



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

REPÈRES

FAITS ET PERSPECTIVES

Corrosion sous contrainte :
où en est-on ?

REPORTAGE

Une nouvelle stratégie
pour protéger le cølon

DOSSIER

Effluents des installations nucléaires
 limiter les rejets et garantir la sùreté



L'IRSN lance son nouveau site Internet

Meilleure ergonomie, accessibilité, accès direct aux actualités, navigation plus intuitive... Le site Internet de l'IRSN fait peau neuve, tout en conservant ses incontournables : rapports et avis produits depuis plus de vingt ans, « Savoir et comprendre », vidéos... et même vos favoris, dont les liens restent fonctionnels. Bonne re-découverte sur www.irsn.fr

Rapports sur l'EPR et ses alternatives

Deux rapports de l'IRSN « Nouveaux réacteurs nucléaires et projet Penly » – établis à la demande de la Commission nationale du débat public – sont consultables sur le site irsn.fr.

« Retour d'expérience des projets d'EPR dans le monde » et « Les alternatives au réacteur EPR2 » : le premier traite la question sous l'angle de la sûreté. Le second présente les principales évolutions de conception entre l'EPR de Flamanville et les EPR2, avant de s'intéresser aux petits réacteurs modulaires (*Small Modular Reactor*, SMR) en projet dans plusieurs pays. Les rapports sont consultables sur : www.irsn.fr/rapports-debat-projet-Penly



La mesure de la radioactivité en vidéo

Quelle est la différence entre le gray, le sievert et le becquerel ? Comment l'IRSN mesure-t-il la radioactivité chez l'être humain et dans l'environnement ?

Le public pose quotidiennement à l'IRSN de nombreuses questions sur la mesure de la radioactivité. Pour y répondre, l'Institut publie neuf nouvelles vidéos. Chercheurs et experts y donnent des explications détaillées et didactiques. www.irsn.fr/videos-mesure-radioactivite



Un polluant radioactif : du fleuve à la mer

Quels sont le trajet et le devenir d'un polluant radioactif depuis un fleuve jusqu'à la mer ? Vous le comprendrez en écoutant le cinquième épisode de la série de podcasts IRSN « Ma thèse en connaît un rayon ». Adrien Delaval, doctorant spécialisé en environnement, explique avec pédagogie ses recherches et les enjeux sanitaires. www.irsn.fr/R49

Agenda

13 au 15 juin

Dijon (Côte-d'Or)

Congrès national de radioprotection

Venez rencontrer les experts de l'IRSN sur leur stand à l'occasion du prochain congrès de la Société française de radioprotection (SFRP). Il réunira professionnels de la recherche, médecine, industrie et électronucléaire, pour échanger leurs expériences, réflexions et avancées en radioprotection contre les rayonnements ionisants et non ionisants. À noter : la présence de Werner Rühm, président de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), qui donnera une conférence le mercredi.

Plus d'informations : www.sfrp2023.fr/

11 au 16 juin

Juan-les-Pins (Alpes-Maritimes)

Patram 22

Conception, analyse des performances, de la sûreté et de la sécurité de l'emballage et du transport de matières radioactives... sont au programme de cette nouvelle édition de l'*International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials* (Patram). Cette conférence internationale sur le transport de substances radioactives, dont l'IRSN est partenaire, réunit tous les trois ans les experts de l'industrie, de la recherche et des autorités publiques, à des fins d'échanges scientifiques et techniques.

Plus d'informations : Patram.org

24 et 25 juin

Cherbourg (Manche)

Cherbourg 2023

Venez poser vos questions aux scientifiques de l'IRSN impliqués dans la surveillance de l'environnement, les moyens de mesure, les réacteurs nucléaires, les effets de la radioactivité sur le corps, etc. lors d'un événement public à la salle des fêtes. Au programme : ateliers ludiques et participatifs sur la mesure, présentation des moyens mobiles d'intervention, échanges avec les experts... et présentation de l'exposition pédagogique « Radioactivité – Découvrir et comprendre ».

On line www.irsn.fr/R57 WEBMAG



Dossier

Filtration des aérosols : assurer la performance



Dossier

Les contrôles des exploitants sont suivis par des acteurs publics



Dossier

Saint-Alban, Isère : quelle exposition ajoutée pour les riverains ?

Abonnement

**POUR VOUS
ABONNER**

www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications
> Magazine Repères

Sommaire

En couverture : Isabelle Musabini, chargée d'évaluation en sûreté nucléaire, et Gilles Barrachin, responsable de l'INB 35 à Saclay (Essonne) examinent les caractéristiques techniques des coques où seront stockés des déchets issus du traitement des effluents de cette INB.

P.4 TEMPS FORTS

Côtes méditerranéennes
Connaître les zones impactées en cas de rejets accidentels dans le Rhône

Crayons de combustible
Un nouvel essai dans le réacteur Cabri



P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Centrale nucléaire
Corrosion sous contrainte : où en est-on ?

P.9 ZOOM

Tissu modèle

DOSSIER P.10

**Dossier du prochain numéro :
Cancer, imagerie et traitements :
prévenir les risques**

Effluents des installations nucléaires
Limiter les rejets et garantir la sûreté

P.17 EN PRATIQUE

Refonte de Siseri
Des données plus complètes et plus fiables

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

**Rhône et radioactivité :
les questions des riverains**



P.22 REPORTAGE

Organes et radiosensibilité
Une nouvelle stratégie pour protéger le côlon

© Antoine Devouard/Médiathèque IRSN



Remplir nos missions

Depuis quelques semaines, l'IRSN est dans une phase d'incertitudes sur son positionnement institutionnel. J'ai eu l'occasion de rappeler les principes qui, il y a 20 ans, ont fondé l'IRSN à l'issue d'une longue réflexion conduite notamment par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques : séparation expertise-décision, synergie expertise recherche, évaluation de l'ensemble des risques liés aux rayonnements ionisants, ouverture et transparence. Ce numéro de *Repères* illustre l'application de ces principes. Vous y découvrirez de multiples exemples. La rénovation du système de surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements pour le compte de la Direction générale du travail et au profit des travailleurs, des utilisateurs et des entreprises. Des recherches pour améliorer la sécurité et le bien-être des patients sur la sensibilité du côlon aux radiothérapies. Des recherches en sûreté sur la capacité de confinement du béton, avec la nouvelle installation expérimentale Macumba, en appui à l'expertise des enceintes de confinement, ou sur le comportement du combustible dans le réacteur Cabri, indispensables à l'expertise sur les accidents d'injection de réactivité. L'expertise de sûreté de la corrosion sous contrainte atteignant des tuyauteries des réacteurs d'EDF. De l'ouverture et de la transparence avec le site *irsn.fr* renoué ou la remise de deux rapports à la Commission nationale du débat public pour le débat public sur l'EPR2. C'est ainsi que l'Institut remplit ses missions. Bonne lecture.

Jean-Christophe Niel

Directeur général de l'IRSN

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

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 – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Sophie Suberbère – Photo de couverture : ©Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN – Impression : Barré (89) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – mai 2023.

Anthroporadiamétrie Intercomparaison européenne

Apprécier la qualité et la fiabilité des mesures de différents laboratoires, c'est l'objectif des intercomparaisons. 43 laboratoires d'anthroporadiamétrie¹ de 21 pays européens – dont l'Allemagne et l'Angleterre – participent à une intercomparaison, entre octobre 2019 et juin 2022. Cet exercice teste leur capacité à mesurer des radionucléides émetteurs gamma incorporés dans le corps entier. Au cours des six exercices, les laboratoires identifient et quantifient des radionucléides chargés dans un fantôme anthropomorphe. Ce dernier simule des scénarios d'exposition interne et de mesures, dans le contexte par exemple d'une crise nucléaire nécessitant la prise en charge de personnes exposées : travailleurs, population. En général, les résultats des participants sont conformes aux recommandations indiquées par les normes internationales². Ces intercomparaisons aident à recenser les informations techniques des laboratoires. De quoi faciliter les échanges en cas d'accident d'ampleur nécessitant une réponse commune.

1. L'anthroporadiamétrie consiste à mesurer l'activité des rayonnements X et gamma émis à l'extérieur de l'organisme par des radionucléides.

2. ISO 28218 et ISO 13528.

EFFLUENTS INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

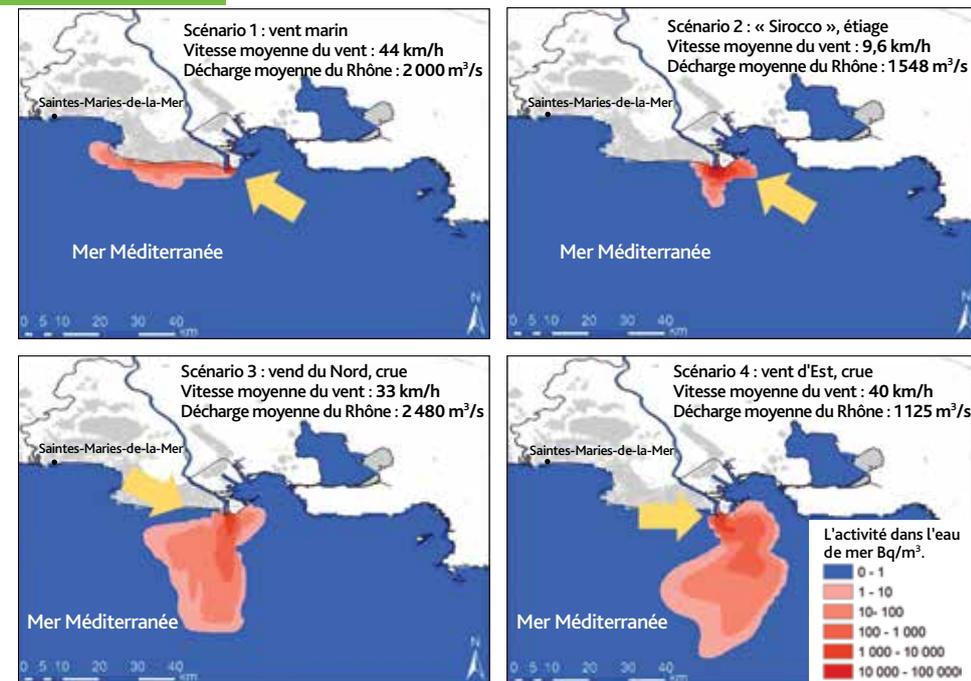
11 000 m³

d'effluents radioactifs liquides sont générés chaque année par un réacteur, soit l'équivalent de quatre piscines olympiques.

-5 tonnes

C'est la réduction par tranche des rejets d'effluents à base d'acide borique entre 1994 et 2017, une mesure saluée par l'IRSN.

Environnement



La modélisation permet d'obtenir des cartes de scénarios de contaminations décrivant la dispersion radioactive en mer Méditerranée selon les conditions de vents en mer et de débit du Rhône.

Côtes méditerranéennes

Connaître les zones impactées en cas de rejets accidentels dans le Rhône

Comment se disperse le césium 137 en mer Méditerranée lorsqu'il est rejeté par une centrale nucléaire située le long du Rhône ? Les scientifiques du Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides au sein des systèmes aquatiques (LRTA), situé à Cadarache (Bouches-du-Rhône), viennent de finaliser la modélisation du transfert de cet isotope radioactif dans l'environnement, avec la thèse d'Adrien Delaval, doctorant spécialisé en environnement.

Comprendre le trajet et le devenir de ce radionucléide en cas de rejets accidentels permettra de mieux connaître les zones les plus impactées le long des côtes. Les pouvoirs publics pourront aussi anticiper des actions de protection de l'homme et de l'environnement, comme une limitation des zones de pêche.

Verrous scientifiques

Les travaux scientifiques couplent deux modèles indépendants de l'IRSN – Casteaur¹ pour la partie fluviale et Sterne² pour le marin – en créant le chaînon manquant entre les deux. Deux verrous scientifiques sont levés. La première amélioration caractérise des conditions

de vent et de débit que l'on retrouve le plus régulièrement à l'embouchure du Rhône. La seconde quantifie le césium 137 pouvant se désorber³ des particules du fleuve au contact de l'eau de mer.

La thèse s'appuie sur trente-deux travaux scientifiques antérieurs, dont certains de l'IRSN.

1. Calcul simplifié des transferts dans les cours d'eau récepteurs www.irsn.fr/code-casteaur
2. Simulation du transport et du transfert d'éléments radioactifs en environnement marin www.irsn.fr/outil-expertise-contamination-marin
3. Phénomène inverse de l'adsorption : les ions et les molécules se détachent du support.

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/these-transfert-cs-rhone-mediterranee



Adrien Delaval, doctorant, étudie les trajectoires des polluants radioactifs.

Sûreté



Bâtiment renfermant le réacteur de recherche Cabri à Cadarache (Bouches-du-Rhône).

© Romain Baltz/Médiathèque IRSN

“ Un accident de réactivité provoque une augmentation rapide de la température du combustible.

Crayons de combustible Un nouvel essai dans le réacteur Cabri

Quel est le comportement des crayons de combustible nucléaire lors d'un accident d'injection de réactivité (RIA), cet emballement soudain et local du flux de neutrons dans les réacteurs à eau sous pression (REP) ?

Pour l'étudier, un nouvel essai est mené à Cadarache (Bouches-du-Rhône), dans le réacteur de recherche Cabri, le 14 novembre 2022. C'est le deuxième dans la configuration « boucle à eau pressurisée » représentative des conditions thermohydrauliques d'un REP. Un RIA induit une augmentation brutale de la puissance nucléaire due à la fission et provoque une augmentation rapide de la température du combustible.

Cinq scientifiques dépouillent et interprètent des résultats. Les enseignements

seront pris en compte dans la réalisation des essais futurs. Ils contribueront aussi au développement et à la validation d'outils de simulation de l'IRSN, tels que le logiciel Scanair.

L'essai, piloté par l'IRSN, relève du programme international Cabri, sous l'égide de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Cofinancé par l'IRSN, il associe des partenaires nationaux – EDF et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables – et étrangers de douze pays, représentant des autorités de sûreté, des exploitants et des laboratoires de recherche.

Le prochain essai est prévu en 2023.

www Pour en savoir plus :
L'installation Cabri www.irsn.fr/cabri-succes-2e-essai

Sûreté



Dans l'installation Macumba, Florent Dany, technicien, teste des portions d'enceinte en béton comportant différents types de fissures.

© Agnès Dumais et Julia Clévarac/Médiathèque IRSN

Situation accidentelle et vieillissement Évaluer le confinement de l'enceinte des réacteurs

La capacité de confinement des polluants radioactifs par la paroi interne en béton¹ d'un bâtiment de réacteur d'une centrale nucléaire est un enjeu de sûreté. Si des mesures du débit de fuite de cette enceinte sont réalisées lors de visites décennales, leur représentativité en situation accidentelle est à l'étude.

Des essais sont en cours dans la nouvelle installation Macumba², implantée à Saclay dans l'Essonne. Les expérimentations sont menées et analysées par trois spécialistes en confinement et en mécanique de l'IRSN.

Les premiers essais consistent à vérifier les prédictions du débit de fuite en fonction de l'état de fissuration de la paroi. L'objectif à terme est de développer un outil de simulation numérique des fuites.

L'installation expérimentale Macumba est mise en service en octobre 2022. Elle est opérée par le Service du confinement et de l'aérodispersion des polluants.

1. L'enceinte en béton des réacteurs de 1300 MWe en France comporte une double paroi.
2. Moyens d'essais appliqués à l'étude du confinement assuré par des murs en béton armé.

Stockage des déchets Des recherches partagées au sein d'un consortium

Mutualiser des recherches sur le stockage géologique profond de déchets radioactifs, tel est l'objectif du consortium international Tenor* mis en place en octobre 2022.

Menées dans le laboratoire de Tournemire dans l'Aveyron, ces recherches impliquent plusieurs organismes d'expertise et autorités de sûreté.

En partageant les programmes d'étude, Tenor met en commun les ressources humaines et financières. Il s'inscrit dans la nécessaire indépendance des expertises des dossiers des exploitants.

Dans une première phase, trois thèmes sont privilégiés : les propriétés de confinement d'une roche argileuse, les performances des systèmes de fermeture des galeries d'accès et le vieillissement des matériaux mis en œuvre dans une telle installation de stockage.

Les premiers partenaires de l'Institut au sein de ce consortium – qui a vocation à s'accroître – sont les autorités de sûreté canadienne et belge, ainsi que l'organisme d'expertise belge.

* Tournemire consortium.

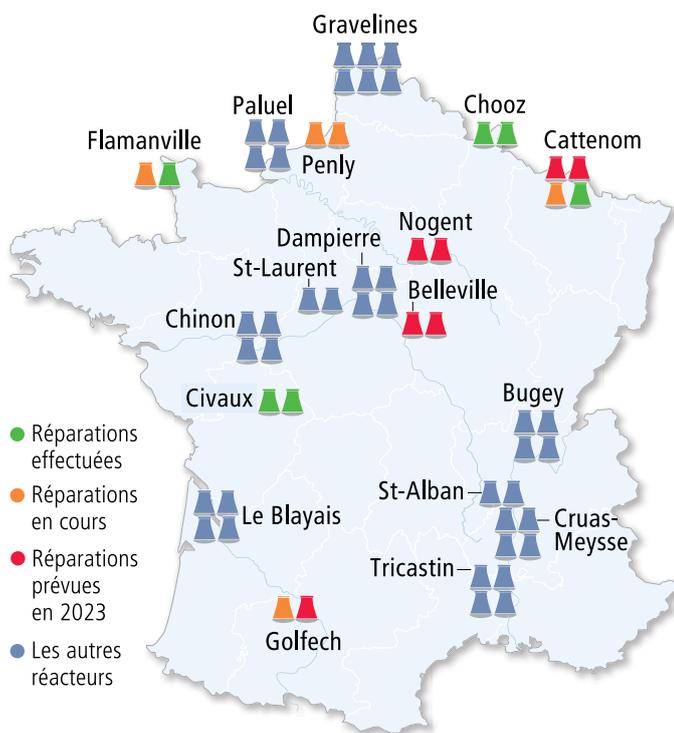
www Pour en savoir plus :
Stockage des déchets : lancement de Tenor
www.irsn.fr/lancement-TENOR

FAITS ET PERSPECTIVES



Les experts en contrôles non destructifs de l'IRSN Souad Bannouf (à gauche) et Thierry Sollier (à droite) échangent leurs analyses sur la corrosion sous contrainte.

Corrosion sous contrainte : les répercussions sur le parc en mars 2023



En 2022, EDF a réalisé :
- 156 expertises métallurgiques sur des échantillons de tuyauteries.
- 299 soudures neuves.

Centrale nucléaire

Corrosion sous contrainte : où en est-on ?

Pourquoi tant de réacteurs nucléaires sont à l'arrêt pendant l'hiver 2022-2023 ? Tout commence lors d'un contrôle périodique à Civaux (Vienne), qui révèle un défaut atypique. Les événements, à rebondissements, mobilisent les inspecteurs de l'Autorité et les experts de l'IRSN et conduisent EDF à réaliser un chantier industriel inédit.

Août 2021. Le réacteur numéro 1 de Civaux, de 1 450 MWe, est à l'arrêt pour une visite décennale. Des contrôles réalisés par EDF sur les soudures des tuyauteries en acier inoxydable des circuits d'injection de sécurité¹ révèlent des défauts inattendus. Pour les caractériser, l'énergéticien découpe la tuyauterie concernée et l'analyse dans son laboratoire à Chinon (Indre-et-Loire). En novembre, un verdict imprévu tombe : une fissure profonde de 5,6 millimètres, s'étendant sur toute la circonférence de la tuyauterie, est due à de la corrosion sous contrainte (CSC). La CSC est la fissuration activée par la température d'un matériau au contact d'un milieu agressif et soumis à une contrainte. Choix du matériau, conception et fabrication de la tuyauterie, chimie de l'eau... tout avait pourtant été fait pour l'éviter. L'exploitant prend la décision d'arrêter les autres réacteurs de 1 450 MWe à Civaux et Chooz (Ardennes). Il engage des

chantiers de réparation inédits, pour remplacer tout ou partie des tuyauteries concernées. L'IRSN se préoccupe sans délai des conséquences pour la sûreté. Pour Antoine Lejosne, expert en thermohydraulique, « l'injection de sécurité est un système essentiel pour refroidir le cœur en cas d'accident. Les défauts sont dans la partie de la ligne directement reliée au circuit primaire. Les opérateurs ne pourraient donc pas isoler une fuite à cet endroit ».

La méthode de contrôle est modifiée

En janvier 2022, EDF confirme la découverte de défauts similaires sur le réacteur 1 de 1 300 MWe de Penly (Seine-Maritime). Le problème n'est donc pas circonscrit aux réacteurs de 1 450 MWe mis à l'arrêt. À l'IRSN, des axes d'analyse sont engagés sous le pilotage de Thierry Sollier, spécialiste en contrôles non destructifs. « Évaluer

les enjeux de sûreté, comprendre le phénomène de corrosion et ses causes, identifier les réacteurs affectés et, pour chacun, les circuits et les soudures concernés, analyser les performances des contrôles réalisés, les études de tenue des tuyauteries, identifier les mesures compensatoires pour limiter les risques en exploitation et détecter rapidement toute fuite... Ces axes font appel aux spécialistes de l'IRSN, avec ceux des directions des équipements sous pression et des centrales nucléaires de l'Autorité de sûreté nucléaire [ASN]. »

EDF programme des arrêts de réacteurs afin de les contrôler. Des indications de défauts sont détectées sur certains (voir infographie ci-dessus). EDF doit faire face à une difficulté : la méthode de contrôle non destructif de l'industriel ne permet pas de déterminer la profondeur des fissures et révèle des faux-positifs. Il faut découper les tuyauteries pour les expertiser. L'exploitant développe un nouveau procédé et

établit une stratégie de contrôle des réacteurs du parc (voir infographie p. 7).

Face à l'incertitude quant à la liste des réacteurs affectés, EDF instaure des mesures compensatoires pour limiter les risques pour ceux en fonctionnement en avril 2022 : renforcement de la surveillance des fuites du circuit primaire, utilisation des détecteurs d'incendie pour identifier au plus vite une brèche, précautions limitant les sollicitations des tuyauteries... L'IRSN les analyse².

La concentration en oxygène à l'étude

La question de leur résistance en service se pose. L'industriel évalue la profondeur maximale de fissure à partir de laquelle la tenue de la ligne n'est plus garantie. L'Institut analyse ces études³. EDF évalue les conséquences qu'aurait une rupture simultanée de deux lignes d'injection de sécurité et montre que le cœur serait tout de même refroidi. Les experts en thermohydraulique de l'IRSN confirment ce résultat par leurs calculs⁴.

Mais qu'en est-il des causes ? Les échanges se poursuivent⁵. L'exploitant avance une dureté élevée du matériau à proximité des soudures et des contraintes mécaniques non anticipées à la conception. Pour Ian de Curières, spécialiste en chimie-corrosion, « la piste des contraintes ne suffit pas à expliquer la morphologie des fissures et le fait qu'elles peuvent s'étendre sur toute la circonférence de la tuyauterie ». La piste de la chimie doit être considérée. « En présence d'oxygène, on trouvera des fissurations similaires pour des aciers avec les mêmes propriétés, ce qui expliquerait beaucoup des constats⁶. »

En octobre 2022, EDF soumet un dossier de traitement d'écart concernant le réacteur 1 de Cattenom (Moselle), afin de l'exploiter pendant huit mois en présence de défauts, sans réparation. Pour l'Institut, la démonstration d'absence de risque de rupture n'est pas acquise. Il faut poursuivre l'évaluation de l'état de santé des tuyauteries pour obtenir des garanties suffisantes⁷. L'ASN considère que « les soudures [...] devront être réparées avant un redémarrage du réacteur⁸ ».

Deux réacteurs redémarrent

Les réparations pour dix réacteurs se poursuivent. Ceci met sous forte tension les industriels qui interviennent pour les soudures et les contrôles. L'ambiance radiologique dans les zones d'intervention complexifie la tâche.

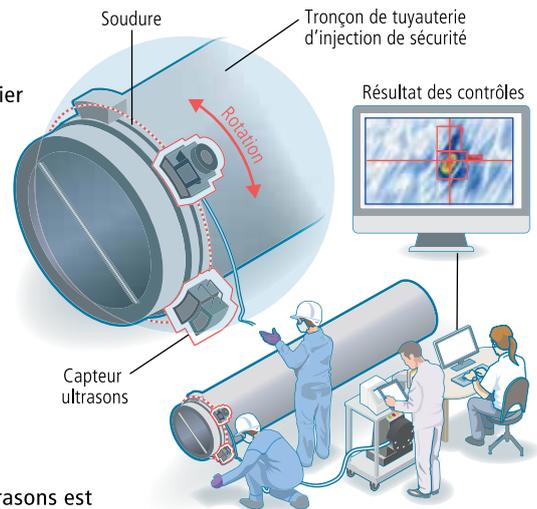
PROCESS

La corrosion sous contrainte est caractérisée par ultrasons

2022. La corrosion sous contrainte affecte des soudures de plusieurs réacteurs. EDF développe un nouvel examen qui rend les contrôles plus performants. L'IRSN expertise ces résultats. Exemple dans les Ardennes, avec le réacteur Chooz B1.

1 Un procédé innovant pour rechercher des fissures

Après l'arrêt du réacteur le 11 février 2022, EDF confirme des fissures de corrosion sous contrainte (CSC) sur des tuyauteries de l'injection de sécurité découpées. Pour se doter d'un contrôle non destructif (CND), l'énergéticien développe un examen par ultrasons amélioré (UTA). Il identifie les dimensions des fissures.



2 Les contrôleurs examinent les soudures

Pendant 1 à 3 jours, le capteur ultrasons est déplacé avec précision autour de la tuyauterie. Il réalise trois acquisitions en amont et trois en aval de la soudure.

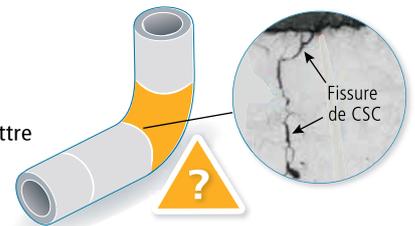
3 L'IRSN expertise les contrôles

L'IRSN expertise les analyses de l'exploitant grâce à la plateforme logicielle Civa* dédiée aux CND. Les experts visitent le site pour s'assurer de la bonne appropriation de l'UTA, constater les difficultés et les axes d'amélioration...



4 Des compléments sont demandés

Un dialogue technique s'engage entre l'IRSN et EDF. L'industriel prend la décision de remettre en conformité – à neuf – les tuyauteries d'injection de sécurité des centrales de 1 450 MWe.



5 Le réacteur redémarre au printemps

EDF a terminé l'ensemble des réparations prévues et le réacteur redémarre. À l'issue de ces réparations, des indications ultrasonores pouvant correspondre à des défauts de CSC demeurent à proximité de certaines soudures non remplacées. Le dialogue technique entre l'industriel et les experts se poursuit. L'IRSN apportera son expertise sur les thèmes : examens non destructifs, cinétique de la CSC, analyse mécanique et analyse la sûreté.



* Plateforme codéveloppée depuis 2004 avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et cofinancée par l'IRSN.

FAITS ET PERSPECTIVES

Six chantiers sont terminés début novembre. Dès mi-novembre, deux réacteurs réparés redémarreront : Chinon 3 et Bugey 4 (Ain). Les perturbations du planning des arrêts se répercuteront au-delà de l'hiver 2022-2023. Les contrôles et analyses se poursuivent (*lire ci-contre*), mettant en évidence de nouveaux défauts sur des tuyauteries considérées par EDF comme peu sensibles au phénomène de corrosion sous contrainte. Les investigations concernant le périmètre des réacteurs, des circuits et des soudures affectées se poursuivent également. ■

1. Les tuyauteries du système d'injection de sécurité servent à refroidir le réacteur en cas d'accident. Elles sont reliées au circuit primaire.
2. Avis IRSN du 6 juillet 2022.
3. Avis IRSN du 28 juin 2022.
4. Avis IRSN du 21 juillet 2022.
5. Magazine Repères 56.
6. Avis IRSN du 14 septembre 2022.
7. Avis IRSN du 26 octobre 2022.
8. Note ASN du 3 novembre 2022.

Penly et Cattenom Nouvelles fissures détectées

En mars 2023, EDF annonce la découverte d'une fissure profonde – 23 mm pour une épaisseur totale de 27 mm – sur une soudure du circuit d'injection de sécurité connecté à une branche chaude du circuit primaire du réacteur 1 de Penly. Des réparations faites sur cette soudure pendant la construction du réacteur pourraient en être la cause. L'IRSN tiendra compte de ces éléments nouveaux pour l'expertise en cours portant sur la cinétique de propagation des fissures de corrosion. De plus, lors de contrôles cherchant d'éventuels défauts de corrosion sous contrainte, l'exploitant détecte des fissures de fatigue thermique sur le réacteur 2 de Penly et le réacteur 3 de Cattenom. Ces nouvelles observations conduisent l'ASN à demander des évolutions de la stratégie de contrôle de l'industriel. Elle devra s'appuyer sur une analyse de sûreté que l'IRSN examine. Enfin, la découverte de fissures de fatigue sur d'autres soudures que celles considérées comme les plus sensibles, identifiées par des études thermohydrauliques et mécaniques et soumises à des contrôles périodiques, amène l'IRSN à s'interroger sur la validité de l'ensemble de la démarche et à réfléchir aux actions nécessaires.

www Pour en savoir plus :
www.irsn.fr/fissures-penly-cattenom

Quelles sont les actions d'EDF face à la corrosion sous contrainte (CSC) ?

Depuis novembre 2021, nos équipes déposent des tuyauteries sur plusieurs centrales, puis les analysent en laboratoire. 140 échantillons permettent de classer la sensibilité des zones à la CSC. Pour les réacteurs les plus affectés – 1 450 MWe et certains de 1 300 MWe –, les tuyauteries des lignes sensibles (*voir infographie p. 6*) seront intégralement changées d'ici fin 2023, soit une soixantaine de mètres par paire de réacteurs. Pour connaître la sensibilité à la CSC des autres

réacteurs de 1 300 MWe et de ceux de 900 MWe, Flamanville 2, Tricastin 3, Chinon B3, Bugey 4 et Fessenheim 2 ont fait l'objet de déposes ciblées.

Un nouveau procédé de contrôle non destructif est mis en place. Pourquoi ?

Ce procédé d'examen par ultrasons amélioré, dit UTA, permet d'examiner les défauts des tuyauteries sans les découper (*voir infographie p. 7*). Au 30 novembre, nous avons contrôlé 136 soudures de 14 réacteurs. Testé et validé, instruit par l'Autorité de sûreté nucléaire, l'UTA est déployé

en 2023 pour contrôler plus de 400 soudures sur une quarantaine de réacteurs. Ces contrôles seront menés lors des arrêts déjà prévus. Fin 2025, tout le parc sera contrôlé.

Quels moyens humains sont nécessaires ?

L'examen de deux soudures requiert quatre opérateurs pendant une semaine. Les techniciens doivent obtenir une certification en contrôle non destructif, puis suivre une formation spécifique à l'UTA. Plus d'une centaine ont été formés pour 2023, ce qui permettra de contrôler en parallèle plusieurs réacteurs et soudures d'un même réacteur.

3 questions à...

Nicolas Cayet

Délégué d'état-major ingénierie à la division production nucléaire d'EDF



© Coll privée



La centrale américaine de Three Mile Island.

AILLEURS

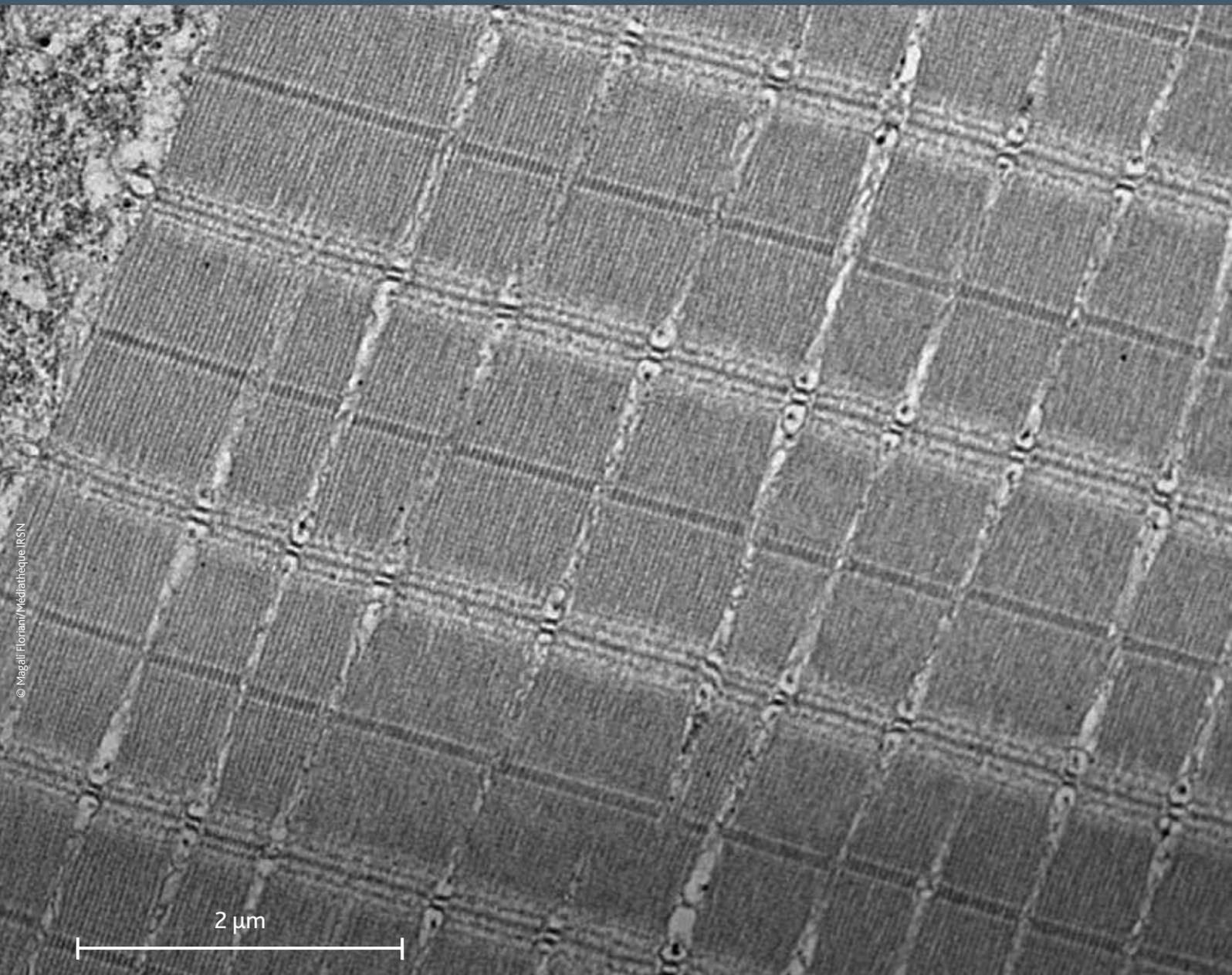
USA : qu'en est-il pour les centrales ?

À l'automne 2021, l'Autorité de sûreté nucléaire américaine (US-NRC¹) est informée, via les canaux habituels d'échange de retour d'expérience (Rex) et par la presse, de la découverte de fissures par corrosion sous contrainte (CSC) dans les centrales en France. Pour comprendre la situation, ses équipes rassemblent de l'information. Grâce aux contacts avec leurs homologues français, elles examinent le risque de défauts similaires dans les centrales américaines. Le Rex des réacteurs à eau pressurisée aux USA et au Japon montre que la CSC

de l'acier inoxydable 316L² est improbable, sauf conditions significativement anormales comme une forte déformation à froid ou une chimie anormale. Compte tenu de ce Rex, des contrôles périodiques et du suivi mené par les industriels américains, la NRC écarte actuellement la crainte d'un problème similaire sur leur parc. Ils continueront à suivre les actions menées dans l'Hexagone.

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission

2. Acier résistant à la corrosion par ses teneurs fortes en chrome et molybdène associées à une basse teneur en carbone.



Tissu modèle

Vous croyez regarder la fine trame d'un tissu ? Nous ne sommes pas dans un atelier de confection. Il s'agit d'un tissu biologique, plus précisément du muscle strié squelettique de poisson zèbre – un animal de laboratoire de quelques centimètres – étudié au microscope électronique en transmission. Le fort grossissement utilisé nous emmène au cœur de l'organisation de filaments d'actine et de myosine, deux protéines liées à la contraction musculaire. Invisibles sur cette image, les mitochondries, véritables centres énergétiques,

sont pourtant nombreuses dans la cellule musculaire. Elles ont été identifiées au fil des études comme une cible potentielle majeure des dégâts liés aux expositions aux radiations.

Le Laboratoire de recherche sur les effets des radionucléides sur les écosystèmes (Leco), situé à Cadarache (Bouches-du-Rhône), mène plusieurs études sur cet organe. Celles menées sur des animaux modèles, comme le poisson zèbre ou le nématode (petit ver), convergent avec les observations faites sur des rainettes de Tchernobyl,

Magali Floriani

Ingénieure microscopiste en écotoxicologie

en Ukraine. Elles montrent un dysfonctionnement du métabolisme énergétique possiblement lié à la perturbation de l'activité mitochondriale.

Deux thèses débutent. Elles vont analyser comment ces perturbations altèrent la physiologie des rainettes et percer le rôle de la mitochondrie dans les effets radio-induits. Deux plateformes d'irradiation de Cadarache sont employées. Elles aideront à affiner les connaissances sur les effets des expositions chroniques aux faibles doses de rayonnements ionisants. ■

DOSSIER

Les déchets issus du traitement des effluents, à évacuer vers les sites de stockage ou de traitement, sont conservés dans des coques en béton. Isabelle Musabini, chargée d'évaluation en sûreté nucléaire à l'IRSN, et Gilles Barrachin, responsable de l'installation nucléaire de base 35 au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives à Saclay (Essonne), examinent les caractéristiques des coques vides, leur fermeture ou bouchage.



©Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

10 000 à 35 000 GBq

d'activité radioactive sont rejetés chaque année par réacteur, en fonction de sa puissance et du mode de gestion du combustible.

Effluents des installations nucléaires

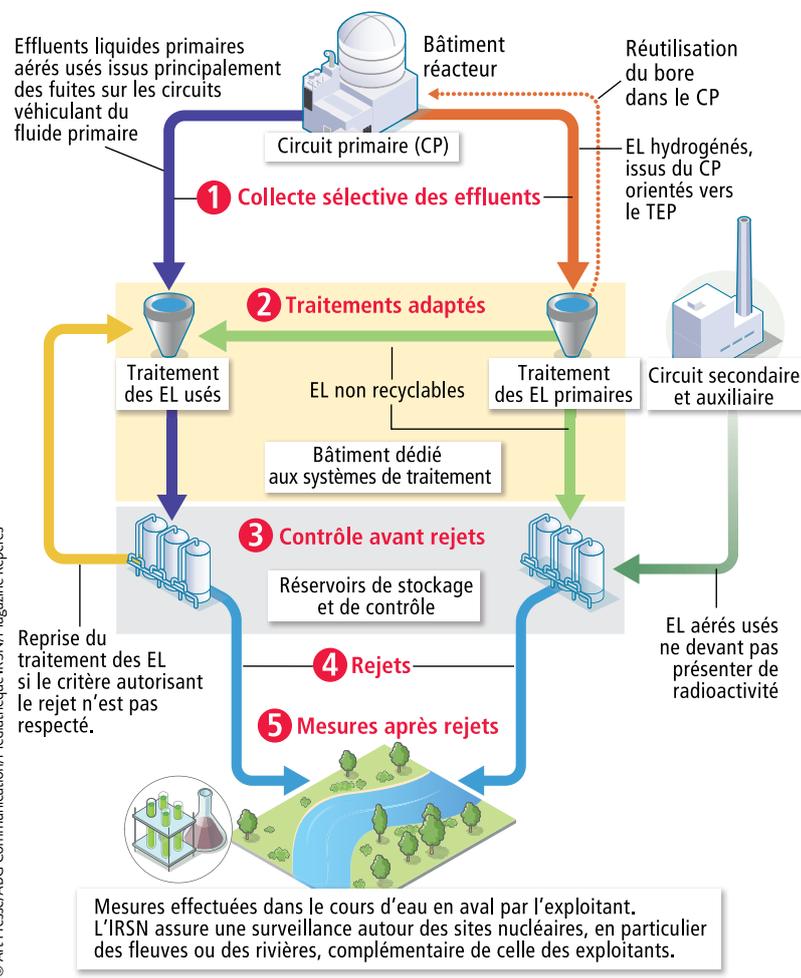
Limiter les rejets et garantir la sûreté

Toute installation nucléaire en fonctionnement génère des effluents. Limiter leur volume et les risques associés est un objectif permanent pour l'exploitant et l'IRSN. Les experts assurent un suivi, rendent des avis et examinent les stratégies efficaces afin qu'elles soient transposées à l'ensemble du parc.

EN CLAIR

Effluents radioactifs d'une centrale : comment sont-ils traités et éliminés ?

Des effluents liquides (EL) et gazeux radioactifs générés par les centrales sont collectés, traités, puis partiellement rejetés après contrôles. L'exemple des effluents liquides, sur le site d'une centrale.



L'exploitation d'une installation nucléaire entraîne la production d'effluents. Qu'ils soient liquides ou gazeux, certains contiennent des substances radioactives en proportions limitées. Collecte, contrôles, stockage, transport, réduction... Qu'est-ce qu'un effluent ? Comment sont-ils traités ? Quel suivi est effectué par les experts ? *Repères* fait le point pour divers types d'installations nucléaires. Dans une centrale, les effluents radioactifs proviennent principalement de produits de fission et d'activation générés dans le réacteur. L'essentiel de leur radioactivité vient du tritium et du carbone 14 (voir *webmag*). Les effluents liquides sont collectés et traités une ou plusieurs fois pour retenir l'essentiel de leur radioactivité. Entreposage transitoire pour laisser celle-ci décroître, filtration à très haute efficacité, déminéralisation sur résine... ces processus dépendent des caractéristiques radio-physico-chimiques de l'effluent. « Après traitement, une partie rejoint des réservoirs de contrôle avant le rejet dans l'eau – rivière, fleuve, mer – bordant la centrale. Sinon, ils sont recyclés dans l'installation, évitant le relâchement dans l'environnement », complète Anna Duprat, experte en sûreté des installations nucléaires (voir *infographie ci-contre*).

Deux types de rejets gazeux

Les rejets radioactifs gazeux relèvent de deux catégories. L'essentiel – plus de 90 % de l'activité annuelle déclarée au rejet – est composé d'effluents dits aérés. Ils proviennent de la ventilation des bâtiments nucléaires, maintenus en dépression pour prévenir la dissémination de la radioactivité. Après filtration, ils sont évacués dans l'air par la cheminée du bâtiment des auxiliaires nucléaires (Ban).

Ceux dits hydrogénés sont produits notamment⁷ par les dégazeurs du système de traitement des effluents primaires. Outre l'hydrogène et l'azote, ils contiennent krypton, tritium, xénon, iodes, etc., produits de fission et d'activation. Pour réduire l'activité du mélange, ces derniers sont entreposés au moins



Manutention de coques dans le bâtiment de traitement des effluents (BTE) de la centrale de Saint-Alban, à Saint-Maurice-l'Exil (Isère).



Bâches de stockage des effluents à la centrale de Cruas-Meysses, en Ardèche.

“ Le meilleur effluent est celui qui n'est pas généré.

trente jours dans des réservoirs sous atmosphère inerte. Après analyse, puis passage par des pièges à iode et des filtres à très haute efficacité (voir *webmag*), ils sont aussi rejetés via la cheminée du Ban.

Divisés par 100

L'exploitant doit respecter des seuils réglementaires fixés par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour l'ensemble des effluents radioactifs. Il engage des évolutions pour en réduire le volume. Selon le guide 2020 d'EDF², les mesures prises par l'industriel entre 1985 et 2000 divisent par 100 les rejets radioactifs liquides, hors tritium et carbone 14. Sur la même période, les rejets de gaz rares diminuent d'un facteur dix.

« Avec l'appui de l'Institut, l'ASN veille à ce que chaque installation limite au maximum les fuites sur les circuits primaire et secondaire, explique Anna Duprat. L'exploitant doit disposer de systèmes de contrôle identifiant ces fuites, afin de les circonscrire rapidement. »

Les experts ont d'autres rôles. Ils examinent les nouvelles procédures de l'industriel pour gérer les effluents. Dans le cadre des renouvellements des demandes d'autorisation de rejets et de prélèvement d'eau (Darpe), ils analysent le retour d'expérience du site. Ils étudient les facteurs influant les niveaux des rejets, afin d'identifier les voies de limitation possible et de se prononcer sur l'acceptabilité des valeurs limites demandées (voir *infographie* p. 13).

Recycler pour moins rejeter

L'IRSN identifie toutes les dispositions participant à limiter les rejets, tout en garantissant la sûreté.

Le recyclage de l'acide borique³ figure parmi les améliorations qu'étudient ses experts dans un rapport

Une trentaine

d'avis sur les effluents des installations nucléaires sont rendus par l'Institut entre 2000 et 2022.

de 2009 sur la gestion des effluents des centrales. Initiée en 2006 par celle de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher), la réutilisation de cet émetteur bêta est depuis adoptée par les sites du Tricastin (Drôme), Bugey (Ain) et Gravelines (Nord). Le principe ? Une modification oriente les effluents primaires usés⁴ – radioactifs et contenant du bore – vers un système permettant leur recyclage dans l'installation. Ceci évite leur rejet. C'est aujourd'hui un levier important de limitation des rejets pour les réacteurs de 900 MWe.

Si ce recyclage peut comporter des limites – respect des spécifications chimiques, risque de pollution –, son principe est retenu à la conception des réacteurs EPR de deuxième génération. Dans le respect des règles de sûreté, « cette stratégie diminue les volumes d'effluents éliminés par voie liquide. Elle contribue à abaisser les rejets d'autres substances radioactives », souligne l'experte.

Depuis le milieu des années 2000, les centrales qui ne recyclent pas l'acide borique recourent à d'autres modifications limitant leurs rejets dans l'environnement. Les sites dotés de réacteurs de 1 300 MWe mutualisent par exemple le stock de bore entre plusieurs tranches. Cette augmentation des capacités de stockage évite des rejets. Ces évolutions sont payantes : en vingt ans, le parc français a diminué ses rejets annuels d'acide borique d'environ 200 tonnes.

Des rejets divisés par sept

Une centrale génère des effluents chimiques, dont certains sont toxiques. C'est le cas de l'hydrazine⁵, cancérigène pour l'homme et toxique pour la reproduction. Lors de l'expertise des Darpe, l'IRSN identifie les sources de rejets de cette substance et les moyens mis en place localement pour les réduire.

Trois stratégies prometteuses sont repérées : la collecte des fuites d'hydrazine au niveau des pompes injectant le réactif dans le circuit secondaire, la destruction

thermique de cette substance dans les générateurs de vapeur (GV) et sa dégradation chimique dans les réservoirs de collecte. Cette dernière consiste à l'oxyder dans les cuves recueillant les effluents liquides des circuits primaire et secondaire. Elle est déployée dès 2008 par les sites de Cattenom (Moselle) et de Nogent-sur-Seine (Aude). « *Le retour d'expérience de ces installations sur la réduction des rejets d'hydrazine est positif. Nous avons demandé à EDF d'étudier la possibilité de généraliser ce dispositif à l'occasion des renouvellements des Darpe* », rapporte Anna Duprat. Cette modification est systématisée depuis 2009.

Il en va de même de la destruction de ce composé chimique dans les GV lors du redémarrage des réacteurs après maintenance. Le recours à ces deux méthodes divise les rejets par sept par tranche entre 2007 et 2017.

Pour l'experte, la vigilance reste de mise : « *Les nombreuses opérations de maintenance prévues en France en 2023⁶ pourraient générer davantage de rejets chimiques et radioactifs. Vider, rincer et conditionner des circuits lors d'un arrêt de tranche augmente souvent des volumes d'effluents liquides.* »

Pas de relâchement : l'exploitant doit poursuivre ses efforts pour limiter les rejets de ses installations. ■

1. Ils proviennent aussi du balayage éventage de réservoirs sous matelas gazeux, dans lesquels le fluide primaire se dégaze.
2. Voir « Centrales nucléaires et environnement » sur www.edf.fr
3. L'acide borique est ajouté à l'eau du circuit primaire pour piéger les neutrons excédentaires.
4. Effluents aérés issus notamment de fuites ou d'opérations de vidange sur le circuit primaire et des connexes.
5. L'hydrazine sert à diminuer la concentration d'oxygène dans le circuit secondaire pour limiter le risque de corrosion.
6. EDF prévoit d'arrêter six réacteurs de 1300 MWe pour des réparations dues à la corrosion sous contrainte.

WEBMAGAZINE



À LIRE
Filtration des aérosols : assurer la performance
www.irsn.fr/R50



À LIRE
Les contrôles des exploitants sont suivis par des acteurs publics
www.irsn.fr/R52



À LIRE
Saint-Alban, Isère : quelle exposition ajoutée pour les riverains ?
www.irsn.fr/R54

FOCUS

Effluents thermiques Les réacteurs face au réchauffement climatique

Environ 1 °C de plus que la température du fleuve. C'est la marge accordée aux centrales françaises lorsqu'elles rejettent l'eau utilisée pour refroidir les réacteurs. En cas de fortes chaleurs, le code de l'environnement impose de réduire les effluents thermiques pour préserver la biodiversité aquatique. « *Ils ne sont pas entreposables, à la différence de ceux radioactifs. Pour les limiter, il faut moins refroidir, donc baisser la puissance* », précise Anna Duprat, experte en sûreté des installations nucléaires (lire p. 11 et 14). Le 9 mai 2022, la Gironde est anormalement chaude. La centrale du Blayais réduit sa production pendant quelques heures. Elle respecte le seuil réglementaire : 30 °C du 15 octobre au 15 mai, et à 36,5 °C

le reste de l'année en aval de l'installation.

Au cours de l'été, la température des fleuves continue à croître.

EDF demande à l'Autorité de sûreté nucléaire des modifications temporaires des limites de rejets thermiques en vue d'éventuels dépassements des seuils. L'Autorité accorde des dérogations du 13 juillet au 11 septembre à cinq centrales, mais demande à l'exploitant de surveiller davantage l'environnement. Il analyse taux d'oxygène, peuplement piscicole...

Selon son rapport préliminaire, les rejets thermiques de l'été 2022 n'ont pas d'effets notables sur les écosystèmes aquatiques. Face au défi climatique, l'IRSN lance des recherches étudiant l'impact sur la faune et la flore.

Rejets d'une installation nucléaire, comment sont instruites les demandes ?

Toute installation fait une demande d'autorisation de rejets et de prélèvements d'eau (Darpe) avant son implantation ou une modification. Elle doit être adaptée aux besoins du site et de son environnement naturel. L'IRSN les expertise.

1 La demande

EDF soumet à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) une demande de modification de l'autorisation de rejets et de prélèvements d'eau (Darpe).

2 L'ASN saisit l'IRSN

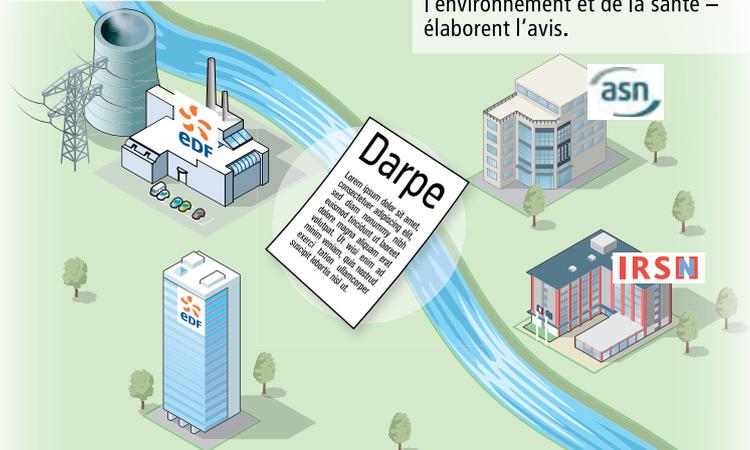
L'IRSN et l'ASN précisent les sujets à analyser et les questions à traiter. L'IRSN analyse le dossier et interagit avec EDF. Différents spécialistes – de l'installation, de l'impact sur l'environnement et de la santé – élaborent l'avis.

4 La décision

L'ASN s'appuie sur l'avis de l'Institut pour définir les niveaux de rejets, ainsi que les modalités de contrôle.

3 Le rendu de l'avis

Les experts prennent position par rapport aux limites de rejets demandées et évaluent leur impact. L'avis de l'IRSN propose des améliorations de gestion des effluents pour limiter des rejets.



Installations du cycle, laboratoires... des effluents sous surveillance

Dans des usines de retraitement, des réacteurs expérimentaux, comme dans les centrales, les effluents radioactifs sont traités, avant rejet ou évacuation comme déchets. L'IRSN évalue leur sûreté. Risque incendie, corrosion, explosion...

Le 11 mars 1997, un incendie suivi d'une explosion survient à la centrale de Tokai-Mura, au Japon. Il a lieu dans l'atelier où les effluents issus du retraitement du combustible nucléaire sont enrobés de bitume. « *Au contact de l'enrobage, les sels présents dans les effluents – nitrates, ferrocyanure de potassium, etc. – peuvent générer une réaction chimique qui dégage beaucoup de chaleur. Le bitume peut alors s'enflammer* », expose Isabelle Musabini, chargée d'évaluation en sûreté nucléaire. L'accident met en lumière le danger des procédés de traitement des effluents radioactifs.

En France, les effluents dont la dangerosité est supérieure aux limites réglementaires sont traités dans des unités spécialisées pour réduire leur volume, puis évacué comme déchets vers des centres de traitement ou d'entreposage (voir infographies p. 11 et ci-contre).

L'IRSN évalue divers aspects de sûreté associés à ces traitements.

Risque d'incendie

Dans les jours qui suivent l'accident nippon, Orano réunit un groupe de travail. Objectif : éviter un tel accident dans ses installations. En effet, l'installation nucléaire de base (INB) 118, dans son usine de retraitement de La Hague (Manche), utilise un procédé d'enrobage similaire.

En 2007, à l'occasion du réexamen périodique de cette INB, l'Institut étudie¹ les dispositions prises par Orano vis-à-vis du risque d'incendie. Les résidus issus du traitement des effluents aqueux sont



Un chef de quart au CEA de Saclay (Essonne), manipule l'évaporateur derrière un hublot blindé.

enrobés de bitume, puis conditionnés en fûts métalliques. Pour prévenir l'emballement thermique, l'exploitant peut suivre les dépôts de feu à l'aide d'une caméra. « *Le dispositif est insuffisant pour juger de l'évolution d'un incendie compte tenu des fumées engendrées par un feu de bitume* », détaille Isabelle Musabini.

Les experts recommandent de suivre la température en temps réel et au sein des enrobés. Dans les années qui suivent, l'exploitant recourt à une caméra pyrométrique qui le renseigne sur la température à la surface du premier fût rempli. Si aucune dérive de température n'est relevée sur ce fût témoin en 24 heures, le bitumage débute. Lors du réexamen suivant, en 2018², l'IRSN juge la démonstration de maîtrise des risques incendie suffisante, une détection précoce de tout emballement thermique étant fournie par cette caméra pyrométrique.

De risque d'incendie, il en est aussi question dans les avis rendus par l'Institut relatifs à l'INB 35. Exploitée par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), elle traite pour évacuation les

effluents radioactifs issus des laboratoires et réacteurs expérimentaux situés sur son site de Saclay, dans l'Essonne (lire p. 16).

Un des bâtiments abrite d'anciennes cuves d'entreposage d'effluents, devant être vidangées puis démantelées. Une des cuves située dans une fosse semi-enterrée, est prioritaire. Sa vidange exige une série d'opérations pouvant affecter la sûreté et la radioprotection : perçage de la cuve, installation de canalisations semi-flexibles, récupération des effluents dans des fûts, entreposage avant envoi vers le Centre nucléaire de traitement et de conditionnement (Centrac) à Codolet (Gard).

Corrosion prématurée

Dans un avis³, l'IRSN demande au CEA d'étoffer les moyens prévus pour la première intervention en cas de départ de feu. « *En l'état, ils sont inadaptés aux quantités de liquides inflammables présents dans les locaux de vidange et d'entreposage et aux caractéristiques de combustion rapide* », pointe Isabelle Musabini.

Un autre bâtiment de l'INB 35 retient l'attention de l'IRSN, celui où les effluents

sont évaporés pour réduire leur volume. Ce nouvel évaporateur, mis en service en 2011, est arrêté en 2019 à la suite d'un contrôle de l'exploitant qui révèle une corrosion prématurée sur un de ses composants : le séparateur⁴. Le phénomène peut engendrer des défauts de ses matériaux et induire des fuites d'effluents.

Ce risque – déjà présent sur l'ancien évaporateur, actuellement démantelé – est pourtant identifié et suivi par l'Institut depuis le réexamen périodique de 2007. À l'époque, les experts incitent le CEA à prévoir une campagne d'échantillonnages et d'essais pour caractériser ces mécanismes de corrosion et leurs vitesses. « *L'objectif était d'ouvrir des pistes pouvant atténuer à l'avenir ce phénomène, par exemple un changement de produits chimiques dans l'enceinte de l'évaporateur ou l'adaptation de son fonctionnement* », illustre Isabelle Musabini. L'IRSN demande la mise en place d'un programme de surveillance des mécanismes de dégradation plausibles.

Inspection et surveillance

L'exploitant en transmet une première version en novembre 2011, puis une seconde révisée en 2014. Ce programme comprend un contrôle par inspection visuelle externe et une surveillance de la corrosion localisée. Pour l'Institut, il peut encore être amélioré.

En 2016⁵, l'IRSN recommande que le CEA inspecte certaines parois internes du séparateur et des échangeurs du nouvel évaporateur à l'aide d'un endoscope. Deux ans plus tard, l'exploitant démontre que la géométrie complexe de l'évaporateur rend la mise en œuvre d'un tel dispositif impossible. L'industriel joint une étude des mécanismes de corrosion, justifiant selon lui l'absence d'utilité de ces nouvelles dispositions.

Les dispositions retenues par l'exploitant figurent dans le dossier de demande de modification de cet équipement. L'Institut expertisera les démonstrations techniques associées courant 2023, s'il est saisi par l'Autorité de sûreté nucléaire. ■

1. Rapport DSU n° 172 du 19 décembre 2007.

2. Rapport 2020-00681.

3. Avis 2022-00146.

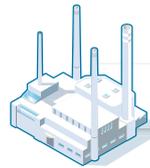
4. Il assure la séparation et la décontamination des vapeurs issues de l'évaporation des effluents.

5. Avis 2016-00025.

EN CLAIR

Effluents d'une installation nucléaire : quelles expertises sont réalisées ?

Les effluents d'une installation nucléaires sont traités avant d'être rejetés en partie. Quels contrôles sont réalisés ? Quelles expertises sont effectuées par l'IRSN ? Illustration avec l'unité de retraitement de La Hague dans la Manche.

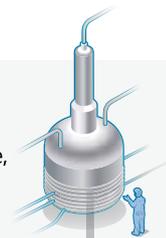


L'usine de La Hague (Manche) traite les combustibles nucléaires.

Quelles sont les étapes du traitement des effluents ?

Quelles expertises réalisent les experts de l'IRSN ?

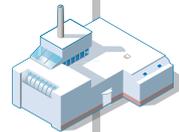
1 Le **retraitement du combustible** consiste à séparer l'uranium et le plutonium. Après une étape de dissolution des pastilles de combustible, les autres radionucléides sont piégés dans un mélange d'eau et de produits chimiques.



- Suivi de l'installation – mise en service, fonctionnement, modifications –, dont sa tenue au séisme

Le concentrat restant après évaporation est vitrifié. Ces déchets de haute activité sont entreposés sur le site.

2 L'atelier de retraitement des effluents INB 118, exploité par Orano sur le même site, les effluents générés par la dissolution encore radioactif, acheminé par des pipelines. Une succession de réactions chimiques réalisées dans des cuves différentes extrait les radioéléments un à un.



- Suivi général du procédé
- Risque d'incendie

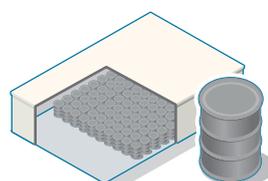
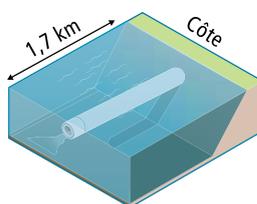
3 Les **effluents sont récupérés** par précipitation puis décantation. Le surnageant filtré devient un effluent liquide.



- Maîtrise du confinement
- Maîtrise de l'exposition aux rayonnements

4 L'**effluent liquide** est contrôlé puis rejeté en mer lors de courant fort, dans les quantités définies par la Darpe (demande d'autorisation de rejets et prélèvement d'eau).

5 Le **concentrat constitue une boue** qui est piégée dans du bitume, puis conditionnée en colis. Ce déchet est entreposé sur site. Il sera ensuite envoyé dans le centre de stockage Cigéo (Meuse) dès qu'il sera opérationnel.



- Composition des boues
- Risque explosion
- Tenue mécanique des colis
- Expertise des dossiers de Darpe

Maîtrise du confinement, tenue mécanique des colis ou du génie civil... au total **six spécialités d'expertise de l'IRSN contribuent à maintenir et à améliorer la sûreté et la radioprotection sur ce site.**



1



2

Photoreportage : ©Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

1 Ces fûts jaunes contiennent des gants et des surbottes usagés de l'INB 35 sur le site CEA Paris-Saclay (Essonne). En tenue blanche, surbottes et gants scotchés, Housna Katibou, technicienne en radioprotection (à gauche), contrôle le débit de dose du fût. Isabelle Musabini (à droite), chargée d'évaluation en sûreté nucléaire à l'IRSN, observe ces mesures de radioprotection en marge de son activité concernant les effluents.

REPORTAGE Dans l'Essonne, une installation nucléaire traite les effluents radioactifs. Une experte de l'Institut suit ses mesures pour prévenir les risques et assurer la sûreté : intégrité des cuves, ventilation... Récit d'une visite.

Collecte, tri, transport...

Effluents sous l'œil des experts



3



4

2 Remplie de divers effluents de l'installation, cette citerne sert à l'entreposage. Elle sera vidée dans les cuves de l'INB 35. L'experte s'enquiert des documents de transport auprès de Gilles Barrachin, chef de l'INB. Ils mentionnent l'expéditeur, l'activité radiologique du contenu, etc.

3 L'experte et Faycel Mokaddem, technicien, sont dans le local contenant les agitateurs. Ce système brasse en permanence les concentrats enfermés dans des cuves situées en dessous, en attente de cimentation. L'experte vérifie les contrôles réalisés et leur fréquence.

4 La ventilation est un aspect important de la sûreté. L'intégrité des gaines, l'aspect des locaux, le contrôle des rejets, sont vérifiés par l'experte. Ici, elle surveille la concentration en tritium avant rejet.

Is sont tantôt immenses, silencieux et aérés, tantôt exigus, bruyants et encombrés. Le point commun entre les dizaines de locaux de l'installation nucléaire de base (INB) 35 du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Saclay (Essonne) ? Les effluents radioactifs liquides. Coproduits lors de processus industriels ou de laboratoire (lire p. 15), l'INB 35 assure leur traitement.

L'installation fait analyser les éléments radioactifs et chimiques qu'ils contiennent auprès d'un laboratoire dédié. Elle les collecte, les analyse, les concentre par évaporation, rejette les distillats en tant qu'effluents industriels si les seuils de rejet sont respectés, les cimente et les expédie à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) sous forme de colis en respectant les règles de transport et de sûreté.

Isabelle Musabini, chargée d'évaluation en sûreté nucléaire à l'IRSN, suit ce site depuis deux ans. Elle s'y rend régulièrement dans le cadre d'expertises, seule ou aux côtés de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) lors des inspections. « Le respect des règles générales

d'exploitations est vérifié. Elles récapitulent tant le domaine de fonctionnement et les limites associées, que les contrôles, essais et maintenances périodiques aidant à s'assurer du respect des fonctions de sûreté ou encore les consignes de radioprotection », décrit-elle.

Au cours de sa visite avec le responsable de l'INB 35 Gilles Barrachin, l'experte consulte de nombreux professionnels impliqués dans la prise en charge des effluents : citernier assurant le remplissage des citernes, technicien en radioprotection, opérateur de conduite de l'installation, chef de quart... Elle échange sur les mesures de radioprotection et de ventilation, le transport, l'intégrité des cuves... Elle suit seule cette INB au sein de l'Institut. « En cas de besoins spécifiques, je m'appuie sur d'autres experts de l'IRSN, précise-t-elle. C'est le cas par exemple pour la gestion des risques liés à l'incendie, les calculs relatifs au dimensionnement de la ventilation, du génie civil ou des équipements mécaniques... »

Et de conclure : « Un chargé d'affaires doit aussi s'informer, auprès de l'exploitant comme de l'ASN, pour anticiper les dossiers à venir et de les prioriser. » ■

■ BIBLIOGRAPHIE

Rapport 2020-00681

Rapport DSU n 172, 2007

Avis 2022-00146

www.irsn.fr/Avis-IRSN-2022-00146

Avis 2016-00025

Chaque année, le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri) fait peau neuve. Courant mai 2023, les utilisateurs bénéficieront d'un outil plus ergonomique et plus puissant dans la mise à disposition des données. De quoi optimiser le suivi dosimétrique des travailleurs. Le nouveau Siseri optimisera le suivi des travailleurs. Ici, un technicien effectue un procédé chimique en cellule blindée.

Refonte de Siseri

Données plus complètes et plus fiables

L'ESSENTIEL Le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri) fait peau neuve. Courant mai 2023, les utilisateurs bénéficieront d'un outil plus ergonomique et plus puissant dans la mise à disposition des données. De quoi optimiser le suivi dosimétrique des travailleurs.

TÉMOIGNAGE Le responsable radioprotection d'une société d'ingénierie. **DÉCRYPTAGE** Quelles nouveautés pour les utilisateurs ? **AVIS D'EXPERT** Le chef de projet refonte Siseri.



Xavier Nicolas

Responsable radioprotection chez Assystem, société d'ingénierie nucléaire. Lors de la conception du nouveau Siseri, il intervient comme l'ambassadeur pour le domaine du nucléaire.

TÉMOIGNAGE “Le but : un outil ergonomique”

“**N**os clients appartiennent en majorité au secteur énergétique français. Nous les accompagnons dans les bureaux d'études pour la conception des installations et sur site pour organiser des travaux ou le suivi.

900 collaborateurs sont habilités à travailler sous rayonnements ionisants. Je les suis, avec mon équipe. En 2020, l'IRSN et la direction générale du travail (DGT), pilotes de la refonte de Siseri, créent un groupe de travail pour recenser les attentes des utilisateurs. Nucléaire, médical, intérim, organismes compétents en radioprotection, quatre ambassadeurs conseillers en radioprotection (CRP) sont désignés par domaine d'activité. Jusqu'à fin 2022, avec la DGT et l'IRSN, nous définissons les éléments du nouvel outil, menu, affichages, statistiques... en méthode agile utilisant des interfaces développées rapidement. Le résultat est bien plus qu'une base de données de stockage.

Jusqu'ici, Siseri ne pouvait pas comparer les données, ni situer une entreprise dans son secteur ou par type de métiers.

Intelligence de la donnée

Dans la nouvelle version, un module statistique lit la base de données. Il restitue des médianes et des moyennes selon les filtres choisis.

Tout CRP peut s'interroger sur l'exposition des travailleurs qu'il suit : « *Les échafaudeurs de mon entreprise sont exposés en moyenne à 5-6 mSv, est-ce beaucoup ou non ?* » L'outil affiche la moyenne et la médiane de la dosimétrie de tous les échafaudeurs en France. Des indicateurs graphiques aident à repérer un problème : « *J'ai un employé très au-dessus de la médiane. Pourquoi ?* » Il peut engager des mesures correctives.

Le nouveau Siseri facilitera le suivi de la dosimétrie de beaucoup de petites entreprises. ■

Quelles améliorations pour les utilisateurs de Siseri ?

Le nouveau Système d'information rayonnements ionisants (Si Synthèse des principaux changements en radioprotection (CRP),

Pour l'employeur

Les données renseignées sont plus fiables

Il est responsable du suivi dosimétrique et médical de ses employés exposés. Il crée son compte dans Siseri via le service de l'État ProConnect¹ et désigne ceux qui peuvent y accéder : MDT, CRP... Il renseigne les données administratives : nom, prénom, date de naissance, numéro de sécurité sociale...



Nouveau

- Une **interopérabilité** entre Siseri, les systèmes d'information (SI) connexes – de l'État, des laboratoires accrédités et des entreprises – fiabilise les données. Exemple : une **double vérification en ligne** de l'identité du travailleur avec le téléservice Ameli, et du Siret² de l'employeur avec la base Siren³.

Pour l'employé

Il peut consulter ses données dosimétriques

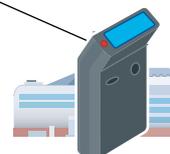
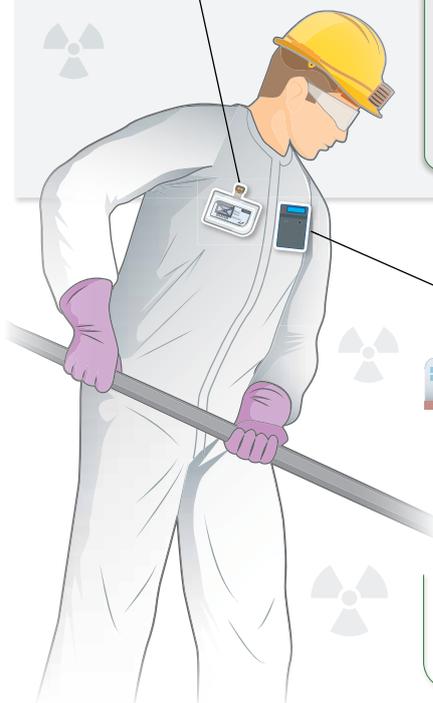
Frédéric est un employé d'une société d'ingénierie nucléaire, classé en catégorie A⁴. Pour son suivi individuel, il porte un dosimètre passif, fourni par un organisme accrédité (OA).



L'OA lit le dosimètre et enregistre la dose externe dans Siseri.

Nouveau

- Les données incohérentes – un numéro de sécurité sociale erroné par exemple – sont rejetées.
- L'OA reçoit une notification de rejet.
- Frédéric **consulte ses données** via un accès nomade sur son téléphone portable.



Lors d'une **intervention dans une installation nucléaire de base (INB)**, l'exploitant fournit un dosimètre opérationnel à Frédéric.

Nouveau

- L'exploitant de l'INB **envoie les données de dosimétrie opérationnelle** à Siseri.



¹ <https://proconnect.gouv.fr/>. ² Système d'identification du répertoire des établissements. ³ Système d'identification du répertoire des entreprises.

⁴ Travailleur susceptible d'être exposé professionnellement à une dose efficace dépassant 6 millisieverts (mSv) sur 12 mois glissants ou une dose équivalente supérieure à 3/10^e des limites d'exposition.



Dans cette unité de recherche à Caen (Calvados), les travailleurs sont exposés au risque radiologique.

© Sophie Brändström/Signatures/Médiathèque IRSN

LA RÉGLEMENTATION ÉVOLUE

Dans la précédente version de Siseri, la dosimétrie de tous les travailleurs exposés a été centralisée. Leur suivi était décorrélié de leur classement : catégories A, B, etc. Depuis 2018*, le législateur incite employeurs et organismes accrédités à **ne conserver dans le système que les travailleurs A ou B** ayant un suivi dosimétrique individuel. Le label travailleur non classé sera à terme supprimé. L'IRSN accompagnera les employeurs pendant la transition, pour fiabiliser l'information sur le classement.

* Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018.

PROTECTION DES DONNÉES

L'IRSN est engagé dans une démarche de **protection des données à caractère personnel** qu'il traite. Les résultats du suivi dosimétrique des travailleurs, comme les données permettant leur identification, sont des données sensibles, voire pour certaines médicales. Pour les protéger, **l'accès des utilisateurs à Siseri** requiert une **procédure d'authentification forte** : couple identifiant et mot de passe, à l'aide d'un code à usage unique.

AVIS D'EXPERT



© Célia Courmard/Médiathèque IRSN

Hervé Roy

Chef de projet refonte du Siseri

Accompagner les employeurs

“ Le projet de refonte Siseri est mené de concert avec des ambassadeurs pour chacun des profils utilisateur : employeur, conseiller en radioprotection, médecins du travail... Plus ergonomique, le nouveau système sera mieux pris en main par les utilisateurs. À la clé, des données plus complètes et une plus grande efficacité dans leur traitement. Les équipes en charge du Siseri auront plus de temps pour des analyses, pour repérer des incohérences, voire conduire des actions proactives auprès des employeurs ayant un compte et mieux les accompagner. Nous pourrons par exemple leur indiquer comment effectuer une tâche dans l'outil, telle la mise à jour de la liste des travailleurs exposés ou le renseignement des données de contexte de l'exposition : métier, activité, statut d'emploi... L'objectif est que le bilan de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants, publié par l'Institut chaque année, soit enrichi des données renseignées par les employeurs. Une mise à jour des données de référence – secteurs d'activités et métiers – aidera à réaliser des analyses plus précises. Auparavant, la nomenclature métier mentionnait par exemple « médecin », quelle que soit sa spécialité. Maintenant, il est possible de préciser cardiologue, radiologue... ce qui valorise mieux les données.

mation de la surveillance de l'exposition aux (seri) sera disponible courant mai 2023. amagements pour les employeurs, conseillers médecins du travail (MDT) et laboratoires accrédités.

Pour le médecin du travail

Il peut agir sur le système, ajouter ou corriger une dose

En cas d'alerte pour un dépassement de doses, Frédéric est convoqué par le MDT. Ce dernier se connecte à Siseri pour accéder à sa dosimétrie.



Nouveau

- Le MDT peut télécharger l'historique dosimétrique.
- Il peut intégrer de nouvelles données : ajouter une dose, corriger – par exemple en cas de dosimètre perdu près d'une source ayant déclenché une alerte.
- Un accès à la base est prévu pour les ingénieurs de prévention, les infirmiers et les personnels non médicaux des services de santé au travail.

Pour le conseiller en radioprotection

Il exploite mieux les données dosimétriques

Nouveau

- Le CRP visualise les cumuls dosimétriques pour toute la durée du contrat de travail.
- L'ergonomie et les fonctionnalités sont améliorées.
- Les données de symétrique sont mieux exploitées.
- Un module statistique – en développement – permettra de comparer les doses des travailleurs au sein de l'entreprise et d'un même métier à l'échelle nationale.



© Art Presse/ABC Communication/Médiathèque IRSN/Magazine Repères

RESSOURCES

Refonte de Siseri, qu'est-ce qui change ?

www.irsn.fr/siseri-2023

Pour les **médecins du travail**

www.irsn.fr/siseri-refonte

Pour les **conseillers en radioprotection**

www.irsn.fr/siseri-cr

La **synthèse 2021** : Bilan de la surveillance des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants

<https://expro.irsn.fr/synthese>

Repères 51 : La refonte du système Siseri

se base sur les attentes des utilisateurs

www.irsn.fr/R51

SISERI EN CHIFFRES

- Résultats annuels d'environ 390 000 travailleurs pour 30 000 employeurs
- De 1957 à 2022 : 1,6 million de travailleurs au total
- Le nombre d'utilisateurs depuis 2005 : 13 000 CRP et 6 000 MDT

CONTACT

Bureau d'analyse et de suivi des expositions professionnelles (Basep)
01 58 35 84 04

Accueil Siseri <https://siseri.irsn.fr>



CONTACT

Hervé Roy

hervé.roy@irsn.fr

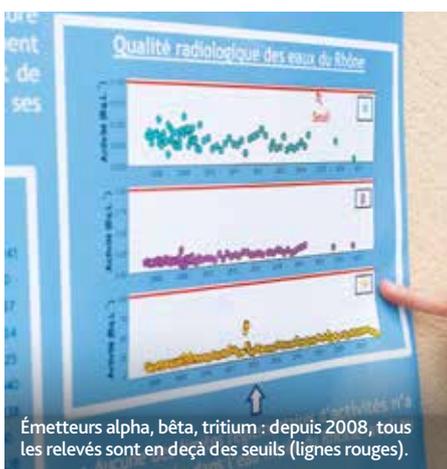
Rhône et radioactivité : les questions des riverains

Ils sont ingénieurs, enseignants retraités... et habitent les Bouches-du-Rhône. Ils assistent à une animation à la station d'observation du Rhône en Arles (Sora), dans le cadre du festival « Dans les bras du Rhône ». Quelles sont leurs interrogations ?

1 Le Rhône est-il dangereux ?

Culture, art, nature... Depuis 2010 dans le bassin rhodanien, le festival « Dans les bras du Rhône » explore diverses facettes du fleuve. Il est organisé par le centre permanent d'initiatives pour l'environnement Rhône Pays d'Arles. Le 8 octobre 2022, il propose un sujet scientifique – « *Le Rhône est-il radioactif ?* » – et fait découvrir à une trentaine d'Arlésiens la station de l'observatoire du Rhône à Arles (Sora). Les questions « *Y a-t-il de la radioactivité ? Est-ce dangereux ?* » sont posées immédiatement. Christelle Antonelli, chercheuse et experte de la surveillance en milieu fluvial, répond sans détour : « *Oui, nous en mesurons dans le fleuve : elle est artificielle et naturelle.* » Pour mettre en perspective ces données, elle pointe trois courbes (photo ci-dessous). Elles compilent

plus de dix ans de relevés des émetteurs alpha, bêta, gamma et du tritium. Verdict, en comparaison avec l'eau potable, « aucune limite réglementaire d'activité n'aurait été dépassée pour le Rhône aval », souligne-t-elle. Pour les émetteurs alpha et bêta, la comparaison se fait avec la limite de la potabilité de l'eau, définie par la réglementation française. Quant au tritium artificiel rejeté par des centrales, dans le fleuve on mesure aussi sa forme naturelle et celle issue des dépôts dus aux tirs des armes nucléaires antérieurs aux années 1980. Comparées au niveau de pré-alerte français de 100 becquerels par litre (Bq/L) – soit un centième de la valeur guide recommandée par l'Organisation mondiale de la santé –, les mesures sont rassurantes.



2 Pourquoi le fleuve est-il surveillé ?

Curieux, les citoyens veulent savoir pourquoi et comment ces mesures sont réalisées. Christelle Antonelli commence par brosser le « profil » de ce fleuve, un des plus nucléarisés au monde. Le Rhône compte dans son bassin quatre centrales, deux usines du cycle du combustible, deux centres de recherche et plusieurs hôpitaux. Tous y rejettent des effluents radioactifs, selon les autorisations qui leur sont accordées. À cela s'ajoute la radioactivité de son bassin versant, due à l'accident de Tchernobyl, aux essais nucléaires et en partie naturelle, rappelle-t-elle. L'experte explique que si Sora contribue à surveiller le fleuve, elle aide surtout à mieux comprendre les dépôts et relargages de la radioactivité. Elle recueille des échantillons d'eau contenant des matières en suspension toutes les heures et 365 jours par an. Après traitement, ils sont analysés par l'Institut en région parisienne. « *Ils indiquent quels radionucléides sont présents et en quelle quantité* », détaille la scientifique. Un visiteur est « *étonné par la technicité de ces mesures* ».



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

Plusieurs participants s'inquiètent d'un éventuel accident sur une centrale. « La station n'a pas pour mission de tirer la sonnette d'alarme », explique la scientifique. « Mais comment pouvons-nous être prévenus alors ? », insiste une participante. L'experte décrypte les rouages de la surveillance de la radioactivité en France. Les exploitants – contrôlés par le gendarme du nucléaire,

l'Autorité de sûreté nucléaire – doivent déclarer tout incident ou accident. Le système d'alerte de l'IRSN analyse en permanence le débit radioactif en France, tant dans l'air que dans l'eau en aval des installations nucléaires. Leurs relevés sont disponibles pour le grand public sur le site www.mesure-radioactivite.fr [voir Repères 56]. « Ça me rassure de savoir qu'il y a autant de mesures et qu'on peut les consulter », avoue une Arlésienne.



Christelle Antonelli décrypte le fonctionnement du dispositif pour le captage d'eau en cas de crue.



La station de l'observatoire du Rhône à Arles (Sora) pompe l'eau du Rhône au niveau du centre historique de la ville.

4 Que se passe-t-il en cas de crue ?

À l'intérieur de la station, les cinq récipients longs et étroits, étiquetés « système crue », captent l'attention des visiteurs.

Le souvenir de la crue de 2002 est bien présent dans l'esprit de chacun. D'un débit d'environ 10 000 m³/s – contre 1 500 en moyenne –, elle charriait un gramme de matière par litre d'eau. Rares, courts et violents, de tels événements déplacent en 10 % de temps 90 % de matières, brassent le fond du fleuve, embarquent la radioactivité déposée dans ses bras stagnants ou morts.

La mesurer est capital en recherche pour évaluer les stocks de radioactivité dus aux rejets des installations, aux accidents et aux essais des armes nucléaires.

Mais avec autant de matière charriée, la collecte usuelle serait vite saturée. L'experte précise : « En cas de crue, ce dispositif avec cinq échantillonneurs prend le relais. Il serait également activé en cas de signalement d'accident avec rejets radioactifs. »

Reportage photo : © Albane Noor/Signatures/Médiathèque IRSN



Beaucoup de visiteurs sont rassurés d'apprendre que des analyses poussées quantifient la radioactivité environnante.

5 Que retiennent les visiteurs ?

« Je n'ai rien entendu d'alarmant sur la radioactivité du Rhône. Cette visite m'a rassurée », confie une Arlésienne. Elle sait désormais que « cette chose qui flotte dans l'eau » est le collecteur de l'eau de la station Sora. « Avez-vous vu quelque chose lors de l'accident de Fukushima ? », demande une blogueuse captivée. « Pas de radionucléides dans le fleuve à Arles, répond la scientifique. Le niveau des relevés dans l'air a été légèrement augmenté pendant quelques

jours. L'IRSN anticipait une faible incidence en France. Mais nous avons effectué des mesures rigoureuses pour fournir des résultats clairs et transparents. »

Ces éléments répondent à l'interrogation de la visiteuse, marquée par l'accident de Tchernobyl. La capacité des analyses à distinguer les rejets de diverses installations, à différencier la radioactivité naturelle et artificielle, ou encore à repérer une anomalie de mesure... Ces sujets techniques sont abordés par les visiteurs. La plupart repartent satisfaits grâce aux explications.

Organes et radiosensibilité

Une nouvelle stratégie pour protéger le côlon

Qu'est-ce qui explique la grande sensibilité du côlon aux radiothérapies anti-cancéreuses ? Comment le protéger ? Des recherches menées à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine) ambitionnent d'améliorer la prise en charge des complications post-traitement.

Les yeux rivés sur son écran de contrôle, Valérie Buard inspecte le marquage fluorescent d'une coupe de tissu intestinal animal. La pièce exigüe dans laquelle s'affaire la technicienne biologiste se situe au Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales (LRMed). Celui-ci est spécialisé dans l'étude des tissus exposés aux rayonnements ionisants. Située au Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), elle compte huit chercheurs épaulés par quatre techniciens.

Depuis deux ans, le pharmacien et docteur Martin Jestin y étudie les effets de l'irradiation sur le côlon. Ses investigations se focalisent sur un compartiment méconnu de cet organe : son micro-environnement, appelé aussi le stroma. Ce dernier diffuse une multitude de molécules, dont certaines seraient impliquées dans la régénération des cellules épithéliales¹ du côlon. « Nous souhaitons identifier les signaux moléculaires perturbés par les rayonnements, pour comprendre comment ils entravent la régénération de la paroi intestinale », détaille le docteur.

L'enjeu est d'importance. Près de 115 000 cancers pelviens – prostate, vessie, utérus, rectum, etc. – sont diagnostiqués en France chaque année. Une part significative est traitée par radiothérapie. Cette technique est très efficace pour traiter les tumeurs mais peut, dans certains cas, conduire à des complications – regroupées sous le terme anglo-saxon « pelvic radiation disease » –, dont la fibrose colorectale.

Lésions tardives

Si ces complications se manifestent le plus souvent dans les mois suivant la radiothérapie, chez 20 % des patients, plusieurs années s'écoulent avant leur apparition.

« Le fait que le côlon dispose d'un compartiment riche en cellules souches épithéliales se divisant rapidement le rend sensible aux rayonnements », explique Noëlle Mathieu,

la chercheuse en radiobiologie qui supervise le thésard. Pour prévenir ces effets secondaires, le doctorant cherche à mettre au point une nouvelle stratégie thérapeutique. La première étape consiste à prélever le côlon d'une souris ayant reçu une dose de rayonnement dans la zone colorectale. Deux semaines après l'irradiation, la structure tissulaire est analysée au microscope optique. L'opération est renouvelée dix semaines plus tard, afin d'observer des effets tardifs comme la fibrose. « Même si la structure du côlon est intacte, certaines protéines qui assurent la fonction de l'organe sont en revanche altérées par l'irradiation », observe Martin Jestin.

Analyser chaque cellule

L'étape suivante vise à identifier les voies de signalisation moléculaires du micro-environnement stromal impliquées dans cette altération. Martin Jestin conçoit un protocole pour obtenir une suspension cellulaire à partir de côlon de souris irradiées.

Une technique novatrice est appliquée sur cette suspension : le séquençage sur cellule unique. Ce procédé sert à caractériser le transcriptome² de chaque cellule de l'échantillon tissulaire. « Nous déterminons les gènes surexprimés ou sous-exprimés dans diverses populations de cellules stromales³ irradiées, ainsi que les voies de signalisation sur lesquelles agir pour rétablir leur expression normale. »

L'efficacité de ces voies de régulation est testée à l'aide d'un dispositif expérimental singulier : des versions simplifiées et miniatures de côlon, appelées organoïdes. Pour fabriquer ces organoïdes coliques, les expérimentateurs placent des cellules souches dans une matrice – un dôme d'hydrogel – avec des substances stimulant leur prolifération et leur différenciation. Au bout d'une semaine, les cellules s'organisent spontanément en une structure 3D qui mime l'architecture de l'organe.

Organoïde de côlon – version simplifiée et miniature de cet organe – observé au microscope. Constitué de différents types de cellules – souches, progénitrices, différenciées –, ce mini-organe mime la structure d'un véritable côlon.

Ces mini-côlons sont associés à des cellules issues de souris irradiées. L'objectif de cette culture simultanée : comprendre comment les cellules stromales agissent sur le développement de l'épithélium intestinal lors d'une radiothérapie pelvienne.

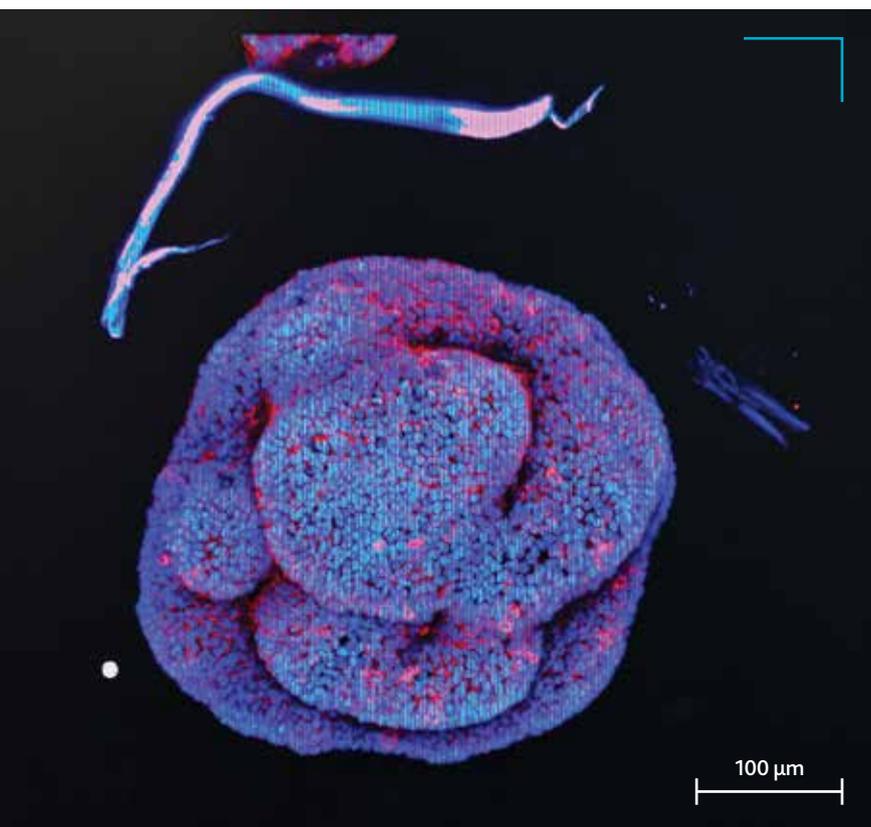
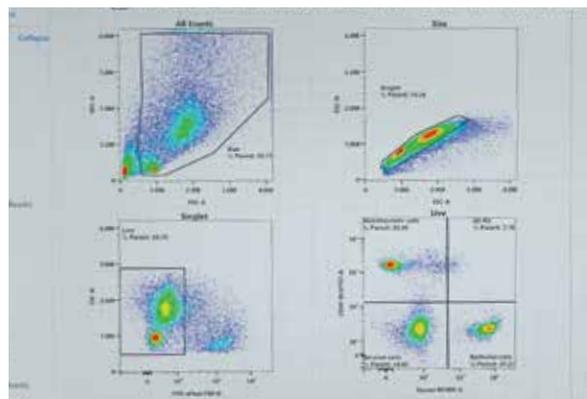
Dans les prochains mois, plusieurs molécules seront testées sur des organoïdes coliques. Si certaines parviennent à restaurer les fonctionnalités de l'épithélium intestinal, elles seront expérimentées chez l'animal. ■

1. Cellules recouvrant l'intestin et formant l'épithélium intestinal chargées d'absorber des nutriments.
2. Ensemble des ARN issus de la transcription du génome. La caractérisation du transcriptome dans un tissu permet d'identifier les gènes actifs et les mécanismes de régulation associés.
3. Catégorie de cellules contribuant à la structuration anatomique des organes.



Une culture sous étroite surveillance

La technicienne Claire Squiban installe une plaque de culture d'organoïdes intestinaux dans un incubateur. Ce dernier est couplé à un appareil qui prend des photos des organoïdes toutes les six heures. Différents paramètres – taille, quantité, forme et capacité de différenciation – sont suivis. L'expérience est répétée en présence de cellules stromales irradiées ou non, afin d'évaluer leur rôle sur la formation des organoïdes.



Carte d'identité cellulaire

Une suspension cellulaire, issue d'un micro-environnement stromal de souris, est analysée par cytométrie en flux spectral. Cette technique mesure divers paramètres de chaque cellule – taille, granulométrie, niveau d'expression des protéines situées à leur surface... – en faisant passer des dizaines de milliers de cellules une à une devant plusieurs faisceaux laser. Les distributions de ces paramètres sont affichées selon différents critères mesurés.



Visualisation des altérations

Valérie Buard, technicienne responsable de la plateforme de microscopie, mesure le niveau d'altération de l'épithélium d'un côlon de souris après une irradiation sur une image numérique de microscopie. Un marquage localise les protéines de jonctions cellulaires. Leur présence dans le tissu épithélial renseigne sur le niveau d'étanchéité du côlon vis-à-vis du milieu extérieur.



Le rôle du micro-environnement révélé

Martin Jestin, doctorant au LRMed, suit la prolifération en temps réel de trois séries d'organoïdes intestinaux. Cette étude comparative montre que les cellules du micro-environnement stromal irradiées conduisent à un emballement de la croissance des organoïdes. Il discute avec Noëlle Mathieu, sa directrice de thèse, d'un schéma qui résume ce processus.

Explorer l'expression génique de chaque cellule

Georges Tarlet, technicien au LRMed, réalise une manipulation de type « Single Cell ». Cette technique de séquençage sur cellule unique, réalisée sur des milliers de cellules, mesure simultanément l'expression de milliers de gènes. Martin Jestin l'utilise pour identifier des molécules impliquées dans la régénération épithéliale après irradiation.

Reportage photo : © Sylvain Renard/Médiathèque IRSN

© Célia Coumard/Médiathèque IRSN

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