mathématique DIB (*Dynamic isotope budget*, budget dynamique des isotopes).

1. Souloumiac A. et al. (juillet 2021) Journal of Environmental Radioactivity, 233.

2. Laboratoire de recherche sur les effets des radionucléides sur les écosystèmes (Leco).

www Pour en savoir plus : Thèse « Étude mécaniste et écophysiological des transferts du carbone 14 aux poissons » www.irsn.fr/These-Souloumiac

Robustesse des installations

Une conviction partagée, autant qu’un calcul

La robustesse d’une installation nucléaire est avant tout une conviction partagée entre plusieurs groupes d’acteurs : exploitants, autorité de sûreté, expert technique (IRSN).

Telle est la conclusion de Mathias Roger à l’issue de sa thèse en sociologie, préparée entre 2016 et 2020 au Laboratoire de recherche en sciences humaines et sociales (LSHS) de l’Institut, à Fontenay-aux-Roses (Essonne).

« Ses travaux ont été initiés après l’accident de Fukushima. Celui-ci a révélé une défaillance du système de régulation des risques nucléaires. Cela nous a amenés à questionner notre pratique d’expertise », raconte François Jeffroy, responsable du laboratoire.

L’objectif de la thèse était de comprendre, sur le plan sociohistorique, comment se construit la robustesse des installations nucléaires face au risque sismique.

À travers l’analyse de centaines de documents et de dizaines d’entretiens, Mathias Roger retrace la façon dont chercheurs et experts abordent depuis plusieurs décennies l’aléa sismique, ses effets sur les installations et les marges de sécurité associées.

« La robustesse ne relève pas seulement du calcul, considère l’expert, mais aussi de la confiance dans la démonstration. »

FAITS ET PERSPECTIVES



En juin 2011, une crue exceptionnelle des eaux du Missouri aux États-Unis, inonde la centrale de Fort Calhoun (Nebraska). Les risques de crue sont désormais pris en compte dans les mesures de sûreté.



Ouvrage de référence de 1 250 pages, *Éléments de sûreté nucléaire, les réacteurs à eau sous pression* est une actualisation didactique du livre de Jacques Libmann (1996).

Éléments de sûreté nucléaire

Un nouvel ouvrage capitalise 25 années de retour d'expérience

Maîtrise de situations avec fusion du cœur, rôle des facteurs humains, modifications des installations après l'inondation du Blayais en 1999 et l'accident de Fukushima Daiichi en 2011... La nouvelle édition des *Éléments de sûreté nucléaire*, parue début 2021, met à profit 25 ans de retour d'expérience en sûreté.

La nouvelle édition du livre *Éléments de sûreté nucléaire* vient de paraître. Elle aura nécessité sept années de travail et près de 50 contributeurs. Ses quarante chapitres en 1 250 pages donnent à de nombreux acteurs – exploitant, expert, chercheur, société civile, services de l'État, enseignant, étudiant – une vision détaillée et globale de la sûreté. Paru en 1996, le « Libmann », véritable bible en sûreté, commence à pâtir de son ancienneté. La nouvelle édition est-elle un « toilettage » ou un total remaniement ? Au final, les contenus sont repris en profondeur. « Le mieux était de le réécrire, en conservant néanmoins les données de l'ouvrage de 1996 toujours utiles : des éléments relatifs à l'histoire, à la genèse de l'organisation de la

sûreté... », raconte Jean Couturier, conseiller scientifique à l'Institut et « chef d'orchestre » de cette nouvelle édition.

Une démarche structurée

Le « Couturier », issu de cette refonte, n'a plus grand-chose à voir avec l'ouvrage initial. Des évolutions majeures ont marqué le domaine, à commencer par la structuration progressive de la démarche de sûreté. « La défense en profondeur, l'élimination de situations accidentelles, la prise en compte des agressions... Tout cela s'est beaucoup affiné depuis les années 1990 », décrit le spécialiste en sûreté Emmanuel Wattelle, qui a apporté un appui à la coordination de l'ouvrage pour le pôle sûreté nucléaire.

Historiquement, certaines agressions sur les installations n'étaient pas intégrées. Le retour d'expérience, telle l'inondation partielle de la centrale du Blayais (Gironde) en 1999, aboutit à un renforcement de la protection. Quels types d'aléas considérer pour une centrale en bord de mer : pluies, crues sur un petit bassin versant, etc. ? « Désormais, il existe une liste d'agressions explicitée. Pour un site donné, elle indique le niveau d'agression à prendre en compte », explique Emmanuel Wattelle.

Un chapitre retrace cette évolution. Il répertorie dans un schéma didactique les phénomènes conduisant à l'inondation d'un site et les conséquences envisageables. « C'est une mise à jour sur l'ensemble des domaines de la sûreté », observe Frédérique Pichereau, dont la spécialité d'origine, les études probabilistes de sûreté (EPS), a également beaucoup évolué en 25 ans (voir infographie p. 7).

L'ouvrage montre ainsi comment la démonstration de sûreté, avec la mise en place d'un systématisme des réexamens, s'est structurée au fil des ans. Depuis 2006, les exploitants

PROCESS

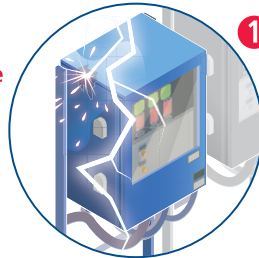
Les probabilités font évoluer la sûreté des installations

Les études probabilistes de sûreté (EPS) quantifient tous les scénarios pouvant conduire à la fusion du combustible. En 2012, la réglementation impose leur réalisation pour toutes les installations nucléaires, sauf quand ce n'est pas pertinent. Le livre *Éléments de sûreté nucléaire* présente le développement et l'utilisation des EPS et les enseignements tirés.

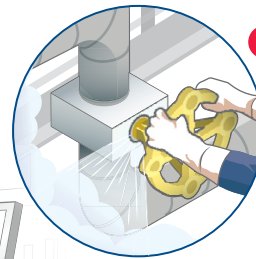
EPS systématiques depuis 2012

Prise en compte de l'ensemble des scénarios issus d'événements internes et externes de l'installation, pouvant conduire à la fusion du combustible et à des rejets radioactifs. Extension du domaine de couverture des EPS et leur utilisation de manière formalisée lors des réexamens de sûreté.

Exemples de scénarios pris en compte

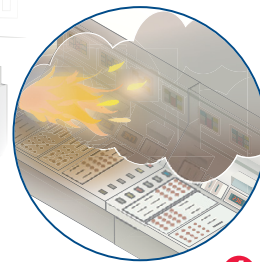


1 Événements internes : défaillances d'origine matérielle

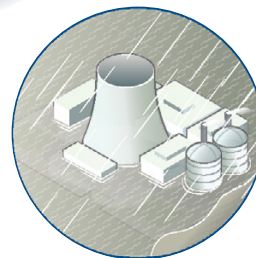


2 Événements internes : défaillances d'origine humaine

3 Ou combinaison de défaillances d'origines matérielle et humaine



4 Agressions internes : départ de feu, inondation interne, explosion



5 Agressions externes : séisme, grand vent, inondation externe...



6 Évaluation des rejets

Premiers développements des EPS avant 2012.



Premières études de fiabilité en 1970. Les premières EPS complètes datent des années 1990.

Ensuite, recours de plus en plus systématique aux EPS pour les réacteurs électronucléaires et extension de leur domaine de couverture.

L'arrêté de 2012 * impose la réalisation d'EPS pour les réacteurs mais aussi les autres installations, sauf si l'exploitant démontre que ce n'est pas pertinent.



Depuis, la démonstration de sûreté nécessite des analyses probabilistes des accidents et de leurs conséquences. Les EPS de référence d'une INB sont réalisées par l'exploitant et expertisées par l'IRSN.

* Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (INB).

Les améliorations pour la sûreté :

- ↑ Renforcement du niveau de sûreté des réacteurs.
- ↑ Modifications matérielles, organisationnelles ou de procédures...

ont l'obligation de réexaminer périodiquement – en pratique, tous les dix ans – la sûreté de leurs installations. La démarche comprend deux volets : l'examen de conformité et la réévaluation de sûreté proprement dite. « Elle se fait à la lumière du retour d'expérience, des nouvelles réglementations, de la meilleure pratique française et internationale, des connaissances acquises par la recherche et le développement... Un chapitre explique cette démarche, comment elle s'est traduite sur le troisième réexamen des réacteurs de 900 MWe », détaille Jean Couturier.

En 2019 sont ajoutés des éléments relatifs au quatrième réexamen périodique des premiers réacteurs, lié à la prolongation de

leur exploitation au-delà de quarante ans (lire dossier Repères n° 47).

Le livre met en lumière la prise en compte des facteurs organisationnels et humains dans la prévention des incidents et accidents.

Intégrés dans les enseignements

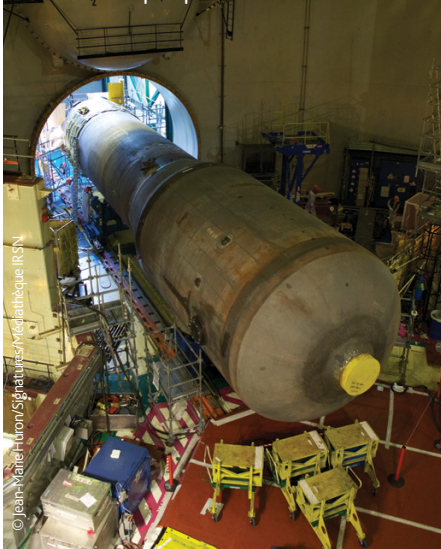
« Cela a progressivement fait évoluer les méthodes de travail et l'organisation », remarque Constance Coston, directrice de la formation du génie atomique de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Depuis quelques années, ce dernier intègre cette question dans ses enseignements. Un chapitre du « Couturier » y est dédié, il sera un appui.

Tirant les enseignements des accidents de Three Mile Island (1979), Tchernobyl (1986) et Fukushima Daiichi (2011), l'ouvrage retrace le développement de la « culture de sûreté » depuis les années 1990. « Notre ouvrage de référence était le Libmann. Le Couturier prend le même chemin », remarque Constance Coston.

En un quart de siècle, la dimension internationale de la sûreté s'est étoffée, comme en témoigne le livre. Partage d'expériences, avancées scientifiques sur le gainage du combustible... « Depuis les années 1990, la notion d'harmonisation internationale émerge », note Emmanuel Wattelle. Le partage de connaissances entre pays élève le niveau de sûreté de chacun.

FAITS ET PERSPECTIVES

Entre 1990 et 2019, 28 des 34 générateurs de vapeur des réacteurs de 900 MWe sont remplacés en France. Ils font l'objet d'améliorations pour pallier les défauts constatés.



Erreurs de lignage, anomalies dues à la dégradation d'équipements, à la corrosion en bord de mer... La question des écarts de conformité, de leur détection et de leur traitement est traitée. « *Nous y apportons une grande attention, car c'est la base de toute la sûreté, explique Jean Couturier. Si les installations, les équipements, ne sont pas conformes aux attentes, la démonstration de sûreté n'est pas valable.* » Des écarts de conformité sont détaillés, comme les anomalies des moteurs diesel des groupes électrogènes de secours et d'ultime secours des réacteurs de 900 MWe, survenues à la fin des années 2000. « *Les exemples ont une valeur pédagogique pour l'exploitant.* »

Utile pour les étudiants

D'autres acteurs en sûreté en profiteront aussi. Ils ne seront pas les seuls. « *Nos élèves y trouvent des grands principes, comme la "défense en profondeur" et des détails sur un équipement de sûreté précis* », note Constance Coston. Où se trouvent la deuxième et la troisième barrière au niveau du générateur de vapeur d'un réacteur à eau sous pression ? Tout étudiant se pose cette question un jour ou l'autre. L'ouvrage apporte une réponse. « *Dans leur vie professionnelle, ils le découvriront et trouveront l'information qui leur manque.* » ■

www Pour en savoir plus :
Le livre *Éléments de sûreté nucléaire (2021)*

www.irsn.fr/ESNREP

Dossier du Repères n° 47 Vieillesse des centrales, fonctionner en sûreté après 40 ans

www.irsn.fr/R47

Quelle est votre contribution à l'édition 2021 du livre *Éléments de sûreté nucléaire* ?

J'ai rédigé certaines parties en lien avec mon cœur de métier, le combustible. J'ai aussi coordonné, au sein du Semia*, les chapitres sur la neutronique et la thermo-hydraulique, thèmes plus éloignés de mon domaine de connaissance. J'ai dû sortir de ma zone de confort, faire appel à d'autres experts. C'était enrichissant. Relier ces sujets transverses donne une vision cohérente de la sûreté. L'objectif était de montrer les évolutions via la capitalisation des connaissances.

Comment avez-vous abordé les sujets ?

Au-delà d'un état des lieux, il s'agissait de mettre en avant des évolutions apportées grâce à l'expertise de l'Institut. La partie dédiée à l'accident de perte de réfrigérant primaire, par exemple, décrit les réunions du groupe permanent d'experts chargés des réacteurs installés depuis 2011. Il mentionne les recommandations issues des discussions.

Quels étaient les défis ?

Il fallait trouver auprès des personnes compétentes les bonnes informations. Sur la partie consacrée aux tubes de générateurs

de vapeur, nous avons besoin de thermo-hydrauliciens. Des experts de mon service l'ont rédigée, puis nous avons collaboré pour l'améliorer. Il n'était pas toujours évident d'avancer. En sept ans, il y a eu des départs, des mutations... Il est difficile de s'approprier la dimension historique de la sûreté, surtout pour de jeunes auteurs. Or, c'est l'un des objectifs de l'ouvrage : transmettre les connaissances pour les futures générations. On apprend de l'histoire.

* Service d'évaluation de la maîtrise des incidents et des accidents.

3 questions à...

Stéphanie Graff

Experte en combustible



La Belgique prévoit la sortie du nucléaire pour 2025, sauf si la sécurité d'approvisionnement du pays n'est pas garantie fin 2021. Ici, la centrale de Tihange.

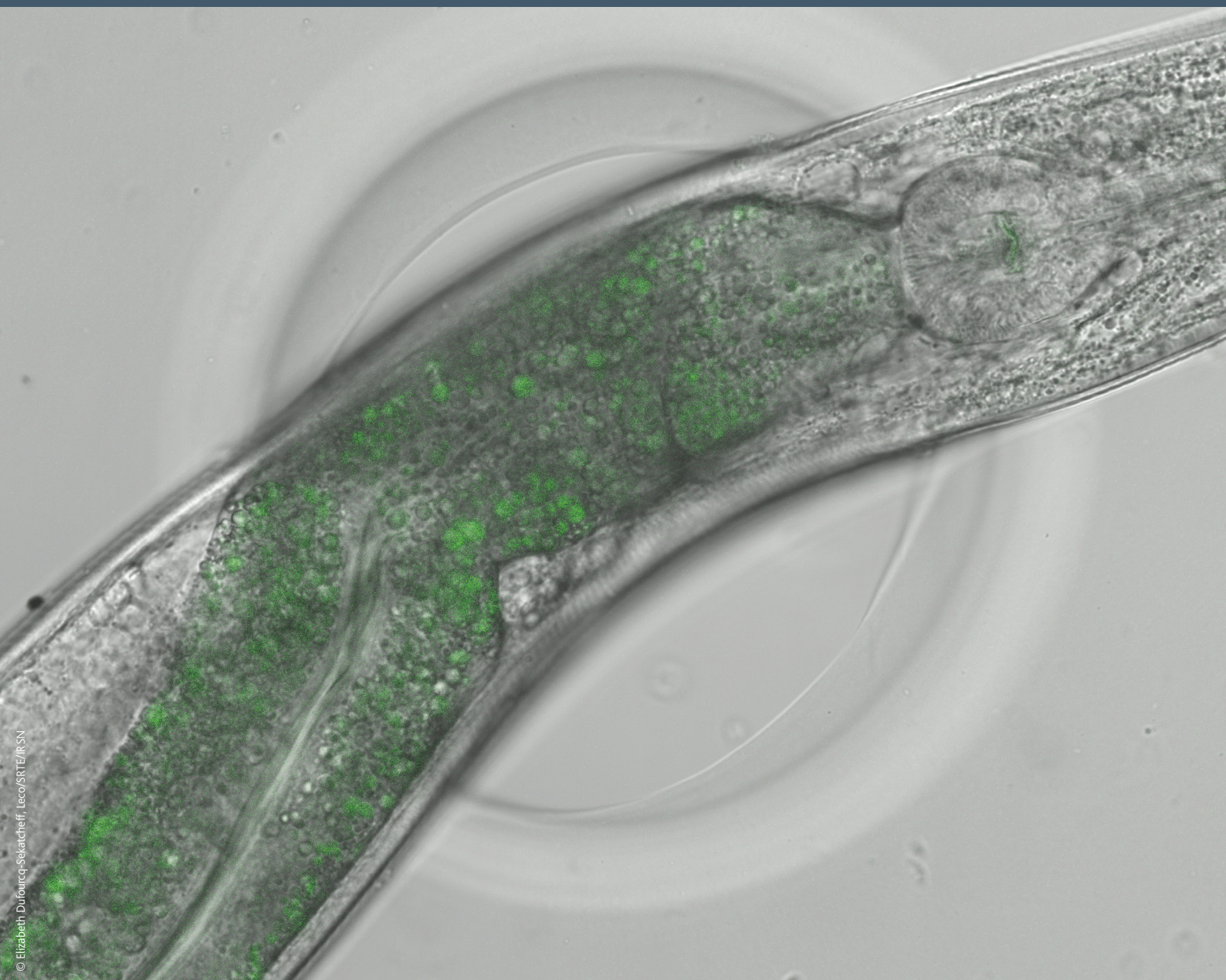
AILLEURS

Belgique : quelles améliorations ?

L'ouvrage *Éléments de sûreté nucléaire* présente les actions choisies par plusieurs pays après l'accident de Fukushima Daïchi. Qu'en est-il en Belgique ? « *Même si les spécifications sont identiques à celles suivies en France, les améliorations ne le sont pas. Ceci en raison de spécificités de conception des installations sensiblement différentes, d'effets d'échelle liés aux parcs exploités*...* », expose Marc Vincke, de l'organisme technique de sûreté belge Bel V. Les agressions d'origine externe – chute d'avion, explosion... – sont considérées dès la conception des quatre unités les plus

récentes (années 1980) selon une approche introduisant des redondances. « *C'est le cas pour l'alimentation en eau des générateurs de vapeur, le maintien de l'intégrité des joints des pompes primaires* », énumère Marc Vincke. Les centrales disposaient d'emblée d'alimentations électriques et de sources froides diversifiées. Les mesures décidées à la suite des tests de résistance effectués en 2011 les protègent contre des situations encore moins probables : séismes et phénomènes météorologiques extrêmes.

* La Belgique a 7 unités en fonctionnement sur 2 sites, la France 56 sur 18 sites.



Le ver nous éclaire

Nu comme un ver, dit l'expression. Ce petit ver-là, un nématode, se met à nu pour aider les scientifiques à comprendre l'effet des rayonnements sur la reproduction. Transparent comme du verre, le marquage vert qu'il révèle – celui d'un gène impliqué dans la détermination sexuelle – informerait sur sa production de spermatozoïdes. Il constitue un bon modèle d'étude, car il est bien documenté sur les plans génétiques et moléculaires.

Cette photo, obtenue au microscope inversé à fluorescence, est issue des travaux de thèse

d'Élizabeth Dufourcq-Sekatcheff, écotoxicologue au Laboratoire de recherche sur les effets des radionucléides sur les écosystèmes à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Son objectif : comprendre quand interviennent ces effets toxiques sur la reproduction.

Les premiers résultats montrent une baisse de fertilité dès les premières heures d'irradiation, à des doses faibles et des stades de développement précoces. La prochaine étape vise à caractériser les mécanismes moléculaires en jeu. Une hypothèse est explorée : l'irradiation aurait un impact sur

**Élizabeth
Dufourcq- Sekatcheff**
Écotoxicologue

les lipides, indispensables pour la formation d'œufs viables. Pour les étudier, la jeune écotoxicologue soumet des populations de nématodes à une exposition chronique aux rayonnements gamma (50 mGy/h), du stade œuf aux différents stades de maturité : embryon éclos, jeune adulte, adulte.

Ces travaux contribuent à mieux appréhender les effets de la radioactivité sur les écosystèmes. À plus long terme, ils pourraient améliorer les indicateurs de suivi et contribuer à une meilleure protection de l'environnement. ■



Mathieu Barrault (à gauche) et Soleiman Bourrous (à droite), spécialistes en filtration des aérosols, retirent un caisson de filtration du banc d'essai Starmania (Station pour les transferts aérauliques et les résistances mécaniques appliquées aux nuisances incidentelles et accidentelles).

95 %

des expertises sur la filtration des aérosols menées par l'IRSN portent sur l'amont et l'aval du cycle du combustible. Ces usines, laboratoires, installations d'entreposage et de stockage des déchets et situations de démantèlement génèrent des aérosols radioactifs.

Filtration des aérosols

Assurer la performance

Une installation nucléaire produit des aérosols, dont certains sont radioactifs. Pour protéger les travailleurs et la population, il faut évaluer le risque de dispersion et dimensionner les systèmes de filtration de l'air. L'Institut expertise ce dimensionnement et contribue à fixer des normes. Ses recherches et ses dispositifs expérimentaux affinent les connaissances sur la filtration.

« **Q**uand la matière radioactive n'est pas dans un lieu étanche ou à faible taux de fuite, comme le bâtiment d'un réacteur, le confinement n'est pas garanti. Deux alliés assurent la radioprotection de l'homme et de l'environnement : la ventilation et la filtration », explique Éloi Bauduin, expert en confinement. C'est le cas pour les laboratoires de recherche, usines de fabrication et de retraitement du combustible et lieux en démantèlement. La matière radioactive y est manipulée de diverses manières – évaporation, fusion, broyage... – dans des équipements complexes, parfois dans plusieurs bâtiments.

Dans ce dossier, *Repères* aborde les expertises et recherches sur la performance de la filtration des aérosols, en conditions nominales et accidentelles. Ces travaux s'intéressent à l'aérosol, à son transfert dans l'installation, à son rejet et surtout aux dispositions

matérielles et organisationnelles prévues pour limiter les rejets dans l'environnement.

Expertiser les lieux à risque

« Le confinement dans le nucléaire fonctionne en "poupées russes". La ventilation crée une cascade de pressions, qui fait circuler l'air vers la zone la plus contaminée », décrit Éloi Bauduin. Selon les risques, jusqu'à trois niveaux de filtration très haute efficacité (THE) se succèdent. Un premier sécurise le procédé¹ contaminé, au plus près de la matière : boîtes à gants contenant de la poudre de combustible, lieux de transit de tuyaux véhiculant des liquides actifs... Un deuxième confine le local où se trouve le procédé et où interviennent les travailleurs. Un troisième sécurise le reste de l'installation. Le dernier niveau de filtration (DNF) constitue toujours l'ultime barrière pour maîtriser les rejets dans l'environnement (*lire p. 14*).

La filtration, soumise à des normes, est régulièrement contrôlée, selon des règles fixées par les exploitants. Le dimensionnement de la filtration d'une installation – le type et le nombre de filtres THE – repose sur l'évaluation des niveaux de contamination atmosphérique en fonctionnement nominal et accidentel. Il s'appuie sur la norme NF ISO 17 873. Celle-ci fait consensus entre les exploitants et l'IRSN. « Nos évaluations concernent des sujets variés : chute de colis, rupture de cuves ou incendie », observe l'expert. Elles se concentrent sur les lieux et situations à risque maximal, à divers stades du cycle de vie d'une installation

Comment un aérosol est-il capturé par un filtre ?

La filtration se décrit à trois échelles : la fibre, le média filtrant et la géométrie du filtre. Les spécialistes étudient et modélisent l'interaction aérosol-fibre pour *in fine* limiter l'exposition des travailleurs, de la population ainsi que les rejets dans l'environnement.

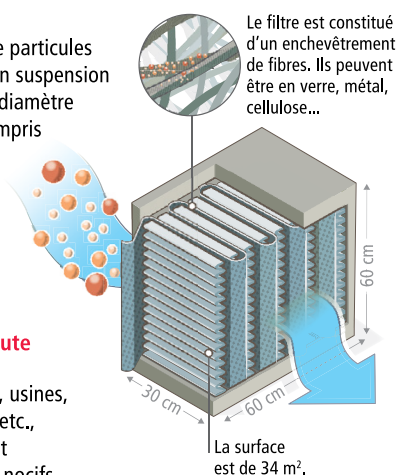
Un aérosol

C'est un ensemble de particules solides ou liquides, en suspension dans l'air, et dont le diamètre est généralement compris entre 0,01 et 10 µm.

- < 0,1 µm
- 0,1 µm ~ 1 µm
- > 1 µm

Les filtres à très haute efficacité (THE)

Dans les laboratoires, usines, centrales nucléaires, etc., ils filtrent l'air partout où il y a des aérosols nocifs, avec une efficacité supérieure à 99,98 %.



Mécanismes de capture

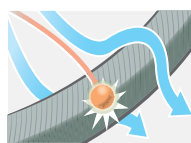
• La diffusion

Les particules fines présentent un mouvement aléatoire (brownien) et se déposent ainsi sur la fibre.



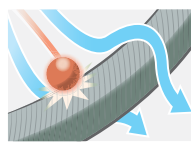
• L'interception

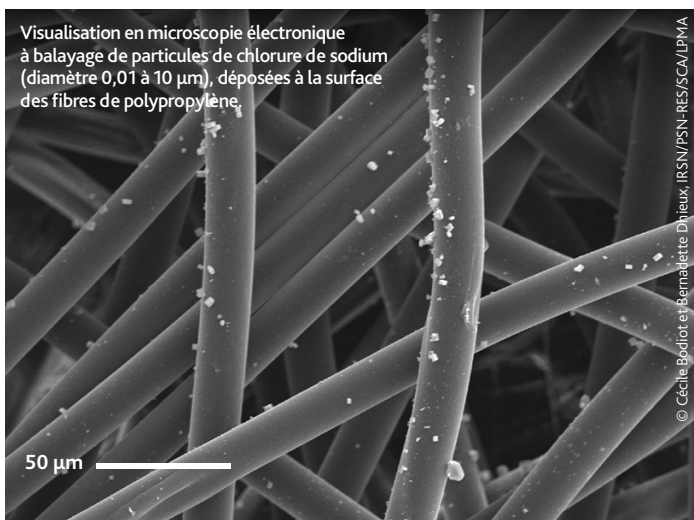
Les particules moyennes sont captées lorsqu'elles passent à une distance inférieure au rayon de cette particule.



• L'impaction

Les grosses particules ont trop d'inertie pour suivre les déviations du flux d'air près de la fibre et s'impactent contre elle.





“ La connaissance et l’expérience des chercheurs éclairent les expertises.

ou d’un équipement. Elles couvrent les conceptions – le nouvel évaporateur des produits de fission de l’usine de La Hague (Manche) –, les mises en service, les réexamens décennaux de sûreté – cas du laboratoire Atalante à Marcoule (Gard) – et les démantèlements – tel celui de l’usine UP2-400 à La Hague. Elles sont assurées par les sept experts du Bureau d’analyse du confinement (Bac). Ils instruisent des dossiers à la demande de l’Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ou de son homologue défense (ASND²). « Par exemple, nous pouvons évaluer la sûreté d’une chaîne de boîtes à gants où sont fabriquées des pastilles de combustible. Nous étudions le procédé étape par étape. À l’aide de calculs, nous soumettons l’équipement aux conditions normales et accidentelles pour vérifier si la conception et l’exploitation limitent la dispersion. Nous examinons le nombre de filtres THE. Faut-il augmenter la redondance ? Les contrôles périodiques sont-ils réalisés ?... », illustre Éloi Bauduin. À la fin, des renforcements peuvent être décidés (lire Focus p. 14).

Impossible de prendre une médiane

Les experts postulent des défaillances et s’appuient sur des hypothèses issues d’expériences archivées dans des bases de données. Deux ressources dominent, constituées avec la contribution de l’IRSN. Badiane regroupe les résultats de la R&D sur le comportement de la filtration aux diverses sollicitations accidentelles. Badimis réunit les coefficients de mise en suspension des aérosols dans des conditions variées.

150 nm

C’est le diamètre des aérosols utilisés pour tester les filtres dans les installations nucléaires. Il faut s’assurer de leur efficacité, même dans les conditions les moins favorables.

Pour comprendre le comportement aéraulique³ d’une installation, experts et exploitants utilisent des outils numériques, tel le logiciel Sylvia. Il fournit une « photo » en fonctionnement normal – flux d’air et dépressions entre les différents volumes –, puis simule l’accident (voir infographie ci-contre).

« Si une recherche bibliographique n’est pas concluante, nous réalisons des expérimentations à Saclay [Essonne]. Il peut s’agir d’une expérience, d’un programme complet, d’une thèse, détaille Éloi Bauduin. Nouveaux procédés, situations accidentelles... nous devons affiner nos connaissances constamment. Cela a été le cas entre 2016 et 2018 pour le comportement des filtres THE soumis à une très forte humidité. Les chercheurs éclairent nos expertises, pour que l’avis de l’IRSN s’appuie sur des bases solides. En l’absence de connaissances, il est impossible de prendre une médiane. »

Nouvelles homologations

L’aérodispersion est étudiée à l’Institut depuis les années 1980. Il est assez vite apparu que les normes et les standards pour les réseaux de filtration, écrits pour l’industrie en général, ne suffisaient pas pour le nucléaire. « Les normes de résistance au feu pour un clapet coupe-feu prennent en compte l’agression thermique, mais pas l’augmentation de pression. Or, il y a une augmentation de pression importante en cas d’incendie dans une installation nucléaire », remarque Jérôme Richard, spécialiste du transfert des particules ou gaz au Laboratoire d’expérimentations et de modélisation en aérodispersion et confinement (Lemac), à Saclay (Essonne).

Le Lemac initie en 2016 la mise à jour du référentiel CTHEN⁴ en vigueur pour les filtres utilisés dans l’industrie nucléaire. Celui-ci fixe des paramètres – par exemple, la pression à laquelle le filtre doit résister – et définit des essais permettant de les vérifier.

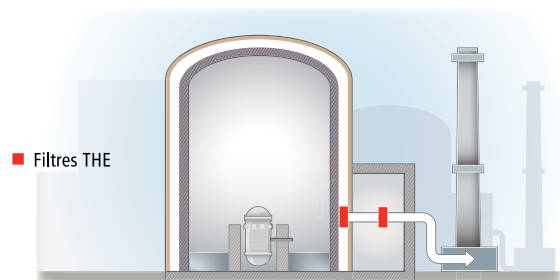
EN CLAIR

Le comportement des filtres est étudié en situation accidentelle

Quel est le risque de déchirure d'un filtre en cas d'accident ? La question est posée en 2017 à l'occasion du troisième réexamen périodique des centrales de 1300 MWe. Comment les experts de l'IRSN y répondent ? En utilisant les lois physiques et le logiciel de modélisation Sylvia.

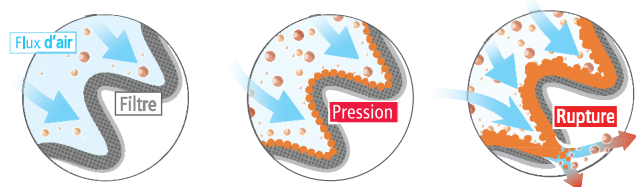
1 Une filtration indispensable

Le **système de filtration** d'une centrale contribue à limiter les rejets en fonctionnement normal et accidentel. Les filtres à très haute efficacité (THE) retiennent **99,98 %** des particules contenues dans des aérosols.



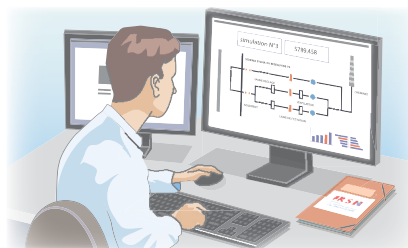
2 Que se passe-t-il en cas d'accident ?

- **Le filtre se charge**
En cas d'accident le nombre de particules – radioactives, mais aussi liées à l'humidité de l'air – dans l'installation augmente.
- **Il se colmate**
Le filtre se charge progressivement et se colmate. La différence de pression de part et d'autre augmente.
- **Il peut se déchirer**
Fissuré ou déchiré, il devient inopérant.



3 Simuler un accident avec Sylvia

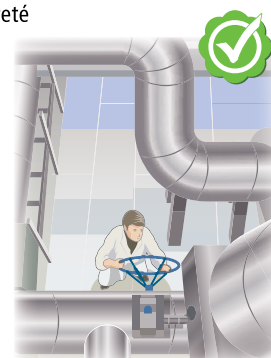
Le logiciel Sylvia modélise le comportement des filtres et leur perte de charge. Il reproduit ici le design du réseau ventilation/filtration d'une centrale de 1300 MWe. Grâce aux modèles physiques issus des recherches, **Sylvia évalue le risque de rupture des filtres** et valide le réseau de filtration.



4 Avancées d'un point de vue sûreté

À terme, **deux issues sont possibles** :

- 1) L'installation répond aux objectifs sûreté fixés : les dépressions et les débits minimums sont assurés.
- 2) Des modifications sont à apporter :
 - sur le système : changement des ventilateurs s'ils sont sous-dimensionnés, de types de filtres ou réalisation de contrôles sur le réseau (température, perte de charge).
 - sur la manière de gérer le système, par exemple décider d'ouvrir un registre pour soulager le ventilateur.



« La mise à jour de la spécification CTHEN 93-030, diffusée en 2020, améliore la sûreté. Elle définit des exigences accrues pour les filtres utilisés dans le milieu nucléaire », précise Jérôme Richard. Elle actualise le contexte réglementaire, notamment pour l'incendie et change certaines conditions expérimentales de validation, par exemple les tests de résistance thermique. « Pour tenir compte du vieillissement, le filtre est irradié avant les tests avec une dose nominale dans la cellule Irma de l'Institut [lire Repères n° 49]. Une autre avancée porte sur l'humidité, désormais étudiée de façon dynamique », explique-t-il.

La conception de ce référentiel vise le meilleur consensus entre tous les acteurs : experts en sûreté, exploitants et fabricants. Le travail, débuté en 2016, se fait en deux temps. Une première phase, menée par l'IRSN, consiste à recenser les exigences applicables – incendie, transport... – avec la participation d'une quinzaine de spécialistes. La seconde inclut huit exploitants⁵ et les six principaux fabricants de filtres pour le nucléaire du monde entier.

Désormais, les deux tiers des tests sont menés par l'IRSN, qui délivre une homologation pour dix ans. Cette limite de durée – nouvelle pour ce standard – accentue ses exigences.

Normes, vieillissement, incendie, vapeurs...

De plus, les spécialistes de l'Institut – Éloi Bauduin et Victor Mocho – ont contribué à l'élaboration de la nouvelle norme de contrôle de filtres sur site (ISO 16170⁶). Elle exige qu'ils soient testés avec l'aérosol le plus pénétrant (particules de 150 nm). Le débit au moment des prélèvements doit également être précisé et ceux-ci effectués en des points où la concentration en aérosols est homogène. « Lorsque les experts étudient un dossier de sûreté, ils vérifient l'application de la norme. Pour connaître le niveau d'homogénéité lorsque la norme n'est pas appliquée, un programme de recherche a été engagé : il vise à produire des abaques pour divers débits et configurations de canalisations.

Ces recherches vont prendre quatre ans. Les experts sauront alors s'ils peuvent se fier à la valeur mesurée par l'exploitant », décrit Victor Mocho, expert en physique des aérosols et filtration.

Des spécialistes forment les utilisateurs à mesurer l'efficacité d'un filtre conformément à ISO 16170. La formation a lieu sur la boucle d'essai Simoun, à Saclay (Essonne) (lire p. 16).

Depuis 2015, l'Institut et Orano portent un projet commun pour étudier la performance des filtres dans des conditions dégradées – vieillissement, présence de vapeurs nitreuses – ou accidentelles, comme en cas d'incendie. « Nous définissons ensemble des conditions expérimentales. L'IRSN teste dans un premier temps des filtres vierges. L'industriel les expose ensuite aux contraintes étudiées, puis nous les testons à nouveau. Ces travaux sont menés sur des équipements situés à Saclay : Starmania, Catfish, Simoun, Megapan, etc., décrit François-Xavier Ouf, expert des aérosols (lire p. 16).

Le colmatage est étudié

« Les filtres sont sensibles aux concentrations des vapeurs nitreuses et à l'humidité. Cependant, même au-dessus d'une humidité relative de 50 %, comme en cas d'accident, le risque de rupture et de chute drastique du coefficient d'épuration reste faible », précise François-Xavier Ouf.

Autre sujet étudié : le colmatage – encrassement dû aux aérosols – en cas d'incendie par exemple. « Nous combinons des expérimentations et des simulations, commente Soleiman Bourrous, spécialiste en filtration des aérosols. En comparant les données obtenues au laboratoire avec nos codes de calcul, nous vérifions si le phénomène a été correctement compris. Ces études fondamentales ont des applications immédiates, par exemple l'interprétation des tests des masques barrières [lire p. 14]. Savoir comment s'organise le duo filtre-particule, de quelle manière et pourquoi s'enchaînent différentes phases de filtration, comment se modifient les propriétés des matériaux... Tout cela est capital pour anticiper les phénomènes et les effets délétères associés à une situation critique, comme un incendie. » ■

1. Ensemble des équipements permettant de manipuler les matières radioactives pour des fonctions industrielles ou de recherche propres à chaque installation.

2. Autorité de sûreté nucléaire défense

3. Étude de l'écoulement de l'air.

4. Centre technique d'homologation des équipements nucléaires.

5. EDF, Orano, CEA, Andra, Cis bio, Framatome...

6. Méthodes d'essai in situ pour les systèmes filtrants à haute efficacité dans les installations industrielles.

www Pour en savoir plus :
Youssef Alilou Étude du colmatage des filtres plissés à très haute efficacité, concours 3 minutes pour une thèse
www.irsn.fr/3-minutes-Alilou

FOCUS

Usine de retraitement

Limiter les rejets dans l'environnement

D'ici 2023, deux unités d'évaporation de produits de fission seront mises en service au sein des usines de retraitement du combustible de La Hague (Manche). Elles remplaceront leurs homologues actuels, dont la sûreté ne pourra plus être assurée au-delà de quelques années. L'IRSN expertise cette opération, qui nécessite de repenser la filtration.

Les évaporateurs contiennent une quantité très importante de radioactivité. En cas de rupture accidentelle, c'est la filtration qui limite les rejets dans l'environnement. Le problème est que cette rupture s'accompagne d'une production très importante de vapeur d'eau chaude, qui impacte fortement l'efficacité de filtration.

« Des échanges techniques ont eu lieu avec l'exploitant. Dans les nouvelles installations, la ventilation des locaux – qui accueillent des évaporateurs générant une forte humidité – intègre des filtres métalliques résistant à ces conditions », rapporte Éloi Bauduin, expert en confinement. Cette modification préserve la capacité d'épuration du dernier niveau de filtration (DNF) – composé de filtres à très haute efficacité (THE) (lire p. 11). Chaque année, le Bureau d'analyse du confinement (Bac) mène une vingtaine d'expertises de ce type. « Nos contre-évaluations interrogent la conception de l'installation. Nous examinons chacune des situations accidentelles pour savoir si l'exploitant doit modifier la ventilation ou les dispositions de confinement. »

RECHERCHE

Capacité d'épuration

Qualité de la filtration à l'étude

Un filtre à aérosols de très haute efficacité (THE) d'une installation nucléaire doit être remplacé lorsque son coefficient d'épuration (CE) est proche de 1000¹.

Quel est son niveau d'usure à ce moment-là ? Comment cela affecte-t-il ses performances ?

Ces questions scientifiques émergent de l'expertise. Pour y répondre, Victor Mocho, expert en physique des aérosols et filtration, propose en 2020 une étude expérimentale^{2,3}.

Il y a une cinquantaine d'années, un filtre neuf avait un CE de 6 000 à 8 000. Il était remplacé lorsque ce dernier chutait à 1 000 ou 2 000. Avec une capacité d'épuration divisée d'un facteur 3 à 8, le filtre conservait sa fonction – discrimination en taille – vérifiée conformément à la norme⁴.

« Aujourd'hui, un filtre neuf a un CE de 25 000 à 30 000, mais le critère d'usure n'a pas changé. Que filtre-t-il lorsque son coefficient d'épuration est au mieux

de 2 000, ce qui entraîne probablement des microfissures ou des joints non étanches ? Quelle fraction de particules de 1 à 10 µm, nuisibles pour l'environnement, le traverse ? Aujourd'hui, l'industriel n'est pas tenu de vérifier cela », précise l'expert.

L'étude expérimentale commence avec des tests réalisés sur un filtre THE à l'état neuf. Il sera ensuite dégradé pour que sa capacité d'épuration chute à 2 000, puis les tests seront refaits.

« Nous analyserons les rejets à la recherche des grosses particules. » Faudra-t-il rehausser l'exigence du CE ? Réponse mi-2022.

1. NF EN 1822.

2. Représentativité des mesures aux émissaires de rejet - Efficacité d'un filtre THE dégradé.

3. ISO 2 889.

4. NF EN ISO 16170.



WEBMAGAZINE

Ma thèse en connaît un rayon

www.irsn.fr/R50



PODCAST

Marie Lecoq
Quelle est l'efficacité des filtres en métal ?

Crise sanitaire

Les masques en tissu au banc d'essai

Durant la pandémie de la Covid-19, la France est confrontée à une pénurie de masques normés. Elle se tourne vers ceux en tissu. Mais quelle protection assurent-ils ? Retour sur une expertise hors-norme.

Aux premières heures du confinement, des centaines d'entreprises se lancent dans la production de masques en tissu à usage non sanitaire. Faute de masques chirurgicaux et FFP2¹, ces dispositifs non normés sont pour nombre de Français l'unique barrière pour tenter de se défendre contre le virus. Pourtant, une incertitude demeure : quel niveau de protection offrent-ils ?

Dès la mi-mars 2020, l'IRSN est sollicité par l'Afnor² pour répondre à cette question. Cette expertise, hors de son champ d'intervention habituel, doit contribuer à élaborer un cadre de certification basé sur les performances de filtration de ces masques.

Entre avril et juin, une équipe analyse les propriétés de 233 matériaux en fibres textiles naturelles ou synthétiques employés dans leur fabrication. « Pour chacun d'eux, nous avons mesuré le niveau de filtration des particules de 3 µm de diamètre. Cela correspond à la taille des gouttelettes de salive susceptibles de transporter le virus. Nous avons aussi mesuré la perméabilité à



Masques grand public.



Un échantillon de masque en test dans le banc d'essais Carem (Caractérisation des performances des masques).

l'air, appelée la respirabilité du matériau », décrit Soleiman Bourrous, spécialiste en filtration des aérosols, principal auteur de l'étude³.

Les scientifiques modifient une installation destinée à l'étude des filtres utilisés dans l'industrie nucléaire. En une semaine seulement, ce banc d'essai du Laboratoire d'expérimentations sur le comportement des équipements et de la ventilation (Lecv) – à Saclay (Essonne) – est qualifié pour l'analyse d'échantillons de tissu de 5 cm de diamètre.

Filtration inégale

Fournis par des industriels, associations ou groupements de couturières, les échantillons testés relèvent de trois catégories : matériaux tissés, non tissés et mixtes. Les deux tiers présentent une respirabilité satisfaisante. Mais moins de la moitié s'avèrent capables de retenir 70 % des particules de plus de 3 µm de diamètre, comme l'impose l'Afnor³ pour les masques barrières de catégorie 2. Les matériaux non tissés sont les plus efficaces.

Ces résultats sont ensuite comparés à ceux de deux autres laboratoires⁴. Dix échantillons non tissés représentatifs sont passés au crible. « En dépit de variations dans les trois protocoles expérimentaux, comme la nature chimique des aérosols employés,

les performances mesurées sont demeurées identiques d'un laboratoire à l'autre », conclut Soleiman Bourrous.

L'expertise en filtration de l'IRSN a déjà été sollicitée dans un contexte sanitaire. En 2018, face au risque amiante, la direction générale du travail (DGT) a souhaité un appui technique, afin de créer un cadre réglementaire pour l'utilisation des équipements ventilés de protection individuelle. L'étude est en cours. ■

1. Le masque chirurgical est un dispositif médical antiprojections. Le masque FFP2 protège le porteur contre l'inhalation de gouttelettes et de particules en suspension dans l'air. Il filtre au moins 94 % des aérosols d'une taille moyenne de 0,6 µm.
2. L'Association française de normalisation représente la France auprès de l'Organisation internationale de normalisation.
3. Bourrous S. et al. (2021), Aerosol and Air Quality Research.
4. Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et Laboratoire réactions et génie des procédés (LRGP).

WEBMAGAZINE

VIDÉO
Colmatage : étude des filtres plissés à très haute efficacité
www.irsn.fr/R50



REPORTAGE Comment se comporte la filtration d'une installation nucléaire en cas d'incendie ? S'appuyant sur la plateforme expérimentale Boréé, les chercheurs mesurent et simulent les phénomènes physiques en jeu.

Expertise multi-échelle

La filtration à l'épreuve du feu



Éclairés par la verrière du laboratoire, deux chercheurs manient avec attention un imposant filtre à très haute efficacité (THE). Il est utilisé dans les installations nucléaires pour filtrer les substances radioactives. Les scientifiques veulent améliorer la modélisation de son comportement en cas d'incendie et s'assurer de sa résistance. Nous sommes à Saclay (Essonne), au Laboratoire d'expérimentations sur le comportement des équipements et de la ventilation (Lecev) au sein de la plateforme Boréé¹.

Le travail débute à l'échelle microscopique, pour déterminer comment les suies provoquent le colmatage. À l'aide de lasers, le banc d'essai Megapan suit la répartition et l'épaisseur du dépôt de particules. Il mesure en temps réel la porosité du filtre et la variation de pression entre l'amont et l'aval.

L'installation Catfish² reproduit sur des filtres miniatures les effets couplés induits par ce dépôt et la hausse d'humidité due à la combustion. En s'approchant des conditions réelles, ce simulateur modélise tous les processus impliqués dans le colmatage du filtre au cours d'un incendie³.

Le dispositif Starmania⁴ est utilisé pour la qualification de la tenue mécanique des filtres dans leur globalité. Sur un espace aussi vaste qu'un terrain de basket, il reproduit une partie du système de ventilation d'une installation. « Il fait subir aux filtres THE les contraintes typiques d'un incendie : pression, température, humidité », précise François-Xavier Ouf, expert des aérosols.

Le test ultime incombe au banc d'essai Simoun. Il caractérise l'efficacité du filtre THE lorsque celui-ci subit les variations de température typiques d'un incendie en milieu confiné.

Ces deux derniers essais sont nécessaires pour obtenir l'homologation du Centre technique d'homologation des équipements nucléaires (CTHEN) (lire p. 11). ■

1. Boucles résistance des équipements et épuration.
2. Caractérisation analytique de la filtration sous humidité.
3. L'élaboration de modèles de prédiction de l'évolution des filtres THE dans un contexte accidentel repose sur la confrontation des données issues de Catfish et Megapan.
4. Station pour les transferts aérauliques et les résistances mécaniques appliquée aux nuisances incidentelles et accidentelles.

1 Sur le banc d'essai Megapan, l'expert en filtration Soleiman Bourrous installe les lasers qui serviront à mesurer le niveau de colmatage d'un échantillon de filtre très haute efficacité (THE) par des particules de suies.

2 L'installation Catfish permet d'acquérir des données analytiques sur le colmatage des filtres THE, en présence d'humidité.

3 Un réseau de tuyauterie calorifugé constitue le cœur du dispositif expérimental Starmania, utilisé pour la qualification de la tenue mécanique des filtres.

4 Depuis son ordinateur, l'expert en physique des aérosols Victor Mocho observe, sur le banc d'essai Simoun, le comportement d'un filtre THE lors d'un essai reproduisant les contraintes d'un incendie.

■ BIBLIOGRAPHIE

Thèse de Soleiman Bourrous
www.irsn.fr/Publi-These-Bourrous

Thèse de Youssef Alilou
www.irsn.fr/Publi-These-Alilou

Thèse de Jonathan Nuvoli
www.irsn.fr/Publi-These-Nuvoli

Thèse de Laura Lintis
www.irsn.fr/Publi-These-Lintis

Normes et homologations
ISO 17 873
ISO 16 170
CTHEN 93-030



Environ 300 000 colis avec des produits radiopharmaceutiques sont transportés chaque année en France. Il s'agit de produits de diagnostic, des sources pour la radiothérapie ou la curiethérapie.

Transport de radiopharmaceutiques

Multiplier les précautions

L'ESSENTIEL Tous les transporteurs de produits radiopharmaceutiques sont potentiellement exposés aux rayonnements ionisants. Depuis 2018, le secteur du transport a enregistré au total quatre dépassements de la limite de dose. Quelles précautions mettre en œuvre ?

Comment l'IRSN contribue à la radioprotection ? **TÉMOIGNAGE** Un directeur des opérations nucléaires dans l'industrie. **DÉCRYPTAGE** Comment éviter et gérer les dépassements de dose ? **AVIS D'EXPERT** Une spécialiste du suivi des expositions professionnelles.



Loïc de Tarade

Président de Cis bio international et directeur des établissements Saclay & Antony, usine de production de radioéléments artificiels.

TÉMOIGNAGE

“Tout est fait pour protéger le transporteur”

“ En tant qu'expéditeur de produits radiopharmaceutiques, Cis bio international garantit le respect des normes de colisage, comme de transport. Le niveau de radiation du colis ne dépasse pas 2 mSv/h en tout point de la surface. Dans le hall d'expédition des colis, diverses mesures limitent l'exposition des opérateurs. Un code couleur indique leur destination – aéroports internationaux, centres hospitaliers en France, etc. –, ce qui permet de les charger rapidement. Nos transpalettes sont équipés d'une protection radiologique constituée d'une plaque métallique plombée. Un marquage au sol indique les zones à risque d'exposition, etc.

La signalétique est contrôlée

Durant son intervention dans nos locaux, comme au cours du transport, l'exposition du personnel du transporteur mandaté est contrôlée par sa dosimétrie opérationnelle. L'exploitation des données

dosimétriques est réalisée par le conseiller en radioprotection (CRP) du transporteur, qui les partage périodiquement avec notre CRP. Ces données sont reportées dans le bilan annuel.

Au départ des colis, chaque véhicule de transport est contrôlé sous la responsabilité de notre conseiller à la sécurité des transports (CST) : signalétique, extincteur, etc. Le CST vérifie aussi la conformité des documents : déclaration d'expédition de marchandises classe 7, nombre et description des colis, etc.

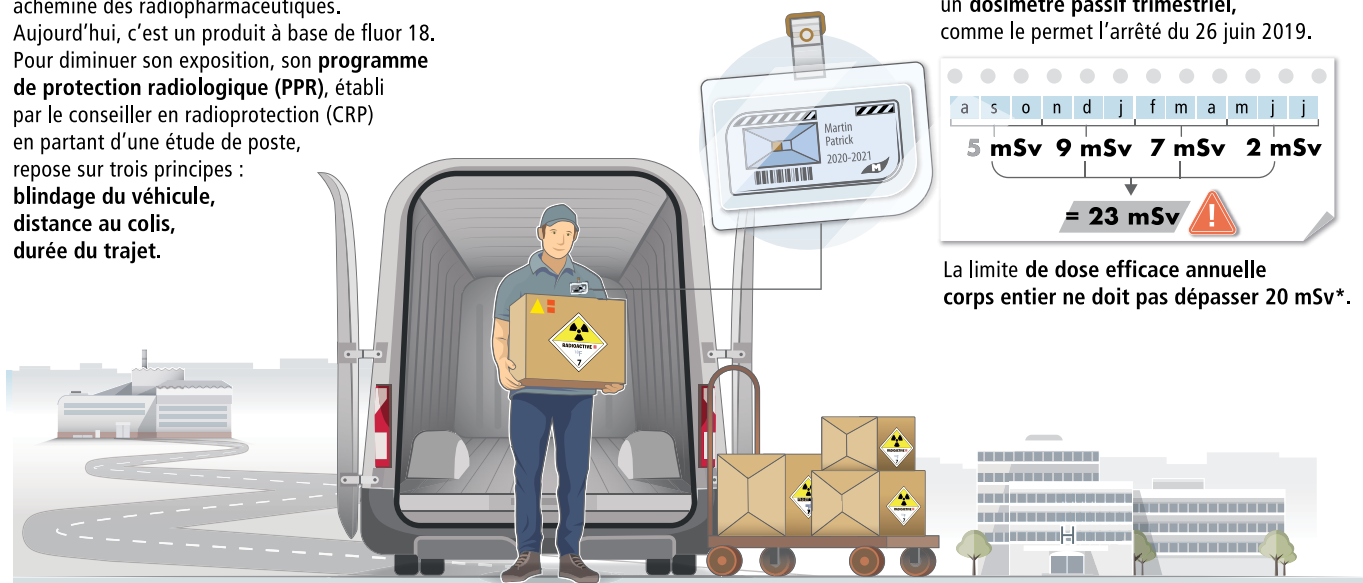
Les principaux incidents – 3 à 4 fois par an – arrivent lors des opérations réalisées dans les aéroports : un endommagement de l'enveloppe extérieure du colis qui est généralement un carton. Même si cela concerne uniquement l'extérieur, notre procédure prévoit de dépêcher sur place une équipe d'astreinte. Celle-ci vérifie l'intégrité du colis grâce à des contrôles dosimétriques puis, le cas échéant, le reconditionne, avant de le faire repartir. ■

Transport de radiopharmaceutiques et dépassements de dose

Éviter de dépasser la santé des profes
Quelles bonnes pra
en cas de dépasse

1 Un métier exposé aux radiations

Patrick M, transporteur routier de classe 7, achemine des radiopharmaceutiques. Aujourd'hui, c'est un produit à base de fluor 18. Pour diminuer son exposition, son **programme de protection radiologique (PPR)**, établi par le conseiller en radioprotection (CRP) en partant d'une étude de poste, repose sur trois principes : **blindage du véhicule, distance au colis, durée du trajet.**



2 La dose est dépassée et l'alerte est donnée

Patrick observe les bonnes pratiques. Malgré ces précautions, le cumul des doses dépasse la limite sur douze mois glissants.

1) L'analyse des dosimètres est réalisée par un laboratoire de dosimétrie. Il transmet les données dans la base de données du Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri), gérée par l'IRSN.



2) S'agissant d'un dépassement par cumul, le cas de Patrick M. est repéré par le Bureau d'analyse et de suivi des expositions professionnelles de l'IRSN (Basep) à partir de Siseri. Son médecin du travail est informé.



3) L'événement est déclaré par l'employeur – informé du dépassement – auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Son compte-rendu d'événement significatif (Cres) précise les solutions mises en place pour éviter que l'événement ne se reproduise. Il l'adresse par courrier à l'ASN dans les deux mois.



© Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

EXPERTISE TRANSPORT

Le Bureau expertise de la sûreté des transports (Best) a plusieurs missions. À la demande de l'ASN, il expertise les programmes de protection radiologique (PPR). Il accompagne des inspections et donne un avis sur l'arrimage. Il expertise le dossier de sûreté sur la conception des colis. Pour le volet transport, il forme des conseillers en radioprotection (CRP), volet transport. Il collabore avec le Basep, Bureau d'analyse et de suivi des expositions professionnelles, pour des événements transport liés aux dépassements de limite de dose annuelle.

EXPERTISE MÉTROLOGIE

Le laboratoire dont dépend l'Unité de métrologie et méthode (UMM) est un des sept laboratoires français accrédités pour le suivi dosimétrique des travailleurs. Il fournit, lit et analyse des dosimètres individuels passifs. Au-delà d'un seuil trimestriel de pré-alerte (1,5 mSv), il réalise une expertise complémentaire explorant les conditions statiques/dynamiques d'exposition. Support technique au médecin du travail et conseiller en radioprotection, il peut aider à mener une reconstitution. Il renseigne le Siseri² et signale tout dépassement au Basep.

la dose efficace annuelle autorisée, c'est préserver sionnels exposés aux rayonnements ionisants. tiques mettre en place ? Que se passe-t-il ment ? Quelles sont les obligations pour l'employeur ?

3 La médecin du travail réalise une investigation

Elle convoque Patrick. Sur la base des données dosimétriques, elle reconstitue l'historique des événements.

Patrick a interdiction d'exercer une activité professionnelle l'exposant à des rayonnements pendant une période définie selon les doses reçues au cours des 12 derniers mois.



Cet échange aide Patrick à faire le point sur les bonnes et les mauvaises pratiques.

⊗ À éviter

- Laisser son dosimètre à côté d'un colis ou dans le véhicule.
- Discuter à proximité d'un colis.
- Enjamber un colis à répétition.
- Laisser le colis près de soi lors du transport.
- Tenter d'ouvrir un colis.
- Ramasser un colis tombé sans analyse et vérifications.

✓ À privilégier

- Utiliser un véhicule avec protection en plomb.
- Minimiser la durée de manipulation.
- Bien arrimer les colis dans le véhicule.
- Utiliser des EPI** : tablier en plomb et gants.
- Éloigner le colis du corps grâce à un chariot.
- Optimiser la durée du trajet : itinéraire et horaires.



* La dose efficace est une grandeur de radioprotection qui mesure l'impact d'une exposition à un rayonnement ionisant sur les tissus biologiques. Elle est calculée sur 12 mois consécutifs pour vérifier le respect de la VLEP (valeur limite d'exposition professionnelle).

** Équipements de protection individuelle.

INCIDENT DE ROISSY, EN 2001

Fin 2001, un colis du fabricant suédois Studsvik est envoyé aux États-Unis. Il transite par la plateforme Fedex à l'aéroport de Roissy (Val-d'Oise). Il contient de l'iridium 192 (activité 366 TBq). À l'arrivée, le transporteur américain détecte un débit d'équivalent de dose anormalement élevé du colis. Les enquêtes estiment les expositions des deux employés de Fedex à 15 et 100 mSv et celle du chauffeur américain à 3,4 mSv. L'événement classé **niveau 3 sur l'échelle internationale des événements nucléaires, Ines**, est dû à une erreur de conditionnement.

RÉGLEMENTATION

Code de la santé publique (article L.1333), du travail (articles R. 4451) et des transports (articles L.1252-1 et R.1252-8). **Guide de l'ASN n°29** La radioprotection dans les activités de transport de substances radioactives www.asn.fr
Expositions professionnelles aux rayonnements ionisants en France, 2019. www.irsn.fr/travailleurs-2019

CONTACT

- <http://dosimetrie.irsn.fr/fr-fr>
- 01.58.35.84.04 siseri@irsn.fr

AVIS D'EXPERT



Juliette Feuarent

Spécialiste des expositions professionnelles

“En cas d'alerte, nous sollicitons le médecin du travail”

En 2020, un nouveau dépassement de la dose limite annuelle – 20 mSv – a été enregistré dans le secteur du transport des radiopharmaceutiques. C'est le quatrième depuis 2018, soit environ 13 % de l'ensemble des dépassements enregistrés sur la même période. C'est inhabituel. Nous repérons ces cas à partir des alertes transmises par les laboratoires de dosimétrie et grâce à la veille réalisée à partir du Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri). Nous calculons pour chaque travailleur la dose cumulée sur douze mois glissants et la comparons à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP). Un bilan des dépassements est régulièrement transmis à la direction générale du travail (DGT) et à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). En cas d'alerte, nous sollicitons le médecin du travail (MDT) de la personne concernée, pour collecter les conclusions de l'enquête qu'il doit mener sur les conditions d'exposition. Parfois, l'investigation révèle que le travailleur a égaré ou mal utilisé son dosimètre. Nous modifions alors les données de Siseri. Nous constatons que les quelques événements recensés concernent des auto-entrepreneurs. Ils n'ont pas de MDT et pas de suivi médical. Le bilan 2019 des expositions professionnelles signale cette défaillance.

CONTACT

Juliette Feuarent
juliette.feuardent@irsn.fr

Tritium dans la Loire : une nouvelle étude avec la société civile

Parmi les missions des commissions locales d'information (Cli), figure le suivi de l'impact sur l'environnement des installations nucléaires. En 2019, la Cli de Chinon (Indre-et-Loire) est informée d'un taux anormal de tritium relevé dans la Loire par un laboratoire indépendant. L'Institut est sollicité, une enquête déclenchée.

1 Pourquoi engager une étude ?

Le 21 janvier 2019, un collectif de préleveurs citoyens recueille un échantillon d'eau du fleuve lors d'une campagne de suivi de la radioactivité. Collecté à Saumur en Maine-et-Loire, à environ 20 km en aval de la centrale de Chinon (Indre-et-Loire), l'échantillon est analysé par le laboratoire de l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest (Acro). Il présente une concentration en tritium de 310 Bq/L, une valeur très supérieure¹ à celles mesurées habituellement par l'IRSN et EDF. Ce taux anormal est-il dû à un incident ou à un rejet plus important de la part de l'exploitant ? Il est évoqué en réunion plénière de la Cli de Chinon. « À l'issue de cette réunion, à laquelle participaient des représentants de l'Autorité

de sûreté nucléaire [ASN] et de l'IRSN, une première enquête² est menée par l'Institut pour tenter de déterminer l'origine de cette concentration inhabituelle », se souvient Fabrice Boigard, président de la Cli et élu au conseil départemental. Ces investigations – fondées notamment sur des modélisations – identifient des causes possibles. L'Institut réalise, de novembre 2020 à avril 2021, une étude basée sur une campagne importante de prélèvements et de mesures, dans des conditions similaires à celles de janvier 2019.

1. D'après le rapport de l'Acro www.acro.eu.org
2. Lorsque le niveau de tritium dans l'eau d'un fleuve dépasse 100 Bq/L, des investigations sont engagées par l'ASN.

2 Qu'attendre de cette campagne ?

Plus de 1 000 échantillons sont collectés au même endroit qu'en janvier 2019. Ils sont réalisés pendant cinq mois, à raison de sept prélèvements par jour. À l'époque, le débit du fleuve était cependant plus faible. Qu'en est-il de la reproductibilité ? « Bien que cette différence risque de compromettre une partie de l'intérêt de l'étude, nous espérons qu'elle permettra tout de même de mieux comprendre la dynamique de dilution des rejets radioactifs », observe Mylène Josset, coordinatrice du laboratoire de l'Acro. Pour Dominique Boutin, membre du collège des associations de protection de l'environnement de la Cli de Chinon, « la mise en œuvre d'une telle étude témoigne de la reconnaissance, de la part des autorités de contrôle, de notre capacité à mettre en évidence des défaillances dans le système de suivi des rejets radioactifs des CNPE [centres nucléaires de production d'électricité] ».



Marc Gleizes, adjoint au directeur du pôle environnement de l'IRSN, responsable pour l'étude (à gauche), échange avec Fabrice Boigard, président de la Cli de Chinon (à droite).



Magali Béguin-Leprieur (à droite), ingénieure, explique le processus de prélèvement de l'eau de la Loire par l'hydrocollecteur aux membres du comité de suivi (à gauche).



Carte des points de prélèvement sur et autour du pont de Cessart à Saumur (Maine-et-Loire).

WWW Pour en savoir plus :
Conclusions et recommandations de l'IRSN, 4^e réunion du comité de suivi www.irsn.fr/Saumur-CS4

3 Quel est le rôle du comité de suivi ?

Le comité de suivi accompagne en toute transparence les investigations de l'IRSN, en partageant des informations sur le déroulement de l'étude, en assistant à certains prélèvements, en présentant et interprétant les résultats des mesures, des modélisations...

« Il offrait surtout l'opportunité de participer à la réflexion et à l'analyse des données avec les représentants d'autres Cli », remarque Mylène Josset.

Au début et au milieu de la campagne, deux réunions sont organisées par l'Institut pour présenter les résultats de l'étude au fur et à mesure de leur acquisition. En mars 2021, une troisième expose le détail des mesures et les modélisations pour les mois de novembre 2020 à février 2021. La quatrième, présentant les résultats sur toute la durée de l'étude, s'est tenue le 28 juin dernier.



Échanges entre Marie-Hélène Pertuisot (IRSN) (à gauche), Michel Madinier (Cli de Chinon) (au centre), et Noël Néron (ville de Saumur, Maine-et-Loire) (à droite).



4 Le comité répond-il aux attentes de la société civile ?

Si l'Acro salue l'effort de transparence de l'IRSN sur l'étude, elle regrette que le comité de suivi n'ait pas eu la possibilité de participer à son élaboration. « Afin d'améliorer la modélisation de la diffusion du tritium, il nous paraissait important que le suivi se fasse en d'autres points du fleuve situés en aval du CNPE de Chinon, mais aussi en amont et en aval de la confluence avec la Vienne », indique Mylène Josset. L'implication des « citoyens-préleveurs » du collectif Loire Vienne Zéro nucléaire aurait été pertinente, estime Dominique Boutin. Ses membres proposaient d'espacer les prélèvements tous les trois jours pour un suivi du tritium sur une année entière, à budget estimé égal. « Cela aurait permis de mieux connaître la diffusion des radionucléides dans le fleuve, notamment en période d'étiage³, pas seulement en période hivernale. » Cette suggestion ayant été écartée, le collectif s'est retiré du comité de suivi.

3. Débit minimal d'un cours d'eau.



Vérification du bon fonctionnement de l'hydrocollecteur et de son tuyau de prélèvement.

5 Quelles perspectives après l'étude ?

« En croisant les résultats de l'étude avec les dates et les niveaux de rejets radioactifs communiqués par l'exploitant, l'IRSN devrait améliorer son modèle de simulation de la diffusion du tritium dans la Loire », précise Jean-Claude Amiard, spécialiste en radioécologie associé à l'Anclci. Sur quelle distance et comment s'opère la dilution des rejets à partir de la clarinette⁴ et en aval, en fonction des conditions hydrauliques de la Loire ? Peut-on maintenir en l'état le protocole de rejet de la centrale ? Des images thermiques

captées par le collectif Loire Vienne Zéro nucléaire au niveau de la clarinette semblent montrer que ces effluents se mélangent de façon inhomogène aux eaux du fleuve. « Il est fondamental d'améliorer la compréhension des transferts des rejets de tritium en aval des centrales, afin de mieux appréhender la surveillance de ces sites, pense la coordinatrice du laboratoire de l'Acro. C'est une question de sûreté et de protection des citoyens et de l'environnement. »

4. Conduite percée d'orifices perpendiculaire à l'axe du fleuve pour favoriser la dilution des rejets d'une centrale.

Référent essais

La sûreté des chaufferies d'un sous-marin

Depuis 2015, la zone d'accueil et d'entretien des sous-marins nucléaires d'attaque de Toulon (Var) évolue pour accueillir la classe de type Suffren. Pour assurer la sûreté de leur réacteur embarqué, un référent essais pilote, vérifie et suit les nombreux essais indispensables. Immersion.

Sous le soleil printanier, la zone militaire de la rade de Toulon (Var) vit au rythme d'un chantier hors norme, conduit par le service d'infrastructure de la défense¹. À son terme, en 2027, ses trois bassins et cinq postes à quais seront aptes à accueillir et soutenir deux classes de sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) français : Suffren (programme Barracuda) et Rubis.

La tâche est immense. Il faut notamment transformer des bassins construits en 1876, puis adaptés aux SNA de type Rubis, en infrastructures adaptées aux SNA – et donc des chaufferies nucléaires embarquées – les plus sophistiqués. Les travaux débutent en 2015. « *Les spécifications techniques pour le chantier tiennent compte de l'avis de l'IRSN sur le programme Barracuda². La transformation vise à faire de la base une installation de soutien terrestre, soit l'équivalent d'un bateau à terre* », précise Vincent T. Référent essais, son rôle est de s'assurer que les preuves de sûreté du domaine des essais et de la formation, y compris nucléaires³, sont réunies lors de la phase de réception des travaux.

Résister aux circonstances extrêmes

Au quotidien, l'homme pilote, vérifie et suit l'ensemble des essais pour l'obtention de ces preuves de sûreté. En 2018, l'installation électrique de secours est testée pour sa résistance au séisme, jusqu'au séisme majoré de sûreté de la région de Toulon. Il organise pour cela les essais à mener sur une plateforme vibrante en Espagne. Il émet des réserves éventuelles pointant des fonctions ou des performances à améliorer, réalise les retours d'expérience, archive et partage les résultats au sein de l'équipe du projet. Aujourd'hui, c'est une autre responsabilité qui explique la présence de Vincent T.

sur le premier quai opérationnel. En plein vent, dos à la mer, il supervise une formation. « *Les personnels du ministère des armées – militaires et civils – et les prestataires doivent comprendre le fonctionnement des installations. Cette fois, le maître d'œuvre leur explique comment brancher le SNA sur la source terrestre d'azote* », stipule-t-il. Plus de 50 formations ont eu lieu depuis les premières livraisons. Pour cause, les exigences de sûreté nucléaire de nombreuses installations nécessitent une parfaite maîtrise.

Les deux quais Est et le bassin intègrent les mesures post-Fukushima. Grâce aux moyens de secours ultime, le SNA à quai ou au bassin pourra rester autonome même après un événement majeur : submersion, séisme, vent ou tempête. « *Les moyens électriques de secours ultime (Mesu) sont simples et robustes. Ils doivent fonctionner même si Toulon était dans des circonstances extrêmes* ». L'inventaire des exigences techniques pour la seconde phase – deuxième bassin – est en cours d'examen. La dernière – troisième bassin – en est à l'étape de la formulation du besoin.

« *La sûreté est toujours en ligne de mire.* » ■

1. Service constructeur des armées et autorité de conception, vis-à-vis de la sûreté nucléaire, dans le domaine des infrastructures.
2. Programme de construction des nouveaux sous-marins nucléaires d'attaque français.
3. Ensemble des dispositions techniques



Vincent T., référent essais (troisième à gauche), supervise la formation assurée par le maître d'œuvre, pour l'exploitation de l'installation d'azote. Ce gaz sert à l'extinction en cas d'incendie et assure la fonction d'inertage⁴.

et organisationnelles relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, pour prévenir les accidents ou en limiter les effets.

4. Le gaz inerte injecté élimine l'oxygène ou l'humidité présents dans l'atmosphère.

WEBMAGAZINE



DIAPORAMA
Rade de Toulon :
la grue
et l'alimentation
électrique
sont vérifiées

www.irsn.fr/R50



À quelques centimètres près

Un Suffren mesure environ 100 mètres de long. Immergé, il pèse jusqu'à 5 300 tonnes. Dans le bassin de la rade de Toulon, son placement se fait à 5 centimètres près. Remorqué depuis l'extérieur du bassin, le SNA est tiré par un treuil axial. Il est centré grâce aux amarres lancées depuis les trois chariots de halage qui bordent chaque côté du bassin. Le référent essai supervise l'essai d'un chariot de halage mené par le maître d'œuvre. Ces manœuvres complexes contribuent à former les personnels.



Le masquage en gigogne est vérifié

Les hangars en gigogne constituent une protection contre la malveillance. Déployés au-dessus du bassin, ils masquent le SNA en entretien. Le référent essai s'assure de leur sécurité et de leur fonctionnement. Il vérifie les différentes configurations du masquage, les capteurs chargés de sécuriser le déplacement du toit, les dispositifs anticollision... Cet équipement résiste à des vibrations provoquées par un séisme et aux vents extrêmes.



Validation du dispositif électrique d'ultime secours

Le référent essai vérifie la possibilité d'alimenter électriquement un SNA via le moyen électrique de secours ultime (Mesu), un des dispositifs post-Fukushima. Ce groupe électrogène étanche et robuste – sorte d'abri métallique construit sur une dalle antisismique – contient du carburant, des transformateurs, des convertisseurs et plus d'un kilomètre de divers câbles de raccordement.

Reportage photo : © Joseph Gobin/Médiathèque IRSN



L'alimentation en eau à 20 °C

L'eau à 20 °C est employée, entre autres, pour assurer en permanence le maintien de la température des équipements participant à la sûreté du SNA. Lors de la réception des travaux sur site, le référent essais Vincent T. vérifie les débits et les pressions des deux réseaux d'alimentation, puis s'assure de la justesse de l'information affichée.

Contrôle des essais électriques

Les dispositifs d'alimentation des SNA Rubis et Suffren diffèrent. Les essais électriques effectués par le maître d'œuvre, sont contrôlés par le référent essai. Il intègre la totalité de l'historique de tous les résultats dans le compte-rendu d'essais partagé. Celui-ci sera validé par l'ensemble de l'équipe projet.

Un livre pour mieux comprendre la sûreté nucléaire



Capitaliser, partager et diffuser la connaissance.

Ouvrage de référence de 1250 pages, *Éléments de sûreté nucléaire, les réacteurs à eau sous pression* est une actualisation didactique du livre de Jacques Libmann (1996).

Coordonné par Jean Couturier, il privilégie une approche historique et montre comment les améliorations continues en sûreté naissent de retours d'expérience et de pragmatisme. Il permet de comprendre l'ampleur et la diversité des questions de sûreté à tous les stades de la vie des installations nucléaires.

Retrouvez l'ouvrage sur irsn.fr, collection *Sciences et techniques*.

Pour en savoir plus

www.irsn.fr/ESNREP

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE