

REPÈRES

FAITS ET PERSPECTIVES

Radiothérapie : quels effets
sur la tumeur et les tissus sains ?

REPORTAGE

Risque incendie : des expériences
sur des câbles électriques

DOSSIER

Générateurs de vapeur
La sûreté de la fabrication à l'exploitation

Dans le magazine Pour la science

En janvier 2013, une fuite de gaz dans l'usine chimique Lubrizol à Rouen (Seine-Maritime) déclenche une situation de crise. Comment s'organise la coopération entre les divers acteurs qui contribuent à protéger les populations et l'environnement lors d'une telle situation ?

Le huitième cahiers de l'IRSN dans le magazine *Pour la science*, aborde la recherche menée à la suite de cet accident. Avec l'ensemble des cahiers, ce sujet illustre la diversité de la recherche de l'Institut. À découvrir sur www.pourlascience.fr/auteur/irsn



Portraits de femmes ingénieures

Radiochimiste, ingénieure en génie atomique, chercheuse en physique... Découvrez des parcours de femmes ingénieures à l'IRSN

grâce à leurs portraits sur le site [jobteaser](http://jobteaser.fr).

Sous la forme d'interview, apprenez-en plus sur deux scientifiques de l'Institut, Salma Gasmi et Muriel Rocher. Sur ce site, vous accéderez aussi à des offres de stages et d'emploi.

www.irsn.fr/jobteaser



Art et science

Cette photo de grenouille a participé à un concours de beauté. Plus précisément au concours « La beauté cachée de la science ». Il s'agit d'un cliché d'une rainette arboricole prise à Fukushima par Jean-Marc Bonzom, écotoxicologue à l'IRSN. Il est arrivé deuxième à ce concours d'images scientifiques organisé par l'ambassade de France au Japon. Pour en savoir plus

sur cette prise de vue intitulée *Du vert dans la pénombre* et les recherches menées par ce scientifique, rendez-vous sur irsn.fr.

www.irsn.fr/concours-photo-2021



En vidéo : effets sanitaires du tritium

Effets biologiques et sanitaires du tritium, rejet dans l'environnement, niveau dans l'eau de boisson... ces thèmes sont abordés à l'occasion d'une journée d'échanges sur ce radionucléide rejeté par les installations nucléaires. Vous pouvez la suivre grâce à une vidéo où interviennent des experts de l'IRSN, des instituts de recherche et des associations. Rendez-vous sur la playlist de la chaîne Youtube de l'IRSN. www.youtube.com/watch?v=f-cO231uLiOQ&list=PLRFAfIk-h_hBYeRd5NkBay7fZigtWMOXA

Agenda

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

25 au 29 avril 2022

Cracovie (Pologne)

IM2022 et NEUDOS-14

Au printemps prochain, l'IRSN partira à la rencontre des professionnels européens de la dosimétrie des rayonnements ionisants. Échangez avec ses experts à l'occasion de deux événements : la conférence internationale sur le suivi individuel de radiations ionisantes et le symposium sur la dosimétrie liée aux neutrons et aux ions.

Plus d'informations : <https://imneudos.jordan.pl/en>

19 au 20 mai 2022

Lyon (Rhône)

RP Cirkus

PCR, acteurs de la radioprotection, venez rencontrer les experts en dosimétrie de l'IRSN lors des prochaines journées techniques de RadioProtection Cirkus. Présents avec un camion d'anthroporadiométrie, ils partageront avec vous des informations pratiques et opérationnelles sur leur stand.

Plus d'informations : www.rpcirkus.org/fr/26-liens/399-4emes-jt

Abonnement

POUR VOUS ABONNER :
www.irsn.fr

Rubrique l'IRSN > Publications
> Magazine Repères

ERRATUM

Une erreur s'est glissée dans le Repères numéro 51. Dans le reportage en page 22, il fallait lire que le pH d'un ciment classique avoisine 13 (en bas de la colonne de gauche).

Online WEBMAG

www.irsn.fr/R52

PODCAST



Faits et perspectives
Radiothérapie pulmonaire : les effets secondaires

VIDÉO



Dossier
Usine de forge du Creusot : diagnostic organisationnel

À LIRE



Dossier
L'usure des tubes : les recherches internationales

DIAPORAMA



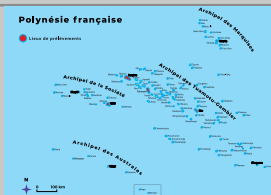
Reportage
Étudier les feux de câbles à moyenne échelle

Sommaire

En couverture : Les experts de l'IRSN, Jean-Marc Decitre (à gauche) et Thierry Sollier (au centre), discutent des contrôles des générateurs de vapeur avec un ingénieur de Framatome, à l'usine de Saint-Marcel (Saône-et-Loire).

P.4 TEMPS FORTS

Polynésie française
Des niveaux de radioactivité
similaires aux années
précédentes



Urgences radiologiques et nucléaires
L'IRSN devient centre collaboratif pour l'AIEA

P.6 FAITS ET PERSPECTIVES

Radiothérapie
Explorer les effets sur la tumeur
et les tissus sains

P.9 ZOOM

Un coup de chaud

DOSSIER P.10

Dossier du prochain N° :
Exposition des travailleurs :
quelles évolutions ?

Générateurs de vapeur
La sûreté de la fabrication à l'exploitation

P.17 EN PRATIQUE

Centrales nucléaires
Les contrôles des exploitants sont suivis

P.20 INTÉRÊT PUBLIC

Accident nucléaire et santé :
les questions de la société civile



P.22 REPORTAGE

Risque incendie
Des expériences sur des câbles électriques



Générateur de vapeur L'IRSN veille

Plusieurs événements impliquant des générateurs de vapeur marquent l'histoire de la sûreté. En 1982, un tube de générateur de vapeur d'une centrale dans l'État de New York aux États-Unis se rompt, ce qui occasionne des rejets radioactifs dans l'environnement et une situation d'urgence. En 2012, l'usure précoce de ces tubes dans une centrale en Californie conduit à sa fermeture. En 2016, la chute d'un générateur lors de son remplacement à la centrale de Paluel (Seine-Maritime) entraîne deux ans d'arrêt du réacteur.

Repères consacre le dossier de ce numéro à cet objet de haute technologie, dont la fabrication nécessite plus de cinq ans. Pour veiller à sa sûreté – de la fabrication au démantèlement –, des experts et des chercheurs sont mobilisés : chimie, corrosion, mécanique, métallurgie, thermohydraulique, contrôles non destructifs. Les équipes de crise s'entraînent à réagir en cas d'accident de rupture de tube d'un générateur.

Dans les années à venir, ces spécialistes auront un nouveau défi à relever. La conception des petits réacteurs modulaires, plus compacts que les conventionnels, progresse. À l'IRSN de s'emparer par la suite de cette nouvelle génération d'échangeurs pour expertiser leur sûreté, tout au long de leur cycle de vie.

Olivier Dubois

Directeur adjoint de l'expertise de sûreté

REPÈRES – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – Membre d'ETSON – 31, avenue de la Division-Lederc, 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 Rouleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Octavia Verly, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Valérie Delchambre – 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) – janvier 2022.

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Politique handicap Un cinquième accord à l'œuvre

Depuis avril 2021, Hugo Sánchez-Reyes, sismologue, travaille au sein d'une équipe de vingt spécialistes des séismes. Pour réussir l'accueil de cet ingénieur de trente-deux ans en situation de handicap, son poste de travail bénéficie d'adaptations. Son intégration fait suite au nouvel accord – le cinquième en douze ans – signé en juin 2021. Il entérine plusieurs avancées. Pour commencer, les équipes qui accueillent une personne en situation de handicap sont accompagnées et formées. Le poste de travail, sur site ou en télétravail, est aménagé selon les recommandations d'un avis médical. Les équipements – fauteuils, prothèses – sont partiellement pris en charge. Enfin, un diagnostic est mis en œuvre en cas d'évolution de l'état du salarié. Depuis 2009, l'Institut intègre de manière volontariste des personnes en situation de handicap. Ceci s'inscrit dans sa politique de responsabilité sociétale des entreprises (RSE). Favoriser l'accueil de tous est un des axes de sa stratégie pour améliorer la qualité de vie au travail.

GÉNÉRATEURS DE VAPEUR

63

C'est le nombre d'avis rendus par l'IRSN à propos des générateurs de vapeur (GV) entre 2007 et 2021.

25 ans

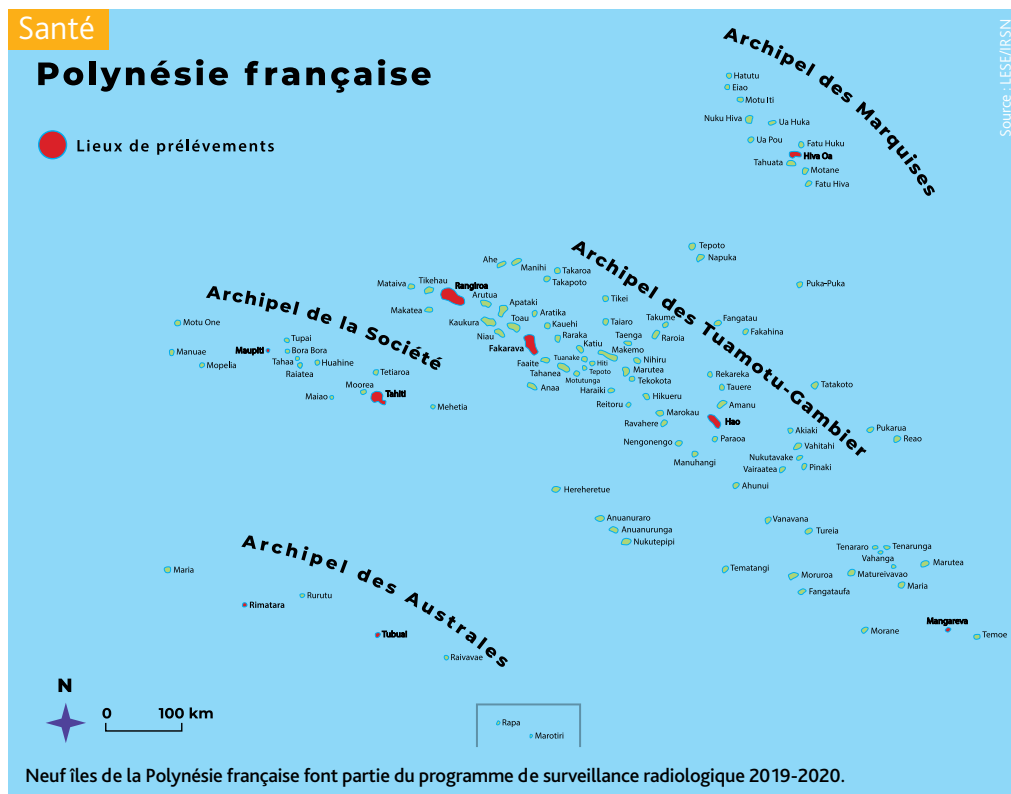
Les experts bénéficient d'un quart de siècle de retour d'expérience sur l'analyse des dépôts observés en fond de GV.

Retrouver le dossier
« Générateurs de vapeur » en page 10.

Santé

Polynésie française

 Lieux de prélèvements



Neuf îles de la Polynésie française font partie du programme de surveillance radiologique 2019-2020.

Polynésie française

Les niveaux de radioactivité similaires aux années précédentes

En Polynésie française, les niveaux de radioactivité mesurés dans les différents milieux – atmosphérique, terrestre et marin – sont dans la continuité de ceux des années antérieures, indique le bilan radiologique 2019-2020. Ils sont très faibles : environ 0,1 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans l'air, 0,1 à 1 Bq/kg dans les denrées alimentaires et dans les sols. Cette radioactivité résiduelle est essentiellement attribuable au césium 137. La dose efficace annuelle pour les adultes de Tahiti est d'environ 1,4 mSv/an, hors exposition médicale. La part de la radioactivité artificielle est de l'ordre de 0,1 %.

Résultats accessibles au public

La réalisation depuis 2015 des inventaires de la radioactivité dans les sols des îles hautes – Marquises, Australes, Société et Gambier – permet d'évaluer la rémanence du césium 137, des plutoniums 238, 239 et 240 et de l'américium 241. Elle aide aussi à caractériser l'origine de la radioactivité et à déterminer la proportion des retombées globales sur l'hémisphère sud et celle des retombées locales, dues aux essais français d'armes nucléaires.

Ces résultats montrent une composante locale plus importante pour les îles de Raiatea et des Gambier que pour les autres îles hautes étudiées. Ainsi, aux Gambier, 90 % des retombées en plutonium résultent des essais nucléaires atmosphériques de Moruroa et de Fangataufa, menés entre 1966 et 1974. Depuis 2020, les résultats des mesures en Polynésie française sont accessibles au public sur le site du Réseau national de mesures (RNM).

* Bilan de la surveillance de la radioactivité en Polynésie française en 2019-2020.

WWW Pour en savoir plus :
Réseau national de mesures
www.mesure-radioactivite.fr
L'exposition de la population française à la radioactivité www.irs.fr/expoRI-Dossier



Prélèvement d'aérosols à Vairao, presqu'île de Tahiti.

Santé

Modélisation de la distribution des rayons gamma (en magenta), 1,4 milliseconde après un flash gamma terrestre.

© Nasa/Coddard Space Flight Center/J. Dwyer, Florida Inst. Of Technology

“ Les flashes gamma terrestres sont liés à l'accélération des électrons au cœur des orages.

Exposition des personnels navigants

Quel est l'impact des flashes gamma terrestres ?

Les flashes gamma terrestres sont produits par des phénomènes électriques intenses localisés dans la partie haute des orages. Ces événements radiatifs sont très énergétiques. Quel est l'impact de ces émissions, découvertes dans les années 1990, sur l'exposition aux rayonnements des personnels navigants ?

Pour répondre à cette question, des simulations et des programmes de mesure sont lancés pour mieux comprendre et caractériser ces phénomènes.

Un spectromètre gamma à haute fréquence a été développé pour les mesures sous ballon stratosphérique. Cet appareil est embarqué dans le cadre d'une campagne du Centre

national d'études spatiales (Cnes). Après un décollage fin novembre 2021 depuis les Seychelles, il doit effectuer un tour du monde de trois mois au-dessus de la région intertropicale, où ces phénomènes sont les plus fréquents.

Ces recherches* sont menées par Mélody Pallu, doctorante en sciences et vie de l'univers, dans le cadre d'une collaboration entre le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Air France et le Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) de l'IRSN.

* Financées par Air France et le Cnes.

www Pour en savoir plus : www.irsn.fr/These-Pallu

Vie de l'Institut



Le Centre des incidents et des urgences de l'AIEA.

Urgences radiologiques et nucléaires

L'IRSN devient centre collaboratif pour l'AIEA

Irradiation de professionnels en Bulgarie en 2011, surexposition accidentelle de patients au Pérou en 2019... Quand ces situations surviennent, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) mobilise les experts de l'IRSN pour apporter une assistance médicale et sanitaire dans le cadre du Réseau d'intervention et d'assistance (Ranet). L'IRSN vient d'être désigné centre collaboratif de l'AIEA pour la préparation et la réponse aux urgences radiologiques et nucléaires, avec les hôpitaux participant à cette réponse. Cela porte à huit le nombre de ces

centres dans le monde. Le but est de diffuser et d'harmoniser les bonnes pratiques à l'international : dispensation de formations, publications de recommandations, coordination de la mobilisation...

En cas d'accident, physiciens, dosimétristes et radiopathologistes travaillent avec des cliniciens. Ils élaborent le pronostic et proposent des stratégies thérapeutiques. Ces dernières années, plus de dix victimes sévèrement irradiées ont été prises en charge.

www Pour en savoir plus : www.iaea.org/about/organizational-structure/

Responsabilité sociétale

L'Institut s'engage pour le climat

Comment sensibiliser à l'empreinte carbone ? À l'aide d'une fresque... Pour renforcer ses engagements en matière de développement durable et sa politique de responsabilité sociétale des entreprises (RSE), l'IRSN organise des fresques du climat¹ sur l'ensemble de ses sites. Ce jeu de cartes est élaboré sur la base des constats du Giec². Il aide à mieux appréhender les corrélations entre les activités humaines et les évolutions climatiques. Plus de 200 000 participants dans soixante pays sont aujourd'hui enregistrés. Les universités, les entreprises et le secteur public contribuent largement à cette dynamique.

« Avec la fresque du climat, il est possible d'apprendre, de partager et d'échanger sur les causes du changement climatique. Cette démarche est une première sensibilisation pour mieux comprendre que nous sommes tous en capacité d'agir », explique Valérie Marchal, déléguée à la RSE. La dynamique engagée fait écho aux responsabilités de l'Institut dans le domaine de l'environnement.

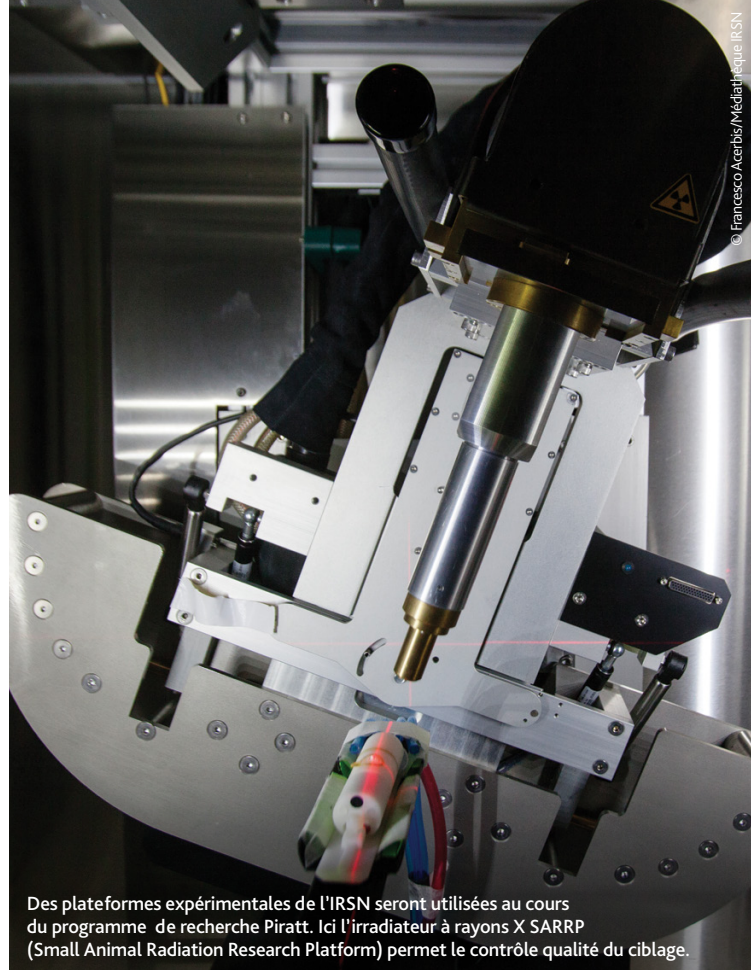
1. fresqueduclimat.org

2. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) est un organisme intergouvernemental ouvert à tous les pays membres de l'Organisation des nations unies.

FAITS ET PERSPECTIVES



À Gustave Roussy, 4 000 traitements de radiothérapie sont effectués chaque année.



Des plateformes expérimentales de l'IRSN seront utilisées au cours du programme de recherche Piratt. Ici l'irradiateur à rayons X SARRP (Small Animal Radiation Research Platform) permet le contrôle qualité du ciblage.

Radiothérapie

Explorer les effets sur la tumeur et les tissus sains

La radiothérapie vise à détruire les cellules cancéreuses. Mais elle peut aussi endommager les tissus sains dans la zone de traitement. Lancé conjointement par Gustave Roussy et l'IRSN, le nouveau programme de recherche Piratt étudie ces effets délétères.

La radiothérapie est utilisée chez plus d'un patient sur deux atteint de cancer en France, soit chez plus de 200 000 patients par an. Son but est de délivrer des doses d'irradiation élevées, nécessaires au bon contrôle de la tumeur, en évitant au mieux les tissus sains environnants. La balance bénéfice-risque est un enjeu essentiel pour le patient. Elle est au cœur des préoccupations des radiothérapeutes et des chercheurs radiobiologistes de l'institut Gustave Roussy à Villejuif (Val-de-Marne) et de l'IRSN.

Issu d'une volonté conjointe de réunir les compétences de chaque institut, le projet Piratt (Projet intégré de recherche préclinique sur la radiobiologie des tumeurs et des tissus sains) est initié en 2018.

Ce partenariat est consolidé en janvier 2021 par la signature d'un accord-cadre entre les directions des deux instituts et pour une durée de cinq ans. Gustave Roussy est considéré comme l'un des meilleurs hôpitaux spécialisés en cancérologie au monde. Il est à la pointe de la radiothérapie clinique – avec 4 000 traitements de ce type effectués chaque année – et de la recherche préclinique, notamment sur les associations radiothérapie-immunothérapie-thérapies ciblées.

La réponse des tissus sains

Une des ambitions de Piratt est de mettre en place une recherche collaborative innovante, en phase avec l'évolution des techniques et des pratiques de radiothérapie modernes

et des enjeux de radioprotection des tissus sains. Ce travail collectif privilégié implique, côté IRSN, les chercheurs du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales (LREM), dirigé par Fabien Milliat. En face se trouvent les médecins et chercheurs du département de radiothérapie et de l'unité Inserm UMR 1030, Radiothérapie moléculaire et innovation thérapeutique, que dirige Éric Deutsch, oncologue radiothérapeute.

À travers le partage et l'échange de méthodes et d'outils, ainsi qu'une culture commune de concepts en radiobiologie, un des enjeux de Piratt consiste à travailler en commun autour de cinq thèmes majeurs, d'intérêt pour les deux instituts dans les prochaines années. Ils vont étudier la réponse des tumeurs et des tissus sains aux doses ablatives – fortes doses délivrées en une fraction unique ou en quelques fractions – pouvant enlever les tissus touchés. Ils vont explorer les nouvelles approches thérapeutiques et le rôle des microorganismes du tractus digestif dans la toxicité digestive. De plus, ils étudieront

la radiorésistance et la radiosensibilité des tumeurs et des tissus sains grâce à de nouvelles mesures d'efficacité biologique relative (EBR) (*lire p. 8*). Piratt inclut des aspects précliniques et cliniques de l'ostéo-radionécrose, cette complication sévère de la radiothérapie liée à un défaut de cicatrisation du tissu osseux.

Enfin, il s'intéressera à l'imagerie et à la radiomique¹ préclinique.

Des réponses conjointes à des appels d'offres nationaux et internationaux permettent aux chercheurs de travailler sur ces sujets, en bénéficiant des infrastructures précliniques de pointe des instituts. Cette démarche, initiée il y a quelques années, est désormais fructueuse.

Plusieurs projets financés par l'Institut national du cancer (Inca) ou le Cancéropôle Île-de-France sont lancés ainsi que de multiples thèses. L'une d'elles étudie le rôle des cellules immunitaires myéloïdes dans le cancer du poumon exposé à des doses ablatives d'irradiation.

L'immunité impliquée

Que pourrait être un tel projet commun ? Pendant longtemps, la radiothérapie a été considérée comme simplement toxique pour les cellules : les rayonnements ionisants, en déposant leur énergie dans la matière vivante, provoqueraient exclusivement la mort cellulaire par des cassures de l'ADN irréparables et létales. Aujourd'hui, il est admis qu'elle a d'autres effets biologiques. Complexes et multiples, ils influencent la balance bénéfice-risque de façon importante. La radiothérapie peut par exemple réorienter profondément la réponse immunitaire vis-à-vis de la tumeur. Le système immunitaire est lui-même considéré comme un acteur essentiel de la survenue d'une toxicité aux tissus après l'irradiation, sans que l'on connaisse précisément les mécanismes impliqués.

Ces effets sur le système immunitaire, tant sur les tumeurs que les tissus sains, dépendent des paramètres liés à l'exposition radiologique. Y contribuent la dose totale délivrée, le volume irradié et la dose par fraction.

La radiothérapie stéréotaxique est une technique moderne. Sa particularité est qu'elle délivre de fortes doses par fraction – doses dites ablatives – sur des petits volumes. Elle est aujourd'hui en pleine expansion pour traiter des patients atteints de tumeurs cérébrales, hépatiques ou encore pulmonaires.

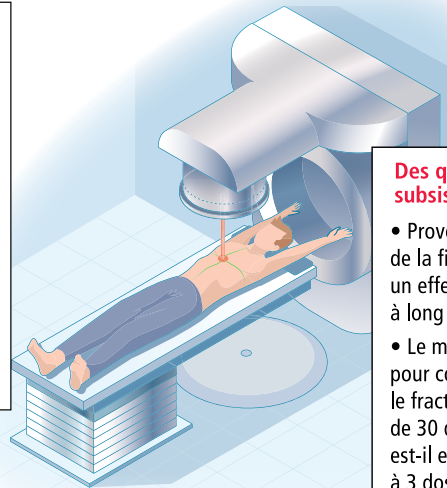
PROCESS

La radiothérapie pulmonaire stéréotaxique : des recherches pour mieux comprendre ses effets

L'irradiation pulmonaire stéréotaxique délivre de fortes doses par fractions de radiations à de minuscules volumes de tissu. Le recours à cette technique très précise progresse depuis plusieurs années. La recherche explore ses effets.

Les avantages de cette technique

- L'irradiation de la tumeur est précise.
- Les tissus sains sont préservés.
- Avec moins de séances, les déplacements du patient sont diminués.
- Les effets secondaires à court terme, telles les pneumopathies aiguës, sont mieux tolérés.



Des questions subsistent

- Provoque-t-elle de la fibrose pulmonaire, un effet secondaire à long terme ?
- Le modèle¹ utilisé pour comparer le fractionnement de 30 doses de 2 Gy est-il extrapolable à 3 doses de 20 Gy ?
- Comment l'hypofractionnement² agit-il sur le système immunitaire ?
- Faut-il rendre cette technique accessible aux patients opérables ?

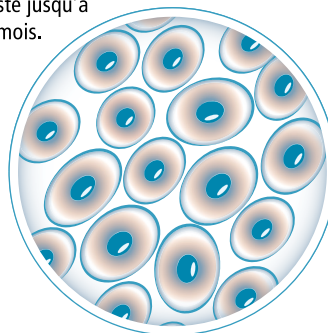
Pascal H. est atteint d'un cancer pulmonaire inopérable. Il est traité par **irradiation stéréotaxique avec trois séances** délivrant chacune 20 Gy. Avec un protocole traditionnel et des doses quotidiennes de 2 Gy par fraction, les médecins auraient pratiqué plus d'une trentaine de séances de radiothérapie.



La recherche préclinique contribue à mieux comprendre ces processus et à améliorer la balance bénéfice-risque.

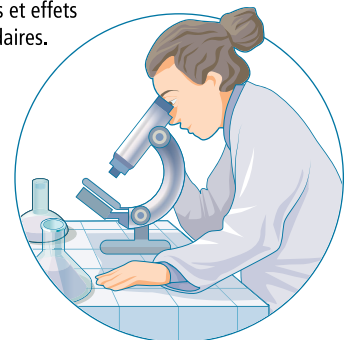
Des effets secondaires

En 2020, des travaux révèlent³ que l'irradiation stéréotaxique induit la sénescence. Ce **vieillessement touche les cellules** des poumons et du système immunitaire. L'effet persiste jusqu'à vingt-et-un mois.



Des recherches en cours

Le projet **Piratt⁴** étudie les **réponses cellulaires des tumeurs et des tissus sains**. Il explore par exemple la protection des tissus sains et cherche à prédire les éventuels risques et effets secondaires.

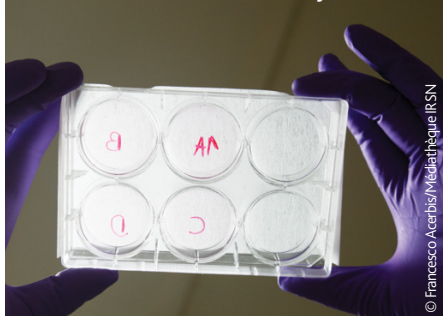


1. Ce modèle radiobiologique compare les protocoles de fractionnement de la dose en clinique et en recherche.
2. L'hypofractionnement consiste à diminuer le nombre de séances.

3. Soysouvanh F et al. (2020) Int J Radiat Oncol Biol Phys.
4. Projet intégré de recherche préclinique sur la radiobiologie des tumeurs et des tissus sains, mené par Gustave Roussy à Villejuif (Val-de-Marne) et l'IRSN depuis janvier 2021.

FAITS ET PERSPECTIVES

Les cellules endothéliales humaines destinées à être irradiées dans un irradiateur à rayons X.



© Francesco Acerbi/Médiateur IRSN

Mieux comprendre les effets de la radiothérapie stéréotaxique pulmonaire sur le système immunitaire ouvrira plusieurs perspectives. Cela permettra de la combiner de manière optimale avec des agents immunomodulateurs² pour augmenter le bénéfice thérapeutique. De plus, il faut trouver des moyens pour protéger les tissus sains. Ce thème de Piratt fait aujourd'hui l'objet de projets de recherche collaboratifs soutenus par l'Inca³ et le Cancéropôle Île-de-France⁴ et de plusieurs thèses⁵. ■

1. Discipline visant à mieux caractériser les tumeurs, basée sur l'analyse d'un grand nombre de données fournies par l'imagerie, afin de les transformer en données numériques.
2. Un traitement immunomodulateur stimule ou freine les réactions du système immunitaire.
3. Inca PLBIO « Biologie et sciences du cancer » (2018-2023).
4. « Rôle des cellules myéloïdes dans le cancer du poumon exposé à des doses ablatives d'irradiation », Projet Emergence (2021-2022), thèse de Marina Millic.
5. Thèses : « Effet abscopal in situ : modulation spatio-temporelle du micro-environnement immunitaire tumoral après une irradiation tumorale partielle en conditions stéréotaxiques », Paul Bergeron ; « Rôle des macrophages dans le développement des lésions pulmonaires après irradiation stéréotaxique », Sarah Braga-Cohen.



Pour en savoir plus :

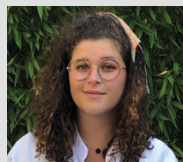
« L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et Gustave Roussy s'unissent pour la recherche préclinique en radiothérapie »
www.irsns.fr/Actu-IRSN-GR-2020



WEBMAGAZINE

Ma thèse en connaît un rayon

www.irsns.fr/R47



PODCAST

Sarah Braga-Cohen

Radiothérapie pulmonaire : les effets secondaires

Quel est l'intérêt d'associer Gustave Roussy et l'IRSN dans le projet Piratt ?

Nos expertises sont complémentaires. À Gustave Roussy (GR), nous étudions la radiosensibilité des tumeurs et les mécanismes de réponse aux traitements. Les chercheurs de l'Institut travaillent sur la réponse des tissus sains. Ils disposent de plateformes d'irradiation, d'histopathologie. Ils apportent une expertise en épidémiologie, modélisation et dosimétrie biologique. Ce projet leur donne

l'opportunité d'interagir avec des praticiens, des biologistes et des physiciens médicaux à l'hôpital qui se posent des questions cliniques.

Quelles sont les thématiques de recherche communes ?

Ensemble, nous avons mis en place des modèles d'irradiation des tumeurs des poumons en conditions stéréotaxiques. Ils seront utiles pour évaluer la réponse de la tumeur, des tissus sains et du système immunitaire.

Quels bénéfices pour les patients ?

La radiothérapie est le deuxième contributeur à la guérison définitive des malades. Il est nécessaire de comprendre comment elle fonctionne et de connaître l'impact des nouvelles combinaisons de traitements en développement qui l'incluent, par exemple celles l'associant à l'immunothérapie. Piratt a pour objectif d'optimiser à terme les traitements. Il permettra d'évaluer les différentes stratégies thérapeutiques et d'aider les praticiens à prioriser l'une ou l'autre. Ces travaux pourraient déboucher sur la validation de nouvelles approches thérapeutiques.

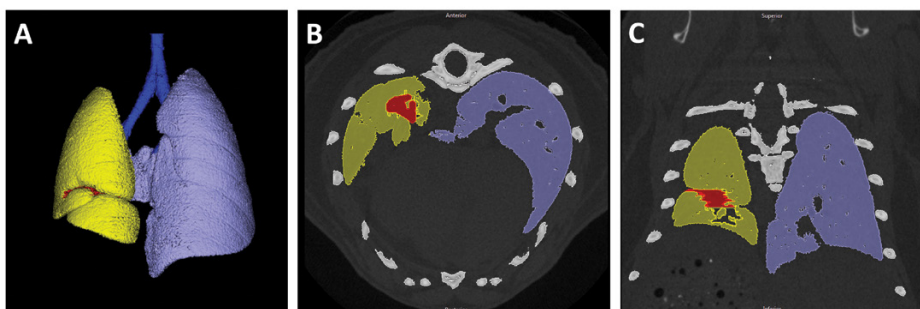
3 questions à...

Éric Deutsch

Chef du département de radiothérapie de Gustave Roussy (GR)



© Gustave Roussy



Suivi des lésions pulmonaires (en rouge) par imagerie après une irradiation en conditions stéréotaxiques. Ces modèles précliniques chez la souris serviront à étudier *in vivo* les effets du fractionnement de la dose.

© Morgane Dos Santos et Fabien Milliat/IRSN

AILLEURS

Pourquoi utiliser l'efficacité biologique relative ?

Mieux comprendre la différence des réponses des cellules saines et tumorales, afin de mieux prédire la réponse des tumeurs et des tissus sains à une radiothérapie, sont deux thèmes intégrés au projet Piratt (lire p. 6). Pour y parvenir, les chercheurs utilisent le concept d'efficacité biologique relative (EBR). Celui-ci permet de comparer deux types de rayonnement ou d'exposition conduisant au même effet biologique. À ce jour, l'EBR est une valeur empirique, dépendant, entre autres, de l'effet mesuré. Ses mesures étaient fondées sur un ancien

paradigme : la radiothérapie aurait un effet sur la mort cellulaire uniquement. Or les répercussions de cette technique sont multiples : activation du système vasculaire, modification de l'expression des gènes, réorientation du système immunitaire... Pour prédire de façon plus réaliste les effets biologiques et leur probabilité d'apparition, il faut développer des mesures à paramètres multiples pour l'EBR. Elles devront tenir compte des préoccupations liées aux nouvelles techniques et pratiques en radiothérapie, telles les modifications de fractionnement ou du débit de dose.



20 μm

Un coup de chaud

Séverine Guilbert

Chercheuse en chimie des matériaux

Ces fils entrelacés pourraient être ceux d'une écharpe. Il s'agit en fait d'une image en microscopie optique d'un échantillon de gaine combustible, la première barrière qui confine la radioactivité dans un réacteur nucléaire. Cette structure dite de « Widmanstätten » est obtenue après refroidissement brutal d'alliage de zirconium chauffé à très haute température.

En cas de brèche sur le circuit de refroidissement d'un réacteur, le cœur peut être momentanément dénoyé avant l'injection d'eau froide pour rétablir l'évacuation de

la puissance résiduelle. En l'absence de ce moyen de réfrigération, la température augmente et la gaine s'oxyde. L'oxygène issu de la vapeur d'eau pénètre de la surface vers l'intérieur du matériau métallique, ce qui le fragilise. Les « fils » sur la photo révèlent les régions où l'oxygène s'est concentré lorsque la température a baissé.

Cette image provient du programme Aloe (Analysis of LOCA Embrittlement, Analyse de l'endommagement en cas d'accident de perte de réfrigérant primaire), mené au Laboratoire d'expérimentation en mécanique et

matériaux (LE2M) de l'IRSN, à Cadarache, situé dans les Bouches-du-Rhône. En soumettant des échantillons de la gaine aux conditions représentatives d'un accident, ce programme vise à vérifier que les critères retenus dans les études de sûreté suffisent pour garantir son intégrité. Il est porté par un chercheur en chimie des matériaux et une technicienne physico-chimiste. Après avoir porté des échantillons à haute température, ils réalisent trois caractérisations : une microstructurale – en microscopie –, une chimique et une mécanique. ■

DOSSIER

Les contrôles non destructifs (CND) sont très importants pour la sûreté des générateurs de vapeur. Dans l'usine Framatome à Saint-Marcel (Saône-et-Loire), les experts de l'IRSN échangent avec un ingénieur de l'industriel sur le procédé de contrôle par ultrasons. Pour effectuer ce CND, un robot, derrière l'expert du milieu, muni de pattes magnétisées parcourt l'ensemble de la soudure.

3 500 à 5 600

tubes métalliques composent la surface d'échange thermique dans le générateur de vapeur, soit l'équivalent d'un terrain de football.

Générateurs de vapeur

La sûreté de la fabrication à l'exploitation

Les générateurs de vapeur extraient la puissance calorifique du circuit primaire pour produire de l'électricité. Les tubes qui les constituent sont aussi une barrière de confinement des matières radioactives. Anomalies de composition de l'acier, risque d'usure et d'encrassement des tubes... De leur fabrication à leur exploitation, ils font l'objet d'expertises et de recherches.

© Jean-Marie Huron/Signatures Média/IRSN



Le générateur de vapeur (GV) refroidit le cœur du réacteur et contribue à la production électrique. Remplacement d'un GV de la centrale de Cruas-Meysses (Ardèche).



Les parois des tubes des générateurs de vapeur font 1 mm d'épaisseur. Les échanges thermiques nécessaires à la production de l'électricité sont ainsi très performants. C'est aussi un facteur de fragilité, très surveillé.

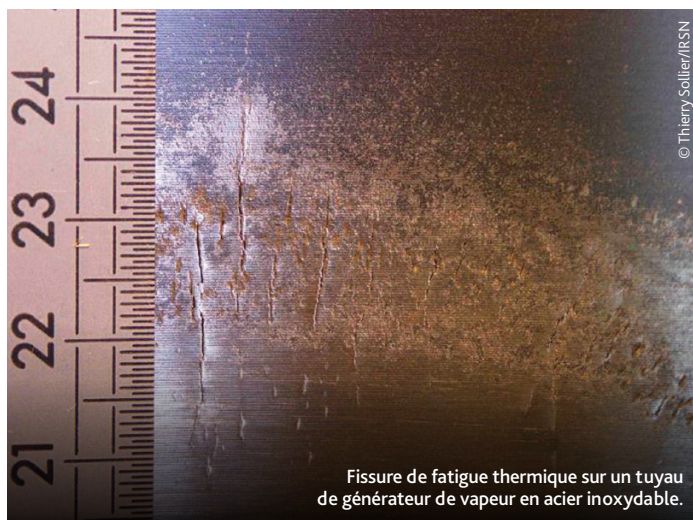
© Joseph Gobin/Média/IRSN

Le 7 avril 2015, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) rend publique une anomalie relative à la composition de l'acier dans certaines zones de la cuve du réacteur de l'EPR de Flamanville (Manche). Cette anomalie – une trop forte teneur en carbone par endroits – touche aussi les aciers des fonds de générateurs de vapeur (GV) de dix-huit centrales françaises. Depuis 2006, l'IRSN a émis soixante-trois avis sur les GV : fabrication, installation, démantèlement, renouvellement. Dans ce dossier, *Repères* fait le point sur ces suivis, expertises et recommandations pour améliorer la sûreté de ce composant essentiel des réacteurs à eau sous pression (REP).

Dans un REP, deux circuits – primaire et secondaire – confinent la radioactivité dans le milieu primaire et fournissent la vapeur qui alimente la turbine. Leur point de rencontre – le GV – transfère la chaleur du circuit primaire vers l'eau du secondaire. Vaporisée, celle-ci entraîne la turbine. « *Un accident redouté est une contamination du circuit secondaire au niveau du GV, et des rejets possibles dans l'environnement* », explique Thierry Sollier, expert en contrôles non destructifs (CND). Pour l'éviter, l'exploitant évalue si des défauts constatés pourraient compromettre la sûreté. L'IRSN les expertise sur saisine de l'ASN.

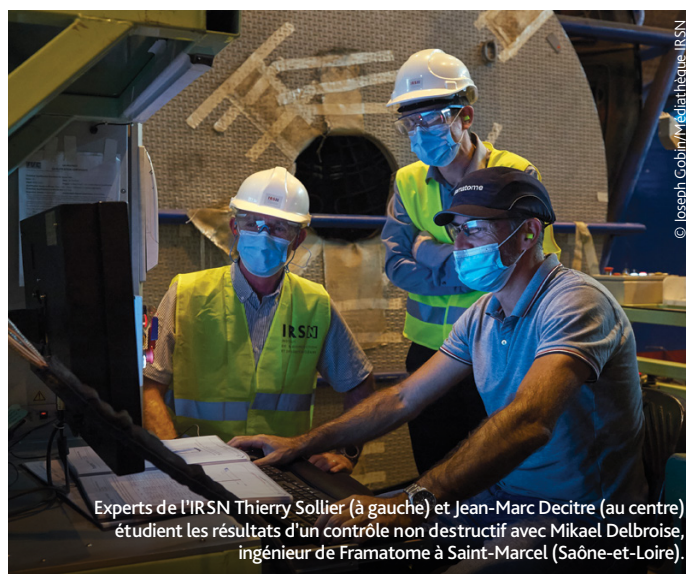
Fabrication : écarts sous surveillance

En 2015, les anomalies de teneur en carbone créent une situation tendue. L'enjeu est fort : l'arrêt possible de plusieurs réacteurs. Nathalie Stenne, experte des équipements mécaniques, se souvient : « *Notre équipe a travaillé d'arrache-pied pendant trois mois pour examiner les dossiers d'EDF.* » Les experts analysent trois points techniques. Ils étudient l'évaluation par l'industriel de la taille et de la répartition des défauts en utilisant des CND. Puis, ils examinent les propriétés mécaniques du matériau des GV. Enfin, ils valident les évolutions de pression et de température



Fissure de fatigue thermique sur un tuyau de générateur de vapeur en acier inoxydable.

© Thierry Sollier/IRSN



Experts de l'IRSN Thierry Sollier (à gauche) et Jean-Marc Decitre (au centre) étudient les résultats d'un contrôle non destructif avec Mikael Delbroise, ingénieur de Framatome à Saint-Marcel (Saône-et-Loire).

© Joseph Gobin/Médiasèque-IRSN

“ Nous estimons des taux de colmatage à ne pas dépasser.

en fonctionnement normal ou accidentel, considérées par l'industriel comme susceptibles de solliciter l'équipement. Avec ces données, les experts vérifient les calculs relatifs à l'impact de ces défauts sur la résistance de l'acier. « Pour valider les transitoires thermohydrauliques, certains ont été reproduits avec des simulations menées avec le code de calcul avancé de thermohydraulique pour les accidents de réacteurs à eau, Cathare », rapporte Caroline Heib, experte en thermohydraulique.

Le principal risque est une rupture brutale de l'acier sous l'effet d'un refroidissement. En 2016, un avis de l'IRSN préconise que les centrales concernées adaptent leur conduite. « Nous recommandons de renforcer ses mesures compensatoires », explicite Nathalie Stenne.

Expertiser le matériau et les contrôles

L'IRSN estime nécessaire* que l'exploitant approfondisse la caractérisation des anomalies. « EDF a déployé des essais destructifs sur des pièces témoins identiques, commandées auprès de fournisseurs, le Japonais JCFC¹ et le Français du Creusot en Saône-et-Loire, Framatome », décrit Nathalie Stenne. La vérification par les experts des essais côté JCFC, objet d'un avis mi-2021*, conclut à l'absence de risque. « Mi-juin, l'ASN lève les mesures compensatoires pénalisantes imposées jusque-là pour les réacteurs concernés », relate la spécialiste.

L'expertise des pièces issues du Creusot se poursuit. En 2020, après enquête, l'IRSN émet un avis* sur les défaillances organisationnelles et humaines, à l'origine des anomalies dans cette usine (voir webmag).

Les experts se penchent sur les joints soudés entre les viroles – ces cylindres qui constituent l'enveloppe des GV – et le fond. Un traitement thermique appliqué

43

C'est le nombre de fonds de générateurs de vapeur potentiellement impactés par les anomalies carbone repérées en 2016.

après les soudures améliore leurs caractéristiques mécaniques. Depuis 2008, l'industriel utilise un procédé nouveau. « Avec une réchauffe localisée, il vise à relâcher les contraintes au sein de la soudure », détaille Lili Ducouso-Ganjehi, experte en CND. Mais ce procédé est imparfait, en raison des surchauffes ou des sous-chauffes. En 2020, une importante surchauffe est détectée. Elle crée des défauts sur un composant de remplacement pour une centrale. Framatome réalise des contrôles sur une maquette à l'échelle 1. L'IRSN les expertise en 2021*. « Pour vérifier que nous parvenons au même résultat, nous ré-analisons les données expérimentales brutes avec d'autres types de calcul », explique Victor Garric, expert en métallurgie.

De son côté, EDF définit les caractéristiques du défaut détectable par des CND pour lequel l'absence de nocivité doit être établie par l'analyse mécanique. En 2020, l'IRSN analyse tous les contrôles réalisés sur des joints soudés entre les viroles et le fond. Il émet une réserve*: « La comparaison des résultats obtenus en fabrication et en exploitation conduit les experts à s'interroger sur la fiabilité et les performances des contrôles dans une zone ayant une variation microstructurale. Nous demandons à EDF d'améliorer et de réaliser de nouveaux contrôles dans cette zone. Les résultats sont attendus pour 2023 sur un des GV du réacteur 4 de Blayais », raconte Lili Ducouso-Ganjehi.

Exploitation : anticiper l'incident

Épais d'un millimètre et longs d'une vingtaine de mètres, les tubes en alliage 600TT ou 690² des GV assurent le contact – et l'échange thermique – entre les circuits primaire et secondaire. Divers endommagements les menacent. Leur rupture en exploitation est redoutée. « Ce scénario peut causer un rejet radioactif dans l'environnement. Il est capital d'anticiper le déroulement d'un tel accident », explique Marc Petit, expert en équipements et structures. Si la France n'en a pas connu, quatorze ont déjà eu lieu dans le monde.

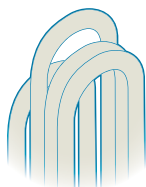
EN CLAIR

Générateurs de vapeur : quels sont les principaux éléments surveillés ?

Pour éviter un accident et assurer la sûreté à long terme des générateurs de vapeur (GV), l'IRSN recommande plusieurs points de vigilance. Focus sur les quatre principaux éléments surveillés.

1 Tubes d'échange

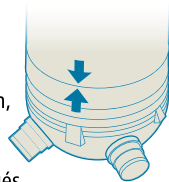
Ces tubes fins en acier assurent le transfert thermique du fluide primaire vers le fluide secondaire. Ils peuvent faire jusqu'à 11,7 m de haut.



- > Risques : fissures, rupture par corrosion ou par usure.
- > À surveiller : état externe et interne des tubes.
- > Recommandations : **inspection des tubes** par des sondes, **bouchage des tubes endommagés**.

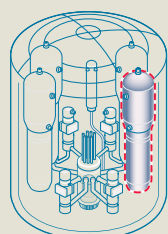
3 Soudures

De nombreux joints soudés – tel celui entre le bol et la virole – maintiennent les pièces du GV. Ils nécessitent beaucoup d'attention, car ils peuvent présenter plus de micro-défauts – soufflures et inclusions – que les produits forgés. De plus, ils peuvent se situer à des zones de raccordement sollicitées mécaniquement.



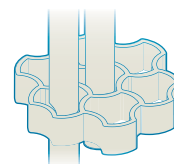
- > Risque : rupture.
- > À surveiller : absence d'évolution ou d'apparition de défauts au niveau de la soudure.
- > Recommandations : **contrôle par ultrasons** des soudures les plus sollicitées, **épreuve hydraulique**.

Bâtiment du réacteur



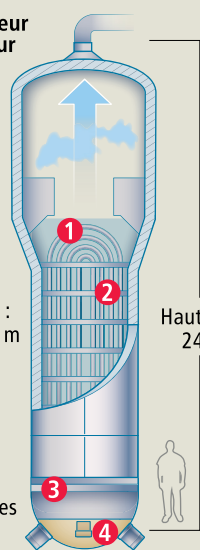
2 Plaques entretoises

Ces plaques maintiennent les tubes, en laissant circuler l'eau du circuit secondaire.



- > Risque : perturbation de la circulation du fluide secondaire, stabilité thermohydraulique des GV, vibration et usure des tubes.
- > À surveiller : dépôts de produits de corrosion.
- > Recommandations : **contrôle de la chimie** du fluide secondaire (pH, teneur en oxygène, en impuretés), **nettoyage chimique** préventif.

Générateur de vapeur



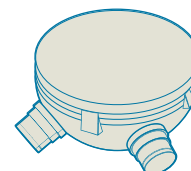
Diamètre :
entre 3,8 m
et 5,1 m

Hauteur :
24 m

Masse :
500 tonnes
(à vide)

4 Bol

Le fluide primaire circule dans cette partie basse du GV avant d'entrer dans les tubes de l'échangeur.



- > Risque : rupture sur certaines plages de fonctionnement, normales ou accidentelles.
- > À surveiller : anomalies dans la composition de l'acier des bols – teneur trop haute en carbone –, soudure entre le bol et la virole – défaut de fabrication.
- > Recommandations : **contrôles par ultrasons**, **adaptation de la conduite du réacteur...**

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

L'IRSN expertise aussi le programme de maintenance préventif d'EDF. Le colmatage des plaques entretoises³ provient des impuretés. « Il perturbe l'échange thermique, peut augmenter la vitesse d'écoulement du fluide et faire vibrer les tubes de manière excessive. Il y a un risque de fissure, voire de rupture », expose Thierry Sollier. « Nous estimons des taux de colmatage à ne pas dépasser », souligne Géraldine Graff, experte en équipements mécaniques. L'IRSN contribue à l'amélioration constante de l'évaluation de ces taux. Ailleurs, le colmatage est estimé par un autre CND : les courants de Foucault (voir p.15). Là encore, l'IRSN indique* que les estimations ne sont pas toujours en phase avec la réalité. Pour faire avancer la sûreté, EDF devra renforcer ses contrôles visuels des plaques intermédiaires. ■

Colmatage

Nettoyer, boucher, remplacer

Lorsque le colmatage des plaques entretoises soutenant les tubes d'un générateur de vapeur (GV) est trop important, il faut dissoudre et extraire les oxydes de fer. « Ce nettoyage chimique est contrôlé, afin que ces produits ne corrodent pas les aciers », expose Ian de Curières, spécialiste en chimie. Depuis 2004, l'Institut a délivré plusieurs avis sur cette opération. Un avis de 2017 émet une réserve : le procédé proposé risque d'être trop corrosif. « L'exploitant a depuis modifié la température, la concentration en réactifs et la durée du nettoyage », détaille-t-il.

Pour éviter la rupture ou la contamination radioactive du circuit secondaire, les tubes trop endommagés ou fissurés sont bouchés. Ceci affecte les échanges thermiques et la durée de vie du générateur. Plusieurs avis de l'IRSN concernent le taux de bouchage au-delà duquel le GV devrait être remplacé. Ceci appelle une vigilance nouvelle : « Les GV récents ont des tubes en alliage 690. L'échange thermique est meilleur. Ceci est favorable à la sûreté, sauf dans certaines situations, pondère Jérôme Roy, expert en thermohydraulique. L'IRSN vérifie donc qu'EDF met bien à jour la conduite de ses réacteurs et les scénarios d'accidents. »



WEBMAGAZINE



VIDÉO

Usine de forge
du Creusot :
diagnostic
organisationnel

www.irsnn.fr/RS2

1. Japan Casting and Forging Corporation.

2. Les alliages 600TT et 690 (noms commerciaux) sont principalement composés de nickel et de chrome.

3. Ces plaques soutiennent le faisceau de tubes et disposent de passages d'eau.

* Voir les avis p. 16.

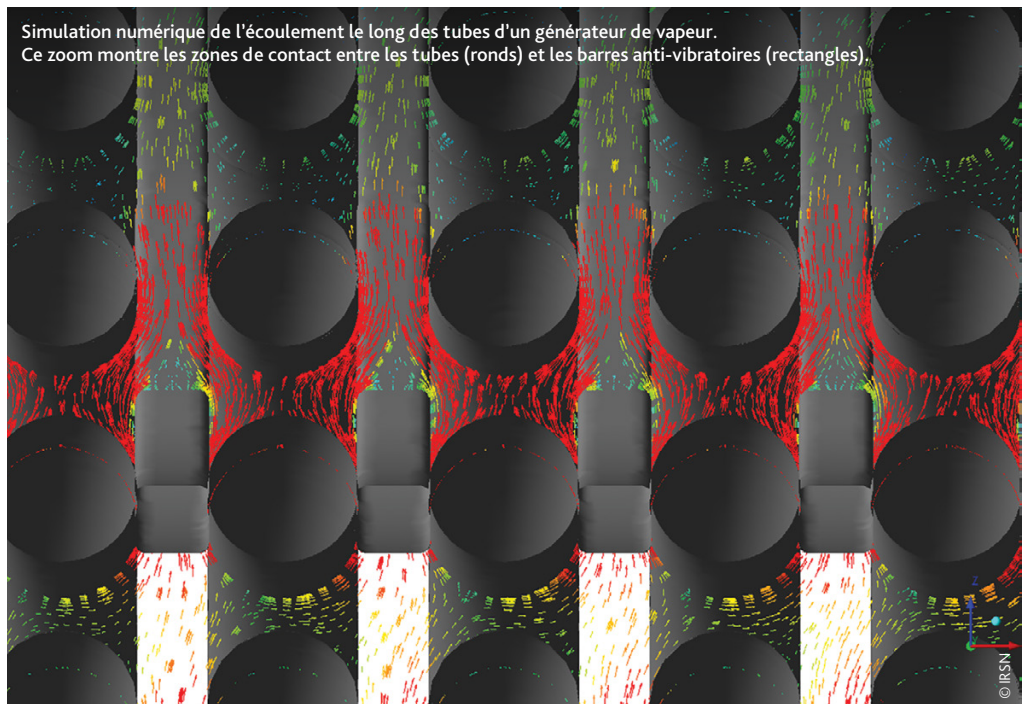
Anomalies des générateurs de vapeur : comprendre et prévenir

La fissuration des tubes, des vibrations anormales... sont des risques connus pour les générateurs de vapeur des centrales. La recherche aide à mieux appréhender ces phénomènes et à inciter les industriels à optimiser leurs inspections.

Les générateurs de vapeur (GV) sont soumis à des pressions et températures extrêmes : 150 bars dans la partie primaire, 90 dans la secondaire, et 300 °C. Ils sont le siège de phénomènes difficiles à modéliser et à contrôler. Comment s'assurer que le dossier de sûreté d'un industriel les concernant s'appuie sur des calculs pertinents et avance des conclusions légitimes ? Pour mener leurs expertises, les spécialistes se basent sur leurs connaissances et les résultats de recherches.

Sonder les incohérences

La plateforme Civa illustre la démarche de recherche et développement (R&D) de l'Institut en soutien à l'expertise. Codéveloppée¹ depuis 2004 avec le CEA², elle modélise numériquement et analyse des données des contrôles non destructifs (CND) de divers composants. Les principales techniques d'inspection utiles lors de la fabrication et la maintenance sont simulées : ultrasons, radiographie, courants de Foucault (CF)³ (voir infographie ci-contre).



« Un module a été créé pour simuler le contrôle des parties courbes – dites cintrées – des tubes des GV où circule l'eau du circuit primaire. Il simule aussi l'effet des plaques entretoises qui maintiennent ces tubes en un faisceau tubulaire », précise Jean-Marc Decitre, expert en CND.

La fissuration des tubes et le colmatage des plaques entretoises constituent des risques de sûreté connus (lire p. 11). « Avec ce module, les experts reproduisent numériquement les contrôles par CF effectués par EDF pour détecter et caractériser les fissures des tubes et le colmatage des plaques entretoises. Nous analysons les procédés de contrôle et nous nous prononçons sur leur pertinence », poursuit l'expert.

Grâce à ce développement, l'IRSN observe en 2019 une limitation de l'évaluation du colmatage des plaques entretoises. Les experts réalisent qu'avec l'outil habituel des contrôles de l'électricien – la sonde axiale –, deux profils de

colmatage bien distincts de cette plaque produisent potentiellement des signaux CF semblables. Ceci peut entraîner une mauvaise estimation du taux de colmatage. Ils recommandent à l'industriel d'améliorer cette technique d'inspection.

Parallèlement, les spécialistes en CND de l'IRSN étudient un nouveau procédé de contrôle évaluant le colmatage avec plus de précision. « Cette R&D peut conduire à terme à breveter une sonde optimisée pour cette application », avance le spécialiste.

Le risque de corrosion

La corrosion des tubes de GV sous l'effet des impuretés apportées par l'eau est un autre risque investigué.

En 2012, l'exploitant découvre des fissures dues à la corrosion dans des tubes en nuance 600TT⁴. Depuis, d'autres GV rencontrent ce phénomène. « Les GV avec des tubes en alliage 600TT sont en cours de remplacement progressif par des matériels aux tubes en alliage 690, supposé insensible à la corrosion. Malgré cela, la corrosion reste un enjeu de sûreté important. Elle doit pouvoir être analysée pour les futurs GV, pour lesquels il

WEBMAGAZINE



À LIRE
L'usure des tubes :
les recherches
internationales
www.irsn.fr/R52

y a très peu de données pertinentes », expose Ian de Curières, expert chimiste.

Pour renforcer son expertise, l'IRSN engage en 2014 un programme de R&D. Il vise à mieux comprendre la corrosion des tubes en 600TT – équipant encore une partie du parc – et à vérifier la résistance du nouvel alliage 690. En partenariat avec Framatome, les experts supervisent des tests de corrosion sur des éprouvettes témoins dans des conditions chimiques représentatives. « Nous avons mis à profit vingt-cinq ans de retour d'expérience sur la composition des boues corrosives récupérées en fond de GV », précise l'expert.

Des contrôles réguliers

Après dix-huit mois d'expérimentations et plusieurs années d'analyse des résultats – jusqu'à la caractérisation de la corrosion par microscopie électronique à transmission –, le projet s'achève en 2021, avec la soutenance d'une thèse⁵. Réalisée en partenariat avec l'École des mines de Saint-Étienne, elle porte sur la corrosion fissurante des alliages de tubes de GV en présence de boues polluées par du plomb ou du soufre. L'un de ses résultats est essentiel : « En présence de ces polluants, la corrosion pourrait aussi affecter la nuance 690 », révèle Ian de Curières. Ce constat, discuté avec EDF, pourrait influencer l'exploitation future des GV.

« Pour prévenir cette dégradation des tubes, une maîtrise rigoureuse de la chimie du fluide du circuit secondaire est appliquée, avec des contrôles réguliers. Au vu des résultats de l'alliage 690, ces exigences sur le fluide secondaire ne pourront vraisemblablement pas être relâchées malgré leur coût », conclut le chimiste.

Autre risque : l'usure des tubes. L'IRSN participe au programme de recherche internationale Tube Integrity Program (TIP)⁶, coordonné par Patrick Purtscher, ingénieur à l'autorité de sûreté nucléaire américaine, Nuclear Regulatory Commission (NRC) (*lire webmag*). Il étudie les vibrations anormales. Elles se produisent parfois sous l'effet de l'écoulement du mélange d'eau et de vapeur à l'extérieur des tubes. Les interactions fluide-structure peuvent entraîner un frottement excessif de ces derniers contre les barres anti-vibrateurs qui les maintiennent.

« Pour comprendre comment se créent ces vibrations, il faut connaître l'évolution du mélange eau-vapeur dans les conditions

EN CLAIR

Comment situer un défaut dans un tube de générateur de vapeur ?

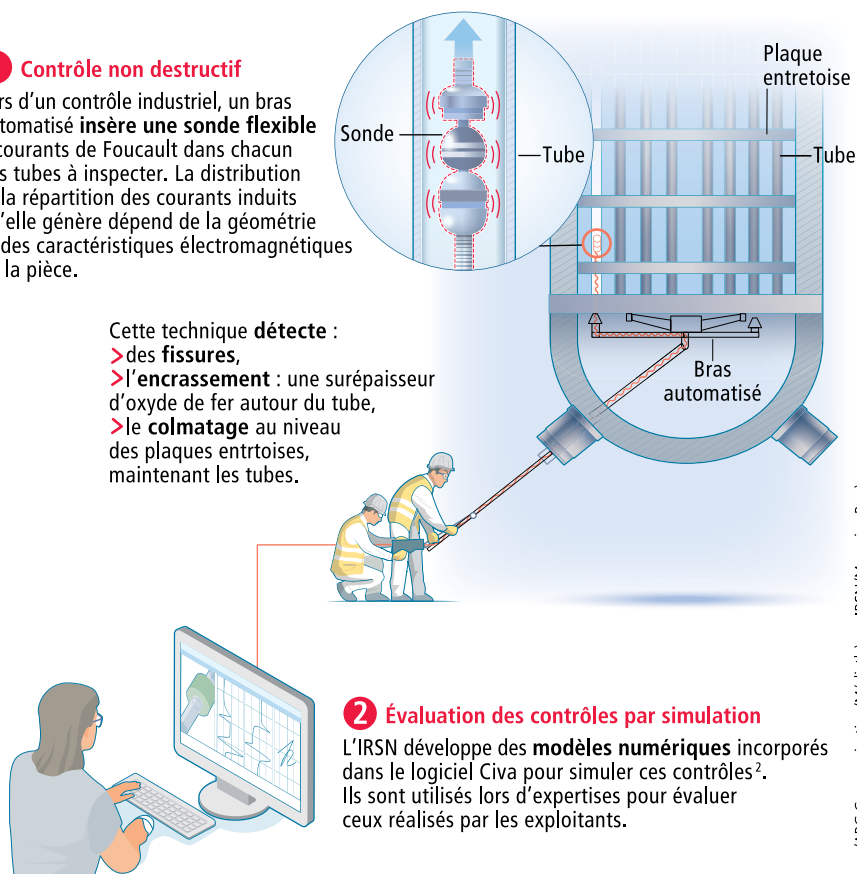
Les tubes de générateurs de vapeur installés sont inaccessibles aux opérateurs. Pour détecter et caractériser d'éventuels défauts, le recours à une sonde à courants de Foucault¹ peut être une solution. L'Institut simule ces résultats afin d'évaluer un tel contrôle.

1 Contrôle non destructif

Lors d'un contrôle industriel, un bras automatisé insère une sonde flexible à courants de Foucault dans chacun des tubes à inspecter. La distribution et la répartition des courants induits qu'elle génère dépend de la géométrie et des caractéristiques électromagnétiques de la pièce.

Cette technique détecte :

- > des fissures,
- > l'encrassement : une surépaisseur d'oxyde de fer autour du tube,
- > le colmatage au niveau des plaques entrtoises, maintenant les tubes.



1. La technique de courants de Foucault est une méthode de contrôle non destructif (CND).
2. Partenariat avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

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

2 Évaluation des contrôles par simulation

L'IRSN développe des modèles numériques incorporés dans le logiciel Civa pour simuler ces contrôles². Ils sont utilisés lors d'expertises pour évaluer ceux réalisés par les exploitants.

extrêmes de température et de pression des GV », indique Daniele Vivaldi, spécialiste en thermohydraulique. Pour y parvenir, le Laboratoire de statistique et des méthodes avancées (LSMA) de l'IRSN à Cadarache (Bouches-du-Rhône) engage en 2021 des études expérimentales. Elles portent sur diverses conditions d'écoulement diphasique au sein d'un faisceau tubulaire à échelle réduite et à pression atmosphérique. « Si le LSMA développe une approche de simulation numérique qui reproduit les résultats de ces expériences, nous pourrions extrapoler sa pertinence aux conditions plus rudes du GV », ajoute le spécialiste. À terme, ce programme contribuera également à renforcer l'expertise. ■

1. Pour certains modules spécifiques aux besoins de l'IRSN.
2. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.
3. Un contrôle par induction électromagnétique détectant et caractérisant les défauts de surface et proches de la surface.
4. Les alliages 600TT et 690 (nom commercial) sont principalement à base de nickel et de chrome.
5. Thèse de Jihane Ben Mohamed. www.theses.fr/s217506
6. Tube Integrity Program (TIP), programme mené en France, aux États-Unis, au Canada, en Corée du Sud et piloté par l'homologue américain de l'ASN.



Pour en savoir plus :
Laboratoire de statistique et des méthodes avancées (LSMA)
www.irsn.fr/LSMA



1



2

Photoreportage : © Joseph Gobin/Médiathèque IRSN

1 Le tubage d'un générateur de vapeur (GV) se fait depuis son extrémité supérieure, appelée étage ou barillet vapeur. Jean-Marc Decitre, expert en contrôles non destructifs (CND), observe les précautions prises pour éviter l'entrée d'éventuels corps migrants.

2 À l'autre extrémité du GV, les tubes en inox sont fixés dans la plaque tubulaire. Thierry Sollier, expert, examine cette pièce.

3 Les tubes sont emmanchés un à un dans cette plaque. Chacun est expansé hydrauliquement pour se solidariser à celle-ci. Puis, les tubes sont nettoyés et leur intégrité vérifiée. Les résultats de ces CND aident à suivre le vieillissement des tubes.

4 Les joints soudés de ce sous-ensemble de GV sont contrôlés par ultrasons. Ce CND est exécuté par un robot qui se déplace le long de la soudure.

REPORTAGE Assemblage, soudure des tubes, contrôles... Les experts doivent connaître les étapes de fabrication des générateurs de vapeur pour approfondir leurs expertises. Rien de mieux que la visite chez un fabricant.

Sous l'œil des experts

500 tonnes d'acier à la loupe



3



4

Équipés d'une tenue de protection, Thierry Sollier et Jean-Marc Decitre, experts en contrôles non destructifs (CND), pénètrent dans le « module de propreté » de l'usine de Framatome. C'est dans ces locaux situés à Saint-Marcel, en Saône-et-Loire, que l'industriel assemble des générateurs de vapeur (GV). Les deux hommes étudient l'organisation des milliers de tubes en alliage 600TT ou 690* au cœur du GV. Ces ingénieurs ont déjà vu des dizaines de générateurs. Sollicités par l'Autorité de sûreté nucléaire, ils participent aux inspections et réalisent régulièrement des expertises. Mais en centrale, leur temps est minuté pour limiter l'exposition aux rayonnements ionisants. « Lors d'une inspection, notre examen est rapide. Nous quittons vite la zone à fort débit de dose pour évoquer des points techniques », décrit Thierry Sollier. Pour eux, il est important de connaître intimement cet équipement et son assemblage, afin d'améliorer l'inspection. « Les usines sont un lieu de prise d'information. Ces visites alimentent notre expertise. » Poursuivant leur parcours, les experts entrent dans un immense hall d'assemblage. Sous leurs yeux, des

dizaines de GV à différents stades de fabrication. Les postes de soudage, d'usinage, de traitement thermique ou encore de contrôles se succèdent. Divers CND – à l'aide d'ultrasons, de courants de Foucault... – y sont effectués pour caractériser l'intégrité des composants et des assemblages (voir p. 15). Attentifs, les experts observent trois opérateurs contrôler une soudure. « Le résultat ne montre pas d'anomalie. Cela témoigne de la bonne qualité de fabrication et de la maturité du contrôle industriel, note Thierry Sollier. Le résultat du contrôle est sauvegardé. Nous pouvons ainsi nous y référer pendant toute la durée de l'exploitation, pour surveiller la bonne santé de l'équipement. »

Quelques mots échangés avec un des contrôleurs révèlent une autre pratique vertueuse : « L'énergéticien britannique, client de Framatome, exige une qualification des CND et des opérateurs. » La qualification des contrôles renforce la confiance dans leurs performances. Le constructeur peut ainsi progresser dans sa qualité de réalisation, ce qui bénéficie à la sûreté. ■

* Ces alliages sont principalement composés de nickel et de chrome.

■ BIBLIOGRAPHIE

Repères n° 23, octobre 2014
Vieillissement des centrales, un phénomène anticipé et surveillé
www.irsn.fr/R23

Woodhead Publishing Series in Energy, Steam Generators for Nuclear Power Plants, edited by Jovica Riznic, 2017, ISBN: 978-0-08-100894-2

* Voir article p. 11 à 13
Avis 2016-00178
www.irsn.fr/Avis-2016-178
Avis 2020-00016
www.irsn.fr/Avis-2020-16
Avis 2020-00103
www.irsn.fr/Avis-2020-103
Avis 2020-00106
www.irsn.fr/Avis-2020-106
Avis 2020-00116
www.irsn.fr/creusot20
Avis 2021-00039
www.irsn.fr/Avis-2021-39
Avis 2021-00069
www.irsn.fr/Avis-2021-69



Près de la centrale du Tricastin (Drôme et Vaucluse), certains échantillons pour la surveillance de l'environnement sont prélevés dans la Gafflière, en aval du site.

Centrales nucléaires

Les contrôles des exploitants sont suivis par des acteurs publics

L'ESSENTIEL Les exploitants des centrales nucléaires respectent-ils les dispositions réglementaires pour les prélèvements d'eau, les rejets d'effluents, la surveillance de l'environnement ? Pour s'en assurer, l'Autorité de sûreté nucléaire réalise des inspections inopinées. L'IRSN l'accompagne.

TÉMOIGNAGE Un responsable de laboratoire environnement chez EDF. **DÉCRYPTAGE** Quels contrôles pour les rejets liquides d'une centrale ? **AVIS D'EXPERT** Une technicienne chargée des inspections.



Loïc Fouchet

Ingénieur environnement
de la centrale nucléaire
de Paluel (Seine-Maritime).

TÉMOIGNAGE "Les inspections confortent la qualité de nos contrôles"

“D epuis les premières visites techniques de l'IRSN en 2004, nous travaillons ensemble à une amélioration continue de nos techniques de contrôles et d'analyses. Auparavant, il était parfois difficile de comparer nos résultats, car nos méthodes d'analyses étaient différentes : temps de comptage, volumes analysés, etc. Depuis plusieurs années, nous nous attachons à employer des techniques similaires, afin de comparer objectivement nos résultats. Nous avons amélioré nos méthodes, bénéficiant des dernières technologies et évolutions normatives. Des réunions de retour d'expérience sont organisées entre chaque inspection pour une analyse approfondie des résultats. Nous nous coordonnons avec l'Institut avec un objectif commun : avoir les analyses les plus fines possibles et réaliser

des échantillonnages pertinents et comparables. Il s'agit de donner à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) une vision représentative et consolidée de la qualité des analyses et des résultats produits par le site de Paluel.

Mieux analyser l'eau de mer

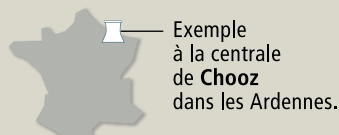
À la suite des inspections menées entre 2005 et 2010, l'IRSN et EDF ont harmonisé leurs procédures de détermination des incertitudes de mesure, notamment pour l'analyse des échantillons en matrice eau de mer. Nous avons affiné les temps de purge, en fonction des matériels utilisés pour l'échantillonnage des eaux souterraines. Le but est d'obtenir des échantillons plus représentatifs.

Les inspections inopinées apportent un regard extérieur qui conforte la légitimité de l'exploitant. ■

Rejets liquides d'une centrale nucléaire : quels contrôles ?

Les rejets liquides des ce
Lors des inspections de
participent les specialist
à l'intérieur et autour du
Décryptage d'une prati

L'autocontrôle obligatoire de l'exploitant



Exemple
à la centrale
de **Chooz**
dans les Ardennes.

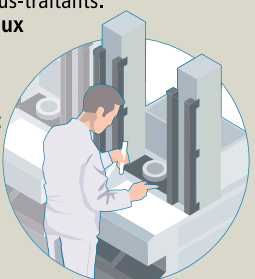
Prélèvements

Les techniciens environnement d'EDF font des **prélèvements quotidiens** d'effluents et d'eaux de rejets, dans la centrale et jusqu'à 2 km dans son environnement immédiat.



Analyses

Ces échantillons sont analysés dans des laboratoires de l'installation de l'exploitant ou par des sous-traitants. L'analyse porte sur les **niveaux de radioactivité** – analyses d'indices alpha et bêta globaux – et la **teneur en quelques radionucléides** : tritium, carbone 14...



Partage d'information

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) vérifie le **respect des seuils réglementaires** de rejet dans l'environnement.

Le contrôle par l'ASN, avec le soutien technique de l'IRSN

1 Préparation de l'inspection

Une centrale fait l'objet d'une **inspection inopinée tous les deux ou trois ans**. Missionné par l'ASN, un laboratoire agréé vérifie la qualité de l'autocontrôle. L'IRSN dispose d'un **laboratoire agréé** pour ce type d'analyses. L'Autorité et l'Institut définissent ensemble la nature et la localisation des échantillons à prélever.

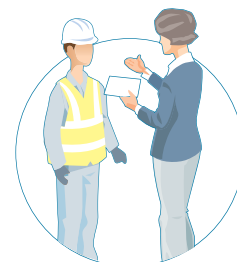


- > 4 à 6 points de prélèvement
- > 20 à 30 analyses
- > 10 à 20 litres



5 Améliorations

Les échanges entre l'Institut et l'exploitant favorisent l'**adoption de meilleures pratiques** : méthodologie de prélèvement, techniques d'analyse, etc.



L'eau prélevée aux abords de la centrale est filtrée par un filtre à 0,22 microns pour enlever les matières en suspension.

© Célia Gournard/Médiathèque IRSN

CHIFFRES CLÉS

À l'IRSN, neuf personnes sont impliquées sur cette thématique.

Jusqu'à **deux-cent-cinquante analyses** sont effectuées chaque année à l'issue de **huit à dix inspections**.

Depuis seize ans, l'Institut a participé à une cinquantaine d'inspections de ce type.

RÉGLEMENTAIRE

Code de l'environnement – partie législative : textes issus de la loi 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (dite « TSN ») codifiée.

Loi 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques, dite « Lema », codifiée aux articles L. 210-1 et suivants, et R. 211-1 et suivants du Code de l'environnement.

Liste de laboratoires agréés sur asn.fr dans l'onglet « L'ASN réglemente », puis « Mesures de la radioactivité dans l'environnement ».

Les prélèvements sont réglementés. L'exploitant les contrôle. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) auxquelles des échantillons sont effectués sur le site. Ils sont analysés par l'exploitant et l'Institut. EDF qui contribue à la radioprotection.

2 Prélèvements

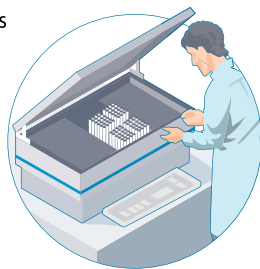
EDF est informé du programme de prélèvement le jour J. Des techniciens de l'IRSN et d'EDF **prélèvent les mêmes échantillons** – eaux, herbes, effluents liquides – à l'intérieur et autour du site de la centrale.

Le prélèvement est surveillé par les inspecteurs de l'ASN. La traçabilité de chaque échantillon est consignée : préleveur, date et heure du prélèvement, délai à respecter avant analyse...



3 Analyses

Les échantillons prélevés sont envoyés aux laboratoires de l'Institut. Les experts spécialisés effectuent les **mêmes analyses** que l'exploitant : la radioactivité globale et la teneur de quelques radioéléments spécifiques.



4 Comparaison des résultats

Les résultats d'EDF et de l'IRSN sont envoyés à l'**Autorité, qui vérifie leur concordance**. En cas de différence inexplicable, le troisième échantillon témoin prélevé – scellé et conservé par le laboratoire d'EDF – est analysé.

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

DATES CLÉS

1994 : entrée en vigueur de l'obligation **d'autocontrôle des rejets** par l'exploitant.

2004 : **premières inspections** sur le thème prélèvements et mesures par l'ASN.

2011 : le protocole d'inspections sur le thème mesure est modifié : **ajout des inspections inopinées**.

POUR ALLER PLUS LOIN

RNM : Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement
www.irsn.fr/RNM-web
 Résultats des mesures réalisées hors site consultables sur le RNM
 Plus sur le RNM sur le site de l'IRSN
www.irsn.fr/RNM

CONTACT

Laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique (LERCA)
 Céline Augeray, cheffe du laboratoire
 01 30 15 52 88 ; celine.augeray@irsn.fr

AVIS D'EXPERT



Chloé Laconici

Technicienne de prélèvement

"Les divergences sont rares"

“ Lors des inspections, les résultats de notre laboratoire et ceux d'EDF montrent très peu de différences. C'est vrai pour des échantillons provenant de la centrale, comme pour ceux de son environnement. La plus récente divergence date de 2016-2017. Elle a concerné une analyse de l'indice du rayonnement bêta. Une discussion entre nos équipes et celles de l'exploitant a permis de l'expliquer. Les tests n'avaient pas été menés le même jour. Sachant que la radioactivité des échantillons décroît avec le temps, cela a faussé la comparaison. La méthodologie de cette analyse des échantillons est depuis renforcée. Au moment du prélèvement, nous indiquons une date d'examen à respecter. Nous prenons systématiquement un troisième échantillon. Il demeure scellé pour une analyse éventuelle par un laboratoire tiers. Il est utile en cas de litige inexplicable. Une telle situation ne s'est encore jamais présentée. Nous échangeons avec les équipes des industriels sur les meilleures pratiques. J'ai par exemple préconisé l'utilisation d'un contenant spécifique ou un nettoyage plus minutieux des outils de prélèvement. La qualité de l'échantillonnage est capitale, elle conditionne celle de l'analyse.



CONTACT

Chloé Laconici
chloe.laconici@irsn.fr

Accident nucléaire et santé : les questions de la société civile

Quelles sont les conséquences d'un accident nucléaire sur la santé ? Pour répondre à cette question, un séminaire s'est tenu en 2021 à destination des représentants de la société civile. Des spécialistes français et étrangers ont fait le point sur les connaissances disponibles et répondu aux interrogations des participants.

1 Quel est l'objectif du séminaire ?

Le séminaire est dédié aux apports de la recherche sur les conséquences sanitaires en situation post-accidentelle. *« Il s'agit d'apporter des connaissances aux membres des commissions locales d'information [Cli], en s'appuyant sur des sources de documentation plurielles. Cela peut être des études produites par l'IRSN et d'autres organismes de recherche français ou japonais et des associations travaillant sur l'impact sanitaire de la radioactivité »,* résume Coralie Pineau, chargée de la communication et des groupes permanents de l'Association nationale des comités et commissions locales d'information (Anccli).

L'événement, organisé à distance en raison du contexte sanitaire, rassemble environ

cent-cinquante personnes sur deux jours. Les scientifiques¹ et associations assurent les onze présentations. Certaines abordent des études en lien avec les accidents de Fukushima Daiichi et de Tchernobyl. Pour Brigitte Dailcroix, vice-présidente du groupe permanent santé de l'Anccli et membre de la Cli de Cadarache, *« la diversité des interventions permet de passer en revue les possibles conséquences d'un accident majeur sur la santé et les moyens disponibles pour y faire face »*. Ce séminaire était coorganisé par l'IRSN et l'Anccli.

1. IRSN, CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), ASN (Autorité de sûreté nucléaire), Université médicale de Fukushima.

2 Comment est préparé l'événement ?

Les sujets traités sont sélectionnés à l'issue d'une dizaine de réunions. C'est le cas par exemple du bilan des études épidémiologiques des faibles doses, présenté par Klervi Leuraud, épidémiologiste à l'Institut. *« La préparation du séminaire a débuté un an avant l'événement, précise Coralie Pineau. Le programme est construit de façon collective par le comité de pilotage spécialement créé pour l'occasion. Il est constitué, entre autres, de membres de plusieurs Cli. »* Les membres du comité débattent de la pertinence de chaque intervention en distanciel. *« Lors des préparations, les représentants de l'IRSN et de l'Anccli ont été à notre écoute, dans la recherche du consensus »,* raconte Patrick Royannez, de la Frapna Drôme Nature Environnement, membre de la Cli de Tricastin.

www Pour en savoir plus :
Le programme détaillé www.irsn.fr/PA-2021



Personnes âgées évacuées après l'accident de Fukushima Daiichi dans un centre pour réfugiés à Tamura.



Victime de l'accident de Tchernobyl au service hématologie des enfants de l'hôpital de Minsk, en Biélorussie.

3 Quelles interventions sont les plus suivies ?

L'exposé du docteur Tsubokura² – très actif après l'accident de Fukushima Daiichi – sur les conséquences non radiologiques a marqué les esprits. « Il nous incite à ne pas minimiser le traumatisme psychologique lié à l'évacuation des populations et ses effets délétères sur la santé des personnes les plus fragiles, comme les résidents de maisons de retraite », résume Brigitte Dailcroix. L'étude Priodac³, dédiée à la prévention du cancer de la thyroïde par la prise

prolongée d'iode stable en cas d'accident, était très attendue par les Cli. « La balance bénéfico-risque de cette stratégie thérapeutique semble favorable. Mais des doutes persistent pour les personnes atteintes d'une maladie thyroïdienne », rapporte Brigitte Dailcroix.

2. Le docteur Tsubokura exerce à l'école de médecine, Université médicale de Fukushima.
3. Prophylaxie répétée par l'iode stable en situation accidentelle.



Les spécialistes des radiations de Greenpeace mesurent le taux de radiation dans la zone d'exclusion de Namie, préfecture de Fukushima.



Mesure du taux de radiation sur des personnes évacuées de la zone ouest de Fukushima dans un centre d'accueil des réfugiés.

4 Quels enseignements majeurs en tirer ?

La campagne de mesure de la radioactivité, menée par Greenpeace sur les territoires contaminés par l'accident nippon, interpelle Patrick Royannez. « Cela contredit l'idée selon laquelle l'État devrait avoir le monopole de l'expertise en cas d'accident », pense-t-il. La présentation du bilan du projet Shamisen⁴ illustre les enjeux sanitaires en situation post-accidentelle. Il comporte vingt-huit recommandations sur la surveillance médicale et sanitaire des populations touchées par un accident nucléaire. « Ce retour d'expérience incite à considérer davantage de paramètres dans nos plans d'urgence. C'est le cas par exemple des bouleversements économiques et sociaux engendrés par l'évacuation », précise Coralie Pineau. La doctrine française est en accord avec la plupart des recommandations de Shamisen.

4. Projet européen conduit entre 2015 et 2017 pour améliorer les conditions de vie, l'état de santé des populations et le suivi dosimétrique, sanitaire et épidémiologique après un accident nucléaire. www.irs.fr/Shamisen

5 Quels sont les retours de la société civile ?

Les participants apprécient les nombreux sujets traités et les temps importants consacrés aux débats. Certains souhaitent que des thèmes soient approfondis. C'est le cas pour le projet Shamisen. « Le temps alloué à sa synthèse est jugé insuffisant », estime Patrick Royannez. Des participants regrettent l'absence de témoignages de citoyens ayant vécu l'accident. « Cela permettrait d'étayer notre réflexion sur les conséquences psychologiques d'une évacuation », souscrit Coralie Pineau. Autre exemple : le bilan des études

épidémiologiques sur les faibles doses. « Le risque de cancer chez les travailleurs du nucléaire est bien documenté, mais aucun autre risque – diabète, insuffisance cardiaque... – n'est abordé », regrette Brigitte Dailcroix. Les présentations sur ces études rencontrent un intérêt et des Cli souhaitent qu'elles soient présentées dans les commissions au niveau local.

www Pour en savoir plus :
Visionnez les rencontres sur le site de l'IRSN
www.irs.fr/PA-2021



Le webinar a réuni plus de cent-cinquante personnes sur deux jours.

Risque incendie

Des expériences sur des câbles électriques

Front de flammes, gaz, fumées... Au sein de la plateforme Galaxie, les chercheurs étudient le risque d'incendie dans les installations nucléaires. Pour mieux le comprendre et faire progresser la sûreté, l'installation Diva accueille une expérience inédite. Repères s'est rendu sur place.

Un long couloir. Ses 15 mètres desservent trois pièces de 30 m² chacune, une quatrième à l'étage... Avec ses murs grisâtres d'une trentaine de centimètres d'épaisseur et ses portes étanches en acier – le tout installé dans un caisson en béton armé de 3 600 m³ –, l'installation Diva en impose. Si ce Dispositif d'études de l'incendie, de la ventilation et de l'aérocontamination ressemble à une prison, c'est parce qu'il joue avec le feu.

Géré par le Laboratoire d'expérimentation des feux (LEF), sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône), Diva est dédié à la réalisation d'essais instrumentés sur les incendies pouvant affecter des installations nucléaires. Le dispositif représente plusieurs configurations de locaux confinés et ventilés. « Nous menons des expériences à grande échelle », explique Sylvain Suard, spécialiste du risque incendie. L'environnement est représentatif des installations réelles.

Le stress est palpable

Unique au monde, l'installation Diva explore notamment le risque lié aux feux de câbles électriques. Dans une centrale, ceux-ci courent sur des centaines, voire des milliers de kilomètres, et assurent nombre de fonctions capitales : mesure, contrôle commande, alimentation électrique... Vieux de quelques mois à plusieurs dizaines

d'années, ils sont une source fréquente¹ et redoutée d'incendie. D'où l'importance de mieux comprendre et caractériser les phénomènes physico-chimiques en jeu lors d'un incendie.

Pour les analyser, Diva reproduit des scénarios de feux et met à contribution ses deux mille voies de mesures pour suivre en temps réel des grandeurs physiques : masse des câbles, températures des gaz et des parois, débits de ventilation, etc.

Chef de laboratoire, directeur d'essai, équipe technique ; ils sont une dizaine à superviser chaque essai, depuis la salle de commande. « Le stress est toujours palpable : l'installation ne doit pas être détériorée. Il faut que l'expérience se passe bien. Surtout, nous espérons un résultat exploitable et valorisable », confie Sylvain Suard.

Vitesse de propagation

Les données servent à améliorer les modèles d'incendie réalisés avec les logiciels Sylvia² et Isis³. L'ensemble alimente l'expertise de l'Institut.

Explorer les incendies à une telle échelle est complexe et onéreux. Les expériences du programme Prisme 3⁴ rassemblent depuis 2017 des partenaires allemands, américains, japonais... Leader du projet, l'IRSN est impliqué dans sa mise en œuvre. Il aura fallu un an pour définir les spécifications fonctionnelles, six mois de mise en place,



Dans Diva, les câbles sont enflammés. La propagation du front du feu est suivie en temps réel par vidéo. Ces données sont ensuite modélisées.

puis trois mois d'installation. « L'effort est payant. Nous avons recueilli des grandeurs mal maîtrisées. La longueur et la vitesse de propagation du feu sont nécessaires à la validation des codes de calcul », rapporte le spécialiste. ■

1. Toutes causes confondues, on compte en moyenne un incendie d'ampleur tous les deux ans dans les installations nucléaires françaises.
2. Outil de calcul de référence utilisé pour les évaluations de la sûreté des installations nucléaires.
3. Outil de calcul pour simuler numériquement et étudier des incendies dans une installation industrielle. www.irsn.fr/isis
4. Sous l'égide de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

www Pour en savoir plus :
La plateforme Galaxie www.irsn.fr/Plateforme-Galaxie
Laboratoire d'expérimentation des feux (LEF)
www.irsn.fr/LEF



WEBMAGAZINE



DIAPORAMA

L'étude des feux de câbles à moyenne échelle

www.irsn.fr/R52



Trois mois de mise en place

Le couloir principal de l'installation Diva est conçu pour étudier un foyer à grande échelle – 6 m de long, 45 cm de large – et la propagation du feu et des fumées dans les locaux adjacents.

Chaque campagne expérimentale prend des mois de préparation. Serge Pons, chargé d'affaires ingénierie, et deux techniciens, Vincent Lemaux et Julien Manzi, installent trois chemins de câbles. La structure, longue de 9 mètres, intègre plusieurs balances. La perte de masse sera ainsi suivie.



Jusqu'à 800 mesures en temps réel

Les rails de fixation (en haut à droite) portent un thermocouple. Celui-ci mesure en temps réel la température dans les locaux et le long du chemin de câbles. D'autres paramètres sont suivis : les concentrations en dioxygène et en monoxyde de carbone et le flux radiatif. Ce dernier donne une indication sur la puissance du feu.



Jusqu'à 1 000 °C

Six mètres de câbles sont installés dans le couloir de Diva, sur trois châssis. Le brûleur installé à une extrémité les enflamme dans des conditions étroitement contrôlées. Cette expérience mesure la distance maximale de propagation du feu sur de tels chemins. Des plaques calorifuges (à droite) protègent l'installation de la chaleur, qui peut atteindre 1 000 °C.



Seul le cuivre résiste au feu

Les câbles sont consumés par le feu au bout de quatre heures environ. Grâce à des balances intégrées, la perte totale de matière est identifiée. Elle atteint 150 kilogrammes. Hormis le cuivre, la quasi-totalité des câbles a brûlé. L'expérience est une réussite pour l'amélioration des connaissances, de l'expertise et de la sûreté.



Étudier sur une maquette

Certains phénomènes – influence des conditions environnementales, interaction des flammes avec les parois, sous-oxygénation... – doivent être compris plus finement. Pour mieux maîtriser les conditions expérimentales, ils sont étudiés avec le dispositif expérimental Nyx, maquette d'un local de Diva. Émeline George, doctorante en mécanique et physique des fluides, et Paul Pelletier, technicien en mesures physiques, supervisent une expérience sur ce dispositif.



PCR

Formez-vous auprès d'experts

Médecin, industriel... vous utilisez des rayonnements ionisants et devez vous former à la fonction de conseiller en radioprotection ?

L'IRSN vous propose une formation certifiée. Au plus près de la réglementation, elle est adaptée aux risques que vous rencontrez : secteur médical ou industriel, option sources naturelles, scellées et non scellées. Une trentaine d'experts de l'Institut – spécialistes des appareils de mesure, du radon, du risque, de la réglementation, ingénieurs sécurité environnement, physiciens, médecins... – vous transmettent rigueur réglementaire et capacité opérationnelle.

Contactez-nous

formationsfrance@irsn.fr
Calendrier des sessions 2022
www.irsn.fr/Formation-web



IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE