

À Fukushima, le chantier du siècle

Quatre ans après l'explosion de plusieurs réacteurs de la centrale nucléaire japonaise, le démantèlement et la décontamination des installations affrontent les premières difficultés. La remise du site entier dans son état initial n'est pas envisageable avant 2070

Par Yann Chassagnon et Raphaël Huet

Les experts japonais ont décidé de commencer à démanteler la centrale de Fukushima Dai-ichi, dans la région de la mer du Japon. Plus de 10 000 personnes sont impliquées dans ce projet. Les travaux de décontamination de la zone sont déjà en cours. Les réacteurs 1, 2 et 3 ont été fermés. Les réacteurs 4 et 5 sont toujours en fonctionnement. Les réacteurs 1, 2 et 3 ont été fermés en 2011. Les réacteurs 4 et 5 ont été fermés en 2012. Les réacteurs 1, 2 et 3 ont été fermés en 2011. Les réacteurs 4 et 5 ont été fermés en 2012. Les réacteurs 1, 2 et 3 ont été fermés en 2011. Les réacteurs 4 et 5 ont été fermés en 2012.

Le gouvernement va devoir prendre une décision cruciale : intervenir ou non à l'effet d'une partie des déchets stockés dans la mer.

de tonnes de terre excavée. La facture des travaux dépassera les 150 milliards d'euros, soit le PIB de la Nouvelle Zélande. Voici la situation actuelle.

Des réacteurs

sous haute surveillance

Aucun des six réacteurs n'est dans la même situation technique. Deux d'entre eux, les 2 et 3, ont fondus à la suite du tsunami. Trois, les 1, 4 et 5, ont été le siège d'une explosion d'hydrogène qui a soufflé les bâtiments. Les réacteurs 5 et 6 sont plus en hauteur et à l'arrêt au moment du drame, n'ont pas été touchés par la catastrophe. Le 11 mars 2011, l'explosion Tepco lutte sans cesse pour maintenir la température des réacteurs fondus autour de 100°C en les arrosant constamment d'eau douce. Les risques de nouvelles explosions d'hydrogène sont devenus et sont de plus en plus

État des lieux de la centrale dix ans après la catastrophe

Centrale de Fukushima



Cuves de stockage des eaux, de 1000 à 1200 m³ chacune

En février, elles étaient environ un millier. L'eau reste légèrement chargée en tritium. Le site sera saturé à l'été 2022, avec 1,3 million de mètres cubes.

Usines de décontamination

Avant le stockage ou la réinjection des eaux dans les réacteurs, des unités filtrent d'abord le césium et le strontium, puis d'autres usines filtrent 62 radionucléides (ruthénium, cobalt)..

Réacteurs 1 à 4

Seule la piscine de refroidissement stockant les combustibles usés du réacteur 4 est vidée. Le retrait des gravats et du combustible est en cours dans les trois autres (voir l'écorché). Des recherches se poursuivent pour localiser le cœur fondu (corium).

Centres de traitement et d'entreposage des déchets

Gravats, décombres, matériels y sont traités puis entreposés.

Mur de glace

Long de 1,5 km, profond de 30 m, il prévient les infiltrations dans la nappe souterraine et limite les fuites d'eaux radioactives.

Mur imperméable en front de mer

Long de 900 m, il retient les eaux souterraines contaminées en amont, afin de les pomper.

Piscine commune

Elle est située à une dizaine de mètres du sol et peut contenir 3823 m³. Le combustible retiré des piscines des réacteurs y est entreposé.

Dans les réacteurs endommagés, des grues débarrassent les gravats et ôtent les combustibles usés des piscines. Des robots travaillent à localiser le cœur fondu (en rouge) qui a percé la cuve et les fondations en béton.

Réacteur 3



Grue de manutention des combustibles

Sarcophage

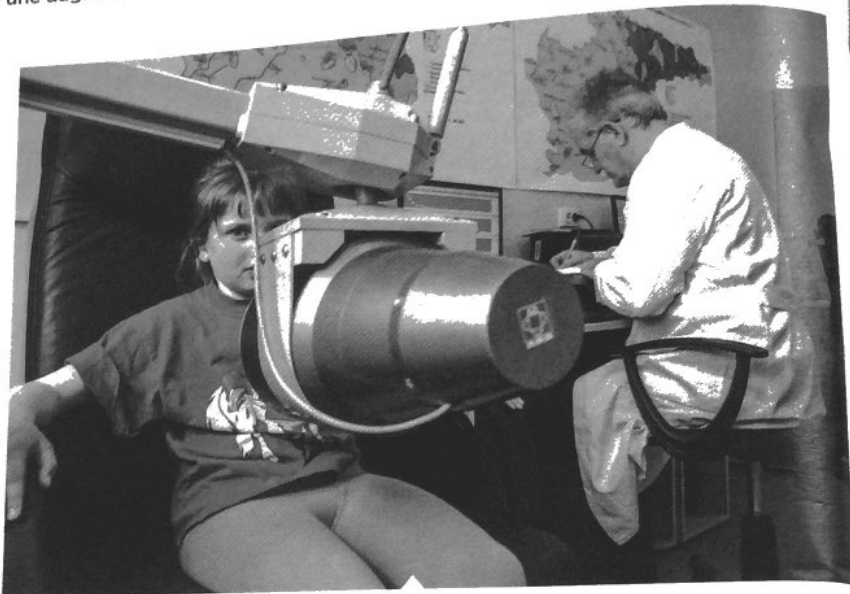
ÉPIDÉMIOLOGIE

Des conséquences sanitaires difficiles à évaluer

En utilisant les enseignements de la catastrophe de Tchernobyl en 1986, les autorités japonaises ont recherché en priorité une augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants.

Du point de vue sanitaire, quelle est l'ampleur de la catastrophe de Fukushima? Dix ans après, force est de constater qu'avec les données disponibles, il est difficile de répondre. Pourtant, les 2 millions d'habitants de la préfecture se sont vu proposer un suivi sanitaire. Mais, dans les faits, ils furent libres de collaborer ou non à l'enquête épidémiologique menée par les autorités japonaises. Et c'est à peine un quart environ (567 000 personnes) qui ont répondu sur la durée aux questionnaires. « Depuis 2011, le taux de participation n'a cessé de baisser ce qui semble indiquer une moindre inquiétude des personnes évacuées », précise Enora Clero, épidémiologiste à l'IRSN, qui participe au programme de suivi des populations avec les autorités sanitaires japonaises.

Parmi ces personnes, 38 % ont été exposées à des doses supérieures à 1 millisievert (mSv), le seuil maximal annuel recommandé par la Commission internationale de protection radiologique et 0,005 % ont reçu une dose supérieure à 15 mSv. Les autorités ont recherché en priorité une augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants. « Cette vigilance provient des enseignements de la catastrophe de Tchernobyl en 1986, explique Enora Clero. Grâce aux registres des cancers tenus en Ukraine, Biélorussie et Russie, les scientifiques avaient pu mettre en exergue une augmentation de cette affection conduisant à une ablation de la thyroïde chez les jeunes de moins de 18 ans exposés à la radioactivité. » Plus de 330 000 enfants ont été suivis dès 2014 — la maladie mettant au moins trois ans pour se déclarer. Mais pour exploiter les résultats,



Provoqués par l'iode radioactif, plus de 6000 cas de cancer de la thyroïde ont été observés chez des enfants en Biélorussie, en Ukraine et en Russie après 1986.

les médecins se sont heurtés à un obstacle de taille : le Japon ne tenait pas jusque-là de registre des cancers. Pas de point zéro donc pour détecter une recrudescence des cas. 141 000 enfants se sont vu détecter des nodules ou kystes sur la thyroïde, cette affection fréquente la plupart du temps bénigne. Mais 18 enfants ont été confirmés porteurs d'anomalies potentiellement malignes et 13 ont dû subir une ablation chirurgicale. « Nous sommes passés d'un taux de prévalence de 39 cas pour 100 000 enfants en 2014 à 6 cas en 2020 », commente Enora Clero. Pour interpréter ces chiffres, les chercheurs ont mené une campagne de dépistage massif dans une autre région du Japon non touchée par la catastrophe. Les taux se sont révélés similaires. Quant aux recherches sur d'autres maladies possibles (cancers, leucémies, troubles hépatiques),

elles n'ont pour l'instant rien révélé d'anormal non plus. S'il faudra attendre encore des années pour tirer des conclusions définitives, d'après ces résultats préliminaires, l'impact sanitaire de l'explosion des réacteurs nucléaires de Fukushima-Daiichi ne serait donc pas comparable à celui de Tchernobyl en avril 1986. En effet, des cancers de la thyroïde continuent de se déclarer jusqu'à aujourd'hui chez des individus qui ont subi les rayonnements de la catastrophe soviétique dans leur jeunesse. L'explication tient peut-être aux différences de matériaux radioactifs inhalés par les populations lors des deux catastrophes, très différentes tant en raison de la conception des réacteurs impliqués que des circonstances de l'accident et des mesures d'éloignement des populations, qui ont tardé en Ukraine. L. C.

► des systèmes permettant d'injecter au besoin de l'azote chimiquement neutre. Des circuits de secours électriques ont été installés pour parer à toute panne. Les piscines d'entreposage de combustible usé situées à côté de chaque réacteur sont également maintenues à des températures inférieures à 30 °C.

Le casse-tête du démantèlement

Pour Tepco, la phase de démantèlement a officiellement commencé en 2013. C'est cette année-là en effet qu'ont débuté les travaux d'évacuation du combustible usé de la piscine du réacteur 4, laquelle était pleine à 97 % avec 1300 éléments qu'il a fallu retirer et stocker dans une nouvelle piscine sur le site. Cette phase s'est achevée en décembre 2014. L'enlèvement du combustible usé du réacteur 3 pourrait s'achever ce mois de mars. Restent les réacteurs 1 et 2, où le retrait est annoncé pour 2023.

Puis il faudra enlever les cœurs fondus (corium) des réacteurs 2 et 3. La radioactivité y est très forte si bien que personne ne sait quelle consistance ont ces matériaux. « À Tchernobyl, le corium est compact et durci mais il est possible que cela soit dû aux sacs de sable et autres matériaux solides qui ont été projetés sur le réacteur par hélicoptère pour stopper les émissions de particules radioactives, suppose Patrice François, ingénieur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). À Fukushima, l'injection d'eau a peut-être conduit à un résultat différent. » Le 13 février 2019, un robot muni d'une caméra a pu arriver au contact du corium du réacteur 2. Selon les premiers constats, il semble que la matière fondue soit friable. Les premières images montrent par ailleurs que le combustible nucléaire a traversé sa cuve pour pénétrer les

fondations en béton (radier). Le 26 janvier 2021, l'autorité nucléaire japonaise a révélé un nouvel obstacle : de très forts taux de radioactivité dus à du césium 137 affectent les dalles de 12 mètres de diamètre composées de trois couches de béton qui couvrent les cœurs fondus des réacteurs 2 et 3. De quoi peut-être repousser la date de la fin des travaux de décontamination prévue pour 2031. Dans tous les cas, Tepco estime que la remise du site entier dans son état naturel devrait durer devrait durer des dizaines d'années, pour se terminer aux alentours de 2070.

Rejeter en mer l'eau dépolluée ?

L'arrosage permanent des cœurs fondus pour les refroidir permet également d'empêcher leur enfoncement dans le sol sous l'effet de la chaleur ainsi que la dispersion de radionucléides dans l'atmosphère. Mais pour chaque réacteur, il faut apporter pas moins de 5000 litres d'eau par heure. De l'eau qui est ensuite récupérée, pour être partiellement décontaminée avant d'être stockée. Pour réussir cette récupération, Tepco a étanchéifié le site en 2016 en congelant la terre afin d'obtenir un « rempart » de sol congelé. Par ailleurs, face à la mer, un mur long de 900 m et haut de 35 m empêche les écoulements. Problème, depuis dix ans, l'eau traitée ne cesse de s'accumuler dans des réservoirs. Au 21 janvier 2021, ce sont très exactement 1 240 731 m³ d'eau traitée qui étaient entreposés dans plus d'un millier de cuves ! Faute de pouvoir s'étendre indéfiniment, le site va arriver à saturation

L'onde de choc



Un chantier mondial a été lancé pour renforcer la sûreté des centrales nucléaires. Coût indéterminé.

d'ici à 2022. À l'été prochain, le gouvernement japonais prendra une décision cruciale : autoriser ou non le rejet dans l'océan d'une partie de cette eau.

« Le strontium, le césium et la plupart des radionucléides ont été éliminés par les systèmes de dépollution », assure Patrice François. Mais il reste encore du tritium. Pour le chercheur, « l'eau pourrait être rejetée en mer sans grandes conséquences écologiques ; la décision est politique plus que technique ». Le

rejet dans la mer est vivement contesté par les associations écologistes, les pêcheurs et les populations riveraines. Mais que faire sinon ? L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) estime que faire s'évaporer l'eau est une autre voie techniquement faisable, le tritium étant un gaz très volatil. Reste qu'il est difficile de modéliser sa dispersion dans l'atmosphère et les conséquences possibles sur l'environnement.

Décontaminer la terre

Dans le voisinage de la centrale, le nettoyage des « zones de décontamination spéciale », où les teneurs en radioactivité dépassaient les 20 millisieverts (mSv), a été terminé en 2018. Ces travaux qui ont coûté près de 25 milliards d'euros ont consisté à racler une croûte de 5 cm sur les terres agricoles, ce qui a réduit sensiblement la pollution. 17 millions de mètres cubes de déchets de végétaux et de sols ont ainsi été produits. Mais rien n'a pu être entrepris dans les forêts et zones naturelles où le nettoyage détruirait les écosystèmes.



TOMIHIRO OSHIHI/GETTY IMAGES/ANP

Le retrait du combustible usé du réacteur 3 devrait être achevé en mars. Reste celui des réacteurs 1 et 2 dont l'enlèvement devrait être terminé en 2024 (ici des ouvriers du chantier revêtant leur tenue de protection).

Le retour des populations

À Fukushima, la moitié des personnes vivant dans les zones les plus polluées ont choisi de ne pas revenir, bien que le gouvernement japonais incite fortement à la réinstallation. L'étude sociologique franco-japonaise Shinrai menée conjointement par l'IRSN, l'Institut d'études politiques de Paris et l'université de Technologie de Tokyo a montré à quel point les vies des habitants de la préfecture de Fukushima ont été perturbées. Certaines personnes veulent revenir et oublier au plus vite l'épreuve. Ce sont principalement des personnes âgées. Elles refusent les mesures de radiopro-

tection et veulent « vivre comme avant ». Mais une autre partie des volontaires au retour le fait en suivant scrupuleusement les consignes de radioprotection. Une troisième catégorie regroupe des « revenants » peu certains de leur choix et anxieux qui décident de rentrer soit par attachement, soit pour le travail. Enfin, les derniers n'acceptent qu'un retour partiel pour travailler, et continuent à vivre en dehors de la zone contaminée.

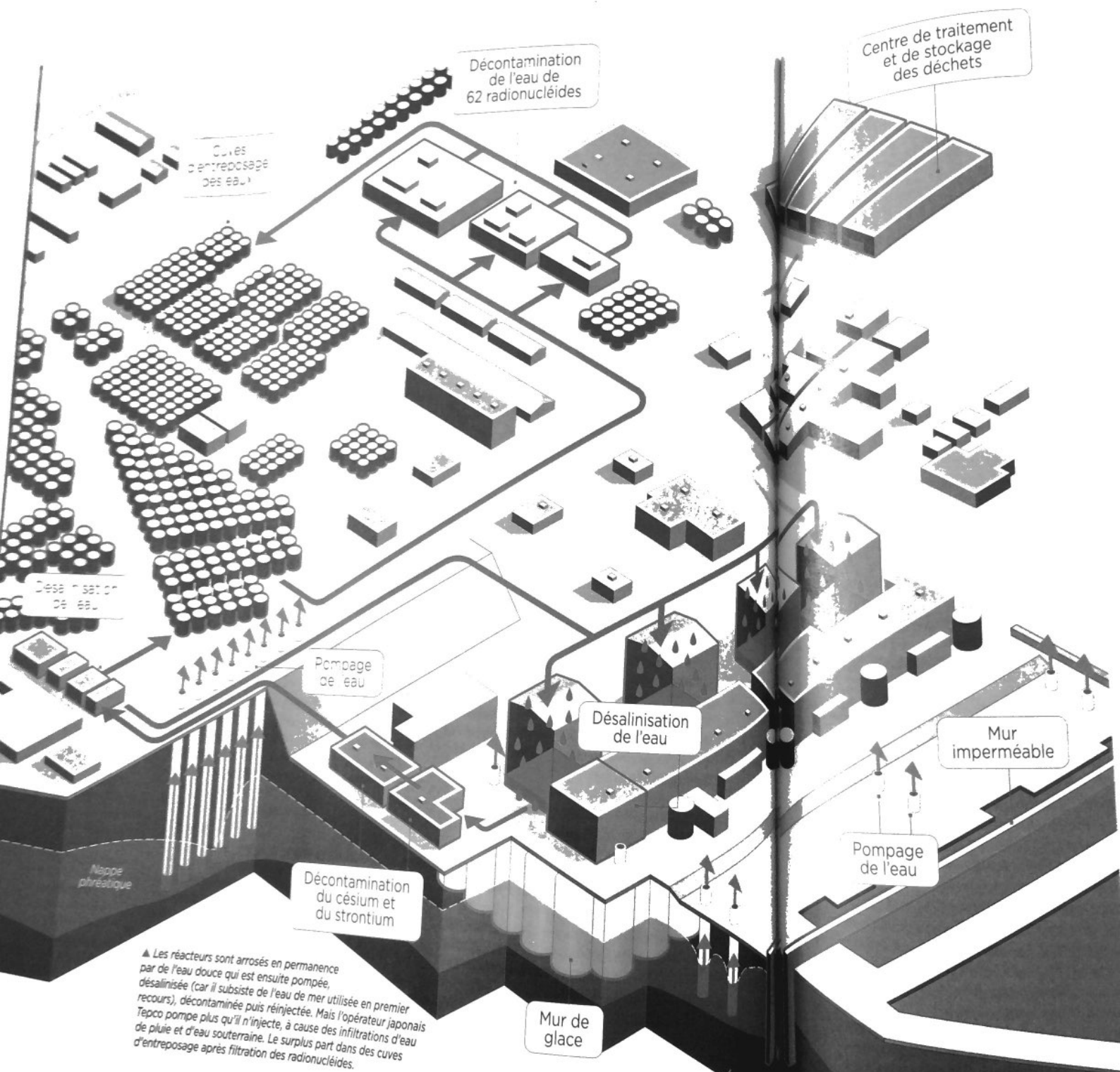
Sécurité renforcée en France

Depuis la catastrophe, les centrales nucléaires du monde entier sont en chantier pour éviter le

scénario de Fukushima. Aucune agence n'est capable de préciser l'état d'avancement des travaux ou les montants engagés, mais la facture atteindrait plusieurs centaines de milliards d'euros. En France, EDF estime ainsi qu'il lui en coûtera 10 milliards d'euros, en sus des 40 à 50 milliards indispensables pour prolonger ses 56 réacteurs jusqu'à 60 ans. Car l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a, après Fukushima, exigé des mesures pour renforcer la sûreté des sites hexagonaux. Il s'agit notamment de sécuriser les approvisionnements en électricité et en eau qui permettraient d'arroser le combustible, en cas de fusion du cœur.

Mi-février, la centrale de Paluel (Normandie) a été la dernière à être équipée d'un bunker avec un « Diesel d'ultime secours », palliant toute panne de courant. « Les bâtiments de crise, ou ceux qui protègent les sources d'électricité ou d'eau, doivent désormais pouvoir essuyer sans dommages les pires tornades, inondations ou séismes possibles dans leur région », explique Rémi Catteau, directeur des centrales nucléaires à l'ASN. Alors, partout, on construit des coques de protection, on surélève sur piliers, on bétonne en acier renforcé, on installe des tuyaux increvables, des prises d'eau, branchées sur les fleuves ou des citernes. Pour les populations, le périmètre du plan particulier d'intervention (PPI), activé en cas de rejet de particules radioactives dans l'air, est passé de 10 à 20 km — ce qui correspond à la zone évacuée au Japon. Les personnels ont reçu une formation aux événements météorologiques extrêmes. Enfin, une Force d'action rapide du nucléaire (Farn) a été créée : 300 techniciens répartis sur cinq sites en France pour intervenir en moins de 24 heures sur n'importe quelle centrale nucléaire du parc français. ■

Certaines personnes, principalement âgées, veulent revenir et oublier au plus vite l'épreuve

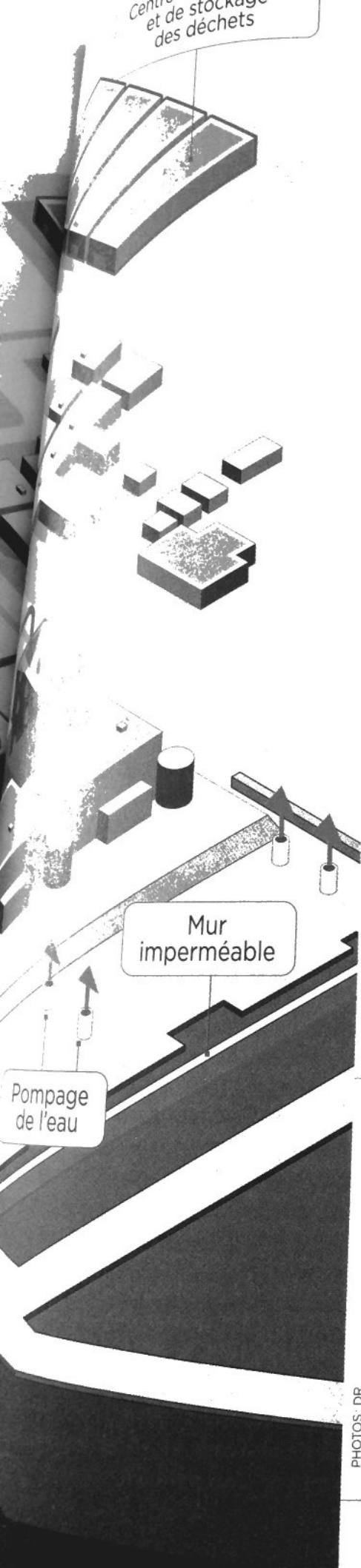


▲ Les réacteurs sont arrosés en permanence par de l'eau douce qui est ensuite pompée, désalinisée (car il subsiste de l'eau de mer utilisée en premier recours), décontaminée puis réinjectée. Mais l'opérateur japonais Tepco pompe plus qu'il n'injecte, à cause des infiltrations d'eau de pluie et d'eau souterraine. Le surplus part dans des cuves d'entreposage après filtration des radionucléides.

Fukushima, dix ans après

Le 11 mars 2011, à 14 h 46, la terre tremble au Japon. Dès les premières secousses, les systèmes d'arrêt d'urgence des réacteurs de la centrale de Fukushima Daiichi s'activent automatiquement. À cet instant, la situation est maîtrisée. Mais l'arrivée d'un tsunami dans les heures qui suivent fait des ravages: le site devient le théâtre de l'un des plus graves accidents industriels de l'histoire. Comment se sont déroulés les événements? Que faire des déchets radioactifs encore présents? Quelles conséquences pour la sûreté nucléaire mondiale? Deux spécialistes des crises reviennent sur cette catastrophe au très long cours.

Infographie: Bruno Bourgeois. Conception: Rachel Mulot



Aurélien Portelli
ENSEIGNANT-CHERCHEUR,
CENTRE DE RECHERCHE SUR
LES RISQUES ET LES CRISES,
MINES PARIS-PSL
*Il travaille sur les représentations des risques
industriels et l'imaginaire des techniques.*



Franck Guarnieri
DIRECTEUR, CENTRE DE
RECHERCHE SUR LES
RISQUES ET LES CRISES
*Ses travaux de recherche portent
sur l'étude des organisations
d'ingénierie en situation extrême.*

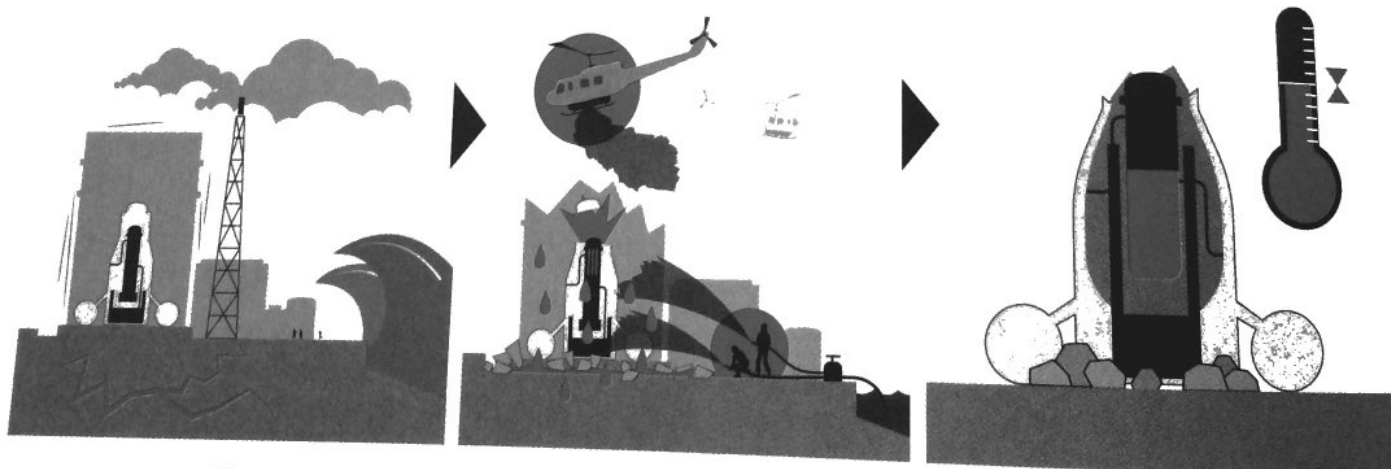
1

FACE À L'ABÎME, LA COURSE CONTRE LA MONTRE

À 15h37, le 11 mars 2011, des vagues de 11,5 à 15,5 mètres de hauteur ravagent la centrale de Fukushima Daiichi, qui comprend 6 réacteurs (dont 2 étaient déjà à l'arrêt). Les opérateurs sont plongés dans l'obscurité, tandis que les instruments de mesure et de commande ne fonctionnent plus. Jonché de gravats et de débris, le site est difficilement praticable. Retour sur ces premières journées de crise où toute prise de décision pouvait avoir des conséquences funestes.

Dès 16 h 36 (heure locale), le directeur de la centrale de Fukushima Daiichi, Masao Yoshida, informe le gouvernement de la situation d'urgence nucléaire. La vidéoconférence reliant la cellule de crise sur place, les autres centrales nucléaires et le siège de l'exploitant Tepco constitue le principal lien entre Fukushima et l'extérieur. L'urgence est absolue : la perte des systèmes de refroidissement conduit en effet à la fusion des cœurs de trois réacteurs et à d'importants rejets radioactifs ; des explosions se produisent dans les bâtiments réacteurs, occasionnant des blessés ; les opérateurs disposent de moyens dérisoires pour tenter de reprendre le contrôle des installations et manquent de matériel de protection, ce qui rend leur travail plus difficile encore et hautement dangereux.

Masao Yoshida et ses équipes font face à un enjeu considérable, puisque l'accident nucléaire confronte le Japon à un risque majeur de contamination nucléaire, ce dont le directeur a pleinement conscience. Pour déjouer ce scénario cauchemardesque, les opérateurs de la centrale entreprennent des manœuvres non spécifiées dans les procédures de gestion d'accident. Ils utilisent des



11 MARS 2011 SÉISME PUIS TSUNAMI

Des vagues allant jusqu'à 15,5 m au-dessus du niveau de la mer noient les installations de la centrale de Fukushima, y compris les systèmes électrogènes de secours. Les trois réacteurs en fonctionnement ne sont plus refroidis.

DU 12 AU 25 MARS 2011 EXPLOSIONS

L'eau s'évapore au contact des combustibles chauds, leurs gaines réagissent avec la vapeur et forment de l'hydrogène, qui explose au contact de l'air. Les cœurs des réacteurs fusionnent. Ceux-ci sont arrosés d'eau douce et de mer, une première.

NOVEMBRE-DÉCEMBRE 2011 STABILISATION

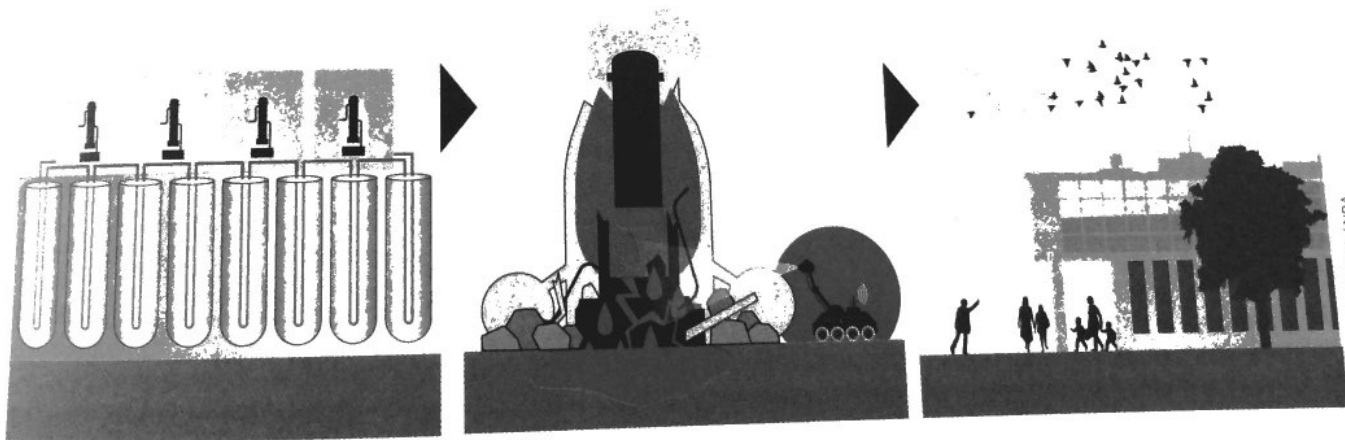
Après des mois de noyage sous l'eau salée puis sous l'eau douce, les réacteurs affichent une température inférieure à 45 °C (contre plusieurs centaines de degrés après la catastrophe). Mais les cuves sont percées, laissant s'échapper le combustible fondu.

pompes à incendie à moteur diesel et des camions de pompiers pour injecter de l'eau dans le cœur des réacteurs, et tenter ainsi de les refroidir. Ils raccordent également des batteries de voiture au tableau électrique du réacteur 3, l'un des plus touchés. Connu pour son inflexibilité, le directeur de la centrale n'hésite pas, au plus fort de la crise, à désobéir à sa hiérarchie. Une fois les réserves d'eau douce épuisées, il ordonne ainsi de procéder le 12 mars à l'injection d'eau de mer dans le réacteur 1, également très endommagé, manœuvre de dernier recours qui n'a jamais été menée ni même envisagée auparavant.

LE COMBAT EST INOÛI POUR REPRENDRE LE CONTRÔLE DES INSTALLATIONS

Malgré des essais concluants, Masao Yoshida reçoit l'ordre d'interrompre l'opération et d'attendre l'autorisation du Premier ministre Naoto Kan. Injecter de l'eau salée dans une cuve en acier à haute température engendre en effet une forte corrosion. Mais le directeur, considérant que seule compte l'issue de la crise, décide alors de mentir à ses supérieurs et de continuer la manœuvre.

Sur le terrain, les travailleurs de la centrale ont le sentiment de représenter la seule ligne de défense pour sauver leur pays. Cela les conduit à idéaliser leur action et à très mal supporter un outrage que leur inflige Naoto Kan. En effet, à la suite d'un quiproquo, le Premier ministre pense que Tepco veut faire évacuer la centrale, devenue trop dangereuse pour ses opérateurs: au matin du 15 mars, il quitte donc sa résidence pour se rendre au siège de l'exploitant, à Tokyo, et ordonne aux équipes, via le système de téléconférence, de rester à leur poste et de sacrifier leur vie. Son injonction malvenue assimile aussitôt le collectif à une bande d'irresponsables, prêts à abandonner le Japon à une fin annoncée. Ses paroles, perçues comme une agression ultime par les travailleurs de la centrale, s'ajoutent aux remontrances du siège, incapable de comprendre la situation vécue sur le site. Ce manque de soutien n'empêche cependant pas les ouvriers de livrer un combat inouï et de regagner prise sur les installations. Au fil des jours, ils parviennent ainsi à stabiliser la température des réacteurs grâce à un arrosage massif d'eau salée. Aujourd'hui, l'arrosage se poursuit, mais c'est désormais de l'eau douce qui est utilisée. ■



2014-2017 MUR DE GLACE

Une barrière réfrigérée de 1500 m de long et 30 m de profondeur est construite autour des îlots nucléaires (enceintes et salles des machines). Ce n'est qu'une des pièces du dispositif visant à limiter les fuites d'eau hautement radioactive vers le Pacifique.

2017-2019 LOCALISATION DU CORIUM

Des robots repèrent après plusieurs tentatives le cœur fondu qui a coulé dans le fond de la cuve et son support en béton. La récupération du magma radioactif doit démarrer en 2022 avec un bras télescopique conçu au Royaume-Uni.

2031 FIN PRÉVUE DU DÉMANTÈLEMENT

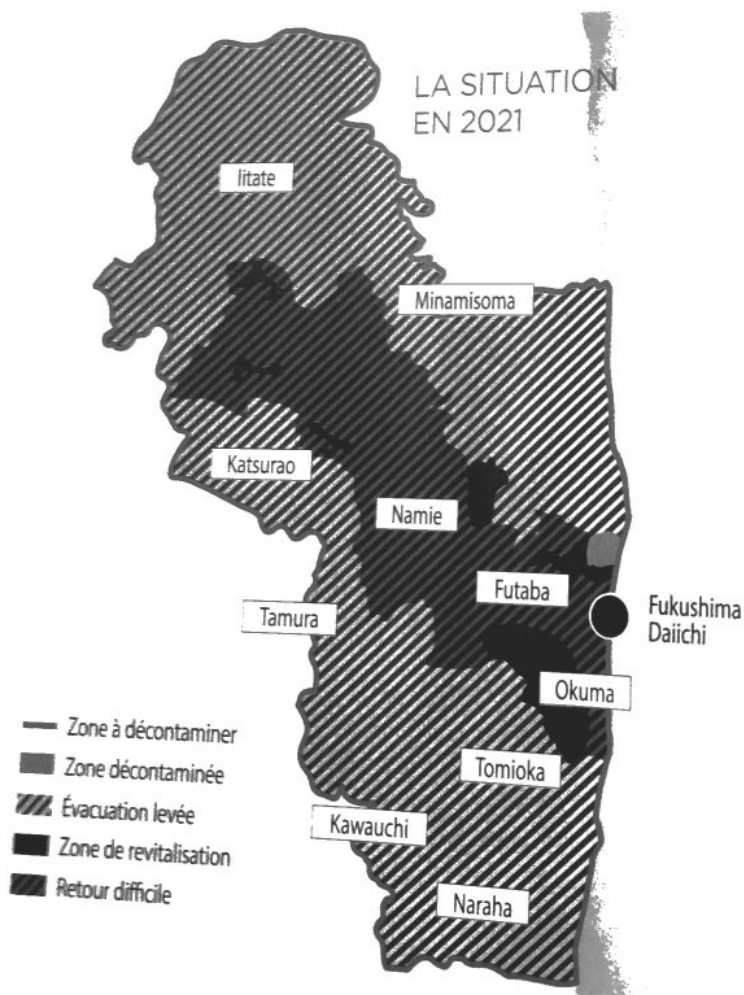
Les piscines des réacteurs devraient toutes être vidées et leurs combustibles et tous les gravats évacués en 2031, espère l'opérateur Tepco. Le démantèlement du site prendra encore deux décennies minimum. Sa vocation future (entreposage, mémorial?) est discutée.

2

DÉMANTÈLEMENT ET GESTION DES DÉCHETS

La centrale est en cours de démantèlement, les terres sont peu à peu nettoyées et des habitants reviennent. Mais l'un des principaux enjeux concerne l'eau contaminée qui a servi à refroidir les réacteurs. Comment s'en débarrasser en préservant l'environnement ?

LA SITUATION EN 2021



La catastrophe de Fukushima occasionne des rejets radioactifs dans l'atmosphère, sous forme de différents gaz (*) qui contaminent les territoires autour de la centrale jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres. L'accident provoque également une forte contamination du milieu marin, due au déversement d'eau contaminée jusqu'au 8 avril 2011, et des retombées d'éléments radioactifs rejetés dans l'atmosphère entre le 12 et le 22 mars 2011. Durant la crise, les populations riveraines sont progressivement déplacées. Une série d'ordres étend le périmètre d'évacuation autour de la centrale de 2 kilomètres le 11 mars à 20 kilomètres le 15 mars. Au total, environ 150 000 personnes quittent la région. Fin 2011, les autorités répartissent les territoires contaminés en plusieurs zones. Au fil des opérations de décontamination, les ordres d'évacuation sont progressivement levés (voir la carte ci-contre). Toutefois, moins de 20 % de la population est revenue habiter dans ces zones, essentiellement des personnes âgées.

1 328 sites d'entreposage temporaire sont créés afin d'accueillir les déchets (terre, végétaux) issus de ces opérations. Ces sites sont aménagés sur le territoire des communes soumises aux opérations de décontamination. À la fin du mois de mars 2019, 550 sites de stockage temporaire sont réhabilités : leurs déchets ont été évacués vers des centres de retraitement ou vers un site de stockage intermédiaire, d'une durée de vie de trente ans, en attendant qu'un site d'entreposage définitif soit choisi après 2045, hors de la préfecture de Fukushima. Plus de 20 millions de mètres cubes de déchets ont été produits depuis le début des travaux de décontamination.

LE REJET EN MER DES EAUX CONTAMINÉES FAIT POLÉMIQUE

De son côté, Tepco se charge des opérations de démantèlement sur le site de la centrale. Les travaux ont d'abord visé, à court terme, à empêcher les fuites d'eau radioactive, à sécuriser l'entreposage d'eau contaminée sur le site et à fiabiliser le refroidissement des installations. En janvier 2012, l'exploitant communique un plan à moyen et long termes. Il prévoit d'abord l'extraction du combustible entreposé dans les piscines et le retrait du corium situé dans les réacteurs 1 à 3.

Cinq pistes d'évacuation des eaux radioactives

L'évaporation dans l'air

Cette solution a déjà été utilisée après l'accident de Three Mile Island (États-Unis, 1979), mais les volumes d'eau ne représentaient que 1 % de ceux de Fukushima. Les vapeurs contenant du tritium, gaz très volatil, seraient difficiles à modéliser et à surveiller. Coût : supérieur à 273 millions d'euros. Durée : 10 ans.

Le rejet sous forme d'hydrogène gazeux

L'eau peut être séparée par électrolyse entre hydrogène et oxygène, qui sont ensuite rejetés. Mais cela nécessiterait encore des travaux de recherche.

Coût : supérieur à 784 millions d'euros.

Durée : 8 ans et 8 mois.

L'injection dans le sol, à 2 500 m de profondeur

Les ingénieurs ne sont cependant pas certains de trouver des couches géologiques sûres, les méthodes de surveillance ne sont pas au point et la réglementation inexistante.

Coût : supérieur à 141 millions d'euros.

Durée : 9 ans, sans compter la surveillance s'étalant sur des décennies.

La solidification pour un enfouissement souterrain

L'eau serait mêlée à un agent de type ciment avant d'être enterrée dans des fosses cerclées de bentonite, une argile volcanique étanche, testée en France sur le site d'enfouissement de Bure (Meuse).

Coût : supérieur à 1,9 milliard d'euros.

Durée : 7 ans et 6 mois, plus 76 ans de surveillance minimum.

Le rejet dans la mer

C'est la solution qui semble avoir été retenue par le Japon. La France procède à de telles dilutions océaniques à l'usine de la Hague (Manche), où l'impact d'un rejet liquide du tritium serait 1000 fois inférieur à l'impact d'un rejet gazeux à quantité égale.

Coût : inférieur à 27 millions d'euros.

Durée : 7 ans et 6 mois.
Rachel Mulot

avant d'envisager le démantèlement intégral des installations. La fin des travaux est fixée vers 2040-2050. D'ici là, afin de maintenir les réacteurs à basse température, l'injection d'eau doit être assurée en continu, ce qui produit des volumes contaminés très importants et stockés dans des réservoirs qui s'accumulent sur le site (voir p. 88). Au point que celui-ci sera saturé en 2022, alors que Tepco a besoin de place pour démanteler et qu'il lui est impossible de conserver indéfiniment des bidons géants à ciel ouvert sans risque. Comment se débarrasser de ces eaux qui focalisent les craintes environnementales ?

Pour certains experts, celles-ci sont trop contaminées pour que puisse être envisagé leur rejet en mer, solution privilégiée par les autorités pour des raisons financières, mais également en raison du calendrier à tenir et de la faisabilité (lire l'encadré ci-dessus). Au Japon, le projet divise et reste discuté. Pour l'ancien gouverneur de la préfecture de Fukushima, le rejet en mer constituerait

une grave erreur et ruinerait les efforts effectués pour améliorer l'image de la région. A contrario, le directeur de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a rappelé, au cours d'une visite du site le 26 février 2020, que la solution du rejet répond aux normes internationales et qu'elle relève d'un moyen courant de libérer l'eau contaminée dans les centrales du monde entier (après traitement). Quant à l'opinion internationale, elle considère avec inquiétude le projet et son impact. De son côté, le gouvernement japonais semble résolu. Les médias déclarent en effet, en octobre 2020, que la décision du rejet en mer sera prochainement officialisée. L'opération, quant à elle, ne devrait pas débuter avant 2022 et prendra des années avant d'être finalisée. D'ici là, le site n'est pas à l'abri d'une fissure et d'une fuite de cuve... À ces risques s'ajoute également le combustible fondu des réacteurs 1 à 3, matière hautement radioactive dont l'extraction soulève un immense défi technique. ■

(*) Parmi les gaz radioactifs rejetés, on a notamment retrouvé du xénon 133 et du césium 137.

3

LES PRINCIPAUX
ENSEIGNEMENTS
POUR LA SÛRETÉ

Contrairement à Tchernobyl, en Ukraine, site confiné sous une arche monumentale, Fukushima est un chantier permanent où l'opérateur Tepco expérimente de nouvelles technologies dont il entend faire étalage. Après l'accident survenu au Japon, la sûreté des installations nucléaires du monde entier a été renforcée, sans qu'on ait pour autant procédé à une redéfinition conceptuelle.



▲ Franck Guarnieri et Aurélien Portelli viennent de publier, aux éditions Presses des Mines, Masao Yoshida, directeur de Fukushima, le témoignage en édition intégrale et augmentée du directeur de la centrale devant la commission d'enquête.

Plusieurs commissions d'enquête ont été créées afin de comprendre l'enchaînement de la catastrophe de Fukushima et en tirer des leçons. Les rapports pointent le manque d'entraînement des opérateurs pour faire face à des événements extrêmes, l'incompétence et l'impréparation des institutions impliquées dans la gestion de l'accident, le manque d'indépendance et de transparence de l'agence de sûreté nucléaire japonaise, et les défaillances en matière de communication entre les cellules de crise. Tous signalent que l'opérateur Tepco n'a pas procédé préventivement à la réalisation de travaux de surélévation de la digue protégeant Fukushima de l'océan, alors que des études montraient la possibilité de survenue d'un tsunami pouvant la submerger. Les rapports soulignent également une prise en compte insuffisante par l'exploitant et les institutions japonaises de l'évolution de l'état de l'art mondial en matière de

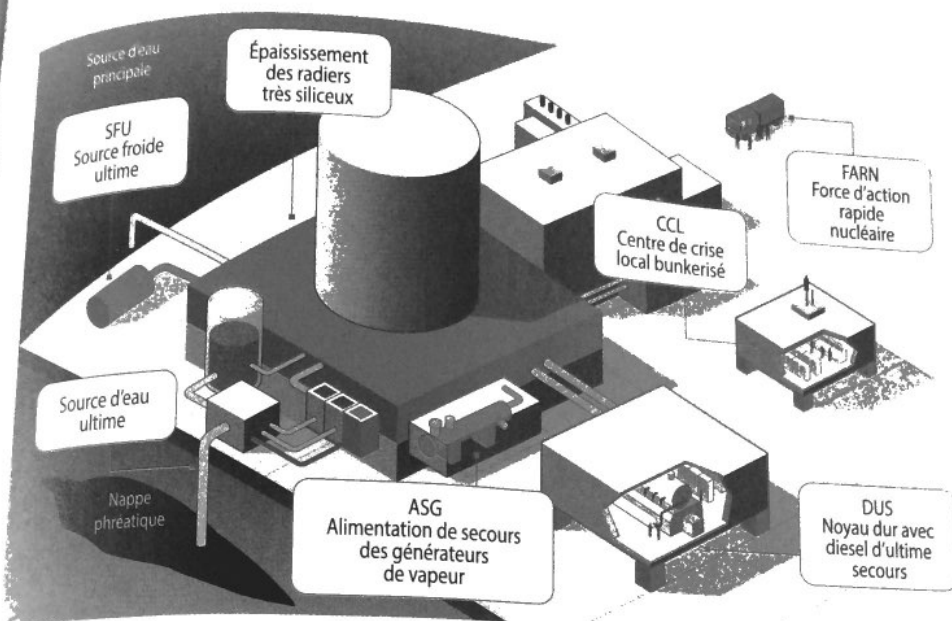
sûreté nucléaire. Il aurait fallu en particulier veiller à une meilleure application des concepts fondamentaux de « culture de sûreté » (*) et de « défense en profondeur » (*). Tirant les leçons de ces constats, les rapports préconisent de renforcer l'application de ces concepts, de définir des standards plus élevés, de prendre des mesures considérant la possibilité d'accidents multiples et hors dimensionnement, et de garantir la transparence et l'indépendance des instances régulatrices.

LA FRANCE CRÉE UNE FORCE
D'ACTION RAPIDE DU NUCLÉAIRE

Au Japon, le parc nucléaire a été mis à l'arrêt en avril 2012 pour inspection. Au cours des années suivantes, des réacteurs ont été progressivement remis en service malgré l'opposition d'une partie de la société civile. Actuellement, neuf réacteurs nucléaires sont exploités dans l'Archipel. La catastrophe de Fukushima questionne également la sécurité des parcs nucléaires en exploitation ailleurs dans le monde. En France, le gouvernement a réclamé, le 23 mars 2011, la réalisation d'un audit de la sûreté des installations nucléaires françaises. Les 24 et 25 mars 2011, le Conseil européen a demandé à la Commission européenne et aux autorités de sûreté nucléaire d'organiser des tests de résistance pour évaluer la robustesse des centrales face à des situations exceptionnelles. C'est dans ce cadre que des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) ont été menées en France à partir de mars 2011. Dans son rapport du 3 janvier 2012 sur les ECS, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a ainsi déclaré que le niveau de sûreté était jugé suffisant pour ne réclamer l'arrêt immédiat d'aucune des installations inspectées, mais elle a exigé le renforcement de leur robustesse face à des situations extrêmes afin de permettre la poursuite de leur exploitation. Le 26 juin 2012, l'ASN a adopté des mesures visant à renforcer les marges de sûreté de ces installations. Les exploitants doivent réaliser d'importants travaux et mettre notamment en place un « noyau dur », qui correspond à « l'ensemble des dispositions matérielles et organisationnelles robustes visant, pour des situations extrêmes

LES MESURES PRISES PAR LA FRANCE

En 2014, l'Autorité de sûreté nucléaire a décidé une première phase d'aménagements portant notamment sur les installations suivantes: pour chaque réacteur, un diesel d'ultime secours de grande capacité nécessitant la construction d'un bâtiment dédié, une source d'eau ultime dédiée et un appoint d'eau ultime, ainsi que pour chaque site un centre de crise local capable de résister à des agressions externes extrêmes.



considérées dans les ECS, à prévenir un accident avec fusion ou à en limiter la progression, à permettre à l'exploitant d'assurer ses missions dans la gestion de la crise». Ces dispositions impliquent entre autres la mise en place d'un diesel d'ultime secours sur chaque réacteur pour assurer la continuité de leur fonctionnement en cas de rupture électrique, d'une source d'eau ultime et de dispositifs mobiles d'alimentation, de la construction d'un centre de crise local sur chaque site et de la création de la Force d'action rapide du nucléaire (Farn), une unité spéciale entraînée pour intervenir en moins de douze heures sur n'importe quelle centrale d'EDF confrontée à un événement extrême.

FUKUSHIMA REPRÉSENTE UN « IMPENSÉ » DANS L'HISTOIRE DU NUCLÉAIRE

La catastrophe de Fukushima n'a donc pas conduit, malgré son ampleur, à redéfinir les concepts de la sûreté nucléaire. En réponse à l'accident, les préconisations vont en effet toutes dans le même sens: renforcer les normes et les procédures. Or, Fukushima représente un « impensé » dans l'histoire du nucléaire. D'une part, les équipes ont dû faire face, pour



la première fois, à la dégradation simultanée de plusieurs réacteurs nucléaires. D'autre part, la centrale s'est retrouvée confrontée à une perte totale d'alimentation externe doublée d'une perte de distribution électrique interne, un scénario que nulle procédure n'avait pris en compte. En ce sens, l'intérêt porté à l'adaptabilité des individus et des organisations conduit à sortir de l'idéalisation des modèles de sécurité, la catastrophe japonaise ayant démontré l'utopie d'une telle approche. Sur le terrain, la réponse à la perte des ressources électriques n'a pas consisté à appliquer la norme définie dans les manuels, mais a été apportée par les travailleurs eux-mêmes. Leur action montre ainsi les limites d'une sécurité définie par l'application des référentiels normatifs. L'espoir de gérer une catastrophe industrielle sans considérer la manière dont les individus qui la vivent font sens de leur situation et reconstruisent un imaginaire fédérateur relève par conséquent de l'illusion. En cela, le témoignage des acteurs constitue une source indispensable pour saisir la profondeur de leur expérience et tenter de décrypter les transformations de tous ordres qu'ils ont vécues face à une situation extrême. ■

(*) **La culture de sûreté** renvoie à « l'ensemble des caractéristiques et des attitudes qui, dans les organismes et chez les individus, font que les questions relatives à la sûreté des centrales nucléaires bénéficient, en priorité, de l'attention qu'elles méritent en raison de leur importance » (AIEA, Insag, 1991, p. 5).

(*) **Le concept de défense en profondeur** repose sur l'idée de niveaux multiples de protection: « Toutes les activités de sécurité, qu'elles soient liées à l'organisation, aux comportements ou aux équipements, sont soumises à des couches de disposition qui se chevauchent, de sorte que si une défaillance devait se produire, elle serait compensée ou corrigée sans causer de tort aux individus ou au grand public » (AIEA, Insag, 1996, p. 1).

À Fukushima, le chantier du siècle

Dix ans après l'explosion de plusieurs réacteurs de la centrale nucléaire japonaise, le démantèlement et la décontamination des installations affrontent d'immenses défis. La remise du site entier dans son état naturel n'est pas envisageable avant 2070.

Par Loïc Chauveau  @Loic_Chauveau et Rachel Mulot  @RachelFleaux

LE 11 MARS 2011, UN TSUNAMI dévastait la côte pacifique de la région du Tōhoku au Japon. Plus de 18 000 personnes sont mortes ou disparues. 500 000 sont déplacées, car leur village n'existe plus, ou parce qu'elles sont les victimes collatérales d'un autre drame : l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima dai-ichi (Fukushima-I), ravagée par la mer. À quoi ressemble celle-ci dix ans plus tard ? Derrière les réacteurs accidentés, qui se dressent toujours face à l'océan, tout juste recouverts de sarco-phages provisoires, le chantier est titanesque : des cuves par centaines, des centres de stockage du combustible irradié, des millions

Le gouvernement va devoir prendre une décision cruciale : autoriser ou non le rejet d'une partie des eaux traitées dans la mer

de tonnes de terre excavée... La facture des travaux dépassera les 170 milliards d'euros, soit le PIB de la Nouvelle-Zélande. Voici la situation actuelle.

Des réacteurs sous haute surveillance

Aucun des six réacteurs n'est dans la même situation technique. Deux d'entre eux — les 2 et 3 — ont fondu à la suite du tsunami. Trois — les 1, 3 et 4 — ont été le siège d'une explosion d'hydrogène qui a soufflé les bâtiments. Les réacteurs 5 et 6, situés plus en hauteur et à l'arrêt au moment du drame, n'ont pas été touchés par la catastrophe. Depuis le 11 mars 2011, l'exploitant Tepco lutte sans cesse pour maintenir la température des cœurs fondus autour de 30 °C en les arrosant constamment d'eau douce. Les risques de nouvelles explosions d'hydrogène sont désormais écartés grâce à ▶

État des lieux de la centrale dix ans après la catastrophe

Centrale de Fukushima



Cuves de stockage des eaux, de 1000 à 1200 m³ chacune

En février, elles étaient environ un millier. L'eau est légèrement chargée en tritium. Le site sera saturé l'été 2022, avec 1,3 million de mètres cubes.