

# REPERES

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

**NUMÉRO SPÉCIAL**

## Fukushima Daiichi Quelles avancées 10 ans après ?

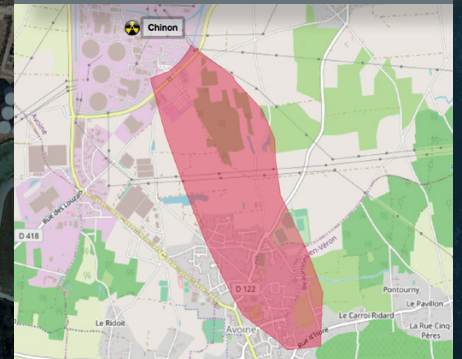
SÛRETÉ



RADIOPROTECTION



CRISE

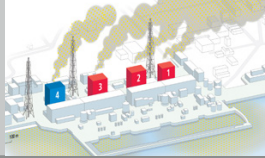


# Sommaire

**En couverture :** La centrale de Fukushima Daiichi (Japon) vue par satellite et colorisée, septembre 2013.  
Un expert de l'IRSN à la centrale Cruas-Meysses (Ardèche) lors des évaluations complémentaires de sûreté, en 2011.  
Mesure de la radioactivité avec l'appareil Safecast dans la région de Fukushima.  
Estimation du zonage post-accidentel lors d'un exercice, à Chinon (Indre-et-Loire) en décembre 2020.

## P.4 JAPON 2011

L'accident de Fukushima Daiichi  
**Que s'est-il passé ?**



## P.6 JAPON 2021

Dix ans après  
**Quelle est la situation ?**

## P.8 SÛRETÉ

Risques extrêmes  
**Mieux protéger les installations nucléaires**  
Diesel d'ultime secours  
**Les expertises rendues lors de leur conception**  
Accident majeur  
**Efficacité du refroidissement ultime**  
Centrale du Tricastin  
**Après expertise, la digue est renforcée**  
Recherche  
**Des matériaux innovants**

## P.14 CRISE

Crise et post-accident  
**La définition  
de nouveaux zonages**



## P.18 SANTÉ

Protection des populations  
**Quelles avancées en dix ans ?**

## P.20 ENVIRONNEMENT

Contamination environnementale  
**Les modèles progressent**



## P.22 IRSN

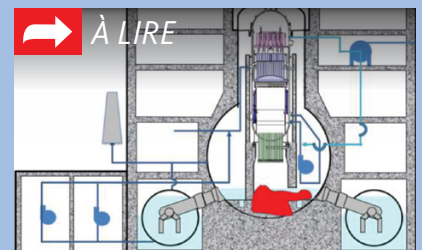
2011-2021  
**Les actions de l'IRSN**

On  
line  
irsn.fr/R48  
WEBMAG



Sûreté

**Centre de crise local : résister  
aux situations extrêmes**



Sûreté

**Comprendre et modéliser  
l'accident**



Crise

**3 questions à Patricia Dupuy  
sur le centre technique de crise**



Crise

**Le post-accident devrait  
intégrer les conséquences  
sociétales**

**Abonnement**

**POUR VOUS ABONNER : irsn.fr**  
L'IRSN > Publications > Magazine Repères

**Dossier du prochain n° :**  
Protection du milieu marin :  
quelles avancées ?

# Dialogue, autonomie, expertises partagées

Dix ans depuis la catastrophe de Fukushima Daiichi. Cet accident, comme ceux qui l'ont précédé, a donné lieu à de nombreuses recherches et actions menées par l'Institut pour faire progresser la sûreté des installations nucléaires et la radioprotection des personnes et de l'environnement.

En effet, tout doit être fait pour éviter l'accident, même si nul ne peut garantir qu'il ne se produira pas. Ce numéro spécial de *Repères* fait le point.

Un des constats essentiels de l'accident de Fukushima Daiichi est l'impact majeur des décisions prises durant la phase d'urgence sur la gestion des conséquences à plus long terme. Pour que les dimensions environnementales, sociales, sanitaires, radiologiques soient prises en compte dans les décisions relatives à la gestion post-accidentelle, les choix associés doivent largement impliquer la société dans ses différentes composantes – citoyens, élus, associations – d'autant plus que l'accident s'accompagne d'une perte de confiance des autorités et des experts. Dans un environnement complexe, il faut donner ainsi aux citoyens les moyens de faire leurs choix, en encourageant par exemple des initiatives de mesure de la radioactivité ou en développant le partage des expertises.

Enfin, une conviction. L'implication des experts dans ces situations, quant à elle, doit reposer sur des principes éthiques : le respect de l'autonomie et de la liberté de chacun, une communication transparente sur le risque, l'honnêteté devant les limites du savoir et les incertitudes de la connaissance.

Les experts doivent faire confiance aux citoyens.

## Jean-Christophe Niel

Directeur général de l'IRSN



Crise

### Quels moyens humains face aux situations extrêmes ?



### Thèse sur le déplacement des différentes espèces d'iode



Environnement

### Un outil cartographique prépare les acteurs locaux

**REPÈRES** – Éditeur : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire - Membre d'ETSON – 31, avenue de la Division-Leclerc, 92 260 Fontenay-aux-Roses – Tél. : 01 58 35 88 88 – Site Internet : [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr) – Courriel : [reperes@irsn.fr](mailto:reperes@irsn.fr) – Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel – Directrice de la communication : Marie Riet-Hucheloup – Rédactrice en chef : Catherine Roulleau – Assistante de rédaction : Isabelle Cussinet – Ont collaboré à ce numéro : Agnès Dumas, Octavia Verry, Pascale Monti – Comité de lecture : Louis-Michel Guillaume – Rédaction et réalisation, maquette et direction artistique : ABG Communication – Iconographie : Sophie Léonard – Photos de couverture : © National Land Image Information (Color Aerial Photographs) ; bas, à gauche © Grégoire Maisonneuve/Médiathèque IRSN ; bas, au centre © Noak/Le Bar Floréal/Médiathèque IRSN ; bas, à droite © les contributeurs d'OpenStreetMap ; ci-dessus © Antoine Devouard/Drone Press/Médiathèque IRSN – Impression : Handprint (50) – Imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement – ISSN : 2103-3811 et 2491-8776 (Web) – février 2021.

  
**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

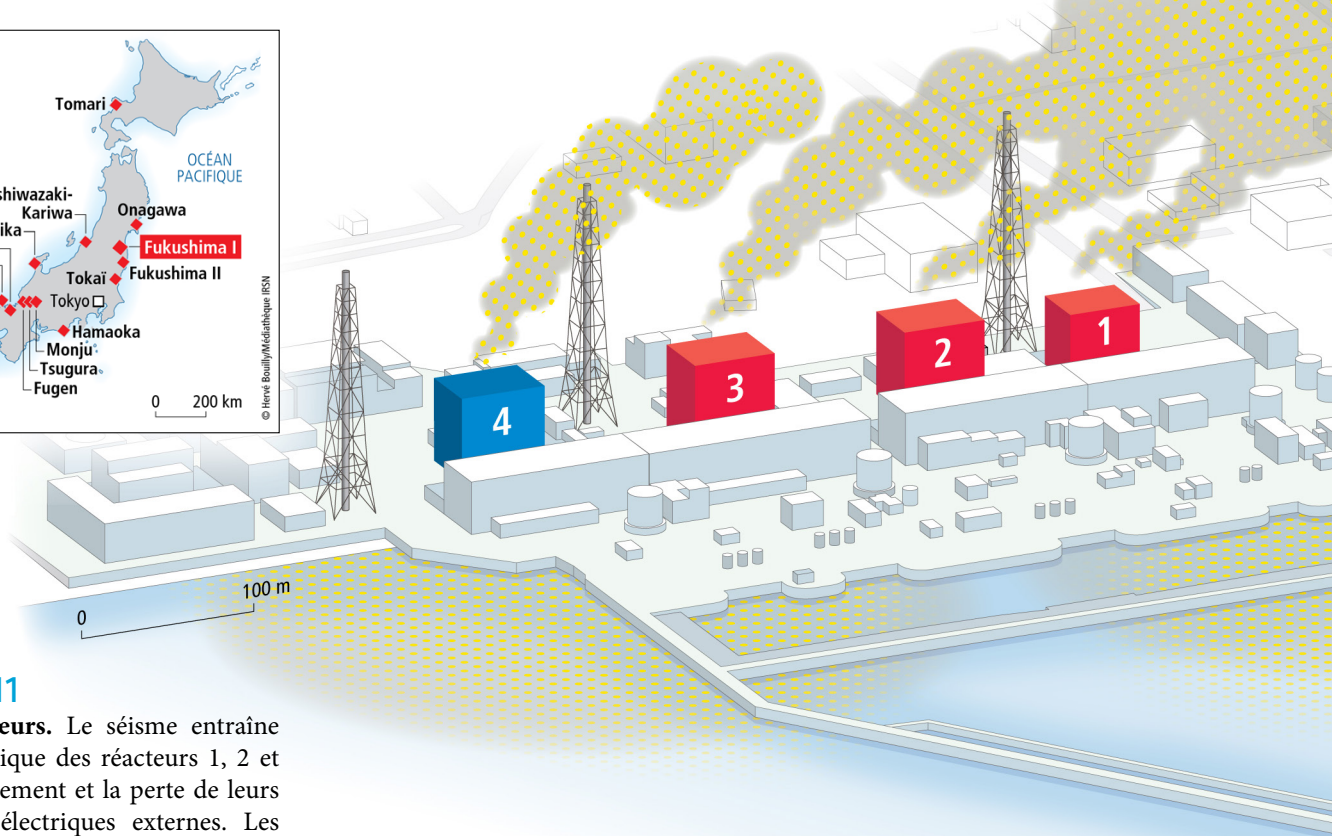
## L'accident de Fukushima Daiichi

# Que s'est-il passé ?

Vendredi 11 mars 2011, à 14h46 heure locale, un séisme de magnitude 9 se produit à 130 kilomètres de l'île de Honshu au Japon. Il entraîne la perte de l'alimentation électrique externe de la centrale de Fukushima Daiichi. Les réacteurs se mettent à l'arrêt. Les groupes électrogènes de secours prennent le relais.

Moins d'une heure plus tard, une vague de tsunami de 14 mètres submerge la digue protégeant la centrale en noyant les groupes électrogènes de secours.

Les prises d'eau refroidissant le réacteur sont endommagées.



### 11 mars 2011

**Fusion des cœurs.** Le séisme entraîne l'arrêt automatique des réacteurs 1, 2 et 3 en fonctionnement et la perte de leurs alimentations électriques externes. Les groupes électrogènes de secours à moteur diesel de la centrale prennent le relais. Quarante minutes plus tard, le tsunami généré par le séisme atteint la côte. Sept vagues frappent le site, dont la plus haute atteint quatorze mètres. Elle endommage les prises d'eau en mer et provoque la perte des diesels de secours des réacteurs 1 à 4. Des systèmes de secours fonctionnent quelques jours sur les réacteurs 2 et 3, retardant d'autant la fusion des cœurs de leurs réacteurs. La dégradation du cœur des réacteurs 1, 2 et 3 entraîne des rejets radioactifs dans l'environnement. L'éventage des enceintes est décidé pour réduire la pression.

### 12 mars 2011

**Réacteur n°1.** Une explosion se produit à 15h36 dans la partie haute du bâtiment abritant le réacteur, une heure après l'engagement de l'éventage de l'enceinte. Les moyens de refroidissement étant indisponibles, le directeur de la centrale décide en dernier recours d'injecter de l'eau de mer dans le circuit de refroidissement.

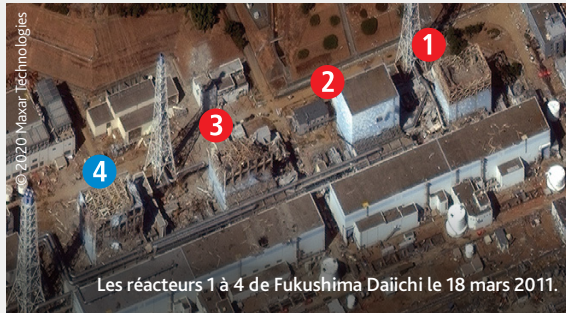
### 14 mars 2011

**Réacteur n°3.** La partie haute du bâtiment explose aussi, malgré un éventage réalisé 24 heures plus tôt. De l'eau de mer est injectée pour refroidir le cœur.

**Réacteur n°4.** Une explosion a lieu dans le bâtiment du réacteur, probablement due à l'arrivée de gaz combustibles par des tuyauteries communes au réacteur 3.

**Réacteur n°2.** Les opérateurs n'ont pas réussi à éventer l'enceinte de confinement. Le 15 mars au matin, le niveau élevé de pression crée une brèche, avec des rejets importants de radionucléides. L'eau de mer est injectée pour refroidir le cœur. ■

## La centrale de Fukushima Daiichi

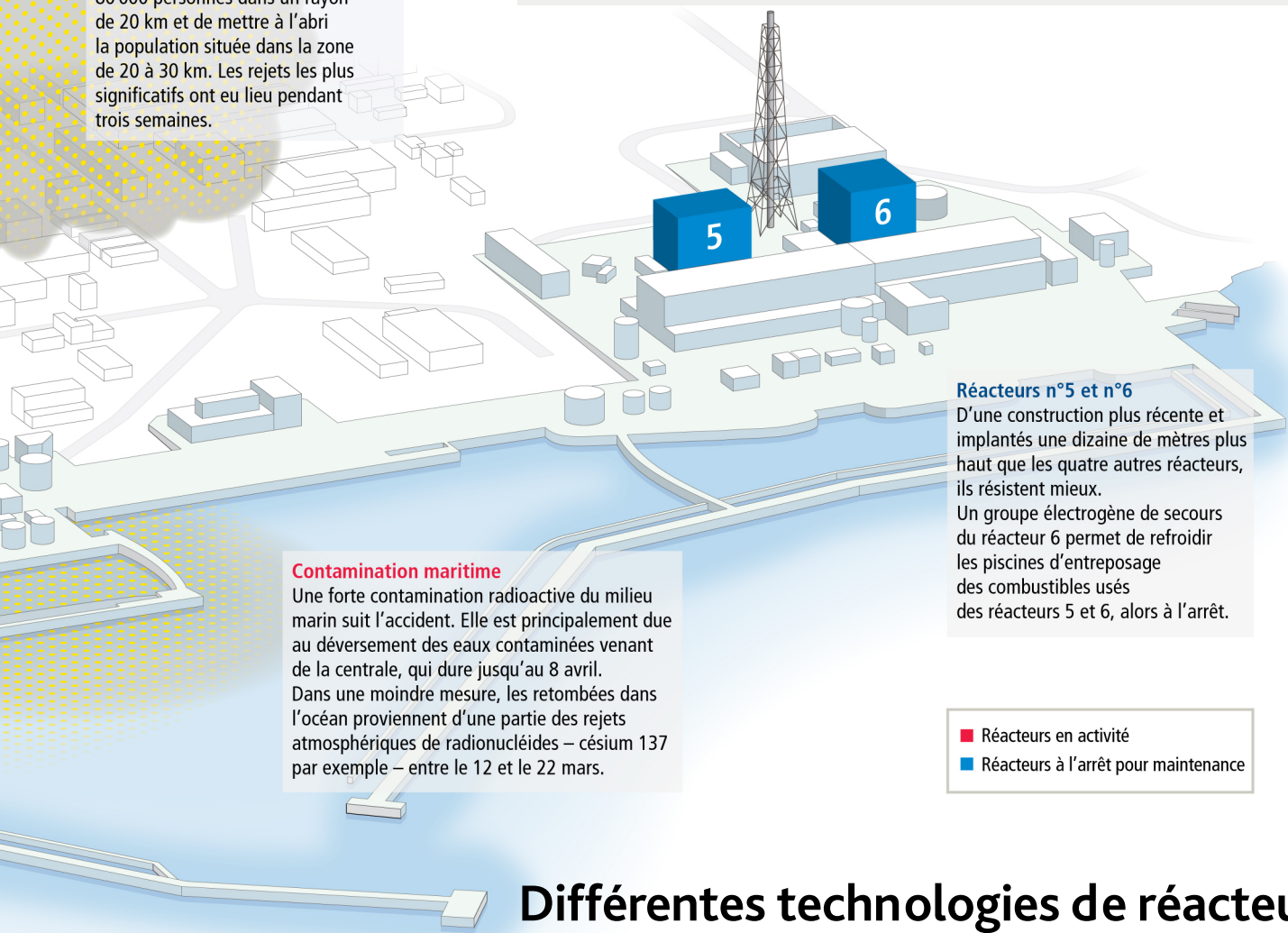


Les réacteurs 1 à 4 de Fukushima Daiichi le 18 mars 2011.

La centrale de Fukushima Daiichi – Daiichi signifie « numéro un » – est constituée de six réacteurs à eau bouillante (REB) de conception américaine. Construite dans les années 1970, elle est exploitée par Tokyo Electric Power Company (Tepco). La puissance électrique brute varie de 460 à 1 100 MWe selon les réacteurs.

### Contamination atmosphérique

Les décompressions successives et explosions entraînent des rejets radioactifs de produits de fission, tels l'iode 131 et le césium 137. Dans les heures qui suivent l'accident, les autorités décident d'évacuer 80 000 personnes dans un rayon de 20 km et de mettre à l'abri la population située dans la zone de 20 à 30 km. Les rejets les plus significatifs ont eu lieu pendant trois semaines.



### Réacteurs n°5 et n°6

D'une construction plus récente et implantés une dizaine de mètres plus haut que les quatre autres réacteurs, ils résistent mieux. Un groupe électrogène de secours du réacteur 6 permet de refroidir les piscines d'entreposage des combustibles usés des réacteurs 5 et 6, alors à l'arrêt.

### Contamination maritime

Une forte contamination radioactive du milieu marin suit l'accident. Elle est principalement due au déversement des eaux contaminées venant de la centrale, qui dure jusqu'au 8 avril. Dans une moindre mesure, les retombées dans l'océan proviennent d'une partie des rejets atmosphériques de radionucléides – césium 137 par exemple – entre le 12 et le 22 mars.

- Réacteurs en activité
- Réacteurs à l'arrêt pour maintenance

## Différentes technologies de réacteurs

# 146 520

habitants de la préfecture de Fukushima sont évacués après l'accident en 2011, à la demande du gouvernement.

Source : rapport officiel de la commission d'enquête indépendante sur l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi (2012).

Si tous les réacteurs électronucléaires utilisent l'énergie de fission\* pour produire de l'électricité, leur conception diffère. Fukushima Daiichi est équipée de réacteurs à eau bouillante (REB). En France, le parc est composé de réacteurs à eau sous pression (REP). Ces technologies diffèrent de par leur système de refroidissement :

- Dans les REB, l'eau refroidissant le cœur se transforme en vapeur en haut de la cuve avant d'être envoyée à la turbine. La vapeur est ensuite condensée en eau liquide dans un condenseur (à Fukushima Daiichi refroidi

par de l'eau de mer) et repart vers le cœur.

- Le cœur d'un REP est refroidi par un circuit dit primaire d'eau qui est pressurisée pour rester liquide, et qui transmet sa chaleur à un autre circuit dit secondaire indépendant, dont l'eau évaporée met en mouvement la turbine.

Les deux technologies sont dotées de divers systèmes de secours en réserve, permettant – en cas d'accident – d'injecter de l'eau pour refroidir le cœur.

\* Pendant la fission, le noyau d'un atome se divise, générant un dégagement d'énergie très important.

## Dix ans après, quelle est la situation ?

Extraction du combustible, contamination de l'environnement, retour des habitants, décontamination...  
Quelle est la situation actuelle, dix ans après l'accident ?  
Quelles sont les conséquences sur la population et l'environnement ?

### ■ Forêts : la dose baisse

Les radionucléides rejetés en 2011 ont dérivé majoritairement vers l'océan, et dans une moindre mesure vers la terre, se déposant sur la végétation et au sol (pour 80 % d'entre eux dans les forêts). De plus, ces radionucléides ont connu une décroissance – entre 2011 et 2020, l'iode 131 a disparu, par exemple, alors que la radioactivité associée au césium 137 a diminué de 20 % – et ont été en partie absorbés par les plantes.

Dès 2011, l'Institut engage le projet de recherche Amorad avec l'université de Tsukuba au Japon et l'Andra<sup>1</sup> (lire p. 20). Après quatre campagnes nippones – 5 000 échantillons d'arbres et de sols examinés –, le cycle du césium entre les divers compartiments de la forêt – feuilles, branches, écorce, bois, racines, humus, litière, sol minéral – est

mieux compris. « En 2020, 75 % du césium initialement déposé en forêt a rejoint le sol, 5 % se trouvent encore dans les arbres. Au fur et à mesure de leur migration dans le sol, l'exposition des personnes pénétrant la forêt se trouve progressivement diminuée », décrit le spécialiste en géochimie, Frédéric Coppin. Ce travail alimente des modèles utiles à la protection de l'homme.

### ■ Le corium dans tous ses états

Retirer ce magma issu de la fusion du combustible, toujours dans les cuves ou mélangé au béton au fond du bâtiment... est la priorité du démantèlement. C'est aussi sa partie la plus complexe.

Face aux radiations bien trop élevées pour toute intervention humaine, la compagnie d'électricité de Tokyo (Tepco) a déployé des robots. Ils explorent les lieux et vont collecter des échantillons de corium, devant révéler sa dureté, sa granularité... Objectif de cette opération : choisir les meilleures technologies pour détecter, découper et collecter les dizaines de tonnes de ce matériau hautement radioactif. « L'IRSN, qui a beaucoup travaillé sur ce type d'accidents, intervient maintenant pour mieux évaluer les caractéristiques des coriums et pour limiter les risques de dispersion inhérents à leur découpe », précise Didier Vola, chef du service des accidents majeurs (lire p. 11 et 13). Le démantèlement devrait durer trente ans.

### ■ Une montagne de déchets

Pour réduire l'exposition de sa population, le Japon fixe la limite de dose additionnelle à 1 mSv/an et lance une décontamination volontariste. Il en résulte quelque 20 millions de mètres cubes de déchets. Au début, ceux-ci sont regroupés dans des entreposages provisoires, nommés *kario-kiba*. Leur contenu est destiné à être trié, incinéré, voire reconditionné, puis transféré dans l'installation d'entreposage temporaire unique, dans la préfecture de Fukushima pour tout ce qui dépasse 8 kBq/kg.



# 5%

La valeur du poisson et des produits de la pêche en 2016, par comparaison avec l'époque avant l'accident\*.

# 220 Md €

Le coût direct de l'accident\*\*. Il englobe l'indemnisation des dommages, les pertes de l'agriculture, de la pêche, du tourisme, la gestion des territoires contaminés, etc.

\* Source : T. M. Nakanishi et al. (eds.), Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident (III), 2019.

\*\* Sources : Divers Japon, IAE, EIA.

D'autres solutions sont à l'étude pour le recyclage des lieux ou stockages en dehors de la préfecture de Fukushima. Les dernières *kariokiba* seront vidées fin 2021.

La décontamination est désormais terminée dans la zone surveillée (ICSA<sup>2</sup>). Elle comprend la zone spéciale de décontamination et les communes pour lesquelles il était estimé que la dose annuelle pouvait être comprise entre 1 et 20 mSv.

« Plusieurs années seront encore nécessaires pour gérer ces déchets, ce qui implique un coût économique considérable », conclut Jérôme Guillevic, expert en radioprotection.

### ■ Des effets radio-induits ?

« Cancers du sein, de la thyroïde, leucémies... seront difficilement imputables aux retombées radioactives, car les doses moyennes maximales étaient trop faibles, de l'ordre de quelques millisieverts. » C'est en ces termes que Klervi Leuraud, spécialiste du risque radio-induit, résume le consensus des épidémiologistes.

Des effets sanitaires indirects sont indéniables : diabète, dysfonctions rénales ou hépatiques, obésité, alcoolisme... Sont mis en cause la perturbation des soins et le stress post-traumatique. Ce stress s'atténue : entre 2012 et 2014, sa prévalence a baissé de 19% chez les hommes et de 27% chez les femmes<sup>3</sup>.

### ■ Quatre habitants sur cinq ne sont pas revenus

Le retour de la population s'engage à partir du 1<sup>er</sup> avril 2014. Il est lent et partiel. Début 2020, le taux de retour moyen est inférieur à 20% dans l'ensemble des communes ayant fait l'objet d'un ordre d'évacuation, variant de 2% à 75%.

### ■ L'importance des « facilitateurs »

« La mesure rend visible la radioactivité. » Jean-François Lecomte, expert en radioprotection, retient cette leçon des « dialogues à Fukushima », un projet qui donne la parole aux Japonais concernés depuis 2011, soutenu par l'IRSN.

Des initiatives citoyennes pour compléter les mesures officielles émergent. Un fermier de Suetsugi relève la radioactivité dans ses champs, des associations s'équipent pour effectuer des mesures, des résidents réclament des dosimètres individuels. Des échanges avec des experts aident à comprendre ensemble la situation. C'est ainsi que naît la co-expertise.

Autre leçon : « La norme ne suffit pas. Elle peut même avoir des effets pervers. » Dès

2011, pour rassurer la population, les seuils de contamination des denrées alimentaires sont abaissés. Mais, aux yeux de certains consommateurs, le seuil vaut preuve de contamination.

L'expérience japonaise pointe l'importance des « facilitateurs ». Les enseignants, le personnel médical ou administratif constituent un relais entre les citoyens et les autorités.

### ■ Le casse-tête des eaux contaminées

En novembre 2020, le site de la centrale abrite 1 234 000 m<sup>3</sup> d'eau tritiée, soit 1 040 réservoirs. Cette eau radioactive provient de dix ans de refroidissement des réacteurs endommagés. Selon Tepco, la limite de 1 370 000 m<sup>3</sup> sera atteinte en 2022.

En 2016, les experts japonais envisagent différentes options. Deux d'entre elles sont encore en discussion avec les diverses parties prenantes : le rejet en mer (favorisant sa dilution) ou dans l'atmosphère (vapeur). Leurs avantages et les inconvénients – techniques, radiologiques, sociologiques... – sont étudiés.

Selon les autorités japonaises, l'impact d'un rejet en mer sur les populations et l'environnement serait comparable à celui des installations nucléaires en fonctionnement. ■

1. L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.
2. Intensive Contamination Survey Area.
3. Étude Fukushima Health Management Survey.

**www** Pour en savoir plus :  
Ministère de l'Environnement, Japon  
[josen.env.go.jp/en/](https://josen.env.go.jp/en/)  
L'Initiative de dialogues à Fukushima  
[irsn.fr/kotoba-FR](https://irsn.fr/kotoba-FR)



Mesure de la radioactivité d'un stockage de terre contaminée avec un outil open data.

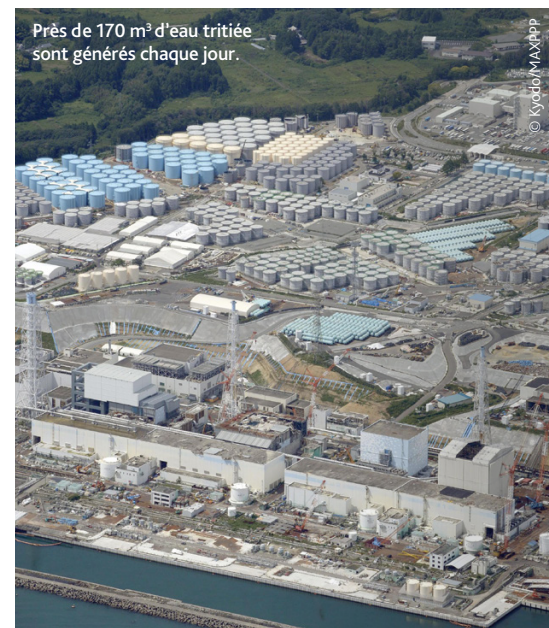


© Noaki Le Bar Floreale Médiathèque IRSN

En 2016, les personnes déplacées dans la municipalité de Miharu, préfecture de Fukushima, vivent encore dans des logements provisoires. Elles sont majoritairement âgées, beaucoup de jeunes ayant quitté la région définitivement.



Chantier de décontamination d'une route dans la préfecture de Fukushima en octobre 2016.



Près de 170 m<sup>3</sup> d'eau tritiée sont générés chaque jour.

© Kyoto/AXAPP

## Risques extrêmes

# Mieux protéger les installations nucléaires

Après Fukushima Daiichi, une évaluation de la résistance des installations nucléaires françaises aux événements naturels extrêmes est décidée. Les experts proposent le concept de « noyau dur ». Son objectif : renforcer la maîtrise des fonctions vitales de sûreté, éviter des rejets massifs dans l'environnement et améliorer la gestion de crise.

« Comment un tel accident est-il possible au Japon, où la technologie est réputée fiable, l'organisation stricte et les constructions robustes ? » Chef de projet post-Fukushima, Patrick Lejuste se souvient de la stupéfaction de la communauté nucléaire en 2011. À l'époque, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande aux exploitants français

d'engager immédiatement des évaluations complémentaires de sûreté (ECS). La robustesse des installations en cas de séisme majeur ou d'inondation extrême doit être examinée. Soixante-dix-neuf rapports d'ECS sont établis par les exploitants. Ils identifient certains écarts de conformité, des points à améliorer, et présentent leur calcul du temps avant rejets dans l'environnement, etc. En

quelques mois seulement, l'IRSN réalise une analyse critique et examine les propositions des exploitants visant à renforcer la robustesse de leurs installations. Forte de ces données et expertises, l'ASN juge début 2012 qu'il n'y a pas lieu de procéder à des fermetures. Elle demande néanmoins aux exploitants de vérifier la conformité par rapport aux exigences de sûreté

## FOCUS

### Quels sont les premiers dispositifs clés du « noyau dur » ?

Prévenir un accident avec fusion du combustible ou ralentir sa progression, limiter les rejets massifs et permettre à l'exploitant de gérer la crise. Voici les trois objectifs du « noyau dur » dont les centrales françaises s'équipent après Fukushima pour résister aux aléas extrêmes. À l'origine de cette initiative, l'Institut expertise sa conception et sa mise en œuvre. Au-delà de 72 heures, la Force d'action rapide nucléaire prend le relais pour assister le site. Zoom sur ses premiers dispositifs.

#### 1 Diesel d'ultime secours (DUS)

Il sert à rétablir une alimentation électrique des équipements et des systèmes du « noyau dur ». Il dispose d'une autonomie de 72 heures, sans assistance humaine.

Mise en place finalisée en février 2021\*

#### 2 Centre de crise local (CCL)

Il est conçu pour résister aux agressions naturelles de grande ampleur. Il accueille le matériel de crise et une centaine de personnes du plan de mobilisation interne et les forces mobiles. Ces équipes diagnostiquent l'état de l'installation, évaluent les rejets et conseillent les pouvoirs publics.

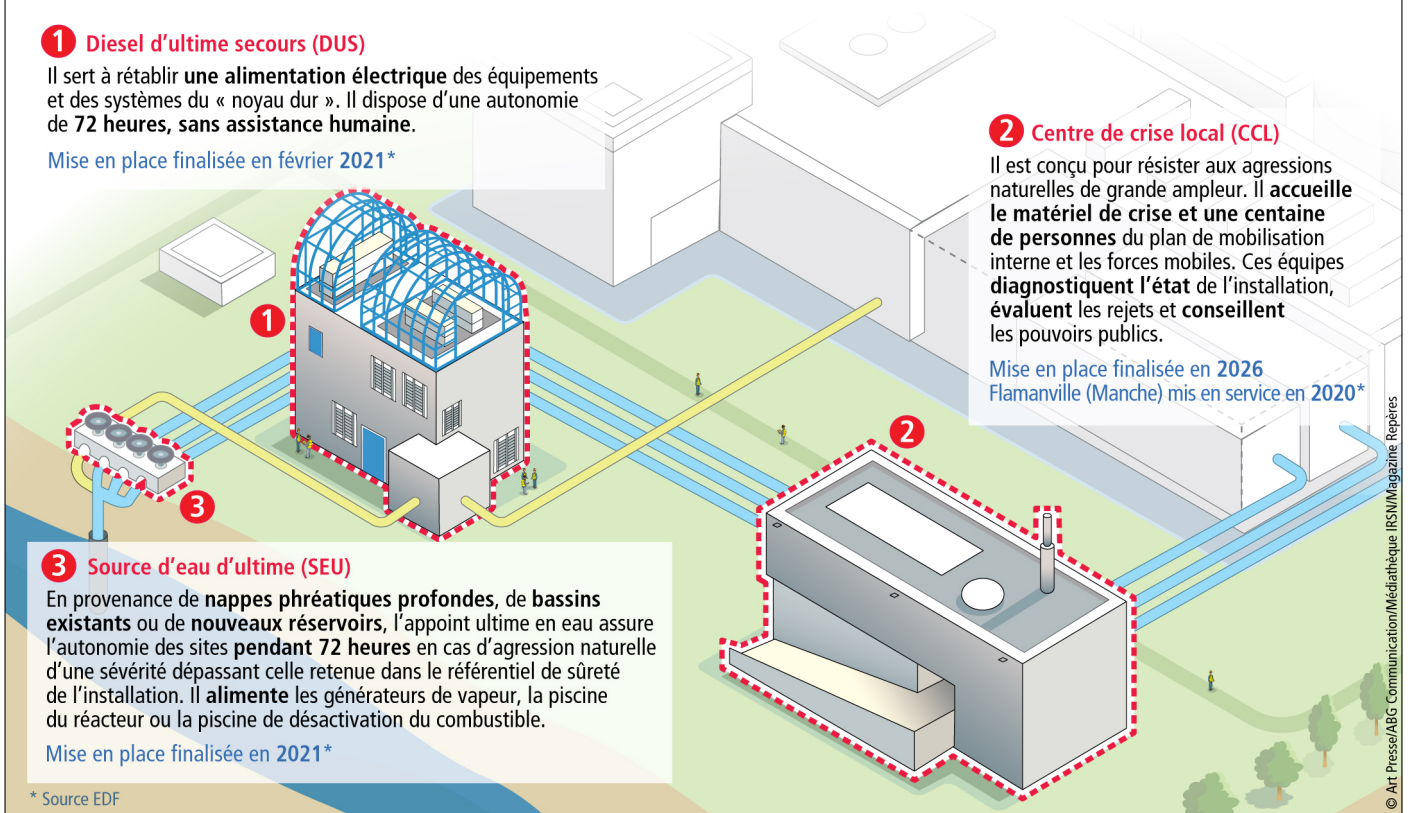
Mise en place finalisée en 2026  
Flamanville (Manche) mis en service en 2020\*

#### 3 Source d'eau d'ultime (SEU)

En provenance de nappes phréatiques profondes, de bassins existants ou de nouveaux réservoirs, l'appoint ultime en eau assure l'autonomie des sites pendant 72 heures en cas d'agression naturelle d'une sévérité dépassant celle retenue dans le référentiel de sûreté de l'installation. Il alimente les générateurs de vapeur, la piscine du réacteur ou la piscine de désactivation du combustible.

Mise en place finalisée en 2021\*

\* Source EDF





et décide de relever le niveau de celle-ci face aux aléas naturels. L'IRSN propose un concept nouveau : le « noyau dur » (ND). Chaque installation doit disposer de moyens humains et organisationnels et des équipements « ultimes » aptes à résister à des agressions dont la sévérité dépasse celle retenue dans le référentiel de sûreté en vigueur.

## Une autonomie de 72 heures

Fondé sur le retour d'expérience de l'accident de Fukushima Daiichi – plus d'eau, plus d'électricité, manque de moyens humains – l'objectif du ND est de « garder la maîtrise de la situation et le cas échéant de contenir un accident majeur, quelles que soient les circonstances », expose Patrick Lejuste, chef de projet post-Fukushima.

Il repose sur deux dispositifs clés : le diesel d'ultime secours (DUS) et la source d'eau ultime (SEU), assurant respectivement une autonomie électrique de 72 heures et un appoint en eau (lire p. 10 et 11). Le dialogue technique avec EDF s'engage dès 2012. L'ASN prescrit la mise en place des DUS à l'horizon 2018 pour tous les réacteurs. Le dimensionnement de certaines parties des installations est également revu, il faut les renforcer contre les agressions climatiques extrêmes : inondations (lire p. 12), foudre, tornades, vents violents...

Pour améliorer la gestion de crise, EDF avait proposé, dans le cadre des ECS, la construction, sur chaque site, d'un centre de crise local (CCL), robuste aux agressions extrêmes (lire webmag). L'année suivante, toujours à son initiative, l'énergéticien met en place la Force d'action rapide nucléaire : la Farn (lire ci-contre).

Tous les équipements nouveaux sont directement dimensionnés en tenant compte des aléas extrêmes. La mise en œuvre complète des dispositions du ND sera effectuée au rythme des révisions décennales, pour se terminer en 2038. ■

### En quoi l'accident de Fukushima Daiichi a-t-il changé les relations entre les acteurs du nucléaire et la société civile ?

**YM :** Les dialogues techniques se sont multipliés. Les commissions locales d'information (Cli) échangent avec les experts de l'IRSN, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et les exploitants sur des sujets parfois polémiques, telles les anomalies de la cuve de l'EPR de Flamanville (Manche). L'IRSN publie davantage d'informations. Il sollicite les citoyens en amont de l'expertise plutôt qu'à la fin. Ce fut le cas pour le projet de piscine d'entreposage centralisé de combustibles usés.

### Les modalités de participation changent-elles ?

**MB :** Les groupes permanents de l'ASN s'ouvrent aux experts non institutionnels. Nous avons intégré plusieurs groupes, portant sur la sûreté des installations et sur les déchets. **YM :** Cette ouverture enrichit l'expertise. Nous portons souvent des avis divergents. Sur les réacteurs, nous insistons sur le maintien des marges de sûreté, apportons une vigilance sur les délais d'exécution des recommandations de l'ASN...

### Quelles améliorations envisager ?

**MB :** Certaines informations doivent devenir publiques,

comme le suivi des engagements pris par les exploitants.

**YM :** Il faut parvenir au point où les préoccupations de la société civile impactent plus concrètement les décisions.

### Sur quel sujet le dialogue fait-il défaut ?

**YM :** La sécurité. Il est naturel que certains aspects, comme la surveillance antiterroriste, soient couverts par le secret défense. D'autres, comme la robustesse du génie civil face à une chute d'avion, la capacité à maintenir le refroidissement après certaines attaques... devraient être intégrés au dialogue avec la société.

## 4 questions à...

Manon Besnard  
et Yves Marignac

Experts indépendants au sein du pôle d'expertise nucléaire et fossile de l'Institut négaWatt



© Coll. part. ; © B. Runtz



La Farn est composée de 300 salariés entraînés. Elle dispose de 52 véhicules tout-terrain et de moyens aériens et fluviaux.

© EDF - Bruno Bony/Sipa

**www** Pour en savoir plus :  
En France : le concept du « noyau dur » dans  
les centrales EDF [irsn.fr/ECS-noyau](http://irsn.fr/ECS-noyau)

## WEBMAGAZINE



**À LIRE**  
Centre de crise  
local : résister  
aux situations  
extrêmes  
[irsn.fr/R48](http://irsn.fr/R48)

## FOCUS

# Relayer le « noyau dur » en 24 heures

Dispositif complémentaire de sûreté depuis 2013, la Force d'action rapide nucléaire (Farn) apporte des moyens humains et matériels en cas d'accident. En 2019, l'Institut signale dans un avis que – pour un scénario accidentel donné –, la Farn doit impérativement agir sous 24 heures (avis 2019-00051 sur la mise

en place des dispositions de refroidissement ultime). Elle contribue à maintenir le refroidissement des réacteurs, assurer l'alimentation en eau, en électricité et en air comprimé. Elle prend le relais du « noyau dur » pour conserver la maîtrise de la situation et prévenir la fusion du cœur, ou en limiter les conséquences.

## Diesel d'ultime secours

# Les expertises rendues lors de leur conception

Un des piliers du « noyau dur », le groupe électrogène diesel d'ultime secours alimente les éléments vitaux de l'installation en cas de perte des autres sources électriques. L'IRSN évalue sa conception. Prévu pour résister à des agressions extrêmes, le dispositif sera selon EDF pleinement opérationnel pour tous les réacteurs au plus tard fin février 2021.



Visite d'experts à la centrale de Cruas (Ardèche) dans le cadre des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) menées à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi.

**A**vec une emprise au sol limitée de 288 m<sup>2</sup>, les bâtiments abritant le groupe diesel d'ultime secours (DUS), appelés bâtiments DUS, implantés à proximité de l'îlot nucléaire. Et pour cause : en situation extrême, ces moteurs diesel doivent réalimenter les systèmes et composants du « noyau dur » (ND) pour éviter la fusion du cœur. À défaut, ils doivent en limiter les conséquences : éviter des rejets massifs dans l'environnement (*lire p. 8*). Comment les experts ont-ils suivi leur conception ? Ces bâtiments bunkérisés doivent résister à des situations extrêmes. « *Élaborés en béton armé avec des murs de 50 cm d'épaisseur, ils*

*peuvent résister à des phénomènes naturels extrêmes et à leurs effets induits : la foudre, la grêle, les tornades et les séismes* », énumère Marie-Hélène Bonhomme, experte en génie civil.

Dès 2016, l'IRSN examine la fiabilité et la robustesse du groupe électrogène DUS, prévu pour fonctionner pendant 72 heures. Il vérifie sa capacité à délivrer la puissance électrique nécessaire : 3 050 kW. Il publie un premier avis<sup>1</sup>. « *L'Institut considère les hypothèses initiales de conception satisfaisantes* », expose Patrick Lejuste, chef de projet post-Fukushima.

L'élaboration du réseau électrique du ND – alimenté par le DUS – et ses protections sont aussi expertisées<sup>2</sup>. Plus récemment<sup>1</sup>, les experts évaluent la bonne adéquation entre la puissance fournie par le générateur diesel et les besoins énergétiques des équipements ultimes qu'il alimente.

### Des recommandations sur la tenue au séisme

En plus du groupe électrogène, les bâtiments des DUS disposent aussi de pompes de graissage, de réservoirs de fioul, d'un système de ventilation, de batteries, d'un tableau électrique et d'un réseau de détection incendie. La présence humaine n'y est pas

nécessaire : en cas de coupure électrique, le groupe démarre automatiquement. « *Les ancrages de chacun de ses équipements sont dimensionnés pour résister aux conséquences d'un séisme de niveau "noyau dur"* », précise Patrick Lejuste.

L'IRSN fait une recommandation en 2016<sup>1</sup> pour la tenue au séisme, les hypothèses et méthodes de dimensionnement des ouvrages abritant les DUS. Il demande à l'exploitant de s'assurer que les marges de sécurité sont suffisantes.

En 2012, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) fixe la livraison des 56 DUS pour 2018. Fin 2018, deux sont opérationnels sur le site de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher). Depuis, les réacteurs du parc sont progressivement équipés.

Selon EDF, tous les DUS seront opérationnels en février 2021. ■

1. Avis IRSN 2016-00187, puis cinq avis sur la mise en exploitation des DUS : 2017-00042 (train P4 du palier 1300 MWe), 2017-00131 (palier CPY), 2017-00318 (train P4 du palier 1300 MWe), 2017-00344 (palier N4) et 2018-00109 (palier CPO Bugey).

2. Avis IRSN 2017-00058.

**WWW** Pour en savoir plus :  
Le concept du « noyau dur »  
[irsn.fr/ECS-noyau](http://irsn.fr/ECS-noyau)



Le bâtiment DUS a une silhouette reconnaissable : 24 mètres de long, 12 de large et 25 de haut.

## Accident majeur

## Efficacité du refroidissement ultime

Le système d'évacuation de la chaleur de l'enceinte, appartenant au « noyau dur », jouerait un rôle important en cas d'accident majeur. L'Institut examine son efficacité et préconise des actions complémentaires.

Le système d'évacuation ultime de la chaleur de l'enceinte (EASU<sup>1</sup>) est-il efficace ? C'est la question posée à des experts IRSN pour ce dispositif appartenant au « noyau dur ». Son rôle : évacuer la chaleur résiduelle hors de l'enceinte de confinement, y compris en cas d'accident majeur. L'EASU est requis lorsque les systèmes d'injection de sécurité et d'aspersion d'eau dans l'enceinte de confinement sont perdus.

Il doit éviter l'ouverture d'un dispositif d'événage et de filtration de l'enceinte et des rejets importants dans l'environnement.

Dès 2015, les experts examinent la conception, la fiabilité et l'efficacité de ce système proposé par EDF pour limiter les conséquences des accidents avec fusion du cœur du réacteur.

« L'EASU injecte, dans la cuve et dans les puisards du fond de l'enceinte, l'eau borée<sup>2</sup> contenue dans une réserve d'eau. Lorsque celle-ci est vide, ce système aspire l'eau des puisards, la fait recirculer et la refroidit. Ce refroidissement est assuré par un échangeur

EASU raccordé à la source froide par la Force d'action rapide nucléaire [Farn, lire p. 9] » décrit Estelle Dixneuf, experte dans le domaine de la conception des systèmes de sauvegarde.

D'après les calculs de l'Institut, c'est là que pourrait résider un problème potentiel. Julien Chambarel, expert en accidents majeurs, précise : « Nos calculs réalisés avec le code Astec identifient un risque en cas d'accident où la pression de dimensionnement des enceintes pourrait être dépassée avant 24 heures et nécessiter un événement. Or, c'est le temps qu'il faut à la Farn pour raccorder la source froide à l'échangeur EASU. »

Une préconisation de l'IRSN en découle en cas d'accident majeur : ajouter à la liste des actions nécessaires la réalimentation de la réserve extérieure en eau borée et l'injection de son contenu le plus rapidement possible dans le bâtiment du réacteur. ■

1. Système ultime d'évacuation de la puissance résiduelle de l'enceinte.
2. L'acide borique est ajouté à l'eau du circuit primaire pour sa capacité d'absorption des neutrons.



ww Pour en savoir plus :  
Avis IRSN/2019-00051  
[irsn.fr/Avis-2019-051](http://irsn.fr/Avis-2019-051)

## RECHERCHE

## Radier

## Améliorer la robustesse du radier

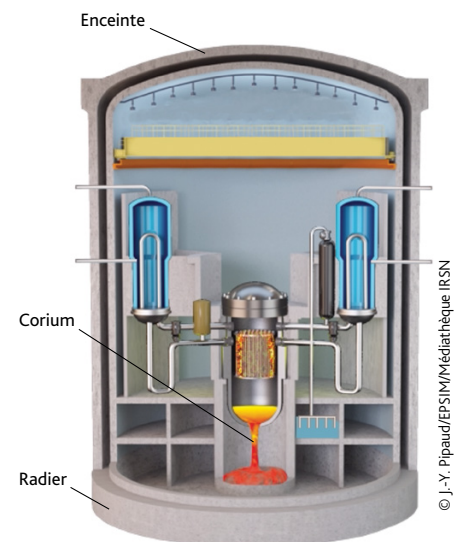
Lors de l'accident de Fukushima Daiichi, le combustible fondu a percé les cuves des réacteurs et s'est écoulé sur le radier. Cette dalle en béton armé sert d'assise à l'enceinte du réacteur. Son abrasion par le corium doit rester partielle pour maintenir le confinement.

Comment ce risque est-il pris en compte en France ? Un avis de l'Institut<sup>1</sup> en 2019 aborde ce sujet. Dans le cadre de l'extension de la durée de vie des réacteurs de 900 MWe, EDF prévoit une stratégie de gestion de la progression du corium après percement de la cuve, souvent appelée « hors cuve ». Le principe consiste à laisser le corium s'étaler au fond du réacteur, puis à le stabiliser sous eau. Pour se prononcer sur cette stratégie, les experts de l'IRSN s'appuient sur trente ans

de recherche. Des expériences étudient les interactions entre l'uranium appauvri – reproduisant le combustible réel – et les bétons des réacteurs, de natures calcaires ou siliceuses.

Dans un second temps, la simulation permet de passer à l'échelle de la situation réelle. « Quand le béton est très siliceux – ce qui concerne quatorze réacteurs en France – nos experts recommandent d'épaissir le fond du réacteur, pour limiter les risques de percée », conclut Gérard Cénérino, expert en accidents majeurs. Ce travail complète d'autres projets internationaux post-Fukushima<sup>2</sup> (lire p. 13 et webmag).

1. Avis IRSN/2019-00051.
2. Preades, ARC-F et TCOFF, sous l'égide de l'OCDE.



Simulation d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression par le logiciel Astec.

## Centrale du Tricastin

# Après expertise, la digue est renforcée

Après l'accident de Fukushima Daiichi, les installations doivent être repensées pour résister à des événements exceptionnels. Le concept de « noyau dur » répond à ce besoin. Il inclut d'évaluer la résistance d'infrastructures protégeant les sites, comme la digue du canal de Donzère-Mondragon, qui longe la centrale du Tricastin (Drôme). L'Institut préconise des renforcements.

« **P**rendre en compte le risque sismique comme cela était fait jusqu'à présent ne suffit pas, observe Olivier Loiseau, expert en sûreté. L'accident de Fukushima Daiichi montre que la nature va parfois bien au-delà des aléas retenus par les ingénieurs pour concevoir les installations. »

À la suite des recommandations de l'IRSN, EDF a dû rehausser les exigences de sûreté sur toutes ses installations. Cela concerne une liste précise d'équipements de protection existants, qui appartiennent au « noyau dur », car nécessaires à la réalisation des fonctions de sûreté (lire p. 8). Ces nouvelles exigences s'appliquent à la digue qui protège la centrale du Tricastin (Drôme). Retour sur la chronologie des événements et l'expertise menée.

Le 27 septembre 2017, la mise à l'arrêt provisoire des quatre réacteurs est imposée à l'exploitant par l'ASN : un tronçon de quelques centaines de mètres de la digue en gravier pourrait s'effacer en cas de séisme. Il doit être renforcé. EDF mène des investigations géotechniques complémentaires et réalise des renforcements.

L'Institut analyse les données fournies par l'industriel et effectue ses propres calculs. Il estime que ces travaux et le plan de surveillance garantissent la stabilité de la digue en cas de séisme majoré de sécurité (SMS).

Ce plan, prévu par l'exploitant, utilise des mesures piézométriques<sup>1</sup>.

Néanmoins les experts mettent en évidence « l'absence de marge prévue pour un séisme supérieur au référentiel SMS ». Ils recommandent un renforcement général. La digue doit désormais pouvoir résister à un « séisme noyau dur<sup>2</sup> ». Ils estiment aussi que les spécificités de site doivent être prises en compte, du fait notamment de la nature des sols.

En 2020, EDF a constitué un dossier détaillant les mesures et travaux envisagés, qui seront expertisés par l'Institut. ■

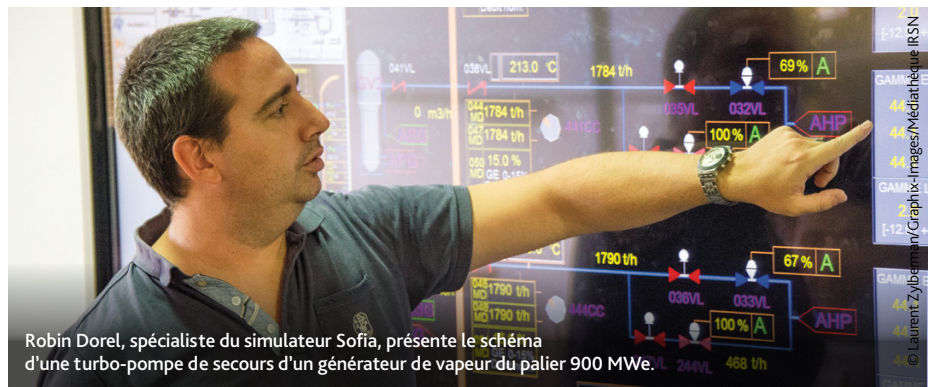
1. Mesures qui évaluent le niveau de l'eau dans les digues.
2. Séisme extrême pris en compte pour le « noyau dur » des installations, défini après l'accident de Fukushima Daiichi.

**WWW** Pour en savoir plus : Protection du site du Tricastin contre les inondations [irsn.fr/digues-tricastin](http://irsn.fr/digues-tricastin)

## INONDATIONS

Outil Sofia

### Une inondation est simulée



La sûreté de la centrale de Tricastin (Drôme) est-elle assurée pendant les travaux de renforcement de la digue du canal de Donzère-Mondragon ? Pour le savoir, les experts réalisent une simulation avec l'outil Sofia<sup>1</sup>.

Une situation critique est envisagée : un séisme détruit la partie de la digue fragilisée, le site est inondé et doit faire face à la perte totale de ses alimentations électriques et de la source froide. Sofia modélise les conséquences d'un tel événement. Cette étude doit faciliter l'analyse des dispositions prises par EDF pour gérer cette situation<sup>2</sup>.

Partant de l'état initial de l'installation retenu par l'exploitant – puissance résiduelle équivalant à celle d'un réacteur à l'arrêt depuis quatorze jours –, l'outil calcule en temps réel les paramètres physiques du réacteur. Il simule l'évolution de la pression, de la température de sortie du cœur, du débit dans le circuit primaire... Ses calculs évaluent à 37 heures le temps de vidange des générateurs de vapeur et à 62 heures le temps de découverte

du cœur du réacteur. Ce délai est suffisant pour qu'intervienne la Force d'action rapide nucléaire (Farn), qui pourrait se rendre sur site en 12 heures.

Plus récemment<sup>3</sup>, Sofia est utilisé pour valider la conduite d'un réacteur de 900 MWe à la suite d'une agression extrême, « mais en prenant en compte les nouveaux équipements du « noyau dur », précise Robin Dorel, responsable du simulateur. La simulation montre que les installations résistent ».

1. Simulateur d'observation du fonctionnement incidentel et accidentel.
2. Note EDF du 9 octobre 2017 – « Mesures de résilience vis-à-vis des états d'arrêts envisagés des quatre réacteurs en cas d'inondation de la plateforme du CNPE ».
3. En support à l'expertise des stratégies de conduite en cas d'agression extrême pour les réacteurs en exploitation.

**WWW** Pour en savoir plus : Le simulateur Sofia [irsn.fr/sofia](http://irsn.fr/sofia)

## Recherche

## Des matériaux innovants

Pour mieux protéger la population, des recherches sont lancées après l'accident de Fukushima Daiichi. Illustration avec deux programmes. Mire porte sur la limitation des rejets radioactifs. Preades étudie la récupération des débris de combustible, pour préparer le démantèlement au Japon.

**D**ix ans après l'accident, les connaissances et la sûreté progressent, grâce à de nombreux projets de recherche engagés en France, comme sur le plan international. En montrant la vulnérabilité des installations aux aléas naturels extrêmes, l'accident de 2011 conduit à revoir les priorités et stimule les recherches exploratoires en sûreté.

Limiter les rejets radioactifs sous forme d'aérosols ou de gaz lors d'une fusion du cœur est primordial en cas d'accident. Caractériser les espèces chimiques rejetées l'est aussi, car leur impact sur l'homme et l'environnement diffère selon leur forme physico-chimique. Ces objectifs sont au cœur du projet collaboratif Mire<sup>1</sup>, piloté par l'IRSN.

### Filter l'iode en ligne de Mire

Pour améliorer l'efficacité du dispositif d'événement et de filtration des enceintes du parc nucléaire, les recherches portent sur des matériaux innovants. « Les zéolites [minéraux principalement constitués d'aluminium et de silice] enrichies à l'argent améliorent très significativement la filtration des iodures volatils, avec une bonne résistance à la chaleur et aux rayonnements, indique Laurent Cantrel, pilote du projet. Nous travaillons sur le vieillissement de ces matériaux et leurs performances en conditions d'accident majeur. Nos recommandations pourraient alimenter la réflexion d'EDF, à qui il appartient de décider de la solution à déployer. »



L'installation Persée est dédiée à l'étude des pièges à iode dans les installations nucléaires.

Les scientifiques commencent par approfondir les connaissances sur la nature des rejets en iode avec la plateforme Chromia<sup>2</sup> de l'IRSN. Puis, ils comparent les capacités de piégeage des systèmes de filtration existants sur une autre installation : Persée<sup>3</sup>. Deux zéolites sont retenues pour les études finales. Modifié, ce minéral peut augmenter ses affinités chimiques avec l'iode, pour le capturer et le piéger sélectivement. L'ajout d'argent s'avère le plus efficace.

### Analyser les débris

« Pour préparer le démantèlement de Fukushima Daiichi, nous sommes sollicités par les Japonais pour inventorier les débris formés par l'accident et leurs propriétés. » Tel est le but du projet OCDE Preades<sup>4</sup>, comme l'expose Marc Barrachin, spécialiste en accidents majeurs. L'IRSN apporte ses connaissances sur les accidents de fusion du cœur.

« Nous les avons acquises avec le programme Phébus PF<sup>5</sup>, grâce à cinq essais de fusion de cœur à échelle réduite, réalisés dans ce cadre. » Des enseignements sont tirés sur la dégradation du cœur et le comportement des produits de fission.

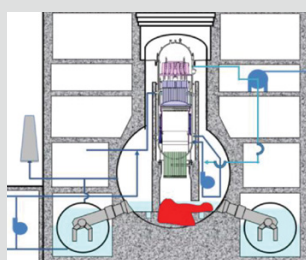
Des campagnes d'analyse des débris sont conduites. Preades se concentre sur les réacteurs à eau bouillante, impliqués dans l'accident nippon, qui « ont les mêmes matériaux, mais en proportions différentes. Nous pensons trouver davantage de métal dans les débris de Fukushima Daiichi ».

L'examen des débris fournira des informations sur les robots à concevoir pour les récupérer et les protections nécessaires pour les évacuer.

L'analyse de la composition du corium prélevé, issu de la fusion du combustible, livrera des indications sur le scénario de mars 2011.

Grâce à ces informations et au logiciel Astec simulant la fusion de cœur de réacteur, il sera possible de mieux retracer l'histoire de l'accident (lire webmag). ■

## WEBMAGAZINE



**À LIRE**  
Comprendre  
et modéliser  
l'accident

[irsn.fr/R48](http://irsn.fr/R48)

1. Mitigation des rejets à l'environnement en cas d'accident nucléaire, avec la participation d'EDF.
2. Plateforme expérimentale de chimie et radiochimie des produits de fission.
3. Plateforme expérimentale de recherches sur l'épuration des effluents radioactifs.
4. Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris, projet sous l'égide de l'OCDE, débuté en 2017.
5. Projet international (1998-2010) [irsn.fr/phebus](http://irsn.fr/phebus)

**WWW** Pour en savoir plus :  
Le projet Mire [irsn.fr/Projet-Mire](http://irsn.fr/Projet-Mire)  
Programme Preades [irsn.fr/Actu-20180522](http://irsn.fr/Actu-20180522)



Le centre technique de crise (CTC), situé à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), est mobilisé pour un exercice national.

## Crise et post-accident

# La définition de nouveaux zonages

Édicter des interdictions de consommation dès la phase d'urgence, améliorer les outils de calcul prédisant la dispersion atmosphérique des contaminants... La gestion de crise évolue, s'inspirant des leçons de Fukushima. L'objectif visé : mieux protéger la population en cas de rejets radioactifs.

«**N**ous sommes à un tournant. » C'est en ces termes que Philippe Dubiau, directeur délégué à la crise à l'IRSN, décrit l'évolution de la doctrine post-accidentelle (PA) élaborée par le Codirpa<sup>1</sup> présidé par l'ASN. Et pour cause : la nouvelle mouture, attendue pour 2021, doit enfin intégrer le retour d'expérience (REX) de Fukushima. Dans cette version actualisée,

une disposition importante est ajoutée pour mieux protéger la population : certaines mesures jusqu'ici réservées à la phase PA seront prises plus tôt. Impossible d'attendre la fin des rejets pour recommander ce qu'il est ou non possible de consommer, comme c'était le cas jusqu'ici.

Dans la doctrine de 2012, publiée trop tôt pour assimiler les leçons nippones, on suppose des rejets pendant un à trois jours, comme à Tchernobyl. Au Japon, ils ont duré plusieurs semaines. « Lorsque le rejet est long, il est nécessaire de prendre des mesures sans attendre. Sinon, cela pose des problèmes d'exposition de la population – la consommation de denrées contaminées – et des questions économiques

sur les conditions de commercialisation des produits », expose Damien Didier, spécialiste de la modélisation des transferts de la radioactivité dans l'environnement.

À l'IRSN, ce changement implique des évolutions opérationnelles : dès la phase d'urgence, ses experts doivent évaluer les enjeux en termes de consommation et de commercialisation des denrées agricoles.

### Le zonage évolue

Ils s'appuient sur une modélisation des expositions futures de la population et de la contamination de la chaîne alimentaire. La plateforme de crise radiologique<sup>2</sup>, C<sup>3</sup>X, est utilisée : « Elle croise les données de Météo-France et celles des rejets radioactifs, simule le transport de la contamination dans l'atmosphère et évalue les doses susceptibles d'être reçues par l'homme », détaille Denis Quélo, spécialiste des modèles de dispersion atmosphérique.

 **WEBMAGAZINE**



**À LIRE**  
**3 questions à Patricia Dupuy sur le centre technique de crise**  
[irsn.fr/R48](http://irsn.fr/R48)

Les contours du zonage<sup>3</sup> évoluent aussi. En 2012, il y a trois zones : un périmètre d'éloignement (PE), une zone de protection des populations (ZPP) et une zone de surveillance renforcée des territoires (ZST).

Désormais, la doctrine définit deux périmètres. Un dit « d'éloignement » (PE), fixé en fonction de la radioactivité ambiante. Une zone de restriction alimentaire qui implique la non-consommation des denrées fraîches produites, ainsi que la « surveillance et la gestion des productions agricoles, des élevages et des biens de consommation ». « Plutôt que de définir une zone globale, il est prévu de travailler par filière », précise Philippe Dubiau.

### Des modèles optimisés

Fukushima Daiichi impose d'étendre les capacités de modélisation de la plateforme C<sup>3</sup>X.

« Cet accident a secoué la communauté scientifique et opérationnelle. Nous en avons tiré des enseignements, raconte Denis Quélo. Nous avons réalisé que nos modèles de dispersion atmosphérique n'étaient pas suffisants en première approche. » En 2011, ils n'intègrent pas de calculs de dispersion sur de longues distances, la priorité est donnée aux dix, vingt, trente premiers kilomètres. Or, lors de cet accident, il s'est avéré crucial de pouvoir couvrir des distances supérieures.

Développé en recherche et développement, le logiciel IdX pallie cette insuffisance. Il a rejoint la plateforme C<sup>3</sup>X. Ces outils de calcul sont améliorés en permanence. « Désormais, nous prenons mieux en compte le phénomène de lessivage<sup>4</sup> dans les nuages pour prédire la contamination des sols. Nos modèles intègrent aussi le dépôt dû au brouillard », décrit le modélisateur Arnaud Quérel.

### Mesurer plus près, plus vite

En métrologie également, les pratiques s'adaptent, les moyens mobiles se développent. Le système de mesure aéroportée Ulysse, comportant des appareils de détection à bord d'hélicoptères ou d'avions, est lancé fin 2011. Il fournit une première évaluation globale des retombées radioactives en cas de crise.

Des protocoles plus rapides voient aussi le jour dans les laboratoires, pour que l'analyse de la dangerosité des échantillons prélevés dans l'environnement puisse orienter les décisions. « Après Fukushima Daiichi, nous avons réalisé que nous étions trop lents, compte tenu des besoins de la

## OUTILS TECHNIQUES

### Méthode

# La modélisation inverse améliore la compréhension des rejets

« La modélisation inverse (MI) combine les mesures faites dans l'environnement avec les modèles de dispersion atmosphérique. Elle aide à déduire avec précision un terme source [TS], c'est-à-dire la composition d'un rejet radioactif depuis une installation et sa chronologie », résume Olivier Saunier, spécialiste en dispersion atmosphérique.

L'IRSN est le premier à mettre en œuvre une méthode de MI à partir des mesures de débit de dose gamma pour estimer le terme source de Fukushima Daiichi, dès 2013\*.

Comment la MI a-t-elle été mise au point ?

En 2011, c'est un projet de recherche.

Lors de l'accident au Japon, le modèle de dispersion atmosphérique utilisé ne parvient pas à reconstruire fidèlement la contamination.

« À l'époque, ce modèle nécessitait comme données d'entrée la météo, pour simuler

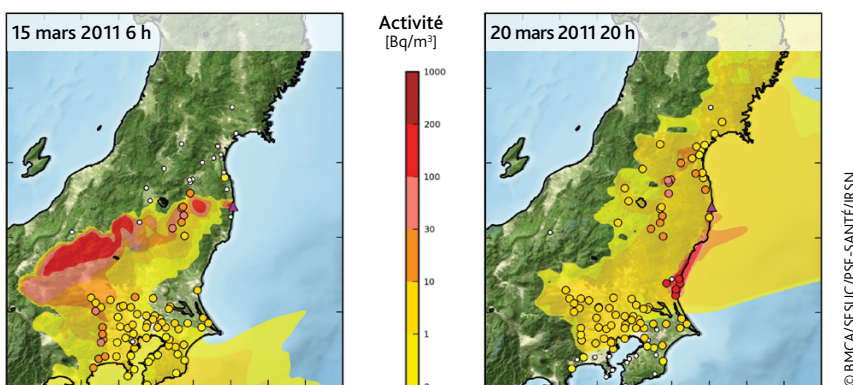
la trajectoire du nuage, et le terme source. »

Leur précision est insuffisante : les résultats ne concordent pas avec les relevés de terrain qui affluent pendant l'accident.

Pour améliorer la connaissance du rejet et contribuer à évaluer les conséquences environnementales et sanitaires, les experts exploitent les mesures de débit de dose s'appuyant sur des réseaux de balises. Ceux-ci sont denses et assurent une résolution temporelle fine, 10 à 60 minutes dans le cas de Fukushima Daiichi. Validée sur l'accident nippon, la MI est désormais utile aussi en cas de détection anormale de radionucléides.

En 2020, elle aide à évaluer les rejets dus aux feux de forêts de la zone d'exclusion de la centrale de Tchernobyl.

\* O. Saunier et al. Atmos. Chem. Phys., 2013.



Panache simulé en césium 137, obtenu à partir du terme source reconstruit par la modélisation inverse, lors des deux principaux épisodes de contamination en mars 2011.

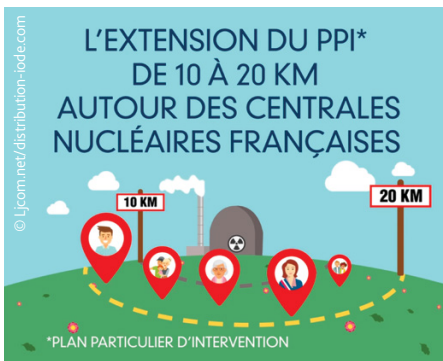
gestion de crise, raconte Béatrice Boulet, radiochimiste. Impossible d'attendre six semaines pour déterminer la présence de strontium 90, de plutonium... Nous avons développé des protocoles qui donnent une réponse en un jour. » L'IRSN planche également sur d'autres sujets (lire p. 16).

### Plans particuliers d'intervention

À l'issue des réflexions interministérielles sur le REX de Fukushima, la nouvelle doctrine relative aux plans particuliers d'intervention (PPI) a été arrêtée en 2016 par le Premier ministre. Elle devrait intégrer, d'ici 2022, le plan national de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur. Ce dispositif à grande échelle émerge en 2014, après l'expérience nipponne, car les pouvoirs publics souhaitent renforcer la

sécurité des populations en cas d'accidents d'ampleur exceptionnelle. « Les PPI définissent une organisation pour être prêts à agir en cas d'accident », résume Erik Leclerc, spécialiste des situations d'urgence et d'organisation de crise. Orchestrés par les préfets au niveau départemental, ils prévoient trois actions de protection de la population : la mise à l'abri et à l'écoute, la prise d'iode stable et l'évacuation. Celle-ci est déclenchée quand les prévisions d'exposition de la population dépassent 50 mSv pour le corps entier en dose efficace. « Fukushima Daiichi les a fait évoluer. »

Parmi les scénarios accidentels envisagés, l'éventualité d'un rejet rapide est prise en compte dès les années 2000, avec la mise en place de rayons réflexes de mise à l'abri, par exemple 2 km autour des centrales.



Le dispositif est désormais complété par la possibilité d'une évacuation immédiate sur 5 km, dans le cas où les rejets rapides seraient de longue durée, comme ce fut le cas pour Fukushima Daiichi.

La catastrophe nipponne montre aussi qu'un accident peut avoir un impact sur des dizaines de kilomètres. Le périmètre des PPI passe donc de 10 à 20 km autour de la centrale, impliquant la prédistribution de comprimés d'iode stable (*lire p. 18*) et la sensibilisation de la population. ■

1. Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une urgence radiologique.
2. Calcul de conséquences et cartographie.
3. Modélisation prédictive des expositions futures de la population à la radioactivité ambiante des zones habitées et de la contamination de la chaîne alimentaire du fait des dépôts de radioactivité.
4. Lors des précipitations, les gouttes entraînent la radioactivité collectée lors de la formation du nuage.

**WWW** Pour en savoir plus :  
 Doctrine pour la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire, octobre 2012  
[asn.fr/Prevenir-et-comprendre-l-accident/Gestion-post-accidentelle/Elements-de-doctrine](http://asn.fr/Prevenir-et-comprendre-l-accident/Gestion-post-accidentelle/Elements-de-doctrine)  
 Nouvelles recommandations du Codirpa  
[asn.fr/Informer/Actualites/L-ASN-publie-les-nouvelles-recommandations-du-Codirpa](http://asn.fr/Informer/Actualites/L-ASN-publie-les-nouvelles-recommandations-du-Codirpa)

**WEBMAGAZINE**



**À LIRE**  
**Le post-accident devrait intégrer les conséquences sociétales**  
*irsn.fr/R48*



**À LIRE**  
**Quels moyens humains face aux situations extrêmes ?**  
*irsn.fr/R48*

## Quel est le rôle de l'IRSN au sein du Codirpa ?

L'Institut apporte des éléments techniques sur de nombreux sujets. Il présente des scénarios d'accidents comprenant des calculs de rejets, des cartes de doses pour alimenter les réflexions sur la doctrine post-accidentelle (PA). Après Fukushima Daiichi, il a réalisé l'étude d'un scénario d'accident majeur, avec des rejets de longue durée. L'IRSN contribue également aux actions menées au profit des acteurs locaux, ou en interaction avec eux.

## Quelques orientations du Codirpa ?

Il nous faut évaluer si la doctrine de protection des personnes, établie

en considérant les rejets d'une centrale, convient pour d'autres installations. Le plutonium, par exemple, est moins irradiant que les rejets radioactifs des centrales, mais plus dangereux en cas d'ingestion. Autre sujet, les rejets dans les milieux aquatiques, marins ou fluviaux. À Fukushima Daiichi, il y a eu des rejets en mer et des questions sur leur impact. C'est une préoccupation en France, où les centrales sont au bord des rivières, ou sur le littoral.

## Quid de la dépollution ?

La gestion des sols contaminés sera approfondie. Il s'agit de définir des stratégies de réduction de contamination

et des recommandations d'assainissement pour les pouvoirs publics. Cela comprend la gestion des déchets produits. Décontaminer les sols, c'est par exemple en retirer 10 ou 20 cm. Selon l'objectif de propreté recherché, les coûts et volumes de déchets générés diffèrent. Nous évaluons les avantages et inconvénients de diverses options. En tout état de cause, il faut impliquer davantage la population et les élus sur ces sujets. La résilience des territoires contaminés repose sur la préparation en amont et l'association des parties prenantes aux processus de décision sur les mesures à mettre en place.

## 3 questions à...

### Philippe Dubiau

Directeur délégué à la crise



## ÉCONOMIE

### Le calcul des coûts est amélioré

**P**erte d'activité des entreprises, dévalorisation des logements, coûts sanitaires et de remédiation de la contamination : ces quatre modules viennent enrichir le logiciel Arpagon en 2021. Celui-ci évalue les conséquences économiques d'un accident nucléaire. Il est créé en 2012 par le Laboratoire d'analyse économique des risques nucléaires (Lern) de l'IRSN.

Le retour d'expérience de 2011 a permis de repérer plusieurs améliorations des méthodes et des outils de calcul des coûts économiques d'un accident. L'Institut est un appui en cas de crise. Il a pour objectif « d'être en capacité de proposer aux pouvoirs publics, en sortie de phase d'urgence, des options techniques relatives à la gestion des territoires contaminés, dont l'évaluation des coûts », explique Ludivine Pascucci-Cahen, économiste à l'IRSN. Il s'agit aussi de mettre en regard les coûts des accidents et ceux de leur prévention.

Autre nouveauté : au sein du programme de recherche Amorad (Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement) (*lire p. 20*), Arpagon estimera les pertes de ressources forestières et aquatiques.



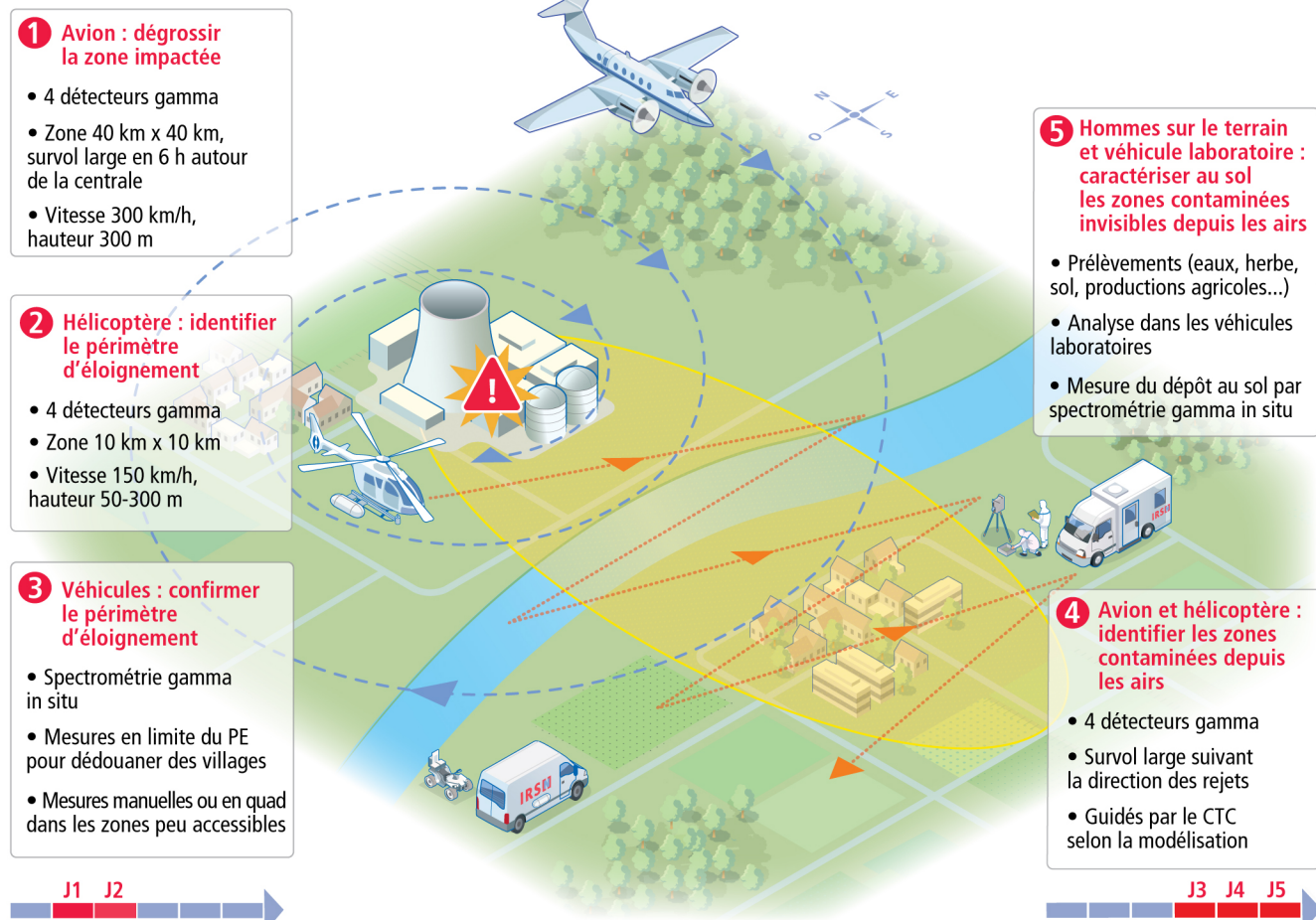
Ludivine Pascucci-Cahen étudie les conséquences économiques d'un accident.



MOYENS ET DISPOSITIFS

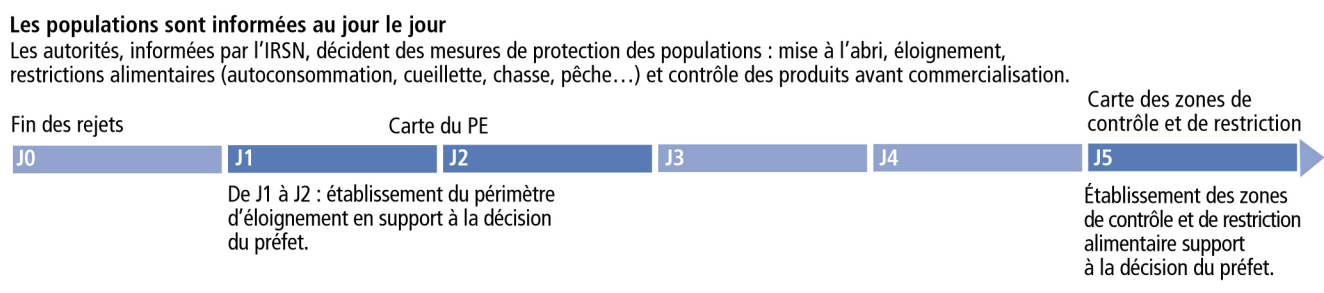
Cartographier un territoire contaminé : quels moyens sont déployés ?

Pour protéger la population en cas d'accident nucléaire avec rejets, il faut en priorité identifier rapidement et de manière fiable les territoires concernés par des mesures de protection afin de conseiller les autorités. La stratégie de l'IRSN s'appuie sur le déploiement successif sur le terrain de moyens de mesure, en liaison permanente avec son centre technique de crise (CTC) situé dans les Hauts-de-Seine. Certains moyens sont déployés à la suite de l'accident de Fukushima.



**Le centre technique de crise (CTC) en dialogue permanent**  
 Le CTC de l'IRSN est basé à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine).  
 • Il fournit des informations techniques sur l'accident (type de rejets, quantité approximative, conditions météo...)  
 • Il exploite les mesures venant du terrain et établit un diagnostic sous forme cartographique des doses efficaces dans la zone impactée pour affiner la modélisation.  
 • Il transmet aux autorités les éléments permettant la protection des populations.

**Deux zones concernées par des mesures de protection**  
 En confrontant les mesures et les résultats issus de la modélisation, l'IRSN aboutit au zonage.  
 Périmètre d'éloignement (PE)    Zone de restriction alimentaire



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



L'opératrice de crise IRSN rassure et recueille les informations administratives d'une personne lors du contrôle de sa contamination interne avec des radionucléides émetteurs X et gamma.



À la suite d'un accident nucléaire, des personnes peuvent avoir ingéré ou inhalé des radioéléments. L'anthroporadiométrie mesure leur contamination interne.

## Protection des populations

# Quelles avancées en dix ans ?

Prise préventive d'iode, suivi sanitaire... Depuis 2011, les mesures de radioprotection en cas d'accident nucléaire évoluent. En outre, une recommandation majeure pour la surveillance de la santé est de tenir des registres nationaux des cancers pour toutes les catégories de la population.

La prise préventive d'iode stable, sous forme d'iodure de potassium (KI), est une des stratégies de protection de la population en phase d'urgence, en cas de menace ou d'accident nucléaire avec rejets. En saturant la thyroïde, elle empêche la glande de capter ou de fixer l'iode radioactif et limite la survenue de ce cancer.

Depuis 1997, son utilisation en France est définie : dès l'alerte, un adulte doit absorber deux comprimés dosés à 65 mg. La prise peut être répétée une fois si l'exposition dépasse 24 heures. La posologie pour les enfants est adaptée en fonction de leur âge.

L'expérience de Fukushima a montré l'insuffisance de cette mesure pour des personnes en attente d'évacuation ou ne pouvant être évacuées en cas de rejets prolongés ou répétés. En 2014, l'Institut initie le projet Priodac<sup>1</sup>, financé par le programme d'investissements d'avenir. « Il fallait trouver une posologie de KI permettant de répéter des prises, et vérifier son efficacité et son innocuité », expose Marc Benderitter. Spécialiste en radiopathologie, il pilote ce vaste projet qui inclut des études précliniques de pharmacocinétique, d'efficacité thérapeutique et

de toxicologie. Les rats modélisent les nouveaux-nés, les rates gestantes, les femmes enceintes, enfin les rats jeunes, adultes ou âgés couvrent le reste de la population. Des études précliniques de toxicologie réglementaire complètent le programme. Priodac vise le changement de posologie du KI pour une prise répétée sur l'ensemble de la population et la modification de l'autorisation de mise sur le marché (AMM) à l'horizon 2022.

### Le dépistage en question

Comment évaluer le risque de cancer de la thyroïde en cas de rejets ? Les Japonais ont opté pour le dépistage systématique. « L'Organisation mondiale de la santé (OMS) déconseille désormais ce type de suivi<sup>2</sup> », rapporte Dominique Laurier, expert des effets biologiques des rayonnements. Cette recommandation fait suite à un long retour d'expérience.

Après l'accident de Tchernobyl, des études révèlent une augmentation des cancers de la thyroïde, notamment chez les jeunes gens exposés aux rejets. En 2011, le Japon veut rassurer sa population. Dépourvu d'estimations précises de l'ampleur de

l'accident, il lance dès l'été une vaste campagne de dépistage par échographie, une technique très sensible. Trois cent mille filles et garçons sont contrôlés. La cinquième campagne de suivi est en cours. Bilan ? Pour tout nodule thyroïdien révélé, une biopsie est effectuée. En cas de malignité, la glande est retirée, entière ou en partie. En dix ans, 200 actes chirurgicaux sont réalisés. Ce record mondial est-il dû à l'accident ? Ou à cette stratégie rare – d'opérer avant même l'apparition des symptômes –, de plus en plus critiquée ? « Ce dépistage donne l'impression qu'il y a plus de cas et qu'ils seraient dus à la radioactivité. En fait, l'occurrence du cancer est stable. La plupart de ces nodules ne sont pas radio-induits », explique l'expert.

Ce choix volontariste révèle peu à peu ses défauts. Le dépistage entraîne un surdiagnostic, génère de l'inquiétude, provoque plus d'ablations et expose inutilement à un traitement hormonal. *In fine*, il n'apporte pas de bénéfice clinique. Les experts aboutissent à des préconisations nouvelles. « Attendre et surveiller le nodule tumoral sans l'opérer » fait aujourd'hui l'objet d'un consensus. Le

Japon l'adopte pour les derniers dépistages. L'expérience nipponne est riche d'enseignements. En 2011, la préfecture de Fukushima n'avait pas de registre des cancers. Dans le cas contraire, elle aurait pu utiliser ce suivi pour repérer une éventuelle recrudescence du cancer de la thyroïde.

La France dispose d'un registre national des cancers chez les enfants, mais ne couvre pas tout le territoire chez les adultes. Ces registres aident à estimer le risque sanitaire et à dialoguer avec la société civile. Le projet Shamisen recommande leur mise en place (*lire ci-contre*). ■

1. Prophylaxie répétée par l'iode stable en situation accidentelle.
2. OMS (2018), Thyroid Health Monitoring after Nuclear Accidents.

www Pour en savoir plus : [Priodac irsn.fr/Projet-Priodac](http://Priodac.irsn.fr/Projet-Priodac)

**WEBMAGAZINE**

**Ma thèse en connaît un rayon**  
[irsn.fr/R48](http://irsn.fr/R48)



**PODCAST**  
Alexandre Figueiredo  
**Le déplacement des différentes espèces d'iode**

## INTERNATIONAL

### Projet Shamisen Pour une culture de la radioprotection



Le projet Shamisen recommande de construire une culture de la radioprotection. À Tokyo en 2014, les autorités locales sont formées sur la distribution de comprimés d'iode aux résidents.

Vingt-huit recommandations améliorent le suivi dosimétrique, sanitaire et épidémiologique après un accident nucléaire. Elles sont issues du projet européen Shamisen – auquel participe l'Institut – initié en 2015. Un principe conditionne tous les autres : « faire plus de bien que de mal ». La surveillance sanitaire doit respecter l'autonomie et la dignité des populations. Selon les phases d'un accident, le projet encourage à former le personnel – médical ou pas –, à préparer les protocoles d'évacuation et de mise à l'abri, à accompagner

les populations voulant faire leurs propres mesures de radioactivité dans l'environnement, les aliments, etc. Les auteurs recommandent de développer, avec l'aide des experts, des applications mobiles et des dispositifs de dosimétrie simples à utiliser. Shamisen réunit dix-neuf partenaires européens et japonais, soit une soixantaine de spécialistes : radioprotectionnistes, dosimétristes, sociologues, médecins, psychologues, etc.

www Pour en savoir plus : [Shamisen irsn.fr/Shamisen](http://Shamisen.irsn.fr/Shamisen)

## EN CLAIR

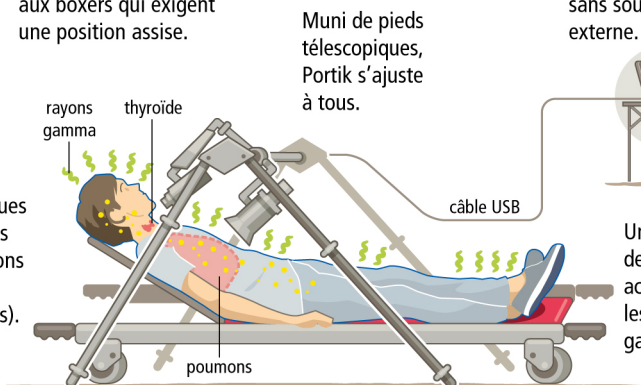
### Contamination interne : la mesure s'adapte à tous

Adapté à la morphologie d'un enfant, d'une personne en fauteuil roulant... le détecteur Portik mesure la contamination interne. Cet anthroporadiomètre portable\* rejoint rapidement une zone sinistrée pour une prise en charge rapide des personnes.



**Le détecteur Portik est transportable**  
Acheminé démonté, en quelques heures, il complète les moyens mobiles déjà sur place : camions laboratoires, véhicules légers d'anthroporadiométrie (boxers).

**Il est adaptable**  
Portik fonctionne dans toutes les positions, contrairement aux boxers qui exigent une position assise.



**Il est autonome**  
Muni d'un ordinateur portable, il est utilisable sans source de courant externe.



Un logiciel de spectrométrie acquiert et analyse les spectres gamma.

Les personnes sont placées dans des pièces isolées ou une tente.



**Il assure un tri rapide**  
Au plus près des centres opérationnels de crise, il facilite une prise en charge rapide des personnes contaminées.

\* Brevet IRSN FR3050281

## Contamination environnementale

# Les modèles progressent

Forêts, milieux marin et agricole sont contaminés lors d'un accident. Les effets sur le long terme sont étudiés. En dix ans, les recherches ont apporté des connaissances sur le transfert de radionucléides dans les écosystèmes, la quantification des incertitudes dans les modèles...

Comment évaluer les conséquences à moyen et long terme d'un rejet radioactif sur l'homme et l'environnement ? En optimisant les modèles qui prédisent leur dispersion et estiment leur impact dosimétrique.

Coordonné par l'IRSN, le projet Amora<sup>1</sup> développe trois axes de recherche : le cycle du césium<sup>2</sup> dans les forêts, les flux d'érosion-ruissellement des bassins versants vers les cours d'eau puis la mer, et l'impact des rejets sur le milieu marin (eau, sédiments, organismes).

### Transfert de césium en forêt

Biotope vulnérable, la forêt capte davantage la contamination atmosphérique que les milieux agricole et urbain. Elle contamine ensuite d'autres milieux, via l'érosion, le ruissellement, les incendies... Prédire le devenir d'une contamination dans les différents compartiments – sol, strate arborée, sous-bois – est essentiel. En 2011, le modèle empirique existant s'avère insuffisant, car peu éprouvé, en l'absence de données immédiates post-Tchernobyl.

Avec Amora, le transfert de césium est précisé après validation du nouveau modèle « TREE4 » sur les données de 40 forêts japonaises. « TREE4 calcule les niveaux de contamination et prédit leur évolution du court au long terme, de plusieurs mois à trente ans », décrit Marc-André Gonze, spécialiste de modélisation pour l'expertise environnementale.

L'outil permet d'estimer en  $\mu\text{Sv/h}$  l'évolution dans le temps des débits de dose externe résultants en milieu forestier et d'évaluer les effets d'une action de décontamination : retrait d'une partie du sol, coupe d'arbres, etc. « Dans combien de temps pourra-t-on exploiter le bois ? Comment raccourcir ce délai ? commente le chercheur. Si un accident nucléaire arrivait en France, ces calculs appuieraient la prise de décisions. » Encore faut-il transposer le modèle, paramétré avec le jeu de données japonaises, au contexte français, en fonction de la nature de



Sabine Charmasson, chercheuse de l'IRSN, réalise des prélèvements et des carottages sur le littoral et en mer pour évaluer la contamination de l'eau et des sédiments marins le long de la côte, au nord de la centrale de Fukushima Daiichi.



Campagne d'échantillonnages en forêt française dans le cadre de la thèse de Dina Okhrimchuk. Pierre Hurtevent, ingénieur, prélève des racines de hêtre.

la végétation, des sols et du climat. Une thèse explore actuellement cette problématique<sup>3</sup>.

## Une approche écosystémique

En 2011, les modèles marins révèlent également des lacunes. Il faut améliorer les prédictions de la dissémination des radionucléides et les simulations des transferts vers les poissons et crustacés consommés par l'homme. Après dix ans de recherche, la modélisation de dispersion, basée sur les calculs de courants marins, est opérationnelle pour rejoindre le centre technique de crise de l'IRSN (*lire webmag*).

Un autre modèle – transfert vers les espèces biologiques – est aussi perfectionné. « *En cas de crise, les outils doivent permettre d'émettre vite des recommandations : interdiction de pêche, de consommation, etc. À partir des niveaux estimés dans l'eau, ils évaluent les concentrations en radionucléides attendues dans les poissons*, explique Céline Duffa, spécialiste du transfert des radionucléides dans les systèmes aquatiques. *L'accident japonais montre que la contamination des espèces varie selon leur habitat et leur régime alimentaire. Les organismes benthiques – vivant sur le fond, comme le cardeau hirame – sont les plus atteints. Leur alimentation est liée aux sédiments, qui piègent la radioactivité.* »

Amorad propose une nouvelle approche écosystémique et considère les transferts à travers toute la chaîne trophique. Il tient compte des relations entre divers organismes en fonction de leurs façons de se nourrir.

## Quantifier les incertitudes

Dans le champ agricole, les modèles post-Tchernobyl sur les cultures maraîchères (choux, épinards...), les grandes cultures et les produits de l'élevage (lait, viande...) étaient déjà présents dans les outils opérationnels, tel Symbiose<sup>4</sup>. Ils n'ont pas été remis en cause. Le manque d'un modèle sur les fruits de vergers (pommes, cerises...) est comblé grâce aux données acquises par les autorités nippones.

L'accident de Fukushima a pointé la nécessité de savoir quantifier le niveau de précision des prévisions et leurs incertitudes. « *Un zonage post-accidentel [lire p. 14] est défini par comparaison entre des valeurs prédites et un seuil. Pour un zonage sûr, nous cherchons à quantifier les incertitudes des modèles* », conclut Marie-Simon Cornu, spécialiste de l'évaluation des risques. ■

## EUROPE

Projet Territories

# Gérer le post-accident à l'échelle locale



En décembre 2018, la commission locale d'information nucléaire (Clin) de la Gironde accueille une délégation de Japonais et de Biélorusses dans le cadre du programme Territories.

Comment gérer des territoires durablement contaminés ? Cette question se trouve au cœur du projet Territories, piloté par l'IRSN. « *Nous émettons treize recommandations sur la manière de modéliser l'évolution à long terme d'une contamination, d'inclure l'incertitude dans la prise de décision, de développer une co-expertise de la surveillance radiologique... Ce projet associe citoyens, experts et institutionnels* », indique Marie-Simon Cornu, coordinatrice du projet qui réunit onze partenaires européens.

Les liens avec le Japon sont forts. Fin 2018, au cours d'un atelier avec la commission locale d'information nucléaire (Clin) du Blayais (Gironde),

plusieurs acteurs nippons partagent leur expérience avec des viticulteurs. Le témoignage d'un producteur de kakis marque les esprits. « *Il nous a expliqué le nettoyage des arbres, des champs et la surveillance radiologique de chaque fruit* », relate Xavier Paulmaz, chargé de mission à la Clin. Un accident fictif est envisagé : Comment relancer l'activité ? Doit-on arracher les pieds de vigne ? Quels soutiens financiers ? Depuis, un groupe de travail sensibilise les acteurs locaux à ces questions.

**WWW** Pour en savoir plus : [Territories.eu](http://Territories.eu)

1. Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement.

2. Les isotopes radioactifs du césium sont parmi les radioéléments majoritaires dans les rejets accidentels des centrales.

3. Étude du comportement à long terme des retombées atmosphériques de césium 137 dans les forêts françaises, Dina Okhrimchuk, en cours.

4. Plateforme de simulation du transfert de radionucléides dans les écosystèmes et de calcul de l'impact dosimétrique sur l'homme.

## BIBLIOGRAPHIE

Gonze M-A et al. (2021a) *Sci. Total Environ.*  
Gonze M-A et al. (2021b) *Sci. Total Environ.* (submitted)  
Gonze M-A and Calmon P (2017) *Sci. Total Environ.*

**WWW** Pour en savoir plus : [Amorad irsn.fr](http://Amorad.irsn.fr)

## WEBMAGAZINE



**À LIRE**  
Un outil cartographique prépare les acteurs locaux  
[irsn.fr/R48](http://irsn.fr/R48)

# 2011-2021 : les actions de l'IRSN

Depuis le 11 mars 2011, l'Institut suit l'évolution de la situation au Japon. Il mobilise son expertise pluridisciplinaire pour accompagner la réflexion nationale et internationale en sûreté. Il accompagne les questionnements de la société civile.

## ■ 2011 : parer à l'urgence au Japon et en France

Dès le 11 mars, l'IRSN mobilise son centre technique de crise (CTC) basé dans les Hauts-de-Seine (*lire webmag*).

L'expert Olivier Isnard accompagne la mission de sauvetage française de sécurité civile détachée au Japon. Par des mesures de débit de dose, il s'assure de l'absence de risque radiologique pour ses membres. « *L'Institut nous a accompagnés avant, pendant et au retour de notre mission de déblaiement* », témoigne en 2012 le lieutenant-colonel des sapeurs-pompiers à la direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises, Bertrand Domeneghetti. Avec une vingtaine de sauveteurs, l'IRSN mène une évaluation du risque radiologique au lycée français de Tokyo, puis informe les parents et le personnel.

L'expert reste cinq semaines au Japon. Il décrypte la situation, ses enjeux. Un bulletin d'information quotidien est publié sur le site de l'ambassade. À la demande du Centre Pompidou, il vérifie l'absence de contamination des 170 œuvres exposées au Centre national d'art de Tokyo avant leur retour dans l'Hexagone.

L'Institut accompagne aussi un navire français, dépêché pour réparer un câble sous-marin endommagé par le séisme à 120 km à l'est de la centrale de Fukushima Daiichi. Deux experts interviennent pour initier l'équipage aux mesures de radioprotection, puis l'accompagner lors de l'opération.

En France, le centre du Vésinet (Yvelines) mobilise des spécialistes en mesures radiologiques. Ils réalisent des anthroporadiométries au retour du Japon des équipes d'Air France, de Radio France et des salariés de la société Cybernetix, qui ont assuré une mission de démantèlement d'une centrale au sud de celle accidentée.

Fin 2011, puis en avril 2012, l'Institut participe aux campagnes de mesures et de cartographie de la contamination près de Fukushima Daiichi. Ses spécialistes réalisent des relevés *in situ* et mesurent le débit de dose à bord de voitures, à l'aide du dispositif Ulysse (*voir p. 17*). Plus de 100 000 points de mesure en spectrométrie gamma seront réalisés, y compris dans la zone interdite.

## ■ CTC, quatre semaines non-stop

L'accident japonais mobilise le CTC de l'Institut. Pendant les quatre semaines de la crise, il compte – en permanence – 30 experts au moins de jour et 20 de nuit. Soit au total 200 personnes sur les 1700 que comptabilise alors l'établissement. Derrière ces 200 experts, c'est l'ensemble des compétences de l'IRSN qui a permis de fournir les estimations de conséquences au Japon et en France.

## ■ La sûreté en effervescence

Au lendemain de l'accident, l'Institut s'organise pour répondre à la demande du Premier ministre. Ce dernier souhaite que soient réalisées des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) des installations nucléaires pour examiner leur résistance à l'égard d'agressions de forte intensité.

Karine Herviou, experte sûreté, se souvient : « *Nous n'étions pas encore sortis de la gestion de crise que nous nous organisons déjà pour définir comment gérer l'impact sur les installations françaises. La demande d'un "noyau dur" en découlera.* »

## ■ Analyser, expliquer

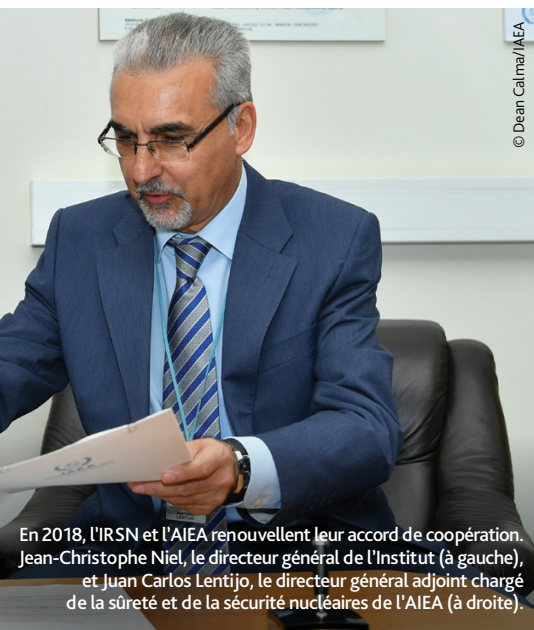
Quelques mois après l'accident, le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) et plusieurs commissions locales d'information (Cli) sollicitent l'Institut pour un



L'expert Olivier Isnard en 2011, lors du forum Eurosafe.



Mesure par l'IRSN de la contamination d'une école évacuée, puis décontaminée à Kawamata, Japon, en février 2013.



© Dean Calma/AEA

En 2018, l'IRSN et l'AIEA renouvellent leur accord de coopération. Jean-Christophe Niel, le directeur général de l'Institut (à gauche), et Juan Carlos Lentijo, le directeur général adjoint chargé de la sûreté et de la sécurité nucléaires de l'AIEA (à droite).



© Olivier Seignette/Mikael Lafontan/Médiathèque IRSN

Gilles Compagnat lors du séminaire Anccli-IRSN sur les enjeux de sûreté post-Fukushima.

décryptage des événements survenus à la centrale japonaise. Entre septembre 2011 et janvier 2012, l'IRSN et l'Anccli, Association nationale des comités et commissions locales d'information, co-organisent trois séminaires. But : suivre les ECS, présenter les conclusions de l'IRSN sur ces ECS, dont le concept de « noyau dur », pour améliorer la sûreté des installations face aux aléas exceptionnels (lire p. 8).

### ■ Une présence internationale

L'Institut a participé à la revue par les « pairs » des conclusions des *stress tests* européens, une action internationale dans l'esprit des ECS français. Il prend aussi part à plusieurs travaux de l'AIEA<sup>1</sup>.

En 2013, il est sollicité pour un séminaire au Japon sur le thème de l'accident majeur. Il y présente la démarche française du « noyau dur ». Il prend part aux échanges sur la sûreté au sein du réseau Etson<sup>2</sup>.

« Nous sommes présents dans toutes les grandes organisations internationales pour partager notre expérience sur l'accident, les enseignements tirés, et confronter les améliorations de sûreté », résume Karine Herviou.

### ■ Dix ans de suivi...

Depuis 2011, l'Institut contribue au suivi de l'évolution de la situation au Japon : gestion de crise, impact environnemental et sanitaire, état des installations, démantèlement, conséquences sociales...

Huit bulletins annuels sont publiés sur [irsn.fr](http://irsn.fr). Localement, l'IRSN s'implique dans plusieurs projets techniques, comme le démantèlement, et sociétaux, avec les « dialogues à Fukushima » (lire p. 6).

### ■ Des commissions locales vigilantes

Depuis 2011, l'action de la Cli de Golfech (Tarn-et-Garonne) s'inspire du retour d'expérience de l'accident de Fukushima Daiichi.

À l'occasion de l'extension des plans particuliers d'intervention (PPI) de 10 à 20 km autour des centrales, une campagne de sensibilisation auprès de 130 000 habitants supplémentaires est organisée. Des mesures de radioactivité ambiante hebdomadaires sont réalisées à l'aide du capteur *OpenRadiation* fourni par l'IRSN. Cet outil connecté à un smartphone permet aux

citoyens volontaires et aux communautés de partager ces mesures sur un site internet et de contribuer ainsi à une meilleure connaissance de leur environnement.

Côté sûreté, « les membres de la commission visitent la centrale de Golfech depuis 2016 pour suivre le déploiement du « noyau dur » [voir p. 8] », rapporte Véronique Auguste, chargée de mission au sein de cette Cli.

À l'origine de cette vigilance, le voyage au Japon en 2014 de l'un des membres de la commission, Gilles Compagnat. Là-bas, ils échangent avec l'ancien directeur de la centrale de Fukushima Daiichi, située à 11 km au sud de l'installation sinistrée, où la catastrophe a été évitée. « Les employés ont réussi à tirer 9 km de câbles électriques pour redémarrer les pompes. Ceci a empêché l'explosion d'hydrogène », explique-t-il. La Cli se dote en 2015 d'une commission technique sur les facteurs organisationnels et humains. Elle étudie tous les événements significatifs de sûreté sous cet angle. ■

1. Agence internationale de l'énergie atomique.
2. Réseau européen des organismes techniques de sûreté/European Technical Safety Organization Network.

**www** Pour en savoir plus :  
 Mobilisation : comprendre Fukushima depuis la France [irsn.fr/Fuku-mobilisation-France](http://irsn.fr/Fuku-mobilisation-France)  
 ECS : l'état des lieux des installations nucléaires post-Fukushima [irsn.fr/ECS](http://irsn.fr/ECS)  
 Dossiers d'information de l'IRSN concernant l'accident de Fukushima Daiichi [irsn.fr/fukushima](http://irsn.fr/fukushima)  
 OpenRadiation [openradiation.org](http://openradiation.org)  
 Séminaire IRSN-Anccli 2012 [irsn.fr/IRSN-ANCCLI-012012/](http://irsn.fr/IRSN-ANCCLI-012012/)



© Susanna Löff/AEA

Deux experts de l'IRSN mesurent la radioactivité lors d'un exercice de l'AIEA, près de Fukushima Daiichi.

# 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](http://irsn.fr), collection *Sciences et techniques*.

## Pour en savoir plus

[irsn.fr/ESNREP](http://irsn.fr/ESNREP)

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE