

SCIENCES ET AVENIR

SCIENCESETAVENIR.FR

D'AUTRES UNIVERS EXISTENT-ILS ?

Multivers, mondes parallèles,
effet d'hologramme...

p. 44

NEUROSCIENCES

Nos trois niveaux de conscience

p. 40



ESPACE

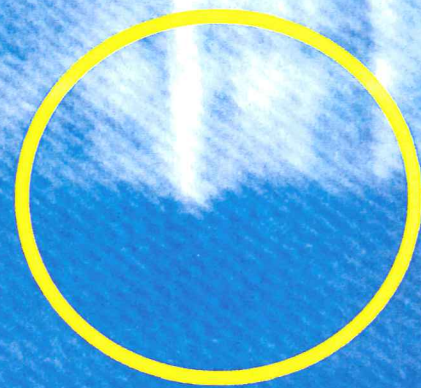
Il y a 50 ans Iouri Gagarine

p. 72

CATASTROPHE AU JAPON

LE NUCLEAIRE EN QUESTIONS

p. 10



M 02667 - 770 - F: 4,00 €



AVRIL 2011 - N° 770 - BELGIQUE 4,60 € / CANADA 6,50\$ / ITALIE 4,20 € / LUXEMBOURG 4,60 € / SUISSE 8 FS / GRÈCE 4,50 € /
ESPAGNE 4,60 € / PORTUGAL (CONT) 4,50 € / MAROC 40 DH / ANTILLES 4,20 € / ALLEMAGNE 6,80 € / TUNISIE 6 DTU / AUTRICHE 4,60 € /
G.B. 4,40 £ / USA NY 6,50 \$ US / ROUMANIE 2,75 € / TOM (SURFACE) 680 CFP / TOM (AVION) 1300 CFP / LIBAN 9000 LBP /

Sciences et Avenir

33, rue Vivienne 75083 Paris cedex 02
Tél. : 01.55.35.56.00. Fax : 01.55.35.56.04.
e-mail : redaction@sciences-et-avenir.com
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction

Dominique LEGLU 56.02
Rédactrices en chef
Carole CHATELAIN 56.57
Aline KINER (hors-série) 56.42
Rédactrices en chef adjointes
Claire CARRARD (édition) 56.10
Andréina DE BEI (photo-icongraphie) 56.31
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER 56.18
Chef de service (actualités)
Maryse GUEZ 56.38
Adjoint au chef de service
Hervé RATEL 56.45
Chefs de rubrique

Azar KHALATBARI (sciences de la Terre) 56.46
David LAROUSSE (fondamental) 56.27
Rachel MULO (sciences de l'évolution, environnement) 56.07
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) 56.54

Rédaction

Bernadette ARNAUD grand reporter (archéologie, histoire) 56.44
Olivier HERTEL (technologies, futur, décryptage) 56.03
Sylvie ROUAT (espace, fondamental) 56.40
Elena SENDER grand reporter (biologie, neurosciences) 56.43
Collaborateurs : Yves BLANG, Guillaume CANNAT, Loïc CHAUVEAU,
Pierre MIQUEL, Henri-Pierre PENEL
Ont collaboré à ce numéro : Sylvie BRIET, Marie-Noëlle DELABY,
Patricia CHAIROPOULOS, Pierre KALDY, Vahé TER MINASSIAN
Secrétariat de rédaction
Frank MIETTON 56.17 (1^{er} secrétaire)

Maquette

Dominique PASQUET (direction artistique, conception) 01.44.88.35.51
Yves CLAVEL (directeur artistique) 56.22
Thalia STANLEY (directrice artistique adjointe) 56.21
Horia BAHRI 56.19, Jean-Louis GILBERT 56.28
Photo-icongraphie
Isabelle TIRANT 56.32

Illustration

Sylvie DAUDAL 56.20, Betty LAFON 56.37

Photogravure

Karine HUET 56.25

Documentation

Isabelle DO O'GOMES (chef de service) 56.49,
Astrid SAINT AUGUSTE 56.48

Renseignements aux lecteurs, vente au numéro
Isabelle RUDI 01.55.35.56.50/56.30.
courrier-lecteurs@sciences-et-avenir.com

Informatique : Daniel DE LA REBERDIERE 56.06

Gestion : Agnès LE BOUCHER 56.16

Comptabilité

Marie-Claude BOUDET 56.12, Tania MINISTRO 56.14,

Patrice PAIN 56.13

Assistante de direction

Valérie PELLETER 56.01

Abonnements : 01.40.26.86.11

142, rue Montmartre, 75103 Paris cedex 02

Publicité

MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.

Pour joindre par téléphone votre correspondant, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent entre parenthèses à la suite de son nom. Pour adresser un e-mail à votre correspondant, l'initiale du prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com

Directrice générale

Corinne ROUGÉ (93.70) assistée de Julia CABRERA (93.70)

Directeur de publicité : Raymond MARCADET (97.74)

Directeur de clientèle : Sylvain MORTREUIL (97.75)

Responsable Web : Arthur VOJVODA (93.76)

Assistante commerciale : Séverine LECLERC (97.57)

Exécution : Nicolas NIRO (93.26)

Administration des ventes : Carole HAHN (97.58)

Ventes

Directeur commercial

Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40

Directrice commerciale adjointe

Paule COUDERAT 01.44.88.34.55

Directeur des ventes

Valéry SOURIEAU

Directeur des abonnements

Philippe MENAT 01.44.88.35.02 assisté de Lina QUACH 34.54

Relations extérieures

France ROQUIE 01.44.88.35.79

Sciences et Avenir SAS

Président : Claude PERDRIEL

Directeur de la publication : Claude PERDRIEL

Vente au numéro, 33, rue Vivienne, 75002 Paris. Tél. : 01.55.35.56.00.

Fax 01.55.35.56.04. Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, Service abonnements, 142, rue Montmartre, 75002 Paris. Tél. : 01.40.26.86.11. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-séries) : 48 €. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.

Multimédia : JD OBS, 10-12, place de la Bourse, 75002 Paris. Tél. : 01.44.88.34.34.

Imprimerie SEGO-Taverny. Distribution Presstalis

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comprend, jérémy sur couverture en diffusion partielle des abonnés, un poster « les 521 Héros de l'espace », un catalogue OBJET du mois, un tout-en-un DVD Égypte, un encart Presse savantes, une enveloppe MEKATEK Turquie et un encart Dossiers d'Abonnements. Copyright Sciences et Avenir. Conception graphique : NOUËL 2712. ISSN 0955-6536. Distribué par NMPP Photogravure : PCH, 10-12, place de la Bourse 75002.



B. MARTINEZ

DOMINIQUE LEGLU

Directrice de la rédaction

“ Les cerisiers de Fukushima ”

Sidération. Effroi. Admiration. Colère. La catastrophe de la centrale nucléaire de Fukushima, sur fond tragique de tsunami, vue en direct sur nos écrans, nous a fait passer par un éventail de sentiments. Il y a eu des explosions, des évacuations, des pompiers et leurs lances, un Premier ministre japonais en habit gris-bleu de travailleur, un empereur prêt à la prière, des camions rouges et leurs canons à eau automatiques, des hélicoptères géants de l'armée larguant de l'eau de mer sur des piscines remplies de combustible à l'ébullition funeste. L'ennemi est invisible mais ses dégâts crèvent les yeux. Et puis, il y a tout ce qu'on n'a pas vu. Tout ce qu'on n'a pas entendu. Et tout ce qu'on n'a pas encore compris. Reste aux spécialistes à faire leur travail : reconstituer de façon rationnelle, minutieuse et aussi claire que possible ce qu'il s'est réellement passé. Il faudra évaluer les destructions : à l'heure où nous écrivons, la catastrophe n'est pas finie et les opérateurs, sur place, ne sont toujours pas parvenus à refroidir cœurs et piscines. Il faudra mesurer avec exactitude les retombées radioactives : césium et aussi uranium ? plutonium ? américium ? curium ? Détecter sur le terrain la « peau de léopard » qu'elles y auront dessinée. Il faudra opérer les irradiés, suivre les contaminés. Il faudra mesurer, mesurer encore. Cela prendra du temps. Aux physiciens comme aux médecins. Surtout, ne pas oublier. Pendant que nos yeux écarquillés scrutent les lambeaux de « bâtiments réacteurs » sur photo satellite, ne pas oublier ceux de Fukushima. Aujourd'hui transformés en « évacués » dormant dans des écoles ou des gymnases, ils seront demain des centaines de milliers empêchés de retrouver leur maison, pour cause de radioactivité. Ne pas oublier les sacrifiés, rebaptisés héros,

qui ont combattu le feu, cernés par ce rayonnement violent à la mesure inconnue du profane, qui pratique les mètres et kilos mais pas les becquerels ou les sieverts. Ne pas oublier cet autre invisible, indicible : ce périmètre intouchable qui s'est déjà virtuellement dessiné tel un demi-cercle interdit, depuis une plage abandonnée jusqu'à 20 km vers l'intérieur des terres. Une zone radioactive à la Tarkovski. Les cerisiers, cette année, y auront fleuri sans qu'on les regarde. Il y a comme une ironie de l'histoire. En ce mois d'avril, allait être célébrée, avec plus ou moins de conviction, la catastrophe de Tchernobyl, un quart de siècle après. Certains se souviennent encore de ses liquidateurs, de la ville abandonnée de Pripyat et de sa grande roue de manège fantôme, du sarcophage de béton édifié pour emprisonner cendres et gravats dangereux. On sait que la centrale de Fukushima, ses six réacteurs à eau bouillante, leurs piscines et leurs turbines, sont eux aussi condamnés. Mais on ne sait pas encore comment l'ensemble sera contenu car il faut d'abord le refroidir. Un autre sarcophage géant ? A 230 km de Tokyo, la ville aux 35 millions d'habitants En ce début de printemps, la France aura vu passer dans son ciel quelques particules de Fukushima entraînées librement par les vents. Mais pour le commerce terrestre, elle aura rétabli des frontières. C'est qu'il s'agit, dans ce monde globalisé, d'arrêter les produits contaminés. Preuve que ce qui se passe là-bas, dans cette société technologiquement avancée qui a les moyens de rebondir, nous importe ici. Le gouvernement français a d'ailleurs promis un audit rapide et transparent de toutes nos centrales nucléaires (58 réacteurs). Et cela aussi, il ne faut pas l'oublier.

Décrypter la catastrophe nucléaire de la centrale de Fukushima, qui a démarré le 11 mars au Japon – et qui n'est pas terminée au moment où nous mettons sous presse, le 23 mars –, c'est ce que *Sciences et Avenir* a tenté de faire en consacrant 12 pages à cet événement hors normes. Que s'est-il réellement passé après le séisme majeur puis le tsunami qui a dévasté la façade nord-est de l'île de Honshu, faisant au moins 9300 morts et 14 000 disparus (chiffres de la police japonaise) ? Rassemblant toutes les informations disponibles à ce jour – forcément incomplètes –, nous avons analysé les données géologiques à l'origine de la catastrophe naturelle initiale et tenté de décrypter la succession d'accidents ayant détruit les réacteurs et les piscines de combustible nucléaire usagé, vingt-cinq ans après l'explosion de Tchernobyl (avril 1986), Fukushima nous rappelle de façon dramatique l'impératif de sûreté qui doit prévaloir dans nos centrales françaises.

Dans nos articles, nous avons retenu l'heure locale au Japon. Il y avait huit heures de décalage avec la France (heure d'hiver) jusqu'au 27 mars (midi à Paris, 20 heures à Tokyo).

La catastrophe au Japon

Le nucléaire en questions

Sécurité, gestion du risque, radioactivité, contamination... Sciences et Avenir décrypte le scénario et les conséquences de l'accident majeur survenu à la centrale de Fukushima.

Que s'est-il passé ?

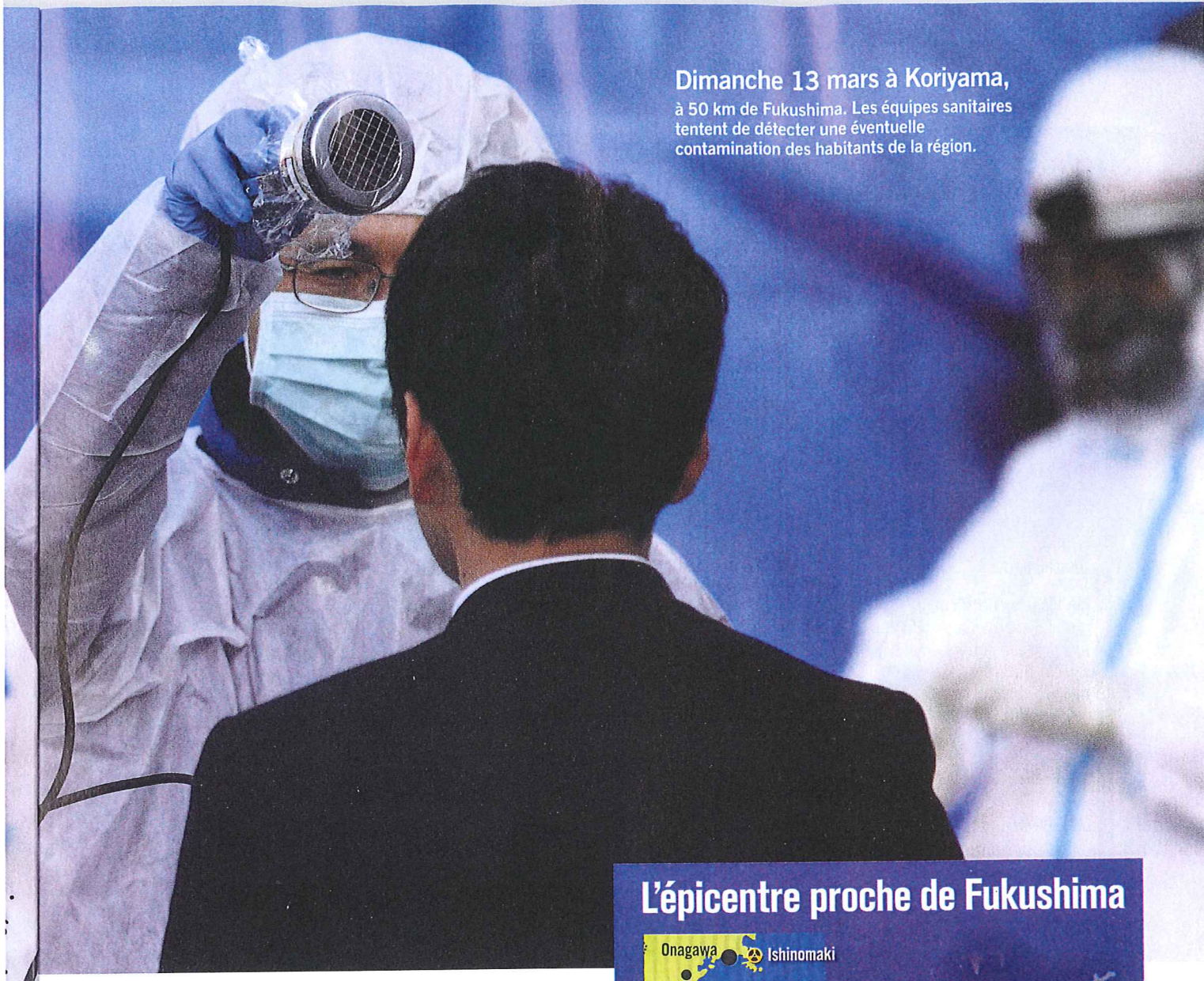
Le tremblement de terre, le vendredi 11 mars à 14 h 46 (heure de Tokyo, 6 h 46 à Paris), d'une magnitude exceptionnelle de 9 sur l'échelle de Richter, suivi d'un tsunami avec des vagues atteignant jusqu'à 14 mètres, a provoqué l'arrêt de 11 réacteurs nucléaires sur les 54 que compte le Japon. Les conséquences sont devenues catastrophiques à la centrale de Fukushima Daiichi, qui compte six réacteurs : trois d'entre eux ont été automatiquement arrêtés à la suite des secousses sismiques ; les trois autres l'étaient depuis plusieurs semaines pour permettre inspection et rechargement.

Mais même arrêté, un réacteur demande à être continuellement refroidi. Les réactions de fission

nucléaire ont beau avoir été stoppées, les éléments radioactifs qu'elles ont produits dégagent de la chaleur en se désintégrant. C'est cette phase de refroidissement qui a échoué sur les réacteurs 1, 2, 3 ainsi que sur les piscines 1, 2, 3, 4 qui contiennent du combustible usagé (mais chaud). Les arrivées d'eau dans les circuits ainsi que les alimentations électriques étaient hors d'usage. L'impossibilité de reprendre le refroidissement a provoqué un enchaînement d'événements rejetant de la radioactivité dans l'atmosphère, équivalente à « un dixième de Tchernobyl », selon une estimation de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) le 16 mars. Non refroidie, l'eau des réacteurs s'est transformée en vapeur, faisant monter dan-

gereusement la pression dans l'enceinte de confinement, dernier rempart pour éviter la contamination extérieure. Des décompressions volontaires ont alors eu lieu, rejetant dans l'atmosphère des radioéléments présents dans le réacteur. Mais cette vapeur d'eau a aussi réagi sur les gaines de combustible en créant de l'hydrogène. Ce dernier a explosé sur au moins trois unités (1, 2, 3), rejetant encore de la radioactivité et affaiblissant les enceintes de confinement.

Explosions et incendies ont détruit les toits de trois bâtiments abritant les réacteurs (1, 3, 4) et mis à l'air les piscines, dont l'eau n'a plus été refroidie. De l'eau de mer a été injectée pour refroidir les cœurs des réacteurs. Les piscines ont été remplies d'eau par largage depuis



Dimanche 13 mars à Koriyama,
à 50 km de Fukushima. Les équipes sanitaires
tentent de détecter une éventuelle
contamination des habitants de la région.

des hélicoptères de l'armée japonaise et grâce à des camions équipés de canons à eau. Et ce, pour tenter d'empêcher la destruction des combustibles et éviter de nouvelles émissions radioactives. Le 23 mars [date à laquelle nous mettons sous presse], les circuits habituels de refroidissement n'avaient pas été remis sous tension, rendant toujours instable la situation dans la centrale.

Quel est le type de réacteur concerné ?

A Fukushima, il s'agit de réacteurs nucléaires dits à eau bouillante (REB), filière à laquelle la France n'a pas fait appel, mais dont le Japon possède 30 exemplaires (outre les 24 réacteurs dits à eau sous pression (REP), soit 54 réac-

teurs nucléaires au total). D'une conception remontant aux années 1960, ils ont été fabriqués, comme 32 autres dans le monde, par l'entreprise General Electric et mis en service entre 1970 et 1979. L'eau qui refroidit le cœur circule dans un circuit menant directement vers les turbines. Une conception différente de celle des réacteurs de Three Mile Island et de Tchernobyl (voir les schémas pp. 14-15).

Tous ces réacteurs possèdent des piscines d'entreposage des combustibles usés à proximité de leur cœur. Dans les bâtiments de Fukushima, elles sont surélevées, contrairement à celles des REP ou des futurs EPR – la génération suivante envisagée en France, où les piscines seront dans un bâtiment étanche. A noter que dans les REP français, des filtres à sable doivent ●●●

L'épicentre proche de Fukushima



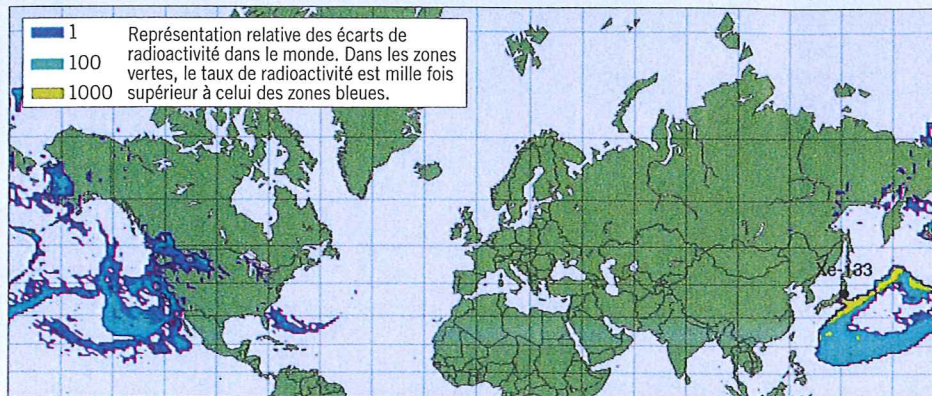
Le Japon compte 54 réacteurs nucléaires (ci-dessus, la carte des principales centrales). Une semaine après le séisme du 11 mars, onze d'entre eux étaient encore à l'arrêt. Après l'explosion à Fukushima, les premières mesures de précaution ont consisté à évacuer d'abord une zone de 3 km puis de 20 km, avec des consignes de mise à l'abri dans un rayon de 30 km (en haut).

GREGORY DULLAPPSIPA

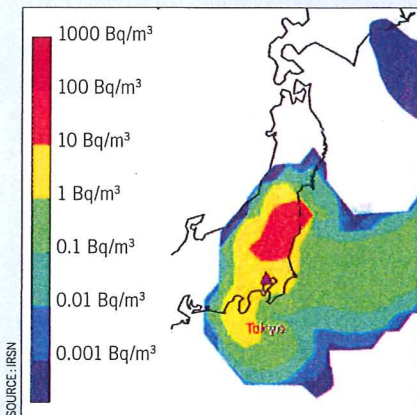
IDF



Qu'est-ce qui se répand dans l'atmosphère ?



SOURCE: INSTITUT CENTRAL POUR LA MÉTÉOROLOGIE ET LA GÉODYNAMIQUE, ZAMG



Le panache au Japon et dans le monde

A gauche: simulation du panache radioactif au-dessus de l'archipel en prenant comme hypothèse que seuls des radioéléments volatils ont été émis par les différents cœurs de Fukushima. Seul l'effet du césium 137 est ici représenté, le 15 mars, avec un panache au-dessus de Tokyo d'une dizaine de becquerels, légèrement inférieur à des mesures effectuées depuis.

Ci-dessus: simulation à l'échelle du globe établie le 22 mars par l'Institut ZAMG (Autriche), chargé de soutenir l'Agence internationale de l'énergie atomique en réalisant des calculs de dispersion du panache radioactif. Il s'agit d'un gaz rare, le xénon 133, qui persiste plus longtemps dans l'atmosphère que le césium et l'iode, entraînés par les précipitations. Le niveau de radioactivité est infime après le passage au-dessus du Pacifique, sans risque pour la santé.

L'échelle des retombées radioactives

- En becquerels*
- Hiroshima → $>10^{24}$ Bq (total estimé)
 - Tchernobyl → 10^{18} Bq (total estimé sur le site)
 - Tchernobyl → $1\ 500\ 000$ Bq/m² (30 km autour)
 - Corps humain → 8000 Bq (taux naturel)
 - Lait → 100 à 600 Bq/l (France après Tchernobyl)
 - Salade → 100 à 600 Bq/kg (France après Tchernobyl)
 - Tokyo le 15 mars → 50 Bq/m³ (césium) (premières mesures)
 - France → 10 Bq/m³ (Maximum juste après Tchernobyl)
 - Essais nucléaires → 0,01 Bq/m³ (retombées atmosphériques)
 - France → 0,000001 Bq/m³ (radioactivité ambiante)

Radioéléments que pourraient contenir les rejets

Cs Cesium 137 30 ans	I Iode 131 8 jours	Xe Xénon 133 5,3 jours	Kr Krypton 85 10,8 ans	Sr Strontium 90 28 ans	Pu Plutonium différents isotopes de 13 ans à plus de 24 000 ans
--	--	--	--	--	--

137 : nombre de nucléons (protons et neutrons) 30 ans : demi-vie

Lors de la fonte (fusion) d'un cœur de réacteur sous l'effet de la chaleur, les éléments radioactifs issus de la fission des noyaux d'uranium sont libérés. Ce sont des isotopes des gaz rares, de l'iode, du césium, du strontium ou des particules plus lourdes comme le zirconium, le curium ou le plutonium (voir le schéma ci-dessus). Tous ces noyaux n'ont pas la même durée de vie. C'est-à-dire que le nombre d'atomes est divisé par deux en trente ans par exemple pour l'isotope du césium, en huit jours pour l'isotope de l'iode 131. Les rayonnements sont généralement des rayons gamma ou des électrons, invisibles. Une partie de ces particules est volatile (césium et iode), d'autres, plus massives, peuvent être émises dans l'atmosphère par de l'air

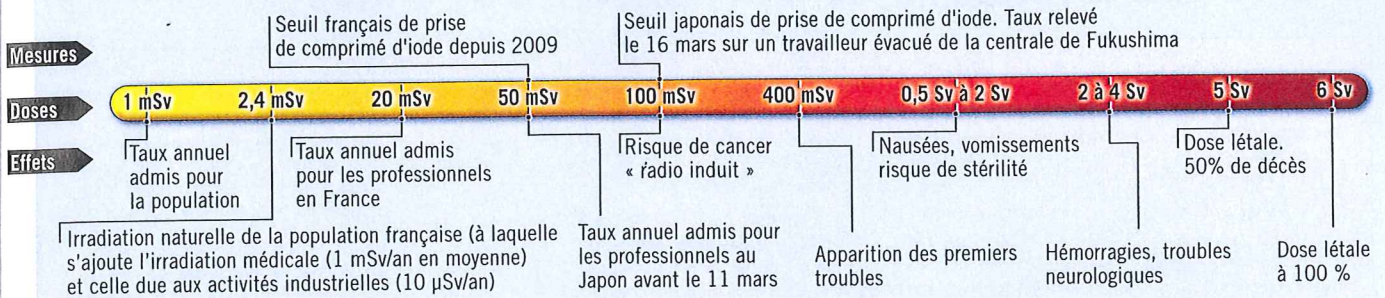
chaud après un incendie ou une explosion (comme à Tchernobyl). La fonte du cœur peut amener le mélange à traverser la cuve, puis les fondations de béton, et ainsi contaminer l'environnement avec des radioéléments à la durée de vie très longue. A l'heure où nous écrivons, seules des informations sur les éléments volatils (césium et iode) ont été obtenues. La radioactivité autour des réacteurs a atteint des niveaux très importants. Pour les personnels impliqués dans les tâches de noyage des réacteurs, les doses ont pu être « toxiques » selon l'IRSN (lire ci-contre). Les premières mesures de précaution ont consisté à évacuer d'abord une zone de 3 kilomètres puis de 20 km, avec des consignes de mise à l'abri dans un rayon

de 30 km. Douze jours après la première explosion dans la centrale, il demeure difficile de se faire une idée précise de l'état de la radioactivité sur place. Les chiffres publics ne concernent que les zones au-delà des 20 km ou alors sont tirés des neuf balises sur le site même de la centrale (par exemple 10 mSv/h le 15 mars sur la balise de l'entrée principale...). Des contaminations des aliments ont également été enregistrées (lire p. 16).

EN FRANCE La radioactivité devait être détectée le 23 mars au-dessus du territoire, les particules ayant été transportées en une semaine par les vents de l'hémisphère Nord allant du Japon vers l'Europe. L'IRSN estimait que la mesure serait minime, autour d'1 mBq/m³, sans impact sanitaire.

INFOGRAPHIES: BETTY/JAPON

Quels sont les effets de la radioactivité sur la santé ?



On peut être irradié par une source ou contaminé de trois manières : par contact direct, ingestion et, surtout, inhalation de particules radioactives. La dangerosité dépend de la dose (mesurée en sieverts) qui s'accumule au fil du temps. Entre 0,5 et 2 sieverts (Sv), apparaissent les premiers signes (nausées, vomissements) d'un syndrome aigu, et 6 Sv sont mortels à 100 %. Le 15 mars, dans la centrale de Fukushima, des taux de 400 mSv/h (millième de sievert par heure) ont été

détectés. Autrement dit, en moins de quarante minutes, les travailleurs avaient atteint la dose maximale autorisée lors de l'accident (250 mSv). Mais certains « héros » ont absorbé beaucoup plus. Les conséquences sanitaires peuvent aussi ne se déclarer que vingt à trente ans plus tard, sous forme de leucémies, de cancers digestifs. Sans oublier les malformations congénitales chez les descendants. En pratique, on estime que le risque de cancer dit radio induit apparaît à partir de 100 mSv. Autre conséquence, souvent

oubliée, le stress post-traumatique et ses symptômes (dépression, troubles psychiques, suicide). Soixante ans après Hiroshima et Nagasaki, 70 % des survivants, les *hibakusha*, en sont atteints.

EN FRANCE Selon l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), chaque individu reçoit une dose totale annuelle de 3,41 mSv, dont 2,4 mSv dus au rayonnement naturel, 1 mSv dû aux examens médicaux et 0,01 mSv provenant de sources industrielles.

●●● bloquer les radioéléments lors de phase d'urgence de décompression d'un cœur de réacteur. Des systèmes doivent aussi empêcher la formation d'hydrogène dans l'enceinte.

EN FRANCE En 1969 et en 1980, la centrale de Saint-Laurent (Loir-et-Cher), équipée de réacteurs graphite-gaz (filiale aujourd'hui abandonnée), a été le théâtre des deux accidents les plus graves (niveau 4) dans notre pays. Des assemblages ont fondu suite à des erreurs humaines de manipulation mais il n'y aurait pas eu de rejets hors du site.

Pourquoi les centrales sont-elles situées au bord de l'eau ?

Sans eau, pas de transport possible de la chaleur émise par le combustible nucléaire vers les turbines qui produisent l'électricité et pas d'évacuation possible de la chaleur en excès. Voilà pourquoi toutes les centrales nucléaires sont situées au bord de cours d'eau à fort débit ou près de la mer. Les besoins s'élèvent en moyenne à

40 m³ par seconde (chiffre EDF), restitués à 98 % dans le milieu naturel. Cette dépendance à l'eau rend le nucléaire sensible au réchauffement climatique qui pourrait augmenter certains risques : inondation lors de fortes tempêtes, plus fréquentes ou, au contraire, assèchement des cours d'eau.

EN FRANCE Le 27 décembre 1999, l'eau de la Gironde poussée par la tempête Martin a envahi une partie de la centrale du Blayais* où trois tranches sur quatre étaient en fonctionnement. La centrale a aussitôt été mise volontairement à l'arrêt. Cet épisode a été classé au niveau 2 de l'échelle internationale des incidents nucléaires (INES). Depuis, EDF a procédé à un relèvement des digues au Blayais d'un mètre pour atteindre 6,20 m mais aussi à Belleville, Chinon, Dampierre, Gravelines et Saint-Laurent. Entre 2003 et 2006, des centrales situées sur rivières ont été stoppées par manque d'eau.

* Le rapport de l'IRSN sur le Blayais : http://www.irsna.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/rapport_sur_l_inondation_du_site_du_blayais.pdf

Quelles protections face aux catastrophes naturelles ?

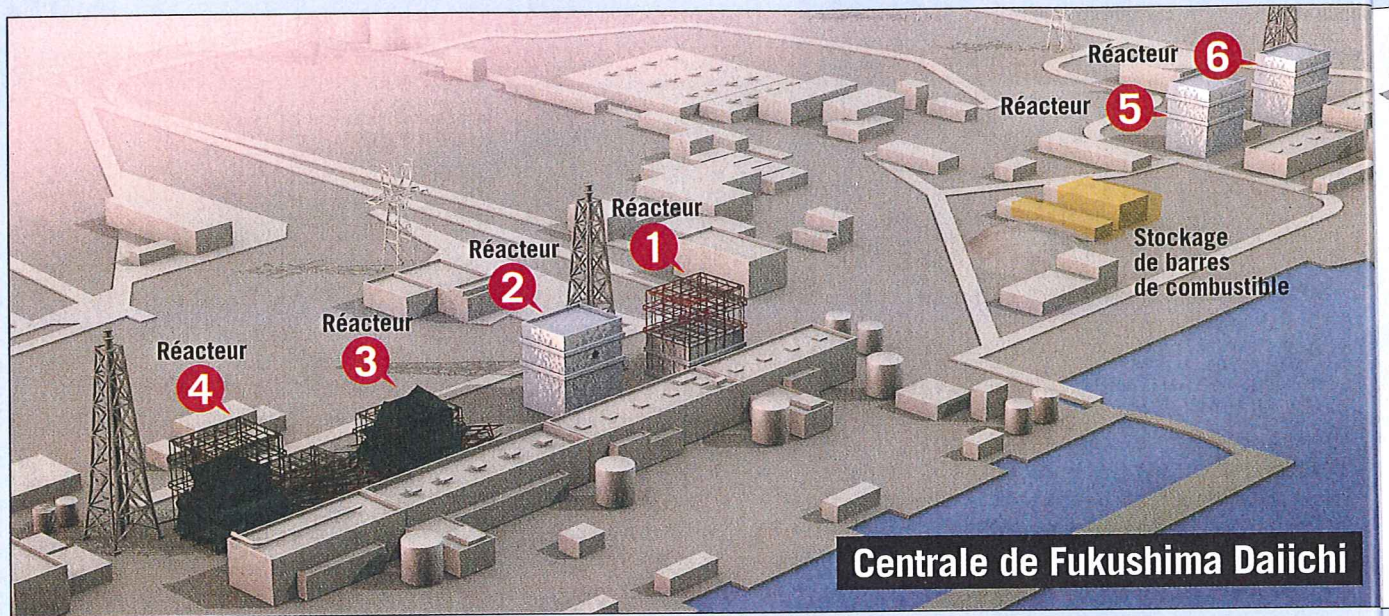
La centrale japonaise de Fukushima a été construite (amortisseurs, renforcements divers, sols durs et lits de sable) pour affronter une accélération maximale au sol de 600 cm/s² – correspondant à un séisme de magnitude 8,2 sur la fosse du Japon. Le 11 mars, les capteurs sismiques ont permis d'arrêter automatiquement les réacteurs dès les premières secousses mais on ne connaît pas encore les dégâts exacts que le séisme a pu provoquer. Certains experts dénoncent depuis longtemps des normes antisismiques trop laxistes, et seules les analyses post-accident permettront de reconstituer les événements. Quant au tsunami, il a détruit la digue devant la centrale entraînant des avaries parmi les plus importantes : perte de l'alimentation en eau et impossibilité de remise en route des groupes électrogènes alimentant les pompes pour assurer le refroidissement.

Il faudra analyser les raisons de cette dramatique sous-estimation des risques, ce qui ne va pas manquer de créer des polémiques. Le principe général de protection – au Japon comme ailleurs – consiste à étudier l'historique sismique ou hydrologique d'une zone pour déclencher les événements les plus dramatiques, avant de fixer les règles de construction en ajoutant une marge de sécurité.

EN FRANCE Pour la région Alsace, le séisme de référence a eu lieu à Bâle (Suisse) en 1356, avec une magnitude récemment réestimée à 6,7 (BRGM). La centrale de Fessenheim (Haut-Rhin) et les réacteurs de recherche du site de Cadarache (Bouches-du-Rhône) – les plus exposés – doivent théoriquement résister à un séisme d'environ 6,5. D'où la polémique entre l'opérateur (EDF), les autorités de sûreté (ASN, IRSN) et les associations antinucléaires sur la capacité de résistance de la centrale (voir la carte p. 14). Le gouvernement a promis le 15 mars un audit des centrales françaises (Suite page 16)



De l'accident à la catastrophe



Centrale de Fukushima Daiichi

Réacteurs 1 et 3 Les cœurs endommagés

Après l'arrêt automatique des réacteurs le 11 mars, des explosions ont lieu les 12 et 14 mars (*lire les scénarios de rejets*). Tepco procède à de nombreux rejets volontaires pour diminuer la pression dans les cuves de réacteurs et y injecte de l'eau de mer pour les refroidir. Dans la semaine du 21 mars, des fumées grises et noires s'échappaient du réacteur 3 et la piscine du combustible usagé inquiétait les spécialistes.

Réacteur 2 L'enceinte touchée

Le 15 mars, une explosion a lieu en partie basse du bâtiment, préservant le toit mais sans doute pas l'enceinte de confinement. Le cœur est endommagé et en partie à sec. De l'eau de mer est injectée dans la cuve pour le refroidir.

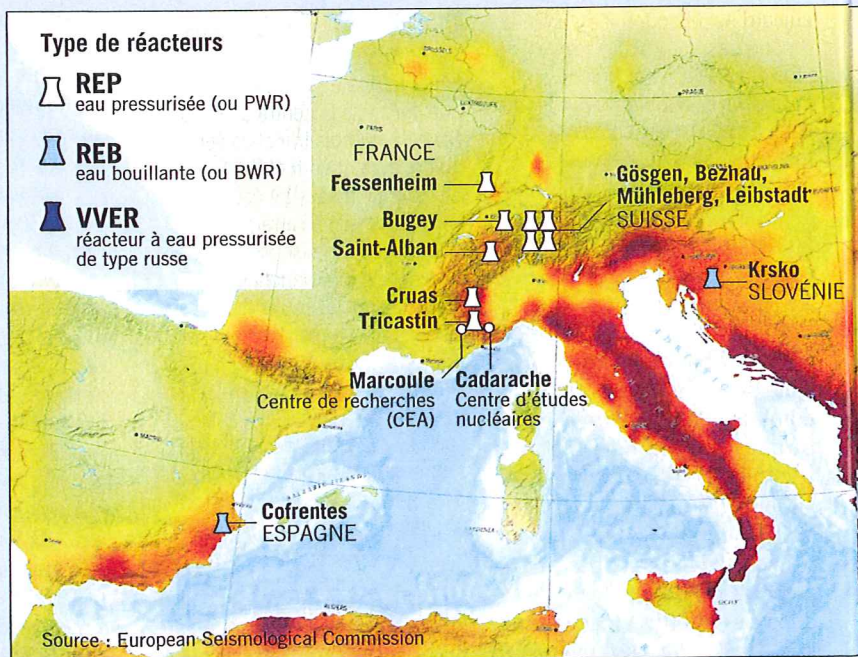
Réacteur 4 La menace de la piscine

A l'arrêt avant le séisme, le réacteur a été déchargé de son combustible dans la piscine. Un incendie, le 15 mars, la met à l'air libre; l'eau chauffe à cause du combustible et s'évapore. On redoute que le combustible se mette à brûler, dégageant des radioéléments dans l'atmosphère. Des tonnes d'eau ont été relarguées dans la piscine par hélicoptère et par des canons à eau. (Sources : IRSN et ASN.)

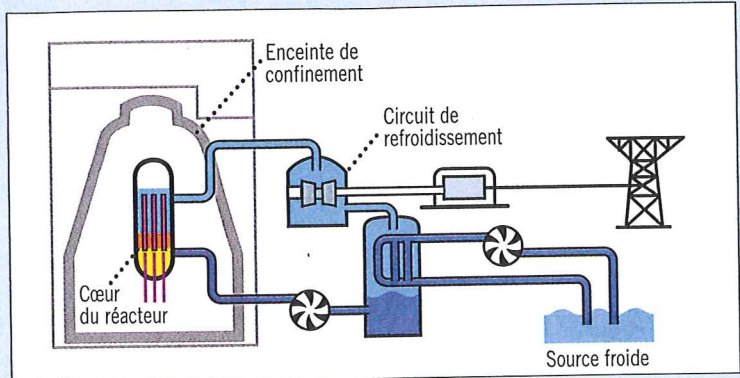
Le risque sismique en Europe

La carte officielle des aléas sismiques au niveau européen (ci-contre), obtenue à partir de la sismicité historique, permet de voir les réacteurs nucléaires soumis au risque sismique. En France, la centrale de Fessenheim, au cœur du fossé rhénan, et les centrales de la vallée du Rhône sont concernées. Concerné aussi le site de Cadarache, situé dans les Alpes-de-Haute-Provence. Ailleurs, c'est surtout le futur réacteur nucléaire d'Akkuyu (Turquie), très proche de la faille nord-anatolienne, qui inquiète. Le dimensionnement de ces édifices pour résister au risque sismique dépend de chaque pays. En France, il est lié à la détermination d'un séisme historique de référence (SR, le plus fort survenu dans la région). La centrale doit être dimensionnée de manière à refonctionner sans réparation après un séisme de magnitude SR + 0,5*. Elle doit pouvoir refonctionner avec travaux suite à un séisme de magnitude SR + 1 et enfin un séisme de magnitude SR + 1,5 ne devrait pas ébranler le confinement.

* Rappelons que l'échelle des magnitudes est logarithmique : lorsque la magnitude augmente de 1, le mouvement devient dix fois plus fort et l'énergie libérée 30 fois plus importante...

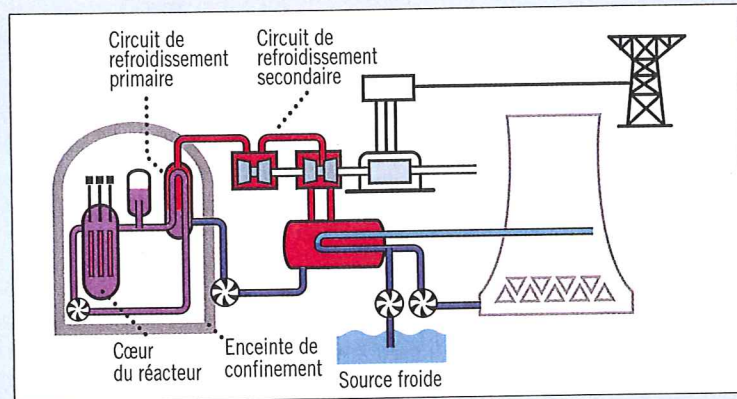


Trois types de centrales



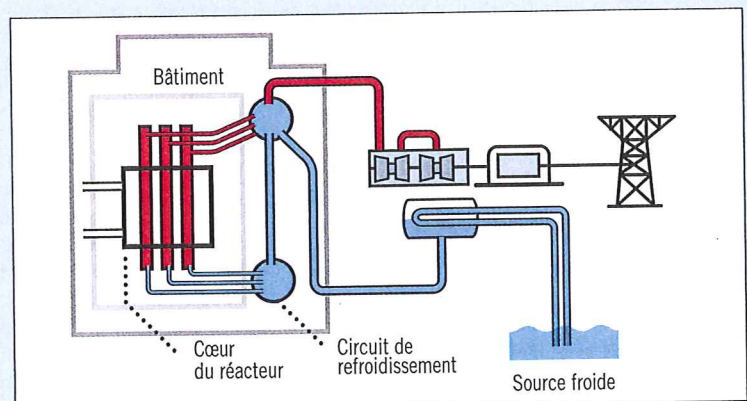
Réacteur à eau bouillante (REB) : Fukushima Daiichi

Une grande partie des centrales japonaises fonctionnent sur ce principe. De l'eau traverse le cœur et se met à bouillir. La vapeur est conduite à une turbine pour générer de l'électricité. Les pertes de refroidissement sur le cœur et sur les piscines d'entreposage des combustibles ont provoqué la catastrophe (lire page 10).



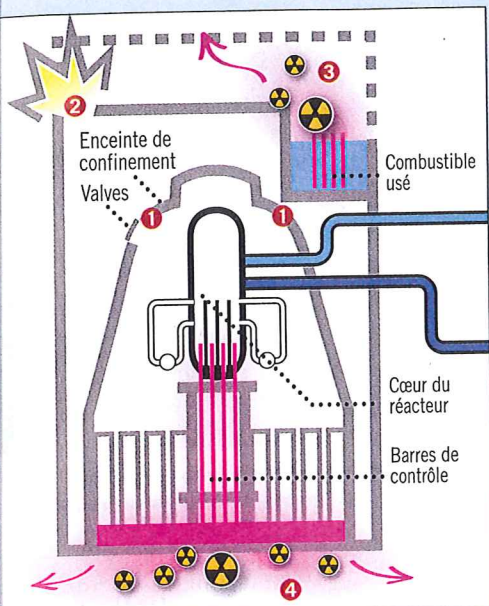
Réacteur à eau pressurisée (REP) : Three Mile Island

Un REP possède deux circuits d'eau, le premier (en violet) refroidit le cœur du réacteur et transfère sa chaleur dans un échangeur au deuxième circuit (en rouge) où l'eau se transforme en vapeur et fait tourner les turbines. Toutes les centrales françaises fonctionnent sur ce principe. En mars 1979, le réacteur américain Three Mile Island, par défaut de refroidissement, a connu une fusion du cœur, avec de faibles rejets radioactifs dans l'environnement.



Réacteur graphite - eau bouillante (RBMK) : Tchernobyl

Le RBMK est un type de réacteur à eau bouillante sans enceinte de confinement dont des blocs de graphite modèrent la réaction. En avril 1986, une mauvaise manipulation à pleine puissance a conduit à l'explosion puis l'incendie du cœur de la centrale soviétique avec des rejets massifs de radioéléments dans l'atmosphère.

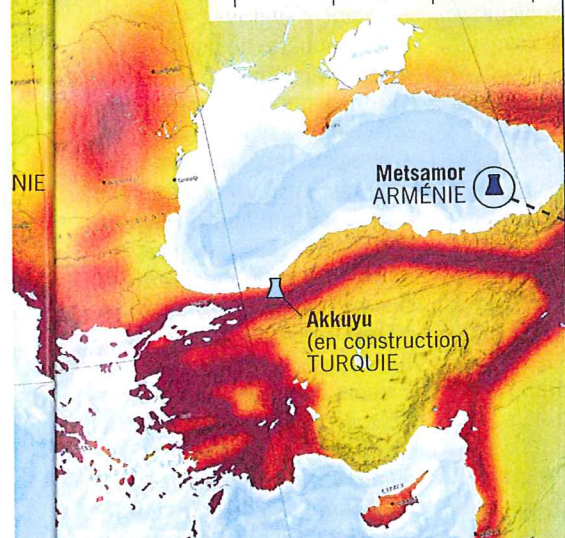


Les scénarios de rejets

Plusieurs scénarios conduisent à des rejets de radioactivité. Quand le cœur chauffe et que la pression augmente, il faut la faire baisser par des rejets volontaires de vapeur 1. A cause de la réaction de la vapeur d'eau sur le combustible, de l'hydrogène se dégage et explose 2. Dans les piscines, l'eau s'évapore, le combustible se détériore et rejette des produits radioactifs 3. Enfin, le cœur peut fondre, traverser la cuve et l'enceinte de confinement, répandant les radioéléments dans l'environnement 4.

Echelle aléa sismique

Faible	Moyen	Fort
--------	-------	------





14 MARS : une explosion d'hydrogène se produit dans le réacteur n° 3 de la centrale de Fukushima, soufflant le toit du bâtiment.



16 MARS : ce qu'il reste de l'unité 4. La photo a été prise par l'un des hélicoptères militaires réquisitionnés pour déverser de l'eau sur sa piscine.

Radiations : comment se prémunir ?

Trois armes préventives : l'évacuation, le confinement à domicile et la distribution de pastilles d'iode (l'iode, dit stable, sature la glande thyroïde pour éviter que l'iode radioactif ne s'y fixe). Au Japon, le seuil de prise est de 100 mSv, et la priorité va aux bébés, enfants, jeunes et femmes enceintes. Car leurs organismes sont plus sensibles et les divisions cellulaires plus fréquentes. A plus long terme, la consommation de légumes à larges feuilles (épinards, salades, blettes), de fruits et de lait devra être limitée.

Dès le 19 mars, les premières contaminations alimentaires (eau, lait, légumes...) en iode 131, césium 134, 137 ont été rapportées. Selon l'Organisation mondiale de la santé (bulletin n° 11, 20 mars), des valeurs de 1510 Bq/kg (becquerel par kilo) d'iode 131 ont été retrouvées dans du lait produit près de la centrale de Fukushima, mais surtout dans des épinards (15 020 Bq/kg) en provenance d'Hitachi, à 100 kilomètres au sud de la centrale. Des valeurs bien au-delà des limites de consommation qui sont, au Japon, normalement de 2000 Bq/kg pour les légumes et de 300 Bq/kg pour le lait et l'eau – le 23 mars, les autorités de Tokyo ont déconseillé de donner de l'eau du robinet aux bébés car le taux d'iode radioactif relevé (210 Bq/l) dépassait le seuil légal pour les bébés (100 Bq/l). Concernant les

légumes, les autorités japonaises ont estimé qu'une consommation quotidienne pendant un an des épinards de la région serait sans risque. Propos contestés en France par la Criirad (Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité) qui considère que la dose limite annuelle d'un mSv serait atteinte en quelques repas avec la seule consommation de 370 g d'épinards pour un enfant de moins d'un an ou de 3 kg pour un adulte. La guerre des chiffres va faire rage. Désormais, le problème réside dans le calcul exact du cumul des doses de radioactivité, provenant tant de la chaîne alimentaire que de l'air respiré, et, surtout, dans leur interprétation. « *Quelle que soit l'évolution de la situation, le Japon aura à gérer, dans la durée, les dépôts de radioactivité consécutifs à ces rejets* », explique l'Agence de sûreté nucléaire (ASN) française.

EN FRANCE Depuis août 2009, le seuil de prise d'iode est de 50 mSv, contre 100 mSv auparavant. 400 000 foyers, des personnes travaillant ou vivant dans un rayon de 10 km autour des 19 centrales françaises et réparties sur 500 communes, sont concernés. 9000 ressortissants français se trouvaient au Japon le 11 mars. Un recueil des informations estimant l'exposition de ces personnes a démarré, mené par l'Institut de veille sanitaire (InVS). Tout sur <http://www.invs.sante.fr/> et japon2011.fr.

(Suite de la page 13)

permettant au grand public de s'informer sur leur résistance aux agressions externes (séisme, inondation...).

Quels sont les principaux risques liés au nucléaire ?

Le rapport Residual Risk de 2007* a répertorié et classé tous les incidents survenus depuis Tchernobyl : un premier groupe provient des dysfonctionnements internes aux réacteurs, liés à des défauts de conception ou de manufacture (62 % surviennent au niveau des échangeurs de chaleur). Ces incidents peuvent s'aggraver et provoquer la « perte de liquide réfrigérant », comme au Japon. Le vieillissement des réacteurs augmente ce type de risque. D'autres risques sont d'origine externe. Le rapport mentionne, outre le facteur humain (erreur, terrorisme...), les séismes, tsunamis ou variations du niveau du fleuve, éruptions volcaniques, vents importants, variation brusque de température causant une dilatation susceptible de créer des fissures, ou encore des « salissures biologiques » communément appelées *biofouling*, terme qui désigne la prolifération de



18 MARS : des camions de pompiers munis de canons à eau déversent des tonnes d'eau pour remplir la piscine du réacteur n° 3.



23 MARS : premières images de l'intérieur de la centrale. Des techniciens dans une salle de contrôle où le courant n'a pas été rétabli.

plancton et de micro-organismes, enfin... chutes d'avion ou de météorites. Les édifices doivent être dimensionnés pour résister à ces événements externes, sauf les deux derniers, qui ont été jugés hautement improbables.

* <http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/181/181995.pdf>

EN FRANCE Selon l'ASN, le nombre d'anomalies et d'incidents nucléaires a doublé en dix ans (plus de 1000 en 2010). L'immense majorité d'entre eux ont été déclarés sans conséquence... trois ont été classés au niveau 2 sur l'échelle INES.

Comment le Japon fait-il face à la pénurie d'énergie ?

Premier importateur de gaz et deuxième pour le pétrole, le Japon est une nation dépourvue de ressources naturelles et très énergivore. Il dispose d'un stock de « seulement 129 jours de pétrole », rappelle Catherine Figuière, chercheuse au Centre de recherche en économie de Grenoble. Or, 11 réacteurs sur les 54 que compte le pays étaient arrêtés une semaine encore après le séisme. Par ailleurs, des dégâts et des incendies auraient fait perdre 31 % de la capacité de raffinage. Les Japonais sont

donc confrontés à une très grande pénurie d'énergie, en particulier d'électricité. « *Mais la production d'électricité est beaucoup plus diversifiée qu'en France : 23,8 % viennent du nucléaire et 65,6 % sont issus du fioul, du gaz naturel ou du charbon. Le Japon va pouvoir compenser ses pertes par des importations de combustibles fossiles provenant notamment du Qatar et de Russie* », explique Davit Sédéfian, économiste à l'université Pierre-Mendès-France de Grenoble. La production devra aussi être rééquilibrée entre les régions où les centrales sont à l'arrêt et celles où elles fonctionnent normalement. Problème : « *Le Japon dispose du seul réseau au monde fonctionnant sur deux fréquences différentes : 50 hertz (Hz) à l'est (dont Tokyo) et 60 Hz à l'ouest. Pour transférer de l'électricité de l'un à l'autre, il faut transformer le courant alternatif à 50 Hz dans une région en courant continu, pour le retransformer en courant alternatif à 60 Hz dans l'autre région. Et vice versa* », explique Nouredine Hadj-Said, spécialiste des réseaux à Grenoble INP. Cette opération se fait au niveau de stations de conversion. Or, si ces stations ont été touchées par le séisme – ce qu'il

est encore difficile d'établir –, les échanges ne pourront pas se faire.

D'autre part, des restrictions ont été édictées au niveau national pour éviter un effondrement du réseau électrique dû à une trop forte demande. Entreprises et habitants doivent limiter au strict minimum leur consommation. Des coupures de courant ont été planifiées dans neuf préfectures, la durée de ces interruptions (jusqu'à 3 h 40) étant ajustée à la demande.

EN FRANCE La production d'électricité est beaucoup moins diversifiée. Elle provient essentiellement des 58 réacteurs nucléaires (76,5 %). Seuls 9,6 % sont issus des énergies fossiles et 11,8 % de l'hydroélectricité.

Loïc Chauveau, Olivier Hertel, Azar Khalatbari, et David Larousserie



Après Fukushima, faut-il amorcer une sortie du nucléaire en France ?

Débat lors de l'émission « Science publique » de Michel Alberganti, vendredi 1^{er} avril, de 14 h à 15 h. Avec notamment Charlotte Mijeon (Sortir du nucléaire), Bruno Chareyron (Criirad), Francis Sorin (Sfen) et Dominique Leglu, directrice de la rédaction de S. et A.

LEXIQUE

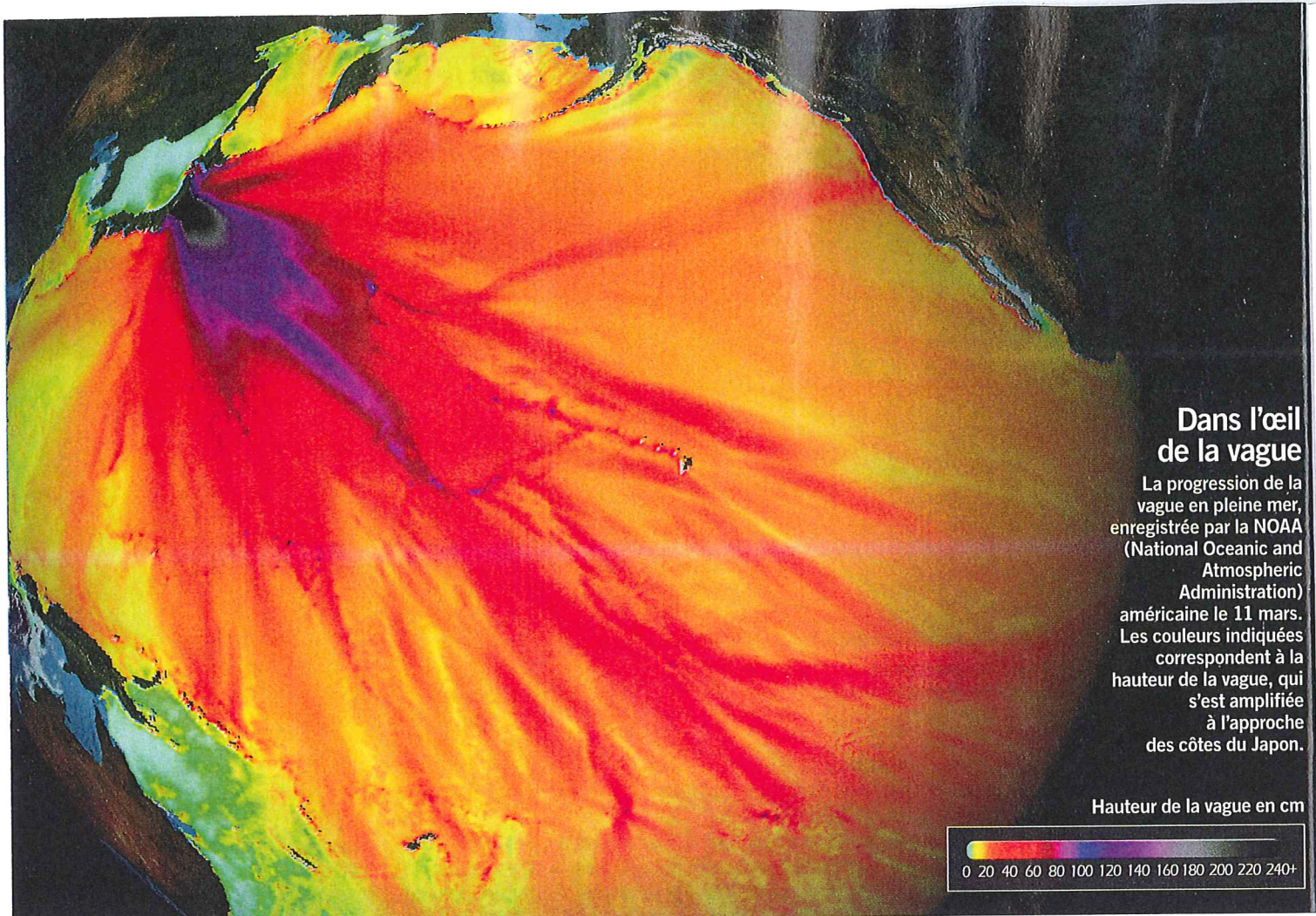
FISSION : réaction qui consiste à casser un noyau atomique en des éléments plus petits avec dégagement de chaleur.

ISOTOPE : deux isotopes d'un même noyau se distinguent par le nombre de leurs neutrons en excès ou en défaut par rapport à la forme stable. L'instabilité entraîne la désintégration du noyau, donc sa radioactivité.

FUSION : dans un réacteur à fission, désigne la fonte des éléments du combustible. Désigne aussi dans le cas de noyaux de petites tailles la création d'un noyau plus gros avec dégagement d'énergie. C'est ce que la machine Iter tentera de faire à partir de 2020.

BECQUEREL : unité de mesure de la radioactivité. Elle donne le nombre de désintégrations par seconde d'un noyau. La radioactivité se mesure aussi en curie.

SIEVERT : unité de mesure des effets biologiques d'un rayonnement radioactif. Ces effets dépendent notamment de la nature de la source (type et intensité du rayonnement).



Dans l'œil de la vague

La progression de la vague en pleine mer, enregistrée par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) américaine le 11 mars. Les couleurs indiquées correspondent à la hauteur de la vague, qui s'est amplifiée à l'approche des côtes du Japon.

Hauteur de la vague en cm

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240+

11 mars 2011, du séisme au « rebond élastique »

Une compression avant une détente brutale : l'ampleur et l'épicentre du séisme ont surpris les spécialistes. Qui redoutent des événements majeurs près de Tokyo.

Le tremblement de terre était-il attendu ?

Non. Ni sa localisation, ni son ampleur. Même si deux jours auparavant, une importante activité sismique avait été enregistrée dans la région de Sendai au nord de Tokyo, proche de l'épicentre. De tels épisodes surviennent souvent dans l'archipel sans qu'ils soient suivis d'événements majeurs. L'attention des experts était plutôt focalisée sur

une portion de faille à l'extrémité de la fosse de Nankai, au sud-ouest de la zone sinistrée. Cette portion appelée Tokai constitue « une lacune sismique » car elle n'a pas connu de gros séisme depuis 1854, tandis que sur les tronçons plus à l'ouest de cette même fosse deux séismes violents (magnitude 7,9 et 8) ont eu lieu en 1944 et en 1946. Le séisme du 11 mars (magnitude 9), localisé bien plus au nord, sur la fosse du Japon, au

large de la côte est de l'île de Honshu et à 140 km de la ville de Sendai, a donc surpris tout le monde. De nombreuses « répliques » – certaines de magnitude 7 – ont été enregistrées les heures suivantes. Le Japon est situé le long d'une zone de subduction où la plaque Pacifique s'enfonce à raison de 8,5 cm par an sous la plaque Eurasie. Ce mouvement régulier de convergence exerce une contrainte continue qui s'accumule sur le

bord de la plaque Eurasie pendant toute la période calme... pour se libérer brutalement lors d'un séisme. Celui du 11 mars a provoqué une rupture de 500 km en seulement trois minutes : le plancher océanique s'est affaissé, déplaçant une grande masse d'eau à l'origine du tsunami. En plein océan, où la profondeur est de plusieurs kilomètres, cette eau déplacée a formé une onde s'étendant sur quelques centaines de kilomètres, sur une



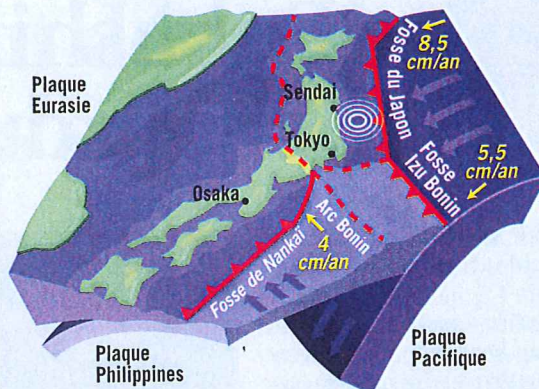
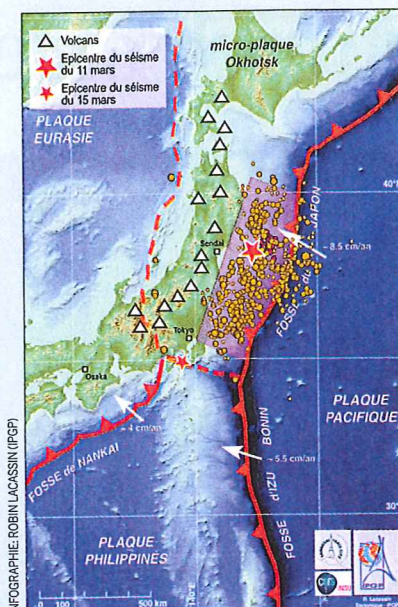
hauteur d'à peine un mètre. A l'approche des côtes, en eaux peu profondes, la masse incompressible n'a pu s'étaler, entraînant la formation de vagues de plus en plus rapprochées, atteignant une hauteur de 14 m, qui ont déferlé dans les terres.

EN FRANCE Des séismes de magnitude 6 ou 7 peuvent survenir, si l'on se fie à la sismicité historique du pays et des zones frontalières (voir carte p. 14). Ainsi, la magnitude du séisme de Lambesc (Alpes-de-Haute-Provence), en 1909, a été estimée à 6. Ces événements servent de référence pour l'établissement des normes de construction.

Un autre événement majeur peut-il avoir lieu rapidement ?

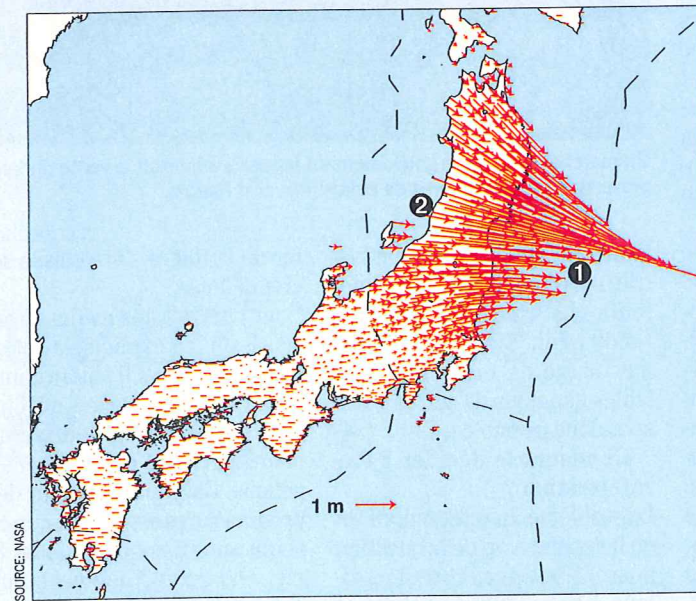
Oui. Et peut-être ailleurs que dans la zone déjà touchée, comme le laisse penser le séisme de magnitude 6,2 survenu quatre jours après la catastrophe et qui ne ferait pas partie des très nombreuses répliques de l'événement du 11 mars. Son épicentre est situé au sud-ouest de Tokyo, proche de la terminaison nord-ouest de la fosse de Nankai, où une « lacune sismique » avait été identifiée, sur la frontière de la microplaque Okhotsk. Si cette région devait rompre brutalement, le séisme pourrait être suivi d'un tsunami. Par ailleurs, des séismes de grande magnitude, parce qu'ils changent les contraintes tectoniques en profondeur, peuvent affecter les remontées magmatiques des édifices volcaniques. Or, face à la zone affectée par l'événement du 11 mars, s'étend une chaîne de volcans au magma visqueux et riche en gaz. Nathalie Feuillet, de l'Institut de physique du globe de Paris, a modélisé les effets du séisme sur le réservoir magmatique de ces volcans : à 20 km de profondeur, une décompression équivalente à un mégapascal, soit dix fois la pression atmosphérique, a eu lieu, qui pourrait provoquer une remontée des gaz et bousculer la structure des

Des mouvements contradictoires



La microplaque d'Okhotsk, zone tampon

A grande échelle, le Japon est situé en bordure de la plaque Pacifique qui plonge de 8,5 cm par an sous la plaque Eurasie, au niveau de la fosse du Japon (ci-contre). A plus petite échelle, la microplaque d'Okhotsk forme une zone tampon entre les deux, tandis que la faille de Nankin, qui s'enfonce aussi sous la plaque Eurasie de 4 cm par an, débute à la frontière d'Okhotsk (ci-dessus). Les deux mouvements ne se font pas à la même vitesse et dans la même direction, ce qui génère un système complexe de failles.



Grand écart entre l'est et l'ouest

Le dense réseau GPS réparti à travers le pays permet de comprendre la déformation créée par le séisme. Chaque point correspond à une station et le vecteur représente l'intensité et le sens du déplacement de ce point. L'échelle des déplacements (en rouge) indique que la côte est de Honshu près de la ville de Sendai ①, s'est déplacée de 4 m 20, tandis que la côte ouest n'a glissé que de 0,5 m ②, comme un bout de caoutchouc sous contrainte qui aurait rebondi brutalement lors du séisme. Plus au nord et plus au sud, aucun déplacement n'a été enregistré.

conduits volcaniques. Ainsi, le séisme pourrait entraîner également des épisodes éruptifs.

Le Japon a-t-il été déplacé ?

Oui. Mais l'archipel ne s'est pas déplacé d'un seul tenant, comme l'a montré le réseau très dense de stations GPS réparties à travers le pays (voir le

schéma ci-dessus). Ainsi, la côte est de Honshu, près de la ville de Sendai, a glissé d'un peu plus de 4 m et s'est affaissée de 70 cm, alors que la côte ouest n'a subi qu'un déplacement horizontal de 50 cm, presque sans enfoncement. Cette distorsion provoque des zones de tension au nord et au sud de cette région. Tout se passe comme si pendant des années, sous la

poussée de la plaque Pacifique, la côte est de Honshu avait été comprimée et s'était bombée. Le glissement de 4 m correspond à un étalement de la croûte... D'ailleurs dans le jargon des géophysiciens, ce mouvement est désigné comme un « rebond élastique » – comme un caoutchouc comprimé qui se serait détendu brutalement.

Azar Khalatbari

SOURCE: ROBIN LACASSIN (IPGP), D'APRÈS LAURENT JOUVEY (ISTO) INFOGRAPHIE IDE



BERNARD LAPONCHE Consultant en politique de l'énergie, cofondateur de l'association Global Chance *



« Fukushima remet en cause le choix du nucléaire »

Que signifie pour vous l'accident en cours au Japon ?

Il confirme malheureusement ce que beaucoup ont souvent dit. Le risque zéro n'existe pas. Les réacteurs nucléaires sont des machines intrinsèquement dangereuses. Réfléchir en termes de probabilité de risque pour définir une politique de sûreté n'a pas grand sens. On s'aperçoit qu'on ne peut tout imaginer. Il peut arriver l'imprévu comme au Japon où, si la centrale a résisté au tremblement de terre, les systèmes de refroidissement ont été hors d'usage suite au tsunami. De tels enchaînements peuvent aussi arriver en France, comme cela a failli être le cas lors de la tempête de 1999 avec les inondations dans la centrale du Blayais en Gironde.

L'accident au Japon remet donc en cause le choix du nucléaire. D'autant plus que cela se produit, tout comme lors de l'accident de Three Mile Island (TMI) en 1979, dans un pays très technologique avec beaucoup d'ingénieurs. On ne peut pas accepter un TMI tous les dix ans. D'autant plus si le nombre de pays nucléarisés augmente, sans que les compétences soient là...

Peut-on se passer de cette énergie en France ?

Compte tenu de la grande part du nucléaire dans l'électricité, ce sera plus dur qu'ailleurs, mais des scénarios alternatifs existent. Cela passe bien sûr par de l'efficacité et de la sobriété énergétiques. Les Allemands consomment, par habitant, moins d'électricité que nous par exemple. Ils ont commencé à rénover leur habitat plus tôt que nous, afin qu'il soit



Un marché à Tokyo : le gouvernement japonais a interdit la vente du lait et de légumes à feuilles vertes provenant des préfectures de Fukushima et d'Ibaraki.

moins énergivore. Dans l'industrie, ils s'équipent aussi de moteurs électriques de meilleur rendement. Et ils produisent davantage de biens renouvelables que nous. D'autres voies sont donc possibles.

Comment le décider ? Par référendum ?

Le problème du référendum est qu'il dépend trop de la question posée. Nous avons aussi participé à beaucoup de débats et constaté qu'ils étaient verrouillés. Les décisions étant déjà prises. Il faut continuer d'informer honnêtement et dénoncer les mensonges habituels comme l'indépendance énergétique (notre uranium est importé !) ou le fait que le retraitement éliminerait le plutonium. Le nucléaire, à cause de son développement historique par les militaires, garde des réflexes de confidentialité. Le dernier rapport Roussely de 2010 sur l'ave-

nir de la filière a été classé secret défense !

Pour l'instant, les médias français ont bien expliqué la catastrophe au Japon. Il faudra continuer cette pédagogie sans être « paniqué » pour induire un changement de politique énergétique. L'argument majeur des pronucléaires est de dire que ce serait sacrifier notre mode de vie. On entend même qu'un Tchernobyl tous les dix ans est acceptable ! Nous devons repenser à tout cela calmement.

Quelles conséquences pourrait avoir ce changement sur la filière industrielle ?

Même lorsqu'on arrête le nucléaire, il y a du travail. Ne serait-ce que pour le démantèlement des centrales et des usines et pour la gestion des déchets. Mais nous aurons besoin aussi de compétences dans le BTP pour les bâtiments à faible

consommation d'énergie, dans les réseaux pour les *smart grids* (réseaux intelligents) et dans les transports publics. Ou encore dans les aciers pour les éoliennes... Ne croyez pas que les jeunes ne sont pas attirés par ces métiers nouveaux autour de l'efficacité énergétique ou des énergies renouvelables. C'est le nucléaire qui a un problème de pertes de compétence. Le génie humain peut encore trouver des choses. Ce serait même triste que nous n'y parvenions pas. Il y a une douzaine de manières de produire de l'électricité autrement qu'en chauffant de l'eau par de la fission. La filière nucléaire doit s'interroger sur son avenir.

Propos recueillis par David Larousserie

* Global Chance est une association réunissant des experts sur les questions énergétiques et les gaz à effet de serre.

EDWARD LAZO Responsable de radioprotection à l'AEN*



« Pollution : tout dépend de la nature des sols »

La pollution radioactive de Fukushima sera-t-elle comparable à celle de Tchernobyl ?

A Fukushima, le contaminant principal est le césium 137, qui se retrouvera dans les sols à long terme. A Tchernobyl, on craignait que les contaminants s'écoulent dans l'eau du fleuve Dniepr qui alimente Kiev. L'autre crainte était que les éléments radioactifs restent dans les terres agricoles. Et c'est surtout cela qui a été observé. Les éléments radioactifs n'ont pas beaucoup migré et se sont ancrés dans les sols. Mais cela dépend de leur nature. Si le sol est sableux, les éléments migrent plus vite que lorsqu'il est argi-

leux. A Tchernobyl, ce sont des terres fertiles qui ont emprisonné le césium. A Fukushima, je ne connais pas la nature des sols. Ce sont visiblement des terres agricoles...

L'expérience de Tchernobyl servira-t-elle ?

Il va falloir mettre en œuvre des mécanismes de gestion des zones polluées, peut-être en utilisant un savoir-faire acquis à Tchernobyl. Par exemple, dans un premier temps, on avait laissé les vaches paître dans des zones contaminées ; et des analyses ont montré que la radioactivité passait dans le lait. On a également étudié les mécanismes biologiques de captation des éléments radioactifs par les

plantes. Puis, il a été réalisé à plus grande échelle une cartographie des terres utilisables. En Biélorussie, il y a des taches de radioactivité un peu partout, mais cette géographie des zones interdites est maintenant connue des gens du pays, qui vivent avec. D'autres expériences dans le monde ont montré que lorsque l'on creuse le sol sur un à deux mètres pour ôter les couches contaminées, on laisse une terre stérile. Cette technique a été abandonnée.

Pourra-t-on vivre à nouveau près de la centrale ?

Il est trop tôt pour le savoir. A Tchernobyl, où une zone a été interdite sur un périmètre de 30 km autour de la centrale, c'est

d'abord une faune importante qui est revenue dans cette zone, vidée des humains. Puis des gens se sont réinstallés dans les zones contaminées au-delà de 30 km de la centrale. C'était leur terre, ils y étaient nés et ils y vivaient bien, avant. En moyenne, ils reçoivent moins de 1 mSv par an et gèrent eux-mêmes leur propre exposition. Le suivi médical a montré qu'il n'y a pas plus de leucémies et de cancers que la normale. Maintenant qu'il y a une gestion de la vie avec la radioactivité, il y a un peu plus d'espoir.

Propos recueillis par Sylvie Rouat

* Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire.

PAUL VIRILIO Urbaniste et philosophe*



« Notre puissance se retourne contre nous »

Que vous inspirent les événements de Fukushima ?

Cela illustre la phrase de Churchill : « *Nous sommes entrés dans l'ère des conséquences.* » Etant donné les conséquences de certaines technologies, est-ce que les scientifiques ne devraient pas se poser la question de l'accident majeur ? Et cette question est-elle possible ? Tchernobyl, rappelez-vous, a fait à sa manière imploser l'URSS car il n'y a pas eu que des raisons politiques (...).

Et là, l'accident recommence ?

Oui, mais il va être plus impor-

tant que Tchernobyl, à cause de la mondialisation. On est au début des grandes questions sur les conséquences sanitaires, environnementales, politiques, financières, économiques et énergétiques. L'accident ici nous dépasse. Et la réussite devient catastrophique, c'est inouï.

D'autant qu'on assiste en direct à cette catastrophe...

Oui, c'est instantané. Et cela aussi, c'est un accident. La transparence absolue, l'instantanéité, posent des questions non résolues. Notre période extraordinaire mériterait une intelligence scientifique et poli-

tique pour la penser, intelligence qui fait défaut. On a le principe de précaution mais on n'a pas le principe scientifique de responsabilité. Je ne peux m'empêcher de penser ici à la phrase d'Oppenheimer [qui a dirigé le projet Manhattan de construction de la bombe atomique dès 1942] pour qui les physiciens ont commis le péché scientifique (1). Les savants atomistes étaient conscients d'avoir mis le pied en dehors du cercle sacré.

Quelle différence entre Hiroshima et Fukushima ?

Hiroshima, c'était un événement sans référence. Avec Fukushi-

ma, on se pose « la » grande question : quelle est cette énergie qui commence par une bombe et se termine, après Three Mile Island et Tchernobyl, par la déflagration d'une centrale. Notre puissance se retourne contre nous.

Propos recueillis par Dominique Leglu

* Dénonciateur de « l'idolâtrie du progrès », Paul Virilio est notamment l'auteur de *Vitesse et politique et de Ville panique* (lire S. et A. n° 767). (1) La phrase originelle est « *the physicists have known sin* ».

Retrouvez l'intégralité de cette interview sur notre site : www.sciencesetavenir.fr

ALY SONG/REUTERS

S
t
t
1
S
e
S
-
e
i
-
-
-
e
y
-
e
1
-
t
S
e
1
-
t