



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

L'accident majeur de Fukushima

Considérations sismiques, nucléaires et médicales



*Groupe de travail Solidarité Japon
présidé par Alain Carpentier, Etienne-Emile Baulieu,
Edouard Brézin et Jacques Friedel*

L'accident majeur de Fukushima

Considérations sismiques,
nucléaires et médicales

ACADÉMIE DES SCIENCES



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Imprimé en France

© 2012, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtaboeuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 978-2-7598-0736-9

Rapport du groupe de travail « Solidarité Japon »

Sous la direction de

Alain CARPENTIER, Président de l'Académie des sciences

Jacques FRIEDEL, ancien Président de l'Académie des sciences, pour la partie
« Mégaséismes et mégatsunamis »

Édouard BRÉZIN, ancien Président de l'Académie des sciences, pour la partie
« L'accident nucléaire »

Étienne-Émile BAULIEU, ancien Président de l'Académie des sciences, pour la
partie « Conséquences sanitaires et environnementales »

This page intentionally left blank

TABLE DES MATIÈRES

Présentation

ix

PREMIÈRE PARTIE **Mégaséismes et mégatsunamis**

Composition du groupe de travail	3
1. Les données scientifiques	5
1.1. Les tremblements de terre de subduction	5
1.2. Les tsunamis	7
1.3. Le séisme de Tohoku du 11 mars 2011	8
2. La France	10
2.1. Les Antilles	10
2.2. La métropole	11
2.3. La réponse des sols	12
3. Aspects socio-économiques	13
3.1. Gouvernance	13
3.2. Réglementation sismique et sûreté nucléaire	14
3.3. Protection parasismique des ouvrages	14
Conclusion	15
Recommandations	17
Annexes sur CD-Rom	
1. Données sur le séisme du 11 mars 2011 – Raül Madariaga	
2. Erreurs de prévision et de gouvernance dans la gestion au Japon de la mitigation des séismes, mises en lumière par le séisme de Tohoku du 11 mars 2011 – Xavier Le Pichon	

3. La prévention des tsunamis (évaluation de l'aléa, alerte, préparation) – François Schindelé
4. Réflexions sur les besoins en recherche sur les données accélérométriques – John Douglas
5. Le risque sismique en France – Michel Cara

DEUXIÈME PARTIE L'accident nucléaire

Composition du groupe de travail	21
1. Séquence des événements à la centrale de Fukushima Dai-ichi . . .	23
2. La situation du nucléaire en France après Fukushima	29
2.1. Le parc nucléaire français	30
2.2. L'organisation de notre dispositif de sûreté	32
3. Le cycle du combustible et les potentialités futures	37
3.1. Comparaison des dispositifs de sûreté EPR-Gén II	37
3.2. Au-delà de l'EPR	37
Recommandations	39
Annexes sur CD-Rom	
1. L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ; texte ASN et IRSN Complément : traitement des eaux contaminées ; texte B. Barré	
2. Glossaire nucléaire	
3. Les réacteurs à eau légère (ou ordinaire) – Réacteurs à eau pressurisée (REP) et réacteurs à eau bouillante (REB) ; texte B. Barré <i>Description des réacteurs modérés par de l'eau ordinaire : réacteurs à eau bouillante (Fukushima) ou réacteurs à eau pressurisée (réacteurs utilisés en France)</i>	
4. Les accidents graves sur les REB ; texte IRSN <i>Description spécifique de l'évolution d'un accident grave dans un réacteur à eau bouillante</i>	
5. Les améliorations de la sûreté des centrales nucléaires apportées par EDF à la suite des incidents et accidents du passé ; texte EDF	
6. Le risque hydrogène dans les enceintes des réacteurs du parc nucléaire français ; texte IRSN <i>Description des dispositifs mis en œuvre dans le parc nucléaire français pour éviter l'explosion d'hydrogène</i>	

7. L'évaluation de la tenue aux séismes des installations nucléaires françaises ; texte IRSN
8. Retour d'expérience de Fukushima, recherche sur le combustible nucléaire ; texte R. Guillaumont
9. L'apport des recherches de l'IRSN, concernant les accidents avec fusion de cœur, à la compréhension de l'accident de Fukushima et de ses conséquences ; texte IRSN
10. Comparaison des systèmes de sûreté d'EPR avec ceux des réacteurs de deuxième génération ; texte B. Barré
11. La recherche à l'IRSN et au CEA dans le domaine de la sûreté nucléaire pour les réacteurs à eau ; texte IRSN et CEA
12. Vieillissement des centrales nucléaires de type REP ; texte Y. Bréchet
13. Les réexamens de sûreté et les visites décennales des réacteurs à eau sous pression ; texte ASN
14. Le cycle du combustible et ses différentes étapes ; texte B. Barré
15. Les réacteurs de 4^e génération, le prototype ASTRID, les enseignements de l'accident de Fukushima ; texte CEA
16. Le cycle du combustible des réacteurs à neutrons rapides ; document CEA
17. La sûreté des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ; document IRSN
18. Le cas des réacteurs embarqués (propulsion navale) ; texte B. Barré
19. Document ASN : Présentation des évaluations complémentaires de la sûreté des installations nucléaires au regard de l'accident de Fukushima

TROISIÈME PARTIE Conséquences sanitaires et environnementales

Composition du groupe de travail	45
Introduction	47
1. Conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima	51
1.1. Effets de la radioactivité	52
1.2. Conséquences sanitaires générales	61
2. Conséquences environnementales	74
2.1. Impacts de l'exposition aux radiations sur la faune et la flore terrestres	74
2.2. Impact sur les produits végétaux de consommation : les différents modes de déposition	76

2.3. Décontamination des milieux	80
2.4. Déchets contaminés	81
Recommandations	83

Annexes sur CD-Rom

1. Rappels sur la radioactivité et ses effets sur l'organisme (A. Aurengo)
2. Becquerel, Gray, Sievert, trois unités différentes (H. Métivier)
3. Organisation française des activités nucléaires industrielles, de la sûreté et de la radioprotection (E. D. Carosella et P. Laroche)
Tableau des formations (SFRP)
4. Iode et accident nucléaire (B. Le Guen)
5. Prise d'iode stable en situation d'urgence (P. Laroche et D. Schoulz)
6. Les études épidémiologiques à long terme des conséquences psychosociologiques des désastres environnementaux : l'exemple de l'attentat du 11 Septembre (AJ. Valleron)
7. L'accident de Three Mile Island (AJ. Valleron)
8. Tchernobyl, conséquences de santé autres qu'en termes de mortalité (AJ. Valleron)
9. L'Institut national de Veille sanitaire et l'exemple de son investigation de l'accident AZF (AJ. Valleron)
10. Analyse du Rapport UNSCEAR 2011 Annexe D : Aspects environnementaux de l'Accident de Tchernobyl (H. Métivier)
11. Mesure et surveillance (J.M. Péres)
12. Influence de la date d'occurrence des retombées radioactives sur les conséquences d'un rejet atmosphérique accidentel (Ph. Renaud)
13. Exemple de modélisation française pour étudier la dynamique des masses d'eau Océaniques (Pascal Bailly du Bois - Coopération IRSN-Iframer)
14. Réduction de la contamination en milieu bâti (JM. Péres)
15. On the use of plants to decontaminate soils around Fukushima Dai-ichi (P. Chagvardieff, E. Quéméneur)

CD-Rom : Annexes des trois parties

PRÉSENTATION

Alain Carpentier, Président de l'Académie des sciences

« Although it is Japan government global responsibility to overcome the Fukushima Nuclear Power Plant accident, we hereafter want to ask all academies in countries and regions around the world to support and cooperate with us ».

Science Council of Japan
April 2011

« Le 11 mars 2011, le district Nord-Est du Japon a été frappé par un tremblement de terre massif suivi d'un tsunami majeur et d'une série d'accidents à la centrale nucléaire de Fukushima avec fuites d'éléments radioactifs ». Tel est le message que le professeur Kanazawa, président du Science Council of Japan (SCJ) adressa quelques jours après la catastrophe aux présidents des académies des sciences étrangères, ajoutant qu'il nourrissait l'espoir que ces académies aideraient à la réhabilitation nécessaire. Le hasard fait que, dix jours plus tard, une délégation japonaise du SCJ était accueillie par notre académie dans le cadre de la réunion du G8-G20 organisée cette même année 2011 par notre pays. Ce fut l'occasion d'un échange de vues sur la situation à Fukushima et d'étudier l'aide que la France pourrait apporter à un pays ami dont la haute réputation en matière scientifique et singulièrement dans le domaine nucléaire est depuis longtemps établie. Ainsi naquit l'idée de former au sein de l'Académie des sciences le groupe de travail Solidarité Japon qui reçut pour mission d'analyser les événements survenus au Japon, de faire le point sur les risques sismiques et nucléaires en France et outre-mer, et d'en tirer les conclusions et recommandations qui s'imposent, sachant les limites d'une telle réflexion dans un contexte en pleine évolution et qui le restera pendant plusieurs années.

Ce n'est pas la première fois que des accidents plus ou moins graves d'ordre naturel ou liés à l'activité humaine se produisent dans le monde, conduisant par retour d'expérience à prendre les mesures susceptibles de mieux les prévoir, les corriger, et les prévenir. En matière d'activité sismique, les géologues ont depuis longtemps pris soin de répertorier, localiser et analyser avec précision les événements les plus dramatiques avec leur cortège de plusieurs dizaines de milliers de morts comme à Lisbonne en 1755 et à Sanriku en 1896, pour ne citer que les plus mémorables parmi les centaines de séismes enregistrés. Au Tōhoku, le 11 mars, ce fut d'abord un séisme de magnitude 9 dans une zone,

certes préparée à ce risque, mais où l'on n'avait pas prévu une telle magnitude. Ce fut ensuite et surtout un tsunami d'une amplitude exceptionnelle sur ces côtes. Cumulant leurs effets, ces deux manifestations firent des milliers de morts, de blessés, de déracinés, de sans-abri, de disparus. Ce désastre permit néanmoins de constater que les systèmes GPS et les constructions parasismiques s'étaient révélés fiables. Si elles n'avaient pas existé, le Japon aurait eu à déplorer un beaucoup plus grand nombre de morts et de blessés dans la mesure où Tokyo était proche de l'épicentre du séisme.

Dans l'ordre du nucléaire, en revanche, le fait que la centrale de Fukushima ait été placée dans une zone à risque a conduit à une cascade d'événements qui ont additionné leurs effets délétères. « Dès la survenue du séisme le 11 mars 2011 à 2h46 pm, trois réacteurs en fonctionnement au moment du séisme s'arrêtèrent (comme il se doit) mais le site fut privé d'électricité extérieure. Les groupes électrogènes se mirent en route aussitôt mais ceux des unités 1 et 4 s'arrêtèrent une heure plus tard et les réservoirs de fuel furent balayés par le tsunami ». Tels sont les termes utilisés dans le rapport que le 23 mars le SCJ adressa aux académies des sciences étrangères qui avaient très tôt manifesté leur solidarité. Ce rapport et les nombreuses notes d'information qui suivirent régulièrement traduisent l'engagement que prit très tôt le SCJ d'informer complètement et en temps réel la communauté scientifique et le public, prévenant ainsi une critique, formulée à juste titre dans le passé, du secret entourant trop souvent les activités nucléaires en général et leurs accidents en particulier. Ce souci de transparence n'est qu'un des aspects du comportement exemplaire du Japon dont le peuple, face à cette effroyable tragédie, a montré une maîtrise de soi et une dignité remarquables qui suscitent l'admiration. On vit, en effet, des manifestations de courage, de solidarité, d'humanité, qui sont autant d'exemples pour ceux qui, dans de semblables circonstances, se seraient laissés submerger par le découragement.

Le groupe de travail que nous avons constitué comprenait trois sous-groupes distincts pour étudier avec les compétences nécessaires les trois composantes – sismique, nucléaire et sanitaire – de ce drame. Bien qu'interdépendantes à bien des égards, ces composantes étaient suffisamment bien individualisées pour justifier des études séparées. Chaque sous-groupe fut confié à un ancien président de l'Académie des sciences, garant de la haute tenue des débats et bénéficia d'informations venant des instances scientifiques japonaises et françaises et des avis de nombreux experts consultés. Dans l'ensemble, les membres ont eu pour souci permanent de répondre non seulement aux questions des scientifiques mais aussi aux questions que le public se pose. De même qu'il y a eu un « avant » et un « après » Tchernobyl, il y aura un « avant » et un « après » Fukushima. L'après Fukushima naîtra de la réflexion que doivent engager les instances scientifiques internationales. C'est dans cet esprit que l'Académie des sciences a répondu à l'appel du Scientific Council of Japan, et apporta sa contribution sous forme d'un rapport et de propositions

de coopération scientifique. Ce rapport est organisé en trois parties correspondant aux trois groupes de travail. Pour chacune de ces parties, à l'analyse des événements observés à Fukushima, on a joint une réflexion sur les forces et les faiblesses de l'organisation en France, de façon à en tirer des recommandations utiles et répondre aux questions que le public se pose : de tels événements auraient-ils pu survenir en France ? Quelles leçons en tirer ? On ne doit pas s'attendre à trouver des réponses à toutes les questions qui se posent. Bien des incertitudes demeurent, notamment concernant le traitement des eaux, la réhabilitation des sols, la réintégration des populations déplacées, la sécurité alimentaire, l'organisation optimale des soins et des mouvements de population lors d'accidents d'étendues et de gravité extrêmes... De nouvelles informations viennent encore chaque mois enrichir le dossier et le feront longtemps encore. Toutefois, à la veille anniversaire de ces tragiques événements, les rapports des trois sous-groupes ont paru suffisamment aboutis pour être publiés en l'état. Ils sont adressés à la communauté scientifique internationale pour contribuer à la réflexion commune, et tout spécialement à la communauté japonaise en témoignage de solidarité.

This page intentionally left blank

PREMIÈRE PARTIE

Mégaséismes
et mégatsunamis

This page intentionally left blank

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL « MÉGASÉISMES ET MÉGATSUNAMIS »

Jacques FRIEDEL	Président, ancien Président de l'Académie des sciences
Pierre-Yves BARD	Observatoire des sciences de l'Univers de l'université de Grenoble
Pascal BERNARD	Institut de physique du globe de Paris
Michel CARA	École et Observatoire des sciences de la Terre de l'université de Strasbourg
Vincent COURTILOT	Académie des sciences
Jean DERCOURT	Secrétaire perpétuel honoraire de l'Académie des sciences
Claude JAUPART	Académie des sciences
Xavier LE PICHON	Académie des sciences
Raül MADARIAGA	École normale supérieure
Jean-Paul MONTAGNER	Institut de physique du globe de Paris
Alain PECKER	Académie des technologies
Jean-Paul POIRIER	Académie des sciences
Jean SALENÇON	Ancien Président de l'Académie des sciences
François SCHINDELÉ	CEA
Paul TAPPONNIER	Académie des sciences

Personnalités auditionnées

Rolando ARMIJO	Institut de physique du globe de Paris
Robert DAUTRAY	Académie des sciences
John DOUGLAS	BRGM
Nikolaï SHAPIRO	Institut de physique du globe de Paris
Steve TAIT	Institut de physique du globe de Paris

Relecteurs critiques

Alain CARPENTIER	Président de l'Académie
Philippe TAQUET	Vice-président de l'Académie
René BLANCHET et Jean-Louis LE MOUËL	Membres de l'Académie

Coordination éditoriale

Jean-Yves CHAPRON	Directeur du service des Publications de l'Académie des sciences, assisté de Joëlle FANON
-------------------	---

1 | Les données scientifiques

Notre planète est animée de mouvements internes dus aux fortes différences de température et de densité qui existent entre la surface et l'intérieur. Cette activité se développe dans la croûte et le manteau entre la surface et le noyau métallique sur près de trois mille kilomètres d'épaisseur. À grande profondeur, le manteau terrestre est porté à haute température et se déforme de manière continue par fluage. Dans les couches superficielles de la Terre, en revanche, les températures sont faibles et les roches ont un comportement élastique et cassant, répondant aux sollicitations mécaniques par saccades : les séismes.

1.1 Les tremblements de terre de subduction

Dans une zone de subduction, une plaque océanique, plus lourde et plus froide que le manteau environnant, plonge sous l'effet de la pesanteur sous une autre plaque (continentale ou océanique selon les endroits) (voir figure 1.1). Le mouvement descendant engendre de fortes déformations qui se relâchent brutalement à l'occasion de tremblements de terre et de possibles glissements aismiques. Les plus gros tremblements de terre, appelés « mégaséismes », se produisent à l'interface entre les deux plaques à des profondeurs généralement inférieures à 50 km. Un modèle simple qui explique ces séismes est celui du *rebond élastique*, proposé initialement pour la faille de San Andreas à la suite du séisme de San Francisco en 1906 et adapté par la suite aux zones de subduction. Entre deux tremblements de terre, pendant la phase appelée « intersismique », la partie profonde de la zone de subduction glisse de façon continue, produisant une lente accumulation de contraintes de cisaillement dans la partie plus superficielle ou « zone sismogène ». Cette zone est normalement bloquée par les forces de frottement entre les plaques. Occasionnellement, la contrainte accumulée dépasse le seuil de glissement dans l'interface et produit un mouvement brutal : un tremblement de terre. Ce modèle explique bien le mouvement saccadé d'une zone de subduction, mais ne permet pas le calcul de la magnitude (ou du moment sismique) des tremblements de terre. La magnitude, mesure logarithmique de l'énergie, dépend de la distribution de contraintes accumulées par le mouvement de la partie profonde de la zone de subduction et par l'histoire des séismes précédents.

Les séismes des zones de subduction se produisent aussi bien à l'intérieur des plaques qu'à l'interface entre les plaques. Au Japon comme aux Antilles, l'activité de la plaque supérieure, où sont situées les îles, est particulièrement importante et produit des séismes très destructeurs qui peuvent atteindre des

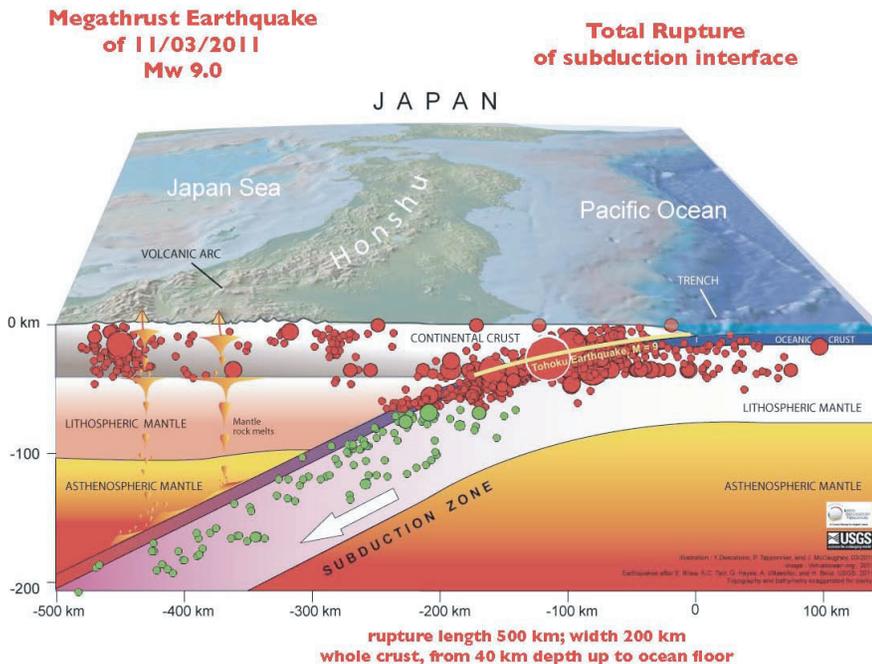


Figure 1.1

La rupture de la zone de subduction le 11 mars 2011.

magnitudes supérieures à 8. Ces séismes sont catastrophiques lorsqu'ils sont situés très près de zones habitées. Un de ces séismes s'est produit en 2008 dans la préfecture d'Iwate au nord de la ville de Sendai au Japon. Des séismes importants se produisent aussi à l'intérieur de la plaque océanique et peuvent atteindre la magnitude 8. Ces séismes sont fréquents en Amérique du Sud et aux Antilles. Les séismes les plus dangereux sont sans aucun doute ceux qui se produisent à l'interface entre les plaques car ils peuvent occasionnellement dépasser la magnitude 8,5 et entrer dans la catégorie des *mégaséismes*.

La sismicité des zones de subduction répond à plusieurs lois empiriques dont la plus importante est la loi de Gutenberg-Richter qui stipule que le nombre de séismes supérieurs à une magnitude donnée décroît d'un facteur 10 quand la magnitude augmente d'une unité. La sismicité dépend en conséquence du plus gros séisme possible dans la zone de subduction. En géophysique, on appelle cet événement extrême le *séisme caractéristique* de la région. Dans la plus grande partie des zones de subduction, on ne connaît pas la taille du séisme caractéristique car les archives historiques sont trop courtes ou incomplètes. C'était le cas du Nord-Est du Japon (Tohoku) où la sismicité historique n'était connue que sur un intervalle de temps de 500 ans au moment de la

construction des centrales nucléaires au milieu des années 1970. Dans de nombreuses zones de subduction, on peut compléter le catalogue historique par des données paléosismiques : des traces d'anciens tsunamis sur les estuaires ou des terrasses marines, etc. permettent de reconstituer des tremblements de terre anciens.

Dans le cas de Tohoku, un gros événement paléosismique datant de l'an 869 avait été identifié, il y a près de dix ans. Quand la sismicité historique est bien connue, comme c'est le cas du Chili où les mégaséismes sont plus fréquents qu'à Tohoku, on peut identifier des zones, nommées *lacunes sismiques*, où le déficit en glissement sismique est important. Ces zones sont donc considérées comme celles où le risque sismique à court terme est élevé. Cette analyse a permis d'identifier la lacune du Maule au Chili où un séisme de magnitude 8,8 a eu lieu le 27 février 2010. Récemment, depuis environ 1990, notre palette de mesures et d'observations a été complétée par la géodésie spatiale (grâce au système GPS et aux études par interférométrie radar), qui permet d'estimer le rapport entre le glissement asismique et le taux d'accumulation de déformation élastique. L'interprétation de ces données n'est pas aisée car la durée d'observation spatiale est courte par rapport à celle du cycle sismique. Ces données spatiales ont mis en évidence des mouvements asismiques épisodiques dans la partie inférieure de la zone sismogène. On pense que ces mouvements lents retardent les mégaséismes.

1.2 Les tsunamis

Un tsunami est dû à un déplacement rapide des fonds marins et son amplitude dépend de la surface déplacée, de l'ampleur et de la direction du déplacement. Ce sont les déplacements verticaux qui sont les plus dangereux. Un tsunami se propage dans un bassin océanique avec une vitesse qui est une fonction simple de la hauteur d'eau. À l'approche de la côte, du fait de la diminution de la hauteur d'eau, la vitesse diminue rapidement et l'amplitude augmente simultanément. Près des côtes, la topographie compliquée des fonds marins et des rivages, dont les variations horizontales se font sur des distances comparables à la profondeur, est responsable de phénomènes d'amplification qui restent mal compris à l'heure actuelle, en partie parce que les données disponibles du relief sous-marin ne sont pas assez précises.

La connaissance de l'aléa tsunami reste à améliorer. Par exemple, les événements du 26 décembre 2004 à Sumatra et du 11 mars 2011 au Japon ont dépassé largement les amplitudes de ce que la plupart des scientifiques attendaient, ceci du fait que la magnitude des séismes attendus et les glissements sur les failles étaient très sous-estimés : c'est la connaissance des sources sismiques qui reste à améliorer pour ces méga-événements, la

connaissance de l'aléa tsunami étant directement liée à celle de la connaissance des sources sismiques potentielles. Le temps de retour de tels cataclysmes est certainement de l'ordre du millier d'années. Or, dans de nombreux continents, la période historique avec récits ou chroniques écrites ne s'étend que sur quelques centaines d'années, et le plus souvent moins. Les données disponibles sont donc très insuffisantes pour évaluer correctement l'aléa, d'autant plus qu'un tsunami majeur a un impact sur la plupart des côtes d'un même bassin, parfois à 20 000 km de distance. Il faut souvent rechercher les traces d'un tsunami très loin de sa source.

Dans le cas d'un tremblement de terre, les caractéristiques du tsunami associé permettent de remonter à la zone de rupture et au déplacement le long de celle-ci. À l'inverse, on peut calculer ces caractéristiques à partir de celles du séisme sous-marin. C'est cette approche croisée qui a permis des progrès significatifs.

1.3 Le séisme de Tohoku du 11 mars 2011

Parmi les séismes dont la magnitude a pu être mesurée avec des instruments depuis environ un siècle, le séisme de Tohoku, de magnitude 9,0-9,1, est le quatrième par ordre d'importance décroissante, après celui du Chili (1960, 9,5), d'Alaska (1964, 9,2) et de Sumatra (2004, 9,1-9,2). La zone de rupture du séisme de Tohoku s'étend sur 600 km de longueur (le long de la fosse) et 250 km de largeur, mais la zone de très grand mouvement (supérieur à 30 m et atteignant localement le chiffre énorme de 60 m) ne dépassait pas 100 km de longueur et 50 km de largeur. La vitesse de convergence entre les plaques étant d'environ 90-95 mm/an dans la région, la déformation relâchée durant le séisme s'était donc accumulée pendant au moins sept siècles. Une particularité étonnante de ce séisme est que deux tiers du mouvement de rupture se sont produits dans la partie proche de la fosse, là où le plan de rupture est à moins de 20 km de profondeur. C'est cette zone de très grande rupture qui fut la source principale du gigantesque tsunami. Le séisme de 1896 situé au nord avait certainement cette caractéristique du fait que le tsunami induit a été également majeur.

Les mégaséisme et mégatsunami du 11 mars 2011 ont frappé le pays qui a le réseau d'observations géophysiques le plus dense du monde, un système d'alerte sismique rapide très élaboré et les plus grandes barrières anti-tsunami, un pays où la population a le meilleur entraînement et la plus grande expérience, où le niveau scientifique est des plus élevés et la gestion des désastres basée sur les connaissances acquises une préoccupation majeure. Les conséquences tragiques et inattendues de cette catastrophe ont atteint un niveau très élevé (il aurait certes pu être encore bien pire si les systèmes d'alerte

n'avaient pas fonctionné, si la population n'avait pas été entraînée et si la qualité des constructions parasismiques n'avait pas été aussi bonne).

Les sismologues japonais chargés de la prévision étaient persuadés que la probabilité d'un séisme pouvait être établie de manière rationnelle à partir de la définition de séismes caractéristiques pour chaque zone. La carte de prévision officielle ne prévoyait pas de séisme supérieur à 7,5 dans la zone la plus proche du continent et 8,2 au large près de la fosse, alors que le séisme du 11 mars a eu une magnitude de 9,1-9,0. Sur la base de ces prévisions, les tsunamis attendus ne devaient pas dépasser 4 ou 5 mètres de hauteur à la côte alors que celui du 11 mars a dépassé 15 à 20 mètres. Ainsi la centrale de Fukushima fut-elle construite pour être à l'abri de tsunamis de moins de 5,7 m de hauteur à la côte, alors que la vague y a dépassé cette hauteur pour atteindre, à l'endroit de certains réacteurs, 14 mètres d'altitude par rapport au niveau normal de la mer.

L'erreur principale des spécialistes japonais a été de considérer que le dernier siècle de sismicité était représentatif du régime permanent de la subduction. Or les zones de subduction peuvent produire des séismes de magnitude égale ou supérieure à 9 avec des mouvements dépassant 20 à 30 mètres accumulés pendant plusieurs siècles, durée bien supérieure à celle adoptée par les spécialistes japonais. Le fait que de grands séismes de magnitude 7,5-8 avaient relâché une partie de la déformation élastique accumulée n'excluait pas qu'un mégaséisme leur fasse suite, comme ce fut le cas le 11 mars. En effet, l'énergie sismique dissipée durant le dernier siècle ne représentait que 20 % de l'énergie due au glissement de la plaque Pacifique sous le Japon. Autrement dit, la sismicité sur un siècle ne rendait compte que d'environ 20 mm/an de glissement, soit environ un cinquième du total. L'hypothèse du régime permanent avait donc comme implication que 80 % de l'énergie due au glissement était évacuée par des microséismes ou des épisodes de glissement plastique.

Les données géologiques et historiques montrent que des tsunamis très importants avaient eu lieu sur la côte de Tohoku en 1611 et 869, dont les traces géologiques sont très supérieures à celles provoquées par les séismes du dernier siècle (quoique le séisme de moindre magnitude de 1896 ait fait des dégâts impressionnants). Le taux de répétition des mégatsunamis en liaison avec les mégaséismes est donc de l'ordre de 500 à 1 000 ans.

L'installation d'un réseau dense de stations GPS (30 km entre les stations) à la suite du séisme de Kobe en 1995 a permis de montrer que la déformation élastique observée à travers le Japon en face de la subduction du Pacifique correspond à une vitesse de déplacement voisine de 80 mm/an, soit proche de 100 % de la vitesse de subduction et non 20 %. C'est donc un blocage mécanique très efficace qui empêche le glissement continu de la plaque

japonaise sur la plaque pacifique en subduction. Ce blocage le long du littoral développe une énergie élastique croissante dans la croûte japonaise qui ne se libère par glissement que quand la contrainte accumulée dépasse la contrainte de friction entre les deux plaques. Des relaxations locales peuvent se produire sur des zones de friction faible, expliquant les séismes « moyens » observés dans la dernière centaine d'années. Mais une relaxation totale sur une grande longueur de la fosse de subduction doit se produire pour une contrainte accumulée suffisante. L'ordre de grandeur des forces de friction est compatible avec le glissement important de 60 m cité plus haut, qui n'a pu s'accumuler qu'en au moins sept siècles, ce qui explique à la fois l'amplitude et la rareté de ce mégaséisme et du mégatsunami qui l'a accompagné.

Le séisme de Tohoku démontre qu'une prévision basée sur des données récentes est insuffisante. Il est indispensable de tenir un large compte des données historiques et géologiques permettant de caractériser la sismicité pendant au moins plusieurs siècles et probablement pendant plusieurs millénaires. Le séisme de Tohoku conforte par ailleurs l'idée proposée récemment que la magnitude maximale d'un séisme de subduction est de 9+ quelle que soit la vitesse de subduction (accumulation maximale de mouvement élastique d'une trentaine de mètres). Cette conjecture a des conséquences très importantes pour l'évaluation du risque sismique dans les Antilles françaises.

2 | La France

2.1 Les Antilles

Les exemples récents de Sumatra et du Japon conduisent à réviser le niveau de risque de mégaséisme et de tsunami en France. Pour notre pays, la seule région concernée est l'archipel des Antilles, sous lequel la plaque américaine s'enfonce à la vitesse de 2 mètres par siècle. La Guadeloupe a subi en 2004 un séisme superficiel de magnitude 6,3 qui a fait des dégâts dans l'archipel des Saintes et une victime. La Martinique a ressenti en 2007 les secousses d'un séisme profond de magnitude 7,3 qui heureusement n'a pas causé de dégâts. Situé à un autre endroit, il aurait pu être dévastateur. On doit noter que ces deux séismes antillais sont les deux plus violents du territoire français depuis cent ans.

La Guadeloupe a subi en 1843 (avant l'existence d'instruments) un séisme majeur, sans doute de magnitude proche de 8, qui a détruit Pointe-à-Pitre sans produire de tsunami. Le temps de retour d'un tel séisme est de quelques siècles.

Le séisme japonais montre que cette zone pourrait être le site d'un mégaséisme avec un temps de retour très long, sans doute de plus d'un millénaire. Aux Antilles, les chroniques et les récits historiques les plus anciens ne datent que de 1492. Il est donc important de poursuivre, à terre comme en mer, des travaux géologiques et géophysiques exhaustifs et de haute résolution spatiale étendus en coopération avec l'arc Caraïbe pour reconstituer l'histoire des séismes et d'éventuels tsunamis dans la région depuis des milliers d'années. En Martinique comme en Guadeloupe, nombreux sont encore les bâtiments, y compris publics, qui ne sont pas construits selon des normes parasismiques leur permettant de résister à des séismes de magnitude 8, *a fortiori* 9. Rappelons enfin que ces risques sismiques s'ajoutent aux risques volcaniques.

2.2 La métropole

La métropole est dans une situation sismique bien différente de celle des Antilles. Dans le contexte général de rapprochement des plaques tectoniques Europe et Afrique à une vitesse d'environ 70 cm par siècle, la déformation est en grande majorité absorbée au nord du Maghreb, où un séisme de magnitude 7,5 pourrait être la cause d'un tsunami montant à 1 à 3 m d'altitude le long des côtes françaises. Corrélativement, les séismes importants sont rares en métropole. Les données historiques montrent toutefois que des tremblements de terre de magnitudes comprises entre 6 et 7 y sont possibles. Leur cause réside principalement dans le jeu de failles anciennes dans un champ de déformation mal connu. Le contexte tectonique et l'influence des variations importantes du relief et des contraintes associées n'y sont pas établis précisément. Les zones sismiquement les plus actives sont les chaînes des Pyrénées et des Alpes, et la bordure nord-est du pays. La marge Ligure au large de Nice est une zone à part où des séismes en compression sont possibles en mer. Ce fut probablement le cas de celui qui frappa les localités de la côte à l'est de Nice en 1887 et qui provoqua un tsunami qui était monté à 2 m d'altitude à Cannes et Antibes. Par ailleurs, une vaste zone de sismicité diffuse s'étend du Massif central à l'ensemble du Massif armoricain. Les plus gros séismes historiques connus en métropole n'ont probablement pas dépassé la magnitude 7, mais l'exemple du Japon, où le mégaséisme a été plus gros que ceux connus historiquement, incite à traiter cette observation avec prudence. On n'a pas observé de tsunami majeur sur les côtes métropolitaines.

L'analyse géologique et la datation précise de marqueurs de séismes dans le quaternaire récent, ainsi que l'approfondissement des études historiques, sont indispensables. À l'échelle du millénaire, on sait qu'une dizaine de séismes de magnitude 6 ou plus ont affecté la métropole. Un exemple célèbre est le séisme de Bâle de 1356 dont la magnitude est estimée entre 6 et 7.

Ce type de séisme peut avoir un impact destructeur très fort dans un pays à forte densité de population comme le nôtre. Il suffit de rappeler l'exemple du séisme de Lambesc (non loin d'Aix-en-Provence) le 6 juin 1909, de magnitude estimée à 6,2, qui fit 46 victimes dans une région à l'époque peu peuplée. On estime que le même séisme ferait à l'heure actuelle plusieurs centaines de victimes.

Que ce soit à cause d'installations industrielles ou de bâti ancien vulnérable dans certaines agglomérations, un séisme de magnitude 6 peut provoquer de nombreuses victimes et avoir des conséquences économiques néfastes, pour peu que son épïcêtre soit superficiel et proche.

2.3 La réponse des sols

Il est établi depuis longtemps que la géologie locale (nature des couches superficielles et distribution en surface et en profondeur) peut modifier grandement les caractéristiques des mouvements sismiques et leur pouvoir endommageant. Un exemple révélateur est fourni par le site de la centrale de Kashiwasaki-Kariwa au Japon, où des effets tridimensionnels fortement hétérogènes et variables d'un événement à l'autre en fonction de l'azimut de la secousse ont été mis en évidence.

La réponse locale du sol aux secousses sismiques fait encore l'objet de multiples recherches, combinant études et mesures de terrain, développements théoriques et simulations numériques lourdes. Les progrès ont été significatifs, mais demeurent insuffisants faute de connaissances suffisamment précises du sous-sol dans la plupart de nos grandes agglomérations et de nos sites industriels. Les verrous ne pourront se débloquent qu'avec des efforts majeurs en instrumentation *in situ* et en reconnaissances dédiées du sous-sol.

Les avancées les plus récentes pour leur prise en compte « forfaitaire » dans les réglementations parasismiques « risque normal » ont été obtenues grâce à l'énorme effort d'instrumentation et de recherche entrepris par la communauté japonaise après le séisme de Kobe (17 janvier 1995). Tous les sites d'enregistrement des mouvements du sol ont ainsi été décrits systématiquement grâce à des reconnaissances géologiques et géophysiques (forages, mesures de vitesse d'ondes sismiques). Toute la communauté sismologique s'accorde à dire que c'est l'exemple à suivre au niveau mondial, mais force est de constater que les crédits font défaut, notamment en Europe. Cette tendance lourde au désintérêt pour les reconnaissances de sols a souvent mené à des surprises désagréables et des surcoûts de construction importants.

3 | Aspects socio-économiques

3.1 Gouvernance

Un système d'observation opérationnel demande une action continue. Dans la plupart des pays développés, c'est le ministère de l'Intérieur qui finance la surveillance. En France, l'effort est porté par le seul ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Il faut sans doute rechercher un moyen terme entre ces deux types d'organisation. Sans lien avec la Recherche, les services de surveillance peuvent périlcliter et ignorer les avancées scientifiques souvent rapides dans le domaine des risques naturels. Sans financement du ministère de l'Intérieur, le poids porté par la Recherche n'est pas soutenable, comme c'est le cas pour la France. L'État doit se doter, au plus haut niveau, d'un dispositif lui permettant de *coordonner* l'action en matière de risques telluriques (séismes, tsunamis, éruptions, glissements de terrain) majeurs. L'expérience du CSERV (Comité supérieur d'évaluation des risques volcaniques), créé après l'éruption de la Soufrière de 1976 et récemment dissous, a montré que cette structure ne fonctionnait pas de manière convenable. Se posaient les questions de la compétence du ministère auquel il était rattaché et de certains fonctionnaires qui en suivaient les travaux. À la suite du séisme de 2004 à Sumatra, un délégué « à l'alerte tsunami » a été mis en place auprès du Premier ministre. Malheureusement, le gouvernement n'a pas assuré la continuité de ce dispositif. Après une phase initiale d'investissements, les moyens de fonctionnement n'ont pas suivi et le délégué a disparu. Il paraît nécessaire de reconstituer *auprès du Premier ministre* une structure assurant la coordination de l'action gouvernementale en cas de crise tellurique majeure, avec la participation des ministères chargés de la sécurité civile (Intérieur), de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et de l'Environnement.

Il convient de noter cependant l'initiative du gouvernement de faire financer le CENALT (Centre d'alerte aux tsunamis) par les ministères chargés de l'Intérieur et de l'Écologie.

Les actions à entreprendre sans délai dans la Caraïbe (plaque caraïbe et ses frontières nord et sud, arc des Petites Antilles, zone de subduction), sur le sujet des (méga)-séismes et du degré de couplage mécanique, doivent associer recherche de haut niveau et observations, et conjuguer données historiques, géologie, sismologie, volcanologie, GPS, à terre et en mer. Cette recommandation concerne le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, les universités et les grands établissements, le CNRS et notamment en son sein, l'Insu chargé du suivi des OSU (observatoires des sciences de l'univers, composantes des universités). L'Insu, agence de moyens au service de la communauté scientifique, a pour mission l'observation des

milieux naturels (en relation, le cas échéant, avec les autres instituts du CNRS), à travers le suivi et le soutien qu'il doit assurer auprès de l'Institut de physique du globe de Paris, grand établissement, et auprès des OSU. Plusieurs sont concernés par la recherche sur la Caraïbe ; l'IPGP notamment a mission d'y assurer la surveillance et la prévision des phénomènes naturels en Guadeloupe et en Martinique. Le rôle scientifique et opérationnel des observatoires volcanologiques et sismologiques français des Antilles devrait être confirmé.

Les financements correspondants doivent être programmés. Une clarification des responsabilités et des engagements budgétaires des tutelles (ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, CNRS-Insu, mais aussi ministère chargé de l'Intérieur pour ce qui est des aspects de sécurité civile) à l'égard des établissements concernés est nécessaire.

3.2 Réglementation sismique et sûreté nucléaire

En France, la réglementation sismique est inscrite dans la règle fondamentale de sûreté, qui date de 2001 et repose sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique.

Pour répondre aux demandes de l'Autorité de sûreté nucléaire, l'IRSN/BERSSIN (Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations) développe ses outils d'expertise de l'aléa grâce à une recherche de pointe, reconnue internationalement, en association avec les laboratoires académiques compétents. De son côté, l'exploitant développe un programme de recherche, en liaison avec un nombre appréciable de laboratoires de recherche et d'organismes dans le cadre du programme européen SIGMA (*Research and Development Program on Seismic Ground Motion*). Il confie par ailleurs des études d'aléa sismique à des entreprises privées.

Malgré le souci de transparence affiché par l'IRSN (ses évaluations sont rendues publiques), on pourrait se rapprocher de la pratique américaine. Cette pratique, fondée sur des panels d'experts, conduit à une réflexion très poussée, tant de la part des chercheurs que des exploitants, portant précisément sur la gouvernance acceptable et le rôle des experts dans les évaluations d'aléas (voir par exemple les documents du Panel « *Seismic Hazard* » de la National Regulatory Commission et du Senior Seismic Hazard Analysis Committee).

3.3 Protection parasismique des ouvrages

La meilleure protection des ouvrages réside dans l'application de normes de construction parasismique. L'expérience démontre sans ambiguïté que, lorsque

les constructions sont faites en respectant les normes modernes (postérieures à la décennie 1970-1980 environ), les dommages restent limités. Dans tous les grands séismes récents, les constructions anciennes ont subi des effondrements spectaculaires alors que les immeubles modernes, conçus « parasismiques », se sont bien comportés.

La bonne conception parasismique implique qu'une égale attention soit portée à chacune des étapes allant de la conception à la réalisation. Si l'accent est souvent mis sur la phase dimensionnement proprement dit, la conception initiale et la mise en application de dispositions constructives adéquates sont également importantes. Il s'agit de prévenir des ruptures fragiles dans certaines parties d'ouvrages dont les conséquences sont des effondrements brutaux ou des ruptures en chaîne (effet « château de cartes »). Le dimensionnement a pour objet de conférer aux éléments structuraux la résistance et la capacité d'adaptation nécessaires.

Tout l'art de la protection parasismique réside dans la capacité à résister à des sollicitations supérieures à celles qui ont été retenues pour le dimensionnement. Le niveau de sollicitation ne peut être défini que de manière probabiliste : on accepte que ce niveau soit dépassé avec une certaine probabilité, d'autant plus faible que l'ouvrage est important ou présente des risques vis-à-vis de l'environnement. Cependant, il est fondamental que lorsque ce niveau de dimensionnement est dépassé, des conséquences catastrophiques soient évitées. La réponse à cette question est apportée par le principe de dimensionnement en capacité, qui s'apparente à celui du fusible dans une installation électrique. On conçoit des zones de dissipation d'énergie où vont se concentrer les déformations anélastiques, créant un endommagement de l'ouvrage sans entraîner sa ruine, et on surdimensionne les autres. La procédure prévaut dans tous les règlements modernes, et en particulier dans le nouveau corpus normatif européen constitué par les Eurocodes.

La mise en œuvre pratique des concepts précédents reste délicate, en particulier à l'échelon français. Dans notre pays de faible tradition sismique, la formation des ingénieurs et constructeurs est en retard. Cela est particulièrement sensible dans les petites entreprises de bâtiment. Le problème est moins aigu dans les grandes entreprises, qui ont investi dans des plans de formation et de sensibilisation de leur personnel.

Conclusion

Le cataclysme qui a touché le littoral nord-est du Japon le 11 mars 2011 est un phénomène majeur de la sismicité mondiale, qui a frappé par son intensité et son étendue et qu'accompagnait un très fort tsunami.

Ce mégaséisme a frappé le pays qui avait le réseau d'observation géophysique le plus dense du monde, un système d'alerte sismique et aux tsunamis rapide au meilleur niveau de l'état de l'art et les plus grandes barrières anti-tsunamis, un pays où la population a le plus grand entraînement et la plus grande expérience, où le niveau scientifique élevé a permis de gérer les désastres récents grâce aux connaissances acquises depuis un siècle. Les conséquences tragiques de cet événement incitent à en rechercher les causes.

Il est clair que les conséquences directes du séisme ont été correctement maîtrisées, tant dans les consignes données à la population que pour la qualité parasismique des grands bâtiments et des réactions automatiques de leur système d'alerte. Mais l'intensité et l'étendue du séisme ont surpris les autorités.

L'addition d'un mégatsunami n'avait pas non plus été prévue par les autorités et a été la cause de grands dommages matériels, notamment sur les réacteurs nucléaires construits en bord de mer, et d'un nombre important de pertes de vies humaines. L'exemple japonais met aussi en lumière certaines interrogations qui concernent notre propre pays.

RECOMMANDATIONS

- Les études de risques naturels (séismes et tsunamis) doivent être menées sur des intervalles de temps suffisamment longs pour apprécier correctement la grande irrégularité des périodes de retour. Il est indispensable de tenir le plus large compte des données historiques et géologiques. Les études géologiques sur la structure, l'histoire et la mécanique des terrains doivent être développées, notamment sur les failles actives majeures, dans les zones sensibles du territoire national (en métropole, aux Antilles et dans les îles de l'océan Indien et du Pacifique).
- Dans les grandes zones de subduction, et notamment aux Antilles, la France doit participer au développement international de l'étude et de la protection contre les mégaséismes et leurs tsunamis, par des réseaux permanents mesurant la sismicité, les déplacements du sol, les variations du niveau de la mer et donnant l'alerte des tsunamis.
- Les activités de recherche comme de surveillance et de normalisation parasismiques doivent tenir compte de connaissances et de technologies qui évoluent rapidement. Elles doivent conduire à des normes uniformes réactualisées fréquemment. En ce qui concerne la recherche fondamentale, les interactions entre les équipes de recherche des différents organismes devraient être stimulées. En particulier, une réflexion impliquant l'IRSN, les exploitants et le milieu académique, doit être menée pour analyser et améliorer, si besoin est, la règle fondamentale de sûreté (RFS) pour le nucléaire, afin d'intégrer l'apport des nouvelles méthodologies d'évaluation des aléas (approches probabilistes).
- Les normes de construction parasismique doivent être respectées lors de la conception de tout ouvrage et leur mise en œuvre doit être contrôlée par un organisme indépendant du maître d'ouvrage. Les normes de construction parasismique de gros ouvrages et ensembles industriels devraient être établies à l'échelle européenne, notamment pour les centrales nucléaires et les usines de production chimique, avec une participation active de l'IRSN, du CEA et des exploitants.
- Les activités de recherche et de surveillance doivent faire l'objet de financements de sources diverses, mais récurrents, garantis sur le moyen et le long terme par l'État. L'étude des aléas naturels à des fins opérationnelles, comme celle de failles au voisinage d'installations industrielles à risques, telles que grands barrages, usines chimiques à risques et centrales nucléaires, doit être prise en charge par l'industrie.

- Il est nécessaire que préfets, responsables de la protection civile et autorités administratives soient bien conscients des caractéristiques et des conséquences principales des catastrophes naturelles. Une formation spécifique en la matière doit être dispensée. Par ailleurs, les aléas naturels doivent absolument faire partie de l'éducation de tout citoyen et figurer dans les programmes scolaires.
- L'étude des aléas naturels et la mise au point de méthodes de prévention doivent être reconnues comme des tâches d'intérêt général, et l'exemple japonais montre clairement qu'elles revêtent des aspects de gouvernance autant que de recherche. Un Conseil national des risques naturels, placé auprès du Premier ministre, devrait être créé et doté de moyens financiers provenant des ministères concernés (Environnement, Intérieur, Recherche). La représentation de la recherche publique et académique au sein de ce Conseil doit être majoritaire.

DEUXIÈME PARTIE

L'accident nucléaire

This page intentionally left blank

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL « L'ACCIDENT NUCLÉAIRE »

Édouard BRÉZIN	Président, ancien Président de l'Académie des sciences
Sébastien BALIBAR	Académie des sciences
Yves BAMBERGER	EDF, Académie des technologies
Bertrand BARRÉ	Areva
Sébastien CANDEL	Académie des sciences
Catherine CÉSARSKY	Académie des sciences
Marie-Pierre COMETS	Autorité de sûreté nucléaire
Robert DAUTRAY	Académie des sciences
Denis GRATIAS	Académie des sciences
Robert GUILLAUMONT	Académie des sciences
Guy LAVAL	Académie des sciences
Yves QUÉRÉ	Académie des sciences
Michel SCHWARZ	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)
Bernard TISSOT	Académie des sciences
André ZAOUI	Académie des sciences
<i>avec la collaboration de</i> Yves BRÉCHET	Académie des sciences

Personnalités auditionnées

David BAUMONT	IRSN
Philippe BILLOT	CEA
Bernard BOULLIS	CEA
François GAUCHÉ	CEA
Gilbert GUILHEM	IRSN
Philippe JAMET	Autorité de sûreté nucléaire
Xavier POUGET-ABADIE	EDF
Jacques REPUSSARD	Directeur général de l'IRSN
Alan ZAETTA	CEA

Relecteurs critiques

Alain CARPENTIER	Président de l'Académie
Jean-Claude DUPLESSY et Denis JÉRÔME	Membres de l'Académie

Coordination éditoriale

Jean-Yves CHAPRON	Directeur du service des Publications de l'Académie des sciences, assisté de Joëlle FANON
-------------------	---

1 | Séquence des événements à la centrale de Fukushima Dai-ichi

On trouvera en annexe une description détaillée de la séquence des événements¹ de Fukushima. Il ne s'agit ici que de résumer les phases principales. Nous présentons ici une analyse préliminaire qui intègre les informations aujourd'hui disponibles, mais il subsiste des incertitudes. Il faudra sans doute encore plusieurs années pour comprendre tout ce qui s'est passé à Fukushima, pour distinguer par exemple de manière claire les conséquences propres au séisme de celles du tsunami, et analyser la séquence des événements au sein des diverses parties de la centrale. Au fil des mois, des informations nouvelles seront disponibles et il serait opportun de revenir sur cette analyse, peut-être dans un cadre international.

Il faudra donc du temps pour déduire de cette analyse les erreurs qu'il ne faudrait pas répéter, ainsi que les mesures de sécurité que nous devons prendre pour les réacteurs en service à l'heure présente. De plus, en juin 2011, la situation à Fukushima reste fragile et à la merci d'une reprise sismique violente.

Néanmoins, on peut dire que, vraisemblablement, le séisme du 11 mars 2011 à 14 h 46, malgré sa magnitude 9, supérieure aux limites retenues pour la conception des réacteurs de la centrale de Fukushima², n'aurait pas eu de conséquences très dommageables pour l'environnement ou la santé, s'il n'avait été suivi du tsunami. Il est possible que les tuyauteries reliant les vannes de dépressurisation des enceintes de confinement aux cheminées d'évacuation dans l'atmosphère aient pu être endommagées par le séisme. C'est peut-être cet endommagement qui a conduit aux explosions d'hydrogène dans les bâtiments réacteurs et donc à mettre en danger les piscines d'entreposage de combustible usé, par ailleurs non refroidies. L'analyse est encore incertaine et elle dépend d'investigations plus approfondies de l'état des réacteurs qui nécessiteront beaucoup de temps.

¹ Plusieurs sites permettent de suivre l'évolution de la situation des six réacteurs de la centrale de Fukushima Dai-ichi : notamment celui de l'autorité de sûreté japonaise NISA, <http://www.nisa.meti.go.jp/english/celui de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, http://www.irsn.fr/FR/Documents/home.htm celui de l'opérateur TEPCO, http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/index-e.html>

On trouvera en annexe 1 un résumé de la séquence des événements initiaux.

² La construction avait été prévue pour résister à un séisme de magnitude 8 ; noter qu'un point en plus dans l'échelle de magnitude correspond à une énergie libérée trente fois supérieure. Néanmoins il est possible que l'accélération provoquée par le séisme au niveau du radier sur lequel repose un réacteur n'ait pas dépassé la valeur limite retenue par les concepteurs.

Les dispositifs anti-sismiques ont fonctionné. Les réacteurs 1, 2 et 3 se sont mis à l'arrêt (les réacteurs 4, 5 et 6 étaient déjà à l'arrêt pour maintenance), l'alimentation électrique par le réseau externe a été perdue, mais les générateurs électrogènes de secours nécessaires pour faire fonctionner les pompes permettant d'assurer le refroidissement des réacteurs et pour évacuer la puissance résiduelle se sont mis en marche. En effet, malgré l'arrêt des réacteurs, il reste un dégagement de chaleur considérable dû aux produits radioactifs qui se sont formés dans le combustible nucléaire pendant le fonctionnement du réacteur : plusieurs dizaines de mégawatts (MW) dans les instants qui suivent l'arrêt d'un réacteur et encore une quinzaine de MW 24 heures plus tard. En l'état actuel des connaissances, il ne semble pas que les cuves des réacteurs aient été fissurées à la suite des secousses sismiques, ni les piscines dans lesquelles sont entreposés les assemblages de combustibles usés issus des réacteurs³, et il semble que les circuits hydrauliques nécessaires au refroidissement soient restés en état de fonctionner. Néanmoins, il sera sans doute difficile de caractériser l'état précis des installations juste après le séisme, avant l'arrivée du tsunami, compte tenu des endommagements qu'elles ont subis par la suite.

Les réacteurs étaient donc bien conçus pour répondre à un séisme et à une perte d'alimentation électrique externe. Mais ils n'étaient pas prêts à subir également pendant une période longue la perte des alimentations électriques de secours et de la source froide qu'a provoquée le tsunami. Celui-ci déferla 55 minutes après le séisme, noyant les générateurs électrogènes, des réacteurs 1-2-3 et 4⁴ et endommageant la prise d'eau de mer.

Pour chaque réacteur, il restait encore des systèmes de refroidissement de secours. Le refroidissement du cœur du réacteur 1 aurait dû être assuré par un système passif utilisant un réservoir d'eau situé au-dessus de la cuve (système nommé « *Isolation Condenser* ») et par un système d'injection d'eau à haute pression grâce à une pompe actionnée par une turbine utilisant la vapeur produite dans le cœur (système nommé « *High-Pressure Coolant Injection system* »). Le système passif qui s'était mis en route automatiquement avant la perte des générateurs de secours s'est arrêté de fonctionner et n'a pu être remis en service de manière continue ultérieurement. La turbo-pompe n'a pas démarré. Les causes précises de ces défaillances (erreur humaine, défaillance

³ Il a subsisté une interrogation sur la piscine du réacteur n° 4 qui contenait l'intégralité du combustible du réacteur à l'arrêt pour maintenance. Les combustibles se sont-ils trouvés à découvert par défaut de refroidissement et/ou une fuite survenue à la suite du séisme ? Un incendie s'est déclaré, dont l'origine est encore inconnue. Après reconnaissance par des robots, les assemblages de combustible usé sont intacts.

⁴ Les réacteurs 5 et 6 ont été construits en 1978 et 1979 à une dizaine de mètres au-dessus du niveau des quatre premiers (1, 2 et 3 datent de 1970 à 1974) et leurs générateurs de refroidissement n'ont sans doute pas été noyés. Leur situation paraissait être maîtrisée à la date d'aujourd'hui (18/4/2011). Un seul des quatre diesels a fonctionné ce qui est suffisant.

matérielle due par exemple à la défaillance des batteries de secours) ne sont pas connues précisément. Il semble donc qu'il n'y ait eu aucun refroidissement du cœur du réacteur 1 pendant une durée de 14 heures environ.

Pour les réacteurs 2 et 3, le refroidissement a pu être momentanément assuré par des pompes actionnées par des turbines utilisant la vapeur produite dans le cœur (systèmes nommés « *Reactor Core Isolation Cooling system* »). Ces pompes ont permis d'injecter de l'eau froide depuis des réservoirs et de faire circuler l'eau contenue dans les tores annulaires situés en partie inférieure des bâtiments. Le système d'injection d'eau à haute pression a également démarré automatiquement sur le réacteur 3. Mais tous ces moyens ont été perdus pour diverses raisons qui restent encore à éclaircir (défaillance des batteries, indication de niveau d'eau haut dans la cuve, chute de pression dans la cuve). Il semble donc qu'il n'y ait également eu aucun refroidissement des cœurs des réacteurs 2 et 3 pendant une durée de 7 heures environ.

Il faut noter qu'en l'absence de restauration de la source froide, ces moyens de secours n'auraient pu permettre de refroidir de manière pérenne les cœurs des réacteurs. Une injection d'eau froide par un moyen complémentaire était nécessaire, ce qui a pu être finalement réalisé, mais bien trop tardivement.

En l'absence de refroidissement, la chaleur dégagée par la radioactivité du combustible vaporise progressivement l'eau de la cuve, puis chauffe la vapeur ; la pression à l'intérieur de la cuve augmente. Lorsque la température dépasse 800-900 °C, la réaction d'oxydation par la vapeur d'eau des gaines métalliques en alliage de zirconium qui recouvrent le combustible⁵ s'accélère fortement, libérant de grandes quantités d'hydrogène et d'énergie car la réaction est très exothermique⁶. Cela se produit vraisemblablement en moins d'une heure.

Dans ces périodes d'assèchement, le combustible cesse progressivement de baigner dans l'eau liquide ; vers les 900 °C, les structures des barres de contrôle (carbure de bore dans une gaine en acier dans les réacteurs à eau bouillante) se liquéfient, puis à 1 800 °C les gaines des crayons de combustible (et les boîtiers des assemblages dans le cas des réacteurs à eau bouillante) en Zircaloy fondent ; à partir de 2 300 °C le combustible commence à se liquéfier, notamment par suite de sa dissolution par les matériaux de structure fondus et il se forme un magma mélangeant les matériaux fondus, le « corium », à très haute température.

⁵ Elles sont en zirconium, métal transparent aux neutrons qui, à 1 200 °C en présence de vapeur d'eau, réduit l'eau en formant de l'oxyde de zirconium et de l'hydrogène.

⁶ Les enthalpies libres des réactions d'oxydation de Zr par H₂O et O₂ sont respectivement de -459 kJ/mol Zr et - 755 kJ/mol Zr.

Pour diminuer la pression interne⁷ de la cuve du réacteur et de l'enceinte de confinement, les opérateurs ont fait des relâchements de vapeur, mais, au contact de l'air dans les bâtiments, l'hydrogène ainsi dégagé avec la vapeur a explosé, emportant les couvertures métalliques des bâtiments 1 puis 3, avec des dommages encore plus importants sur ce dernier réacteur. Notons que le réacteur n° 3 utilisait du combustible MOX⁸ en faible proportion, mais cela n'a probablement pas eu d'incidence sur la nature des rejets de matières radioactives, les composés formés à partir des transuraniens étant très peu volatils.

La reprise de l'alimentation en eau, par injection d'eau de mer par le réseau de protection contre les incendies, a réussi à arrêter le processus d'échauffement des réacteurs. Mais, à partir du 17 mars, une inquiétude nouvelle s'est ajoutée concernant les piscines d'entreposage des assemblages de combustible, notamment celle du réacteur n° 4 ; la question s'est posée de savoir si ceux-ci pouvaient se retrouver découverts au contact de l'air (la chaleur dégagée par la radioactivité des combustibles suffit, en cas d'arrêt du refroidissement à mettre à découvert le combustible entreposé dans une piscine en une à plusieurs dizaines de jours) selon le nombre et l'activité des assemblages de combustible usé entreposés. Le séisme a-t-il projeté une grande quantité d'eau hors de la piscine, ou celle-ci s'est-elle fissurée, nous ne connaissons pas encore la réponse. Le danger potentiel est donc là considérable puisque l'on pourrait avoir au plan de la radioactivité l'équivalent d'une fusion de cœur à l'air libre⁹, sans aucun confinement des produits de fission libérés, car il n'y avait pas d'enceinte de confinement prévue pour ces piscines¹⁰. Les assemblages de combustible usé entreposés n'ont *a priori* pas été endommagés, comme le confirment les mesures de radioactivité qui ont été effectuées autour du site¹¹ et les reconnaissances réalisées à l'aide de robots.

⁷ Montée dans le tore, en principe séparé de l'enceinte de confinement à 8 ou 9 bars semble-t-il sur le réacteur n° 1, alors que la résistance nominale n'était garantie que jusqu'à 5 bars. La décharge de la vapeur de l'enceinte du réacteur se fait à travers l'eau de la piscine du tore qui retient une partie de la radioactivité, mais cela peut enrichir la vapeur en hydrogène par condensation d'eau. La décharge de la vapeur de l'enceinte de confinement se fait ensuite, en principe, à la cheminée. Une explosion très violente a eu lieu au niveau du tore du réacteur 2 avec fuite d'eau radioactive dans le bâtiment des turbines.

⁸ MOX : Mixed Oxide Fuel composé du plutonium issu du retraitement pour 7 % et de l'uranium appauvri ²³⁸U, résidu des opérations d'enrichissement, pour 93 %. 32 assemblages sur les 548 présents dans le cœur étaient composés de crayons de combustible MOX.

⁹ À la différence importante près qu'il n'y aurait probablement presque plus eu de dégagement d'iode 131, mais il y avait 1 300 assemblages de combustible usé du réacteur 4, soit plusieurs cœurs.

¹⁰ Hormis le bâti métallique externe. L'explosion de ces enceintes pour les réacteurs 1 et 3 a sans doute permis de réalimenter par les lances à incendie les piscines des combustibles usés de ces réacteurs.

¹¹ Il est estimé notamment que les rejets en césium auraient été alors supérieurs d'un ordre de grandeur à ceux ayant résulté des rejets des réacteurs accidentés, induisant des conséquences radiologiques bien supérieures à celles observées.

Le 13 avril, TEPCO annonçait une température de l'eau de cette piscine qui était encore de 90 °C, supérieure aux 40 °C normaux, mais en dessous de la température d'ébullition de l'eau.

Au 25 août 2011, il semble que la situation soit en voie d'être maîtrisée (en l'absence de nouveau séisme, mais la terre continue à trembler) et qu'il n'y ait plus que de faibles émissions de produits radioactifs. Les réacteurs 1, 2 et 3 sont maintenant refroidis par injection d'eau douce directement dans les cuves (débit d'environ 15 m³/h)¹². L'eau qui s'en échappe, fortement contaminée, est prélevée depuis les bâtiments des turbines, traitée dans trois installations mises en service à partir du mois de juin puis, après désalinisation, réinjectée dans les cuves. De plus, une injection d'azote est effectuée dans les trois enceintes de confinement pour les maintenir inertes et ainsi éviter tout risque de combustion d'hydrogène.

Mais la maîtrise ne sera réellement complète que lorsque les cœurs seront refroidis en circuit fermé. Les mesures de la radioactivité émise par cet accident majeur, classé au niveau 7 de l'échelle INES¹³, niveau le plus élevé, indiquent des rejets dans l'atmosphère environ dix fois inférieurs à ceux de Tchernobyl. Mais cette émission à beaucoup moins haute altitude a conduit à proximité de la centrale dans une région très peuplée à des dépôts radioactifs comparables à ceux de Tchernobyl. L'évacuation de la zone des 20 km autour de la centrale (c'est-à-dire d'environ 170 000 habitants), intervenue avant les relâchements majeurs de radioactivité, a sans doute réduit l'impact de celle-ci mais il n'y a pas encore d'estimation précise des doses et débits de doses auxquels les habitants ont été soumis.

Par ailleurs, par suite de conditions météorologiques particulièrement défavorables lors des rejets ayant eu lieu du 15 au 16 mars (vent soufflant vers l'intérieur des terres, conjugué à des précipitations abondantes sous forme de pluies et de chutes de neige), une bande de territoire d'environ 20 km de large et 60 km de long située au nord-ouest du site a été soumise à des dépôts d'iode et de césium importants. L'évacuation des 70 000 habitants y résidant a été décidée par les autorités japonaises deux mois après l'accident afin de réduire l'exposition au césium 137 qui subsiste. L'existence de cette zone constituée avec la zone d'exclusion initiale des 20 km sans doute l'élément le plus grave provoqué par cette catastrophe.

On imagine parfois qu'un réacteur non contrôlé pourrait engendrer une explosion atomique. Il faut tout de même bien préciser qu'il n'en est rien et

¹² Les premiers calculs du déroulement de l'accident indiquent que la cuve du réacteur n° 1 a dû être percée par le corium en fusion en libérant une partie qui se serait répandue sur le radier en béton du réacteur.

¹³ International Nuclear Event Scale.

qu'un scénario apocalyptique de cette nature est heureusement exclu. Les accidents nucléaires passés, même les plus graves, sont dus à des augmentations de température et de pression « classiques » et non à une réaction en chaîne explosive. Le combustible d'un réacteur, uranium enrichi à moins de 5 % en isotope 235, ainsi que le plutonium produit par le fonctionnement du réacteur, ne permettent absolument pas, quelle que soit la séquence des événements, d'engendrer une explosion nucléaire¹⁴.

L'explosion de Tchernobyl était due à une brusque augmentation de pression de l'eau provoquée par l'emballement de la puissance du réacteur. À Fukushima, les explosions ont été dues à des fuites d'hydrogène, les réactions de fission ayant été arrêtées dès les premières secousses du séisme.

Le refroidissement de fortune des réacteurs et des piscines à conduit à d'importants volumes d'eau contaminée dont le traitement vient de commencer selon un procédé indiqué en annexe. La décontamination des sols et la gestion des déchets interviendront ultérieurement.

Quelques interrogations complémentaires

- Les réacteurs 1 à 4 ont été implantés en creusant la falaise côtière qui est à environ 40 m au-dessus du niveau de la mer. Peut-être s'agissait-il de trouver un soubassement rocheux plus stable en cas de séisme, ou alors simplement de faciliter le pompage ? En tout cas, l'exposition au tsunami n'aurait pas eu lieu si la centrale avait été construite sur la falaise. Visiblement les constructeurs ont pris conscience de ce danger en implantant les réacteurs 5 et 6 une dizaine de mètres plus haut¹⁵.
- On mesure à quel point il est essentiel de prémunir les générateurs diesel de secours contre une inondation.
- La déficience des systèmes de secours pour le contrôle commande des turbines situées dans le réacteur a été un facteur d'aggravation important. En effet, ceux-ci sont susceptibles tant qu'ils fonctionnent de maintenir sous contrôle le réacteur en cas de perte simultanée de l'alimentation électrique externe et des sources de refroidissement. On ne peut que s'interroger sur les causes de cette panne (intervenue sur le réacteur n° 1 au bout de deux heures). Néanmoins, en l'absence de la source froide, perdue à cause du tsunami, le refroidissement n'aurait pu être assuré très longtemps car l'eau des tores serait de toute façon entrée en ébullition en entraînant la perte de ces systèmes.

¹⁴ Pour fabriquer une bombe, il faut de l'uranium 235 presque pur, en tout cas enrichi à au moins 80 %. La dispersion de l'²³⁵U dans l'²³⁸U dans un réacteur interdit toute « explosion atomique ».

¹⁵ Les réacteurs 5 et 6 sont en « arrêt froid », situation maîtrisée, depuis le 20 mars.

- L'absence ou l'inefficacité d'installation de récupération et de recombinaison d'hydrogène dans les bâtiments situés au-dessus de l'enceinte de confinement des réacteurs a conduit aux explosions qui se sont produites au-dessus des réacteurs 1 et 3. Dans le réacteur 2, il s'est agi d'une explosion dans le tore. Notons ici que des recombineurs d'hydrogène autocatalytiques passifs (RAP) ont été installés fin 2007 sur tous les réacteurs en service en France (voir plus bas).
- L'exploitant TEPCO a-t-il disposé des moyens d'intervention adaptés aux opérations de secours dans des locaux irradiants ? De même, on peut s'interroger sur le délai assez long qui a été nécessaire pour acheminer et mettre en opération des camions-pompes ayant la puissance nécessaire. Certes, les dégâts subis par les voies de communication ainsi que les délicates décisions d'affectation des moyens de secours ont dû jouer un rôle, mais une analyse approfondie des raisons de ces délais s'impose. Il serait également intéressant de savoir si les robots du groupement français INTRA¹⁶ auraient été capables d'intervenir efficacement dans ce cas.
- L'absence d'enceinte de confinement au-dessus des piscines de combustible peut conduire, en cas de perte de refroidissement pendant plusieurs jours, à un danger gravissime, parce qu'à l'heure actuelle rien n'est prévu pour limiter les rejets radioactifs que cela pourrait entraîner¹⁷. On voit combien il est important de limiter autant que possible le nombre d'assemblages de combustible usé entreposés dans les piscines situées dans les bâtiments des réacteurs.

2 | La situation du nucléaire en France après Fukushima

L'accident de Fukushima a montré qu'un événement hautement improbable, tel une perte simultanée et sur des temps longs des alimentations électriques et des sources froides conduisant à endommager gravement trois réacteurs électronucléaires d'une centrale, est néanmoins arrivé. Il faut donc réévaluer le niveau de sûreté de nos installations nucléaires sans écarter comme impossibles des événements de très faible probabilité et sans négliger la possibilité d'occurrence simultanée de plusieurs événements rares *a priori* indépendants.

¹⁶ Groupe d'intervention robotique sur accident, créé en 1988 par EDF-CEA-COGEMA.

¹⁷ Dans les EPR, la piscine d'entreposage est située à l'intérieur de la coque « avion » offrant ainsi une plus grande robustesse vis-à-vis d'un impact important. Mais, pour autant, cette coque ne joue aucun rôle de confinement des produits radioactifs.

Tous les incidents passés qui se sont présentés dans l'industrie nucléaire, et *a fortiori* les accidents graves ou majeurs, ont conduit à un réexamen sévère des conditions de sûreté et d'exploitation des installations nucléaires. À chaque fois, cet examen a entraîné des modifications appropriées et a conduit à entreprendre des recherches visant à améliorer la sûreté et la sécurité. Tirer les leçons de Fukushima va donc s'imposer à nos activités nucléaires.

2.1 Le parc nucléaire français

La France produit aujourd'hui 78 % de son électricité par 58 réacteurs, exploités par EDF, qui se répartissent ainsi :

- 34 réacteurs de 900 MW, moyenne d'âge 29 ans ;
- 20 réacteurs de 1 300 MW, moyenne d'âge 23 ans ;
- 4 réacteurs de 1 450 MW, moyenne d'âge 13 ans.

(Les moyennes d'âge citées, calculées à partir de la première divergence des réacteurs, se réfèrent à décembre 2010). Un réacteur EPR de 1 600 MW est en construction à Flamanville.

Tous ces réacteurs utilisent de l'eau sous pression (REP) pour modérer les neutrons et évacuer la chaleur, alors que ceux de Fukushima utilisent de l'eau bouillante (REB). On trouvera en annexe quelques indications sur les bases physiques du fonctionnement des réacteurs et une description plus détaillée des réacteurs à eau légère¹⁸, REP et REB. Les réacteurs à eau présentent l'avantage qu'en cas de perte de cette eau (par vidange ou par ébullition), le nombre de réactions de fission diminue : c'est une caractéristique intrinsèque des cœurs, très importante pour la sûreté. Ces réacteurs utilisent de l'*uranium enrichi* à 3,5 %¹⁹ et en plus, pour 20 de ces 58 réacteurs, du combustible MOX (*Mixed oxide fuel*, voir annexe 14).

La conception, la construction, l'exploitation et le démantèlement des installations nucléaires (réacteurs nucléaires, ateliers du cycle du combustible nucléaire) sont évidemment guidés par des impératifs de sûreté. La responsabilité de la sûreté des installations est assurée par l'exploitant, c'est-à-dire EDF pour les réacteurs électrogènes. Les modifications permettant d'améliorer la sûreté des installations interviennent lors :

- du retour d'expérience consécutif aux incidents et accidents ;
- des visites décennales imposées à toutes les installations nucléaires.

¹⁸ Il existe également des réacteurs à eau « lourde », où une fraction des molécules d'eau est composée d'oxygène et de deutérium, isotope deux fois plus lourd de l'hydrogène.

¹⁹ Voir l'annexe 2 : glossaire nucléaire.

Les incidents qui émaillent la vie de toute industrie, telle l'inondation de la centrale du Blayais en 1999, et surtout les accidents graves comme celui de Three Mile Island (TMI) en 1979, ou majeurs comme celui de Tchernobyl en 1986, donnent donc lieu à une analyse approfondie et conduisent à des améliorations significatives de la sûreté, au plan technique mais aussi au plan organisationnel et humain. C'est en France l'une des missions de la R&D et de l'ingénierie d'EDF, l'IRSN y travaillant aussi naturellement. Il est évident que l'accident de Fukushima conduira d'abord à une revue des risques du même type puis à la mise en place si nécessaire des mesures correctrices.

*L'autorisation de construction d'un réacteur n'impose pas de limite de durée a priori mais exige que l'exploitant se soumette à un examen de sûreté approfondi tous les dix ans*²⁰. La remise en fonction du réacteur est soumise à la décision de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Les réacteurs les plus anciens sont donc soumis actuellement à leur troisième visite décennale, commencée avec les réacteurs n° 1 de Tricastin et n° 1 de Fessenheim. L'ASN a approuvé en novembre 2010 la poursuite d'exploitation du réacteur n° 1 de Tricastin pour une durée de 10 années supplémentaires après 30 ans de fonctionnement. Elle prendra position en 2011 sur l'aptitude du réacteur n° 1 de Fessenheim à être exploité jusqu'à sa prochaine visite décennale. Le réacteur n° 2 de Fessenheim est à son tour en arrêt décennal.

La surveillance continue des réacteurs, les modifications apportées pour tenir compte du retour d'expérience et des progrès des recherches sur la sécurité, la visite décennale imposée avec redémarrage subordonné à l'ASN, ont pour effet de réduire sensiblement les risques potentiels dus au vieillissement des installations nucléaires.

L'accident de Fukushima n'est donc pas un motif d'arrêt de nos réacteurs les plus anciens²¹. En revanche, il implique l'inspection approfondie de toutes nos installations nucléaires (jeunes ou vieilles) en tant que systèmes technologiques complexes, avec une attention particulière à porter sur les systèmes de contrôle et de sauvegarde, les équipements annexes et les piscines d'entreposage de combustibles usés. Il conviendra de réexaminer toutes les piscines d'entreposage, celles qui jouxtent les réacteurs comme celles où sont entreposés les déchets en attente de vitrification et stockage.

²⁰ Nous nous sommes demandés pourquoi ce délai de dix ans, pourquoi pas cinq par exemple ? En fait la mise en place d'un examen décennal demande plusieurs années d'études préparatoires et les travaux correspondants prennent aussi du temps ! De plus, la sûreté fait l'objet d'une surveillance permanente.

²¹ Le NRC (Nuclear Regulatory Commission des États-Unis) examine depuis 2002 les demandes d'extension de 40 à 60 ans des licences d'exploitation des réacteurs nucléaires. Cette extension a déjà été accordée à environ la moitié du parc des États-Unis qui est constitué de plus de 100 réacteurs. Les possibilités d'extension à 80 ans y sont déjà à l'étude.

Par ailleurs il faut bien entendu également se prémunir contre la possibilité d'une sécheresse sévère ne permettant plus d'assurer convenablement le refroidissement. Mais le danger n'est pas de même nature. On peut la voir venir et arrêter en cas de nécessité les réacteurs ; ce serait une pénurie d'électricité mais rien de comparable à un tsunami ou à une inondation brutale.

Notons que sur chaque site des centrales en France, il y a des systèmes de réserve d'eau de refroidissement du réacteur et de l'ensemble de l'usine, mis en place dès la conception. Ils ont été parfois améliorés lorsque cela s'est révélé nécessaire compte tenu du retour d'expérience. L'accident de Fukushima doit être à son tour pris en compte pour d'éventuelles améliorations.

2.2 L'organisation de notre dispositif de sûreté

2.2.1 La situation réglementaire

La loi du 13 juin 2006, relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, a créé l'ASN, autorité administrative indépendante du gouvernement, chargée de contrôler toutes les activités nucléaires civiles. Celle-ci assure, au nom de l'État, le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France pour protéger les travailleurs, les patients, le public et l'environnement des risques liés à l'utilisation du nucléaire²² et des rayonnements ionisants. L'ASN est placée sous le contrôle de cinq commissaires irrévocables, nommés pour six ans par le président de la République et les présidents des deux assemblées parlementaires. La même loi du 13 juin 2006 a institué des Commissions locales d'information (CLI)²³ auprès de chaque installation nucléaire.

Autant que nous ayons pu en juger, l'ASN est une autorité qui démontre son indépendance en exerçant un contrôle effectif rigoureux sur les installations nucléaires civiles. Par exemple, c'est l'injonction de l'ASN qui a contraint l'opérateur EDF à arrêter le réacteur n° 3 de Bugey jusqu'au remplacement des générateurs de vapeur à la suite de la découverte d'une corrosion importante sur l'un d'entre eux. Le réacteur a été arrêté pendant vingt mois.

Notons également que, depuis 2001, un délégué à la sûreté nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la défense (DSND) est placé auprès du ministre de la Défense et du ministre chargé de l'Industrie.

²² La sécurité nucléaire comprend la sûreté nucléaire, la radioprotection, la prévention et la lutte contre les actes de malveillance, ainsi que les actions de sécurité civile en cas d'accident.

²³ Voir le site de l'Association nationale des comités et commissions locales d'information : www.anccli.fr

L'ASN et le DSND s'appuient sur le support technique que lui fournit l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

2.2.2 La recherche en matière de sûreté nucléaire

C'est par une loi du 9 mai 2001 qu'a été créé l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), qui comporte actuellement environ 1 000 spécialistes, chercheurs, ingénieurs, techniciens, médecins, compétents dans l'ensemble des domaines concernés par les activités nucléaires et la radioprotection. Les recherches en matière de sûreté nucléaire que mène cet Institut pour nourrir ses expertises au profit des pouvoirs publics sont conduites à l'intérieur des laboratoires de l'IRSN implantés sur onze sites en France et comportent souvent des partenariats avec les industriels (EDF et Areva), le CEA²⁴, le CNRS et de nombreux laboratoires internationaux²⁵. L'IRSN consacre 90 M€/an à ses programmes de recherche en sûreté, réalisés en grande partie dans ses laboratoires et ceux de ses partenaires. L'IRSN conduit également des recherches en radioprotection de l'homme et de l'environnement, dont les résultats ont été mis à profit à l'occasion de Fukushima. À titre d'exemple, voir en annexe 9 le texte concernant l'apport des recherches de l'IRSN sur les accidents avec fusion du cœur.

2.2.3 Les programmes français de recherche en matière de sûreté nucléaire

L'objectif majeur qui guide la conception, le dimensionnement et l'exploitation des installations nucléaires (réacteurs nucléaires, ateliers du cycle du combustible nucléaire) est d'assurer la sûreté de ces installations en prenant en compte, dès la conception, des dispositions pour parer à certains accidents potentiels. Pour les réacteurs, l'accident le plus redouté est la fusion du cœur car elle peut conduire à des rejets radioactifs conséquents dans l'environnement.

Les recherches pour comprendre l'enchaînement des phénomènes qui conduisent à des rejets radioactifs accidentels et leurs conséquences sur l'environnement sont indispensables à la mise en œuvre de l'énergie nucléaire de fission. En France, ce sont l'IRSN et le CEA qui les conduisent en relation

²⁴ Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

²⁵ De nombreuses références aux programmes de l'IRSN sont sur le site irsn.fr. Le document de M. Schwarz « Recherche à l'IRSN sur les accidents de fusion de cœur », annexé au rapport, fait un point en avril 2011.

avec les exploitants concernés (EDF pour les réacteurs, Areva pour les installations du cycle du combustible, CEA pour les réacteurs de recherche et autres installations nucléaires de base). L'IRSN et le CEA participent à de nombreux programmes européens ou internationaux et en pilotent certains. La recherche effectuée ou pilotée par l'IRSN est essentielle au développement de ses capacités d'expertise indépendante. Les exploitants ont eux-mêmes leurs propres équipes de recherche et développement.

Ces recherches ont souvent été intensifiées après des incidents ou accidents intervenus sur des réacteurs ou des installations du cycle. Chaque accident révèle des situations nouvelles et conduit à des progrès en matière de sûreté. Par exemple, suite aux accidents de TMI-2 (1979) et Tchernobyl (1986), les programmes de recherche et le retour d'expérience ont entraîné des modifications importantes des composants assurant la sûreté (ou elles sont en cours de réalisation) sur les réacteurs actuels de 2^e génération ainsi que le développement de systèmes destinés à en limiter les conséquences (recombineurs d'hydrogène, éventage et filtration de l'enceinte de confinement). De nouvelles procédures de conduite des réacteurs ont également été mises en place. L'ensemble des enseignements et des recherches sur les accidents a contribué à la conception des réacteurs de 3^e génération, tel l'EPR.

Les programmes de recherches dans le domaine de la sûreté relatifs aux réacteurs nucléaires de 2^e et 3^e générations concernent deux types d'accident :

- les accidents de dimensionnement, ceux dont les conséquences sont prises en compte dès la conception des réacteurs. L'enjeu de l'étude de ces accidents est de parer à ce qu'ils ne dégénèrent pas en accidents graves. Ils comportent deux grandes catégories : les accidents de perte de réfrigérant primaire (problématique du refroidissement en cas de rupture de tuyauterie primaire) et les accidents de réactivité (augmentation instantanée de puissance au sein du réacteur par éjection d'une barre de contrôle de la réactivité, entraînant une montée en température des combustibles et un chargement mécanique de la gaine très rapides) ;
- les accidents graves ou accidents hors dimensionnement (c'est-à-dire non pris en compte lors de la conception), pour lesquels l'enjeu est de maîtriser leurs impacts. Il s'agit d'évaluer le risque de perte de confinement consécutif à la fusion partielle ou totale du cœur du réacteur, et de prévoir à l'avance les dispositifs de prévention afin de limiter les conséquences (mitigation). De tels accidents avec fusion de cœur n'ont pas été pris en compte lors de la conception de la 2^e génération de réacteurs, de sorte que les programmes d'étude ont pour objet la réduction de ces risques et la limitation de leurs conséquences.

À la suite de la demande des autorités de sûreté en 1993, les accidents graves doivent être pris en compte à la conception pour tout nouveau projet de réacteur. En particulier, les dispositions permettant de circonscrire les conséquences de ces accidents à l'intérieur de l'enceinte de confinement du réacteur sans porter atteinte à son intégrité, sont prises en compte pour la conception des réacteurs de 3^e génération comme l'EPR.

La recherche dans le domaine de la sûreté se heurte à l'extrême complexité des phénomènes mis en jeu. Les objectifs scientifiques sont de parvenir à comprendre au mieux les processus physiques et chimiques qui conduisent à la rupture des barrières de confinement (gaine des crayons de combustible, circuit primaire et enceinte de confinement) et à la caractérisation des rejets consécutifs (radionucléides émis, quantités, dispersion dans l'environnement, mesures de terrain). Il faut être capable de développer les modèles et des outils de simulation. Ils doivent notamment permettre de prévoir le déroulement d'un accident dans sa globalité et d'évaluer la pertinence des moyens mis en œuvre pour en limiter les conséquences.

Les programmes du CEA en soutien à la sûreté de l'électronucléaire sont principalement financés par les exploitants, par la subvention de l'État et, pour certains, par l'IRSN.

Il est indispensable de pouvoir effectuer ces recherches d'intérêt public, même au-delà de celles qui sont réalisées ou soutenues par les industriels.

Les recherches expérimentales dans le domaine de la sûreté demandent, notamment pour celles concernant le combustible, des moyens importants, au sein d'installations permettant de mettre en œuvre de la matière très radioactive, ce qui est seulement possible, en France, dans les installations du CEA. Ces moyens expérimentaux destinés aux recherches sur la sûreté doivent être pour certains rénovés et de nouvelles installations sont en construction.

Ce que l'on sait du comportement d'un réacteur non refroidi permet de comprendre ce qui s'est passé à Fukushima. L'accident de Fukushima, tel qu'il peut, ou pourra, être analysé, montre que certains événements appellent un approfondissement des connaissances voire de nouvelles recherches. Le CEA, l'IRSN et les industriels examinent d'ores et déjà comment compléter ou réorienter certaines de leurs recherches et établir les priorités et les financements.

Quelles que soient les circonstances conduisant à des rejets de matière radioactive, il est important de pouvoir rapidement caractériser la contamination et son étendue. Il y a là un domaine de recherche qui doit être abordé par une large communauté scientifique car il relève de problèmes d'environnement. Il faut améliorer la modélisation opérationnelle des éléments

radioactifs contenus dans le combustible, aussi bien que l'étude de leur chimie et de leur transport dans l'environnement.

La recherche en matière de sûreté nucléaire est une priorité qui doit être inscrite dans des programmes clairement affichés et ces programmes doivent être portés à la connaissance du public. En particulier, la recherche publique en matière de sûreté doit être fortement réactivée et développée au-delà de celle qui est réalisée ou soutenue par les industriels. Elle doit concerner tant la physicochimie des accidents que la gestion de crise d'un accident grave et les moyens de mitigation de ce dernier. La communauté scientifique doit y être associée au-delà des organismes dédiés comme le CEA ou l'IRSN.

Questions et recherches concernant l'hydrogène

Les explosions d'hydrogène révèlent un risque réel en cas de fusion du cœur, qui paraît avoir été insuffisamment maîtrisé dans le cas de la centrale de Fukushima. Ce risque est bien identifié dans de nombreuses études en France et dans le monde. Des dispositifs de recombinaison passifs de l'hydrogène ont été placés sur toutes les centrales françaises pour consommer ce gaz au fur et à mesure de son relâchement et éviter son accumulation en cas de production accidentelle. De manière générale, la recombinaison effectuée par catalyse est lente par rapport au taux de production d'hydrogène dans le cas d'une fusion de cœur. Il faudrait vérifier que les dispositions prises permettent cependant de limiter la quantité d'hydrogène présente temporairement dans l'enceinte de confinement.

Il serait aussi utile d'examiner le comportement des dispositifs d'éventage-filtration qui sont installés sur les réacteurs existants pour réaliser une dépressurisation et limiter la pression dans l'enceinte de confinement. Bien que l'objectif premier ne soit pas d'évacuer l'hydrogène, une inflammation de ce gaz pourrait survenir en cours d'éventage. Les dispositions prises pour éviter ce phénomène consistent à utiliser la forte teneur en vapeur d'eau pour inerte le mélange et à placer des dispositifs de préchauffage pour éviter la condensation de la vapeur dans les tuyauteries et maintenir l'inertage de l'écoulement. Ces dispositions devraient faire l'objet d'un réexamen à la lumière de l'accident de Fukushima. Plus généralement, il est important de poursuivre les actions de recherche en cours sur la réduction des risques associés à l'hydrogène dans les enceintes de confinement.

3 | Le cycle du combustible et les potentialités futures

3.1 Comparaison des dispositifs de sûreté EPR-Gén II

On trouvera une annexe décrivant de manière détaillée les améliorations qu'apporte l'EPR²⁶, qui est un REP à dispositifs de sécurité améliorés par rapport aux réacteurs en service aujourd'hui. Elles concernent une réelle réduction de la probabilité de fusion de cœur, grâce à des réserves d'eau de refroidissement importantes et à des générateurs électriques de secours multiples, une architecture parasismique faite aussi pour résister à la chute d'avions, une zone d'étalement pour le corium en cas d'accident grave. L'EPR a effectivement tiré les leçons des accidents de TMI et Tchernobyl. En revanche, il n'assure pas le confinement de la radioactivité qui serait relâchée en cas d'accident dans les piscines où reposent les assemblages de combustible usé.

3.2 Au-delà de l'EPR

On trouvera en annexe une description très complète des opérations concernant le combustible depuis l'extraction minière, jusqu'aux déchets ultimes. Notons que l'industrie électronucléaire française a pris plusieurs options spécifiques :

- le retraitement du combustible usé pour en extraire du plutonium et confiner durablement les déchets ultimes ;
- la fabrication de combustible MOX avec le plutonium extrait ;
- la vitrification des déchets ultimes de haute activité ;
- l'étude du stockage des déchets ultimes à vie longue en couche géologique profonde.

La stratégie pratiquée actuellement, c'est-à-dire l'extraction du plutonium du combustible usé et son recyclage dans le MOX²⁷, est cohérente avec la vision française d'un déploiement des réacteurs à neutrons rapides durant la seconde moitié du siècle. Ces options pourraient être réévaluées si une vision radicalement différente prévalait.

²⁶ European Pressurized Reactor.

²⁷ Noter que les assemblages de combustibles MOX usés ne sont actuellement pas retraités.

Les décisions concernant l'avenir de l'industrie électronucléaire appartiennent exclusivement à nos concitoyens à travers les mécanismes démocratiques qui nous régissent. Nous voulons ici simplement situer les potentialités du nucléaire qu'il faut avoir en tête avant que ces décisions ne soient prises :

- l'utilisation de neutrons rapides, permettant d'exploiter tout le potentiel énergétique de l'uranium²⁸ (voire du thorium), permet de faire passer la disponibilité des ressources à des milliers d'années, certes au prix d'un changement complet de filière nucléaire ;
- le stock existant d'uranium appauvri, résidu des opérations d'enrichissement présentes, ainsi que le plutonium extrait du retraitement du combustible usé, donnent dès à présent à la France des réserves d'énergie considérables, sans émission de gaz à effet de serre ;
- le prototype ASTRID qui serait mis en service dans les années 2020 constituerait une étape importante dans le développement d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium. En effet, il devrait pouvoir être doté aux termes des travaux de recherche actuels d'une sécurité notablement accrue, et disposer alors notamment d'un cœur avec des caractéristiques de stabilité intrinsèques favorables à la sûreté qui n'existe sur aucun RNR²⁹ actuellement en service. Les concepteurs et les réalisateurs de ce projet feront, lorsqu'ils seront prêts, des propositions à l'ASN, qui aura alors à s'exprimer sur ce sujet.

D'autres concepts qu'étudient aujourd'hui les laboratoires méritent une poursuite de la recherche sur le long terme ; citons par exemple les réacteurs à très haute température, les réacteurs au thorium à sels fondus, étudiés au CNRS, les réacteurs hybrides fission-fusion, la fusion magnétique et la fusion inertielle, etc. Il y a en fait encore bien des recherches à conduire sur l'ensemble de la filière nucléaire, sur ses concepts, sur les matériaux, sur les procédés, qui sont susceptibles de modifier profondément cette industrie.

L'accident majeur de Fukushima a conduit l'Académie des sciences à la présente étude. Un travail important reste à faire si l'Académie souhaite formuler des recommandations concernant les études à long terme sur les voies alternatives aux réacteurs et au cycle de combustible actuels.

²⁸ Rappelons que l'isotope fissile ^{235}U n'est présent dans l'uranium naturel qu'à proportion de 0,7 %. L'utilisation de l'isotope ^{238}U , cent quarante fois plus abondant, fait passer de dizaines d'années à des milliers d'années la réserve en combustible.

²⁹ Réacteur à neutrons rapides.

RECOMMANDATIONS

L'accident majeur de Fukushima a mis l'accent sur la nécessité de maintenir impérativement le refroidissement des réacteurs, et des piscines de combustible usé, ainsi que la nécessité de contenir la matière radioactive en toutes circonstances. Il faudra donc étudier à nouveau les risques naturels, sismiques ou climatiques, en incluant les possibilités d'inondation (impératif d'étanchéité des dispositifs de secours), l'examen des dangers présentés par les piscines de combustibles et l'éventualité de prévoir la construction d'enceintes de confinement autour de ces piscines, et l'organisation des secours en cas d'accident. Enfin tous les accidents passés ont montré l'importance de disposer de personnel très qualifié, y compris au sein des personnels intérimaires.

Rien ne peut passer outre à l'impératif de sûreté, mais il n'existe pas d'activité humaine qui ne comporte une part de risque : voir par exemple l'aviation, l'industrie pétrolière ou l'automobile. Les accidents antérieurs ont permis de progresser ; les recherches sur la sécurité issues de l'analyse de Fukushima ne font que commencer.

L'ingénierie parasismique a *a priori* bien fonctionné. La catastrophe qui a si durement frappé le Japon est due au tsunami.

L'installation des réacteurs 1 à 4 de la centrale en bord de mer avait gravement sous-estimé l'amplitude d'une vague qui, de fait, a tout emporté.

Le dispositif de sécurité n'avait pas intégré la concomitance de la perte de toutes les alimentations électriques et de la perte de source froide des réacteurs et des piscines d'entreposage du combustible usé pendant une période longue.

Ces événements, dont aucun pris séparément n'aurait entraîné des effets aussi délétères, se sont conjugués, provoquant une catastrophe qu'aucun scénario n'avait envisagée.

• En ce qui concerne le parc français actuel

1. L'évaluation du danger résiduel de chaleur d'un réacteur arrêté et des piscines de combustible usé doit sans doute être réexaminée. Il faut en particulier se soucier du volume des réserves d'eau ainsi que des appoints d'ultime secours possibles.

2. Réexaminer le cas des piscines de désactivation. S'assurer du refroidissement des éléments combustibles entreposés en toutes circonstances, par des moyens adéquats, est une des actions indispensables pour la sûreté et

la radioprotection dans le cadre du retour d'expérience de Fukushima. Les industriels ont à faire des propositions à ce sujet et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) devra alors prendre position.

3. Limiter autant que possible le nombre d'assemblages de combustibles usés déposés dans ces piscines.

4. Reconsidérer le danger des accidents naturels, sismicité, inondation, et leur concomitance possible.

5. Prévoir sur les réacteurs des raccordements à des moyens de secours mobiles externes. Les délais de fonctionnement des systèmes de sécurité passifs des réacteurs de 3^e génération mériteraient d'être réexaminés à la lumière des enseignements tirés de l'accident de Fukushima.

• Pour le futur

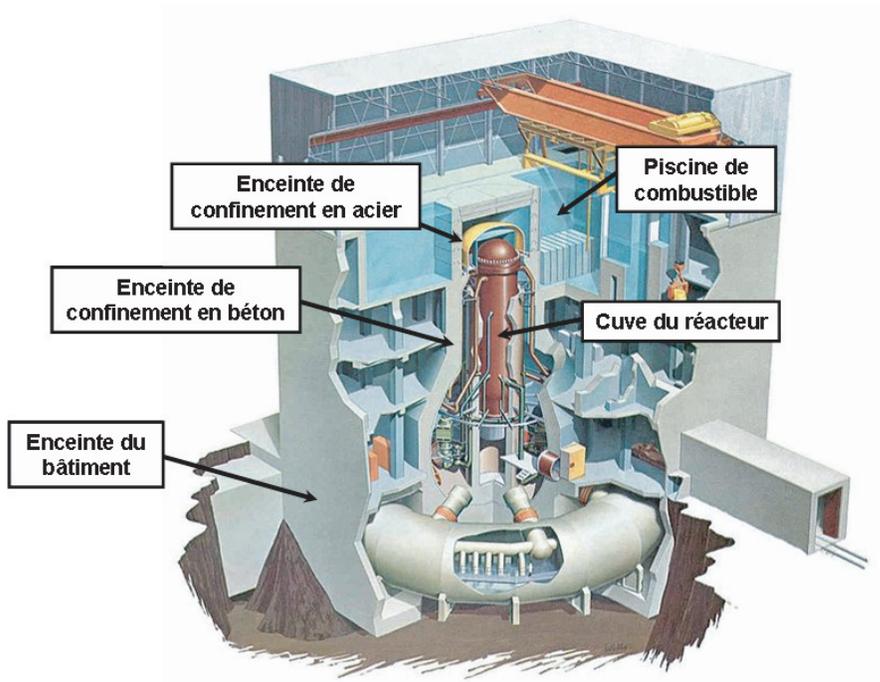
6. Si l'actualité a mis en lumière les risques liés aux réacteurs et au combustible usé entreposé, il ne faut pas perdre de vue que les impératifs de sûreté concernent l'ensemble de toutes les activités nucléaires jusqu'à celles qui mettent en jeu les matières radioactives ultimes.

7. Développer fortement la recherche publique en matière de sûreté (recherches sur la gestion de crise, sur les moyens de garantir l'absence de rejets radioactifs dans l'environnement, sur la fusion de cœur et le comportement du corium, le risque hydrogène...). La communauté scientifique doit y être associée au-delà des centres de recherches des industriels (EDF-Areva) et de ceux des organismes dédiés comme le CEA ou l'IRSN. Un renforcement de la recherche université-écoles d'ingénieurs-CNRS permettrait d'acquérir une plus grande variété d'options et de points de vue.

8. Au-delà des recherches réalisées par les exploitants, responsables aux termes de la loi de la sûreté de leurs installations, il convient que l'IRSN et le CEA disposent des moyens nécessaires pour entreprendre leurs propres recherches concernant les innovations en matière de sûreté et de nouveaux concepts nucléaires.

9. Concevoir à l'avenir le fonctionnement et la gestion d'un éventuel parc nucléaire du futur de façon à minimiser les transports de matière radioactive.

10. Ce sont les mécanismes démocratiques et non les experts qui doivent déterminer l'avenir de l'électricité nucléaire. Mais il faut pour cela que les enjeux et les diverses options dans leur ensemble soient clairement explicités, en gardant au premier plan les exigences de sûreté, sans isoler l'industrie nucléaire des autres industries, sans oublier le contexte du changement climatique dans lequel ce débat doit avoir lieu.



Réacteur de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi.

This page intentionally left blank

TROISIÈME PARTIE

Conséquences sanitaires et environnementales

This page intentionally left blank

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL « CONSÉQUENCES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTALES »

Étienne-Émile BAULIEU Président, ancien Président de l'Académie
des sciences

Sous-groupe I – Radio-exposition et radioprotection

Bernard LE GUEN (coord.)	EDF
Roland MASSE (coord.)	Académie des technologies
André AURENGO	Académie nationale de médecine
Agnès BUZYN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)
Edgardo D. CAROSELLA	Académie des sciences
Anne FLÜRY-HERARD	CEA
Pierre LAROCHE	Service de protection radiologique des Armées
Michèle MARTIN	CEA
Henri MÉTIVIER	Professeur émérite à l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN)
Denis SAFRAN	Réanimation et traumatologie, Hôpital Européen Georges Pompidou
Jean SALENÇON	Ancien Président de l'Académie des sciences
Maurice TUBIANA	Académie des sciences
Alain-Jacques VALLERON	Académie des sciences

Sous-groupe II – Conséquences sanitaires générales

Alain-Jacques VALLERON (coord.)	Académie des sciences
Michel SETBON (coord.)	CNRS, École des hautes études en santé publique, sociologue

André AURENGO	Académie nationale de médecine
Humbert BOISSEAUX	Hôpital Interarmées du Val-de-Grâce, service Psychiatrie
Pierre CARLI	Académie nationale de médecine
Marie-Lise CHANIN	Académie des sciences
Marc GENTILINI	Académie nationale de médecine
Michel LE MOAL	Académie des sciences
Denis SAFRAN	Réanimation et traumatologie, Hôpital Européen Georges Pompidou

Sous-groupe III – Réhabilitation des sols et de l’habitat

Henri MÉTIVIER (coord.)	Professeur émérite à l’Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN)
Jean-Marc PÉRES	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)
André AURENGO	Académie nationale de médecine
Pierre CHAGVARDIEFF	CEA
Jean-Jacques LEGUAY	CEA

Personnalité auditionnée

Monique SENÉ	Vice-présidente de l’Association nationale des comités et commissions locales d’information (ANCCLI)
--------------	--

Relecteurs critiques

Alain CARPENTIER	Président de l’Académie
Yves AGID, Jean-François BACH, Édouard BRÉZIN, Laurent DEGOS, Jacques FRIEDEL et Daniel RICQUIER	Membres de l’Académie

Coordination éditoriale

Jean-Yves CHAPRON	Directeur du service des Publications de l’Académie des sciences, assisté de Joëlle FANON
-------------------	---

Introduction

Les conséquences sanitaires de l'accident nucléaire majeur de Fukushima sont imbriquées avec celles de la catastrophe naturelle provoquée par le mégaséisme et le mégatsunami du 11 mars 2011. Elles le sont d'abord parce que l'accident nucléaire est la conséquence directe du tsunami, ensuite parce que ce tsunami a détruit les infrastructures de la zone, ce qui a perturbé durablement la prise des décisions urgentes concernant les installations et la mise en place des mesures de protection des populations contre les rayonnements ionisants.

Le bilan des conséquences du mégaséisme et du mégatsunami proprement dits est établi.

Il met en valeur l'importance des progrès effectués dans les constructions parasismiques, qui ont permis de limiter considérablement les pertes en vies humaines au moment du tremblement de terre. À cet égard, la comparaison avec les séismes récents du Chili et d'Haïti est éclairante.

S'agissant du tsunami, on ne peut que souligner l'importance du système de prévision et le rôle joué par la discipline admirable de la population japonaise. La comparaison avec le tsunami de Sumatra, d'importance comparable, le 26 décembre 2004, est instructive : le bilan des pertes humaines, bien qu'extrêmement lourd, est 10 fois moins important au Japon.

L'impact propre à l'accident nucléaire est plus difficile à évaluer, l'Académie des sciences a centré son travail sur les conséquences de l'exposition aux rayonnements ionisants – conséquences sur les hommes et sur l'environnement – en élargissant toutefois son analyse aux effets psychosociologiques de cette exposition et en l'inscrivant dans le contexte des conséquences sanitaires générales liées aux destructions de grande ampleur opérées par le tsunami.

Il s'agit donc, avec les informations dont nous disposons fin 2011, de faire un état des lieux et un état prévisible de l'évolution du risque provoqué par l'accident nucléaire de Fukushima à partir du retour d'expérience acquis lors de catastrophes précédentes. Nous en déduisons des recommandations que nous pensons applicables à l'organisation de notre pays.

Sur le plan sanitaire, le tremblement de terre, le tsunami et les dommages occasionnés à plusieurs tranches de la centrale nucléaire de Fukushima ont entraîné des conséquences sanitaires avérées et d'autres potentielles :

- des conséquences traumatiques résultant du séisme et du raz-de-marée qui ont fait dans l'immédiat près de 23 000 morts ou disparus ; sur le site de Fukushima lui-même, seuls deux travailleurs ont disparu lors du passage du Tsunami ;
- des conséquences liées à l'exposition aux rayonnements ionisants, qu'il s'agisse d'exposition externe, du fait de la proximité de sources radioactives, ou de contamination par des substances radioactives, qui sont externes si elles sont déposées sur la peau et internes si elles sont ingérées (denrées contaminées) ou inhalées (gaz et aérosols radioactifs). Ces conséquences potentielles peuvent être précoces et de gravité proportionnelle à la dose reçue en cas de fortes doses, comme celles qu'auraient pu en recevoir les intervenants sur la centrale, ou être retardées, affectant les intervenants et les populations apparemment au hasard avec une probabilité croissante en fonction de la dose reçue ;
- des conséquences attribuables aux conditions d'intervention difficiles sur le site de Fukushima, en particulier les premières semaines : stress, fatigue, travail à la chaleur dans un environnement industriel dévasté (25 blessés et 2 décès, l'un des suites d'un malaise cardiaque et un autre consécutif à la chute d'une grue)...
- des conséquences relevant du domaine du stress post-accidentel après la catastrophe naturelle et l'accident nucléaire, ou dues aux carences de la communication ou encore aux mesures d'évacuation, justifiées ou non, ainsi qu'aux conditions d'hébergement précaire. Il peut en résulter une morbidité importante comportant des syndromes dépressifs, des suicides, des pathologies liées aux addictions (tabac, alcool), des aggravations de pathologies existantes diverses liées à la désorganisation du système de soins. En outre, la peur de l'avenir peut entraîner une baisse de fécondité et une augmentation des interruptions volontaires de grossesse ;
- des conséquences environnementales graves : la contamination des sols perturbe la production agricole dans l'ensemble de la préfecture de Fukushima où environ 500 km² nécessiteront la mise en œuvre de moyens lourds de génie civil pour leur décontamination, après identification des points chauds à traiter plus spécifiquement. La qualité et la rapidité de leur réhabilitation conditionneront des aspects essentiels de l'« après-crise » et de l'impact de l'accident sur la santé.

La gestion de l'accident de Fukushima retenue par les autorités japonaises est conforme aux recommandations de la Commission internationale pour la protection radiologique (CIPR). Cette approche divise la gestion de la crise en une phase d'urgence suivie d'une phase d'expositions durablement existantes. L'objectif de la protection est de prévenir les effets précoces et de réduire les effets retardés à un niveau aussi bas qu'il est raisonnablement possible compte tenu des circonstances.

Pour les situations d'exposition d'urgence, l'évacuation est indispensable si les personnes concernées risquent de recevoir 100 mSv par an ou plus et n'est pas recommandée au-dessous de 20 mSv/an. Pendant cette période initiale, dans la plage 20-100 mSv/an, l'objectif est de protéger la population des retombées radioactives et de préparer le retour des habitants dans certaines zones d'exclusion¹. Les actions engagées comprennent l'évacuation et la mise à l'abri des habitants, la gestion des denrées alimentaires, la cartographie exhaustive de la contamination sur le terrain, les premières phases de décontamination (bitumage, arrosage, traitement des établissements recevant des enfants, en particulier les cours d'école...) pour permettre un retour progressif sous six à neuf mois de la population dans les territoires les moins contaminés.

Cette première phase est transitoire pour gérer la crise. Dès que la situation est stabilisée sur le site de Fukushima, la gestion passe dans un régime appelé « d'exposition existante » et la valeur recommandée par la CIPR² pour gérer ce type de situation doit se situer entre 1 et 20 mSv/an en fonction des circonstances. L'objectif est de revenir à moins de 1 mSv au bout de quelques années. La décision de passer pour la population d'une gestion d'urgence à une gestion de « situation d'exposition existante », selon la dénomination CIPR, n'a pas été prise fin septembre par le gouvernement. La gestion à long terme de la contamination stable est ciblée sur un seul radionucléide : le césium 137. Après le retour des populations dans les zones les moins contaminées, des mesures appropriées de traitements des sols et de sélection des cultures devront être mises en œuvre.

Cette volonté de maîtrise des expositions par les autorités a pour objectif d'éviter tout impact sanitaire (en se donnant un objectif de dose cumulée sur plusieurs années « de l'ordre de 100 mSv ») et de mettre en place un suivi sanitaire sur 30 ans pour une population évaluée à environ 400 000 personnes.

¹ICRP 109: Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People in Emergency Exposure situations Ann ICRP, 39 (1), 2009.

²ICRP 111: Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. Ann of ICRP 39(3), 2009.

L'accident de Tchernobyl montre qu'en Biélorussie, 25 ans après, la dose annuelle moyenne pour le million de personnes qui vivent dans les territoires encore considérés comme contaminés est d'environ 0,1 mSv. Seuls quelques milliers de personnes sont encore exposés à des doses de l'ordre du millisievert. Cela résulte à la fois de la disparition naturelle progressive de la radioactivité et du travail constant des pouvoirs publics et de tous les acteurs concernés y compris la population, en particulier dans le domaine agricole, pour maîtriser la contamination.

Nous présentons les conséquences sanitaires directes connues de l'accident de Fukushima et les comparons à celles de l'accident de Tchernobyl (Section 1.1). Nous évoquons ensuite les conséquences sanitaires générales, en dehors de l'effet spécifique de la radioactivité (Section 1.2). Nous étudions enfin les conséquences environnementales et les mesures de décontamination à mettre en œuvre (Section 2). Tout au long de ce rapport et en particulier dans les recommandations, sont évoquées les conséquences possibles d'un tel accident en France et les pistes pour aider à les prendre en charge.

Les principaux concepts liés à la radioactivité (caractéristiques d'une source radioactive, dosimétrie, effets des rayonnements ionisants sur l'organisme, cancers radio-induits, prévention par l'iode stable) sont rappelés en annexe.

Nous nous sommes principalement fondés sur les communiqués du MEXT³, de l'AIEA⁴ et de l'IRSN⁵, de TEPCO et sur le rapport d'avril 2011 de l'UNSCEAR⁶ sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl et du gouvernement japonais à l'AIEA (juin 2011).

Nous insistons sur le fait que les données dont nous disposons sur l'accident de Fukushima doivent être considérées comme provisoires, susceptibles de révisions importantes selon l'avancée des bilans cliniques, dosimétriques et environnementaux pratiqués au Japon. Les données prises en compte sont les données disponibles au 15 novembre 2011.

³ Ministère japonais de l'Éducation, de la Culture, du Sport, de la Science et de la Technologie.

⁴ Agence internationale de l'énergie nucléaire.

⁵ Institut français de radioprotection et de sûreté nucléaire.

⁶ Comité scientifique de l'ONU sur les effets des radiations nucléaires.

1 | Conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima

Le séisme et le tsunami du 11 mars qui ont ravagé le Japon ont provoqué directement *22 626 morts ou disparus⁷ dans le tremblement de terre et le tsunami, selon OMS SITREP35 au 5 juillet 2011*. Avant que le pays ne commence à déblayer ses décombres pour reconstruire, il lui faut compter avec une facture évaluée par le gouvernement japonais à initialement 297 milliards de dollars, auxquels devront s'ajouter le coût du démantèlement de six réacteurs nucléaires, celui de la réhabilitation des zones contaminées par les radionucléides des réacteurs n° 1, 2 et 3 et de la piscine du réacteur n° 4 et celui de l'exclusion d'une zone contaminée durablement. Une évaluation de cette deuxième phase a été donnée le 31 mai par le président du Japan Center for Economic Research, situant les coûts à supporter entre 70 et 245 milliards de dollars. Cette situation aboutit à diminuer de moitié la croissance escomptée au Japon en 2011 et aura aussi un coût sanitaire en obligeant à des choix qui pénaliseront le bien-être des citoyens.

Mais qu'en est-il des conséquences sanitaires de l'accident nucléaire lui-même ? Même s'il est trop tôt pour un bilan définitif, on peut déjà les situer par rapport à l'accident de Tchernobyl du 26 avril 1986. Les quantités totales de produits radioactifs rejetées à Fukushima s'établissent ainsi selon l'opérateur TEPCO fin août :

	Rejets de Fukushima	Rejets de Tchernobyl
Iode 131	130 000 TBq ^a	1 800 000 TBq
Césium 137	11 000 TBq	85 000 TBq
Équivalence INES ^b	630 000 TBq	5 200 000 TBq

^a TBq = térabecquerel, soit 10¹² Bq. Becquerel = unité de mesure de la radioactivité égale à 1 désintégration par seconde.

^b Échelle internationale des événements nucléaires (International Nuclear Event Scale) ; voir annexe 1.

⁷ Le 11 août, les rapports de police donnaient un bilan un peu plus faible : 15 689 morts et 4 744 disparus.

L'iode 131 et le césium 137 apportent la contribution la plus élevée aux doses pour les populations. D'autres radionucléides rejetés jouent un rôle plus ou moins important, notamment les gaz rares pour l'exposition externe, le tellure 132 et l'iode 132, le césium 134 pour la contamination interne. La contribution des autres produits de fission est faible, seuls participent marginalement le ruthénium-rhodium 103, le barium-lanthane 140 et le niobium 95. Les éléments réfractaires n'ont pas été portés à une température suffisante pour participer significativement au panache radioactif. Des traces de strontium, présent sur le site de Fukushima, ont été détectées jusqu'à 250 Bq/kg de sol, au nord-ouest de la zone évacuée ; de faibles traces de plutonium ont également été détectées. Leur niveau étant équivalent à celui des retombées nucléaires des essais aériens des années 1960, cette origine est vraisemblable dans la plupart des cas.

Ces valeurs montrent des rejets équivalant à environ 10 % de ceux de Tchernobyl ; cependant, en termes de quantités émises, ces valeurs correspondent au maximum de gravité de l'échelle de gravité internationale INES, ce qui suggère la nécessité d'adapter l'échelle INES en termes de mesure du risque sanitaire. Il faut cependant remarquer que les dépôts radioactifs locaux peuvent atteindre des niveaux comparables dans les deux situations, bien qu'affectant des territoires de tailles très différentes.

1.1 Effets de la radioactivité

1.1.1 Les intervenants

Quatre cents agents se trouvaient sur le site de Fukushima Dai-ichi au moment du tsunami. Le 15 mars, l'Agence de Vienne indiquait que 150 d'entre eux avaient été contaminés par les produits de fission au niveau de 500 à 1 500 Bq, ce qui nécessitait une décontamination mais ne comportait pas de risque sanitaire. Il est apparu tardivement cependant qu'un nombre d'agents nettement plus important avait pu faire l'objet d'une contamination interne à partir de la découverte fin mai d'une fixation thyroïdienne, chez deux agents d'intervention, de l'ordre respectivement de 9 800 et de 7 700 Bq d'iode 131. Cette évaluation des doses internes n'a pu être estimée que six semaines après l'accident, du fait notamment de l'absence d'appareils disponibles et de mesures réalisables les premiers jours. La situation créée a conduit à identifier de nouveaux cas d'exposition mixte externe et interne dont l'évaluation est la suivante au 13 juillet 2011.

Total des personnels ayant accumulé des doses par voie externe et par contamination interne en mars et en avril à Fukushima Dai-ichi (source TEPCO) :

Plage de dose	Nombre d'intervenants exposés en mars	Nombre d'intervenants exposés en avril
Plus de 250 mSv	6	0
De 200 à 250 mSv	3	0
De 150 à 200 mSv	14	0
De 100 à 150 mSv	88	0
De 50 à 100 mSv	301	10
De 20 à 50 mSv	813	96
De 10 à 20 mSv	917	279
Moins de 10 mSv	1 396	2 869

Le nombre des intervenants exposés quotidiennement depuis l'accident en mars et en avril a varié entre 50 et 250 sur le site Fukushima Dai-ichi et environ 600 étaient sur le site Fukushima Daini, zone de repli. Environ 10 000 intervenants participaient aux opérations.

Deux intervenants ont subi une contamination par immersion de la jambe dans de l'eau contaminée à un niveau ne causant pas de brûlure radiologique (2 à 3 Sv à la peau) ; ces deux ouvriers ont été hospitalisés jusqu'au 28 mars. Les doses efficaces sont restées dans la limite de 250 mSv⁸. Depuis le 30 août, le gouvernement a décidé de rabaisser la dose limite pour les travailleurs à 100 mSv.

Les conséquences graves immédiates pour les intervenants ont été essentiellement accidentelles : 1 mort par chute de grue, 2 noyés, 1 décès brutal par malaise cardiaque, 25 blessés qui ont été traités entre le 11 et le 25 mars. Il n'a pas été observé de conséquences précoces sur la santé en rapport avec une surexposition aux rayonnements ionisants, ce qui est en accord avec les doses engagées évaluées chez les intervenants.

⁸Dans les situations d'urgence radiologique, la CIPR 103 recommande de ne pas dépasser la dose de 300 mSv.

En termes de conséquences tardives, l'effectif global des personnels exposés et les niveaux de dose qu'ils ont subis ne laissent pas prévoir une augmentation décelable de leur risque de cancer. Il faut remarquer la conduite prudente des autorités de radioprotection qui ont permis d'éviter des doses pouvant conduire à un syndrome aigu. Pour faire face à ce risque, la demande de constitution d'une banque de cellules souches au bénéfice des intervenants a néanmoins été proposée.

1.1.2 Les populations locales et régionales

Malgré le désastre provoqué par le séisme et le tsunami, l'évacuation des zones exposées aux retombées radioactives a été rapidement effectuée. Selon le communiqué de l'Agence de sûreté NISA du 4 avril, la déclaration d'urgence radiologique a été décidée le 11 mars à 19 h 03, la décision d'évacuer le périmètre de 3 km autour de Fukushima Dai-ichi a été prise à 21 h 23, celle des 10 km le 12 mars à 5 h 44 et celle de la zone des 20 km le 12 mars à 18 h 25, après des mesures transitoires de confinement. Des comprimés d'iode stable (1 500 000) ont été mis à disposition des évacués à partir du 15 mars par les autorités locales, sous contrôle de la cellule de crise locale ; ils n'ont vraisemblablement été distribués qu'à partir du 21 mars. Le nombre d'habitations dans la zone des 20 km est de l'ordre d'une trentaine de milliers. Une zone de 10 km a également été évacuée autour de Fukushima Daini. À partir du 25 mars, des zones de confinement, de préparation à l'évacuation, puis d'évacuation sur la base du volontariat ont été décidées dans le périmètre de 20 à 30 km autour de Fukushima. Des contrôles de contamination corporelle ont été pratiqués en cours d'évacuation, les niveaux publiés étaient faibles.

Dans une large mesure, le régime des vents a épargné les terres et poussé le panache à la mer, ce qui pose néanmoins un problème durable de contamination de la ressource marine, aggravé par les rejets intentionnels d'eau contaminée. Cependant, les rejets aériens des 15 et 16 mars ont affecté les terres jusqu'à des distances supérieures à celles prévues par les plans d'intervention, au-delà des 30 km au nord-ouest. Des zones rurales ont été fortement contaminées par l'iode et le césium, notamment la zone du village d'Iidate. Les niveaux atteints ont conduit l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) à proposer l'évacuation de cette zone, mais cela ne semble avoir été fait que lentement et de manière incomplète. Dans son communiqué du 14 juin, le Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) indique des points singuliers à environ 60 km au nord-ouest (Date, Ryo-Zen) où la limite de 20 mSv/an peut être dépassée. La carte des retombées de césium au sol fait apparaître des niveaux maximaux dans un secteur angulaire d'environ 30° vers le nord-ouest depuis Fukushima Dai-ichi, jusqu'au-delà des 30 km, avec des valeurs variant

entre 0,02 et 3,7 millions de becquerels par m². L'agence de Vienne estime que les quantités d'iode correspondant se situent entre 0,2 et 25 millions de becquerels par m². Ces valeurs sont comparables à celles observées dans la zone évacuée de Tchernobyl.

Associée aux mesures multiples de la radioactivité de l'air, de l'eau et des sols, la chaîne alimentaire a été contrôlée de manière apparemment efficace. Sur 4 218 mesures effectuées par le ministère de la Santé du 19 mars au 31 mai, 318 valeurs seulement dépassaient les limites de commercialisation dans les zones en périphérie des zones évacuées, essentiellement dans la préfecture de Fukushima. Ces niveaux de contamination ont été confirmés par l'Agence de Vienne. Les interdictions temporaires de vente et de consommation de légumes, de champignons, de viandes et de poissons locaux ont été largement diffusées.

Les quantités considérées comme acceptables au Japon étaient pour l'eau de 300 Bq/L (100 Bq/L pour les enfants) pour ce qui est de l'iode 131 et de 200 Bq/L pour le césium 137 ; dans les produits laitiers 300 Bq/kg pour l'iode, 200 Bq/kg pour le césium ; pour la viande et les œufs 500 Bq/kg pour le césium, alors que le niveau de 2 000 Bq/kg a été considéré transitoirement comme acceptable pour le poisson. L'ensemble des limites apparaît dans le tableau suivant :

Limites réglementaires de concentration des différents radionucléides dans la chaîne alimentaire au Japon :

Radionucléides	Eau potable	Aliments pour nourrissons	Laits et produits laitiers	Légumes	Céréales	Viande, poisson, œuf, autres
Iode 131	300 Bq/kg	-	300 Bq/kg	2 000 Bq/kg	-	-
Césium radioactif	200 Bq/kg	-	200 Bq/kg	500 Bq/kg	500 Bq/kg	500 Bq/kg
Uranium	20 Bq/kg	20 Bq/kg	20 Bq/kg	100 Bq/kg	100 Bq/kg	
Transuraniens alpha (Pu 238, 239, 240, Am 241, Cm 242, 243 et 244)	1 Bq/kg	1 Bq/kg	1 Bq/kg	10 Bq/kg	10 Bq/kg	10 Bq/kg

Il s'agit de valeurs guides qui permettent d'éviter des contaminations excessives de la population en tenant compte des habitudes alimentaires nationales et des recommandations internationales. Elles diffèrent dans le détail des valeurs guides utilisées en Europe pour réglementer la commercialisation des denrées alimentaires (*Codex alimentarius*). Les restrictions concernant l'utilisation de l'eau de ville ont toutes été levées le 10 mai.

Malgré l'organisation mise en place pour éviter la contamination de la chaîne alimentaire, des failles ont été détectées dans le dispositif. En juillet, 1 400 bœufs ayant mangé du foin contaminé au-delà des normes ont été envoyés à l'abattoir par erreur en vue de consommation. La viande contaminée provenait de onze préfectures dont Fukushima, Miyagi et Iwate. La paille de riz, séchée en extérieur, avait absorbé beaucoup de césium, avant d'être distribuée dans tout le Japon. Suite à cette découverte, le gouvernement a identifié les réseaux de distribution de bœuf et de paille pour corriger ce dysfonctionnement qui n'aura aucune conséquence pour le consommateur. Il a interdit l'abattage des bœufs dans les préfectures de Fukushima, Tochigi, Miyagi et Iwate. Ces mesures ont été levées le 25 août.

Le ministère de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT) a publié le 24 mai une carte détaillée des doses externes intégrées depuis l'accident en dehors des zones évacuées. Les valeurs moyennes les plus élevées sont situées au nord-ouest, en limites de la zone des 30 km : elles sont comprises entre 6 et 30 mSv par an. À ces valeurs, qui ne prennent en compte que l'exposition externe occasionnée par les émissions radioactives des particules de césium 134 et 137 déposées sur le sol, devront être ajoutées les doses résultant de la contamination interne dues au transfert du césium par inhalation et ingestion. Ceci laisse prévoir des doses individuelles préoccupantes, supérieures à 100 mSv, qui demanderont une évacuation de longue durée ou le traitement des sols contaminés.

En dehors des zones des retombées, des dépôts de radionucléides sur le reste du Japon et en particulier sur Tokyo ont été détectés transitoirement, témoignant du passage du panache qui a pu augmenter sensiblement le débit de dose dans l'air. Ces bouffées n'ont pas de conséquences sanitaires attendues car elles se situent dans des niveaux de doses faibles situés dans les fluctuations de l'irradiation naturelle.

En matière de conséquences médicales et sanitaires, le tableau est actuellement dominé par les problèmes de la vie quotidienne et par l'anxiété, consécutifs au traitement de la crise. Ces problèmes sont majeurs lorsqu'ils résultent de l'évacuation des populations. Le choix de déplacer ou non les habitants est particulièrement difficile pour les personnes âgées : à Iitate, le doyen du village s'est suicidé pour n'avoir pas à partir de chez lui. Les 78 000 évacués ont été autorisés à revenir dans la zone des 20 km sous contrôle de radioprotection pour quelques heures. En revanche, les niveaux atteints dans la zone des 3 km interdisent aux 6 000 évacués de le faire. Concernant les contrôles de la thyroïde, 1 200 enfants ont été contrôlés⁹ ;

⁹ Wakeford R. And Now Fukushima. *J Radiol Prot* 2011;31:167-76.

les résultats montraient une dose engagée à la thyroïde de 1 à 2 mGy¹⁰ au maximum. À titre de comparaison, en France, la prise d'iode stable est prévue pour une dose prévisible à la thyroïde de 50 mSv.

Compte tenu de la rapidité de l'évacuation, des mesures de restriction de consommation des produits locaux de la chaîne alimentaire, de la distribution d'iode stable et de l'imprégnation iodée importante au Japon, il est vraisemblable que les niveaux de contamination interne de la population sont faibles. Aucune donnée publiée ne laisse envisager une importante contamination des enfants par l'iode 131. Néanmoins, on ne dispose pas de données suffisantes pour conclure sur ce point dans les zones non évacuées, notamment au Nord-Ouest.

Le 26 juillet, la commission japonaise de sûreté alimentaire a estimé qu'une dose de 100 mSv, cumulée sur plusieurs années, n'induirait pas d'effets sur la santé et sur cette base considère que les niveaux actuels de contamination de la chaîne alimentaire n'entraîneraient pas ce niveau, ce qui est l'objet d'un consensus au plan international.

La population globale du district de Fukushima est estimée à 2 millions et il est envisagé un suivi permanent de recherche de pathologie thyroïdienne pour les 360 000 jeunes âgés de moins de 18 ans qui se trouvaient dans la préfecture au moment de l'accident. Par ailleurs, les 200 000 personnes évacuées, ainsi que les enfants des 20 000 femmes enceintes au moment de l'accident bénéficieront d'un suivi médical longitudinal.

Fin mai, a été annoncée la mise en place d'un suivi épidémiologique sur 30 ans. Le principe retenu est de sélectionner le groupe de suivi à l'aide d'interviews organisés pendant l'été et d'adapter le suivi médical en fonction du résultat de l'enquête.

Un plan d'assistance pour les habitants affectés par les conséquences environnementales de l'accident de Fukushima est en place et fait l'objet d'un suivi permanent. Il consiste en :

- réévaluation des niveaux de contamination des zones évacuées ;
- recherche de relogement temporaire (on en comptabilisait, au 8 août, 13 949 sur un objectif nécessaire de 15 200) ;
- organisation des visites des zones évacuées, y compris dans la zone des 3 km ;
- encadrement des zones d'évacuation délibérées au-delà des 30 km (choix est laissé aux personnes d'y résider ou non) : élimination des principaux points chauds ;

¹⁰Ce qui correspond, en dose efficace, à 0,05 à 0,1 mSv.

- opération de maintien de l'ordre dans les zones évacuées ;
- suivi médical personnalisé ;
- création d'un fond de remboursement des frais de santé engagés ;
- élimination des principaux déchets ;
- décontamination des lieux scolaires ;
- suivi continu de la radioactivité ambiante et de la chaîne alimentaire ;
- mise en place d'une information et d'une communication pédagogique et responsable envers les populations ;
- mise en place de fonds d'indemnisation des dommages individuels et collectifs dus aux conséquences de l'accident nucléaire (budget de 125 milliards de yens) ;
- mise en place de la réhabilitation de l'habitat.

Un plan de décontamination a par ailleurs été rendu public le 26 août avec pour objectif de réduire de moitié la contamination dans les zones résidentielles à proximité de la centrale dans les deux années à venir.

Les premières actions ont commencé en septembre avec l'annonce que des zones à risque resteront très certainement interdites longtemps.

Le gouvernement japonais a annoncé début octobre une levée des restrictions imposées aux habitants de cinq agglomérations situées au-delà de 20 kilomètres autour de la centrale nucléaire accidentée de Fukushima, considérant les risques affaiblis dans ces zones.

Cette décision est fondamentale car la qualité et la rapidité de la réhabilitation de ces zones conditionnent des aspects essentiels de « l'après-crise » et de l'impact de l'accident sur la santé des populations.

Le gouvernement a en outre annoncé que l'ordre d'évacuation serait levé dans certaines régions suite à l'accomplissement de la 2^e étape du plan prévu dans le premier semestre 2012.

En préparation de cette levée progressive, l'opérateur a formé 4 000 personnes en 2011 pour évaluer l'impact radiologique dans les différentes zones.

1.1.3 Populations hors du Japon

Tous les États se sont protégés de l'importation de produits alimentaires contaminés en provenance du Japon. Pour les autres produits, le 22 avril, les

autorités japonaises ont publié des directives à l'intention des ports japonais, expliquant les contrôles radiologiques à mettre en œuvre avant le départ des bateaux et permettant la délivrance, le cas échéant, d'un certificat de non-contamination (source ASN).

En ce qui concerne l'extension du panache, les niveaux enregistrés ont été très faibles (dans la gamme de dose du microsievert) dans tous les pays concernés et ne posent aucun problème sanitaire, en Asie, Amérique ou Europe. Les États-Unis ont été atteints le 19 mars, la France le 24 mars.

1.1.4 Comparaison Tchernobyl/Fukushima

Bien que les deux accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima soient classés au même niveau maximal 7 de l'échelle internationale INES, l'accident de Fukushima a indiscutablement moins de conséquences sanitaires envisageables.

Dans le groupe des 600 pompiers intervenant à Tchernobyl en avril-mai 1986, 237 ont présenté des signes de syndrome aigu d'irradiation et 134 ont vu leur diagnostic confirmé, pour la plupart avec des doses comprises entre 1 et 16 Sv. Vingt-huit d'entre eux, parmi les plus exposés, en sont morts dans les premières semaines, les plus nombreux avaient des brûlures radiologiques particulièrement graves, profondes et étendues. Dans ce sous-groupe ARS, 19 patients étaient décédés en 2006, certains en raison de leur exposition d'autres non. Quatorze décès de causes diverses ont été observés dans le groupe des ARS non confirmés. Les suites des brûlures cutanées sont sévères, mais il n'a pas été observé de cancer sur brûlures au cours des 25 années de surveillance post-Tchernobyl.

Parmi les 59 patients du groupe ARS suivis en Ukraine, 4 cas de cancer et 2 leucémies étaient observés, de même que 3 cas de myélodysplasie.

Concernant les effets tardifs, on compte pour Tchernobyl 7 000 cancers de la thyroïde dans une population de 2,5 millions d'enfants carencés en iode, exposés à de fortes doses d'iode radioactif¹¹. Il n'y aura sans doute aucun effet de ce type à Fukushima, en raison du faible nombre d'enfants exposés à l'iode radioactif à un niveau préoccupant, quels que soient les scénarios envisagés. Cette situation résulte à la fois des mesures prises pour la protection des populations, de l'évitement de consommation des laits contaminés et de l'apport alimentaire en iode stable élevé dans toute la population japonaise...

¹¹ Les taux observés correspondent à une augmentation de près d'un facteur 100 pour les populations juvéniles (âgées de moins de 5 ans en 1986) par rapport au taux de base.

Concernant les niveaux de dose préoccupants, ceux au-delà desquels l'épidémiologie détecte un excès de cancers, c'est-à-dire 100 mSv et plus pendant un temps court, Tchernobyl se caractérise par une population de 530 000 nettoyeurs de site, dits « liquidateurs », exposés à une dose moyenne de 120 mSv. En termes de dose collective (qui représente la somme des doses individuelles), on évalue cette dose à plus de 60 000 hommes \times Sv. Rien de tel à Fukushima où les seules populations à risque envisageables sont les quelque 110 intervenants ayant reçu plus de 100 mSv et les populations qui auraient été maintenues sur site contaminé. Dans un scénario de l'IRSN, cette décision aboutirait à 4 400 hommes \times Sv, soit moins de 10 % de la dose collective de Tchernobyl.

Évaluer le risque cancérigène réel de ces populations à risque est par ailleurs du ressort de l'extrapolation. Après 25 ans, le suivi des populations de Tchernobyl par l'UNSCEAR en 2011 ne révèle pas d'excès significatif de cancers autres que les cancers de la thyroïde chez les sujets exposés jeunes. Ceci n'exclut pas de faibles excès de leucémies, notamment chez les liquidateurs, éventuellement de cancers du sein, mais ces excès ne sont pas établis pour l'ensemble des liquidateurs, bien qu'ils apparaissent dans certains sous-groupes ; s'ils se confirment, ces excès sont faibles. C'est une observation compatible avec ce que l'on connaît de l'excès de cancers observé dans la population des survivants d'Hiroshima et Nagasaki 60 ans après.

Rappelons que, pour ce qui concerne les effets dans la descendance, aucun effet génétique héréditaire n'a été observé dans les populations humaines exposées et que les effets sur le fœtus n'apparaissent que pour des niveaux supérieurs à 100 mSv et n'ont pas été observés à Tchernobyl.

Conséquences sanitaires autres que radiologiques

Il reste à évaluer les conséquences de l'accident nucléaire en termes de santé publique. L'angoisse qu'il génère est considérable : l'ONU l'a exprimé par la voix de son secrétaire général, Kofi Annan, en 2000 : « *Chernobyl is a word we would all like to erase from our memory, more than 7 millions of our fellow human beings do not have the luxury of forgetting. They are still suffering, everyday, as a result of what happened* », puis l'OCHA (Office for the Coordination of Human Affairs) en a fait le constat en 2001. Le Forum Tchernobyl, publié en 2006 par l'OMS, et enfin l'UNSCEAR en 2011 ont cherché à établir les causes du mauvais état sanitaire des populations affectées par ce sentiment de désarroi, sans trouver d'autres facteurs que la pauvreté, les carences, le stress post-traumatique chronique entretenu par la contamination des sols, le refuge dans des conduites personnelles à risque, la perte de confiance envers les autorités.

Outre que les conséquences non liées aux effets des irradiations, mais à l'accident lui-même, génèrent des fantasmes pseudo-scientifiques intarissables, le prix à payer d'une mauvaise gestion de crise est sans doute très lourd. Qu'arrivera-t-il à Fukushima ? Parmi les mesures post-accidentelles, celles qui concerneront l'indemnisation des populations ruinées et la mise en œuvre de procédés de réhabilitation des sols de manière à en rendre l'usage à la collectivité seront particulièrement attendues.

1.2 Conséquences sanitaires générales

L'évaluation des conséquences d'un accident nucléaire en termes de santé publique ne peut être réduite aux seules pathologies liées de façon directe à une irradiation éventuelle (voir la section 1.1 de ce rapport). Elle doit inclure celle des conséquences indirectes, telle la désorganisation locale du système de santé causée par l'accident, son impact sur les risques de santé perçus par la population y compris si ces risques ne correspondent pas à des événements « objectifs », et les conséquences en termes de santé mentale et physique¹² : développement de maladies mentales (stress post-traumatique, dépression...) et syndromes cliniques.

On s'intéresse dans ce chapitre aux conséquences sanitaires *non spécifiques* de l'irradiation d'un accident nucléaire. Par « non spécifiques », on désigne ici les impacts qui ne sont pas des conséquences directes, mécaniques, de l'accident nucléaire (traumatismes lors des interventions, cancers radio-induits).

La situation rencontrée à Fukushima dans les mois suivant la catastrophe sera résumée ci-après ; cependant, l'extrapolation à d'autres accidents nucléaires du point de vue des événements sanitaires non spécifiques est très compliquée du fait que Fukushima a été en même temps une catastrophe environnementale (tremblement de terre, et tsunami), entraînant en elle-même d'immenses conséquences en termes d'événements de santé immédiats et futurs.

¹²Ne caractériser comme « causées » par l'accident que les conséquences médicales « spécifiques » (cancers radio-induits) d'un accident nucléaire pour caractériser son impact sanitaire serait une erreur : imaginons une personne qui, après Fukushima, a eu un infarctus. Supposons que sa procédure d'évacuation soit retardée à cause de la désorganisation induite par l'accident et que cette personne meure de son infarctus, faute d'avoir bénéficié d'hospitalisation à temps dans une structure de soins intensifs. Sa mort ne sera pas causée directement par l'irradiation, mais on pourra cependant bien dire que celle-ci en est la cause. C'est l'approche « contrefactuelle » (sans l'accident, il ne serait pas mort).

On s'appuiera donc aussi sur une brève analyse des accidents « nucléaires » de Three Mile Island (TMI) et Tchernobyl. Cependant, il est difficile de tirer des leçons générales pour la gestion d'un éventuel futur accident nucléaire à partir de la seule analyse des quelques accidents de centrales qui ont eu lieu jusqu'ici, parce qu'ils étaient d'intensités différentes, parce qu'ils ont frappé des populations dont l'état de santé de base et l'accès aux soins étaient très différents et parce qu'ils se sont produits à des époques différentes. Face à cette hétérogénéité, il est indispensable de considérer aussi les réponses organisationnelles et les méthodes épidémiologiques d'évaluation des impacts, mis en place à l'occasion de catastrophes environnementales non nucléaires pour lesquelles une bien plus grande expérience existe, et qui fournissent un « modèle » directement utilisable dans le champ des conséquences sanitaires non spécifiques de l'irradiation. Il est par exemple clair que si la France devait avoir à faire face à un accident nucléaire, les expériences passées du pays pour répondre à des catastrophes comme celle d'AZF seraient sans doute plus utiles que l'expérience de la réponse ukrainienne à Tchernobyl ou de la réponse japonaise à Fukushima ; de même, l'attentat du 11 septembre 2001 contre le World Trade Center (voir Annexe 6) est une source importante de leçons parce que : a) il a touché une population très importante à proximité du site ; b) il a été l'objet d'études complètes des risques induits à distance de l'événement sur les plans des santés mentale et physique (et donc le développement de méthodologies transposables) ; et c) il est survenu à notre âge de l'information, dans un pays disposant des moyens techniques et financiers d'évaluation et de suivi de population très supérieurs à ceux disponibles au moment des accidents de TMI et Tchernobyl, et très comparables à ceux dont disposerait, par exemple la France si elle avait à faire face à une catastrophe similaire.

Enfin, à côté des conséquences sanitaires non spécifiques des accidents et catastrophes, cette section s'intéressera aussi à la perception des risques par la population. Cette perception a évidemment un grand impact en termes de santé ressentie et objective (notamment dans le champ des maladies mentales), et d'attitude par rapport au système de soins : le risque perçu pilote sans doute plus que le risque « objectif » le recours de la population au système de soins.

1.2.1 Leçons des accidents nucléaires de Fukushima, TMI et Tchernobyl

Fukushima : les événements

Au 5 juillet 2011, 4 mois après la catastrophe du 11 mars, le tsunami avait causé 15 534 morts (dont 1 600 dans la préfecture de Fukushima) et 7 092 disparus [1].

L'accident nucléaire entraîna de nombreux déplacements de population : le 22 avril, la région délimitée par un cercle de 20 km de rayon autour de la centrale nucléaire fut déclarée zone interdite. Dans la zone comprise entre le cercle de 20 km de rayon et le cercle de 30 km de rayon autour de la centrale, on institua des « zones d'évacuation planifiée » (l'exposition annuelle y était estimée à 20 mSv/an) et des « zones de préparation à une évacuation d'urgence », la qualification de ces zones étant prévue révisable en fonction des estimations d'exposition annuelle. L'évacuation de la « zone d'évacuation planifiée » fut à peu près terminée le 30 juin (l'hypothèse raisonnable faite était qu'une durée aussi courte n'aurait pas de conséquences sur la santé des derniers habitants évacués).

Le 16 juin, le gouvernement décida d'identifier d'éventuels « points chauds » en dehors de la « zone d'évacuation planifiée », qui aurait un niveau d'exposition de 20 mSv/an. Cependant, dès le 30 juin, on constata que les points chauds potentiels qui avaient été identifiés n'atteindraient pas cette dose limite.

Après le tsunami, le nombre de personnes placées dans des centres d'évacuation est monté jusqu'à 440 000 (le 15 mars). Trois mois après la catastrophe, plus de 110 000 personnes avaient été déplacées, mais 30 000 personnes « seulement » étaient encore dans ces centres d'évacuation. Cette situation exceptionnelle s'est produite dans un pays très développé ayant non seulement la capacité d'y faire face, mais aussi les moyens de l'analyser. Il a été montré que la prise en charge des évacués, la mise en place de conditions sanitaires correctes, l'organisation du relogement reposaient sur cinq facteurs :

- la mise en place rapide et efficace de la distribution d'eau potable, et d'un système d'évacuation des eaux usées performant ;
- l'existence de leaders naturels (avant la catastrophe) dans la communauté ;
- l'existence d'un fort sentiment communautaire qui lia les personnes évacuées ;
- le meilleur fonctionnement des petits que des gros centres, qui fut reconnu ;
- l'importance du rôle des « infirmières de santé publique » (une catégorie de personnes à identifier en France).

Fukushima : l'impact sur les équipements

Le tsunami et le séisme ont gravement endommagé les conduites d'approvisionnement de gaz, d'eau et d'électricité. Il a causé de nombreux dégâts dans les transports, en particulier la destruction des véhicules des

policiers et des pompiers, mais aussi des trains et des autobus. Les téléphones cellulaires n'ont plus fonctionné parce que les antennes avaient été détruites. Il s'agit donc d'une situation de destruction des infrastructures extrêmement grave dans laquelle la part attribuable à l'accident de la centrale nucléaire est évidemment impossible à faire, mais est certainement faible.

Le système de santé a été très atteint : le tsunami a touché directement des hôpitaux et le manque d'électricité et d'eau a paralysé les autres.

Fukushima : les actions et les études de santé publique mises en place immédiatement

- La prise en charge des maladies transmissibles s'est appuyée sur la surveillance épidémiologique de routine, en place avant la catastrophe (telle qu'il en existe une, aussi, en France). Cependant, cette surveillance de routine a été mise en échec par la non-disponibilité des médecins et laboratoires sentinelles, etc. Une surveillance spécifique, par exemple sur les maladies provoquées par une mauvaise qualité de l'eau, a été instituée.
- L'interprétation des données relatives à la santé mentale, recueillies durant la catastrophe, nécessite des informations sur l'état de santé de base (avant catastrophe) de la population. Ce n'est pas possible dans beaucoup de pays, mais ce le fut dans un pays développé comme le Japon. Ainsi, les préfectures d'Iwate et de Myagi étaient connues pour avoir, avant la catastrophe, des taux de suicides plus élevés que le taux de suicide moyen du Japon (0,25 ‰) : à savoir 0,34 et 0,28 ‰. Ces informations sont indispensables pour interpréter les cas de suicides après catastrophe.

L'évaluation des états de stress post-traumatique (ESPT) a été une des premières préoccupations. Des systèmes de suivi permettant de l'apprécier dans l'avenir furent immédiatement mis en place. Des cellules de « support psychologique » furent également disponibles pour la population. Le rapport de l'OMS de juin 2011 indique qu'il est apparu que la séparation de ces cellules psychologiques des autres équipes médicales n'était pas une situation idéale et qu'au contraire il fallait penser à mettre en place des équipes multidisciplinaires capables de fournir des soins intégrés, y compris dans le domaine de la santé mentale.

- La prise en charge des maladies non transmissibles : les facteurs de risque de ces maladies augmentent pendant les catastrophes. Les autorités japonaises ont utilisé une classification en trois groupes correspondant à trois niveaux d'actions :
 - le groupe 1 comprend les patients sous dialyse, les diabètes de type 1, les patients sous assistance respiratoire, les greffés et ceux qui sont en traitements aigus pour leur état cardiaque ;

- le groupe 2 comprend les diabètes de type 2, l'asthme, le cancer, la bronchite chronique, et les autres maladies cardiaques ;
- le groupe 3 comprend les hypertendus, les hypercholestérolémiques et les autres patients à risque pour les maladies non transmissibles (par exemple, les personnes qui sont en cours de sevrage tabagique et alcoolique et en grand risque d'interrompre leur sevrage à cause des événements).
- Le suivi à long terme : la préfecture de Fukushima démarra immédiatement un projet de suivi à long terme de la santé de ses résidents (incluant des informations sur leur démographie, leurs conditions de santé, leur dose reçue et estimée pour les années à venir). Un premier questionnaire préliminaire fut appliqué le 30 juin dans la « zone d'évacuation planifiée », c'est-à-dire sur environ 26 à 28 000 personnes. Un suivi particulier sera effectué sur ceux qui ont reçu les plus fortes radiations et ceux qui ont résidé dans la zone interdite (soit 201 831 personnes). La préfecture de Fukushima avait également étudié 194 371 résidents. Des enquêtes complémentaires furent organisées : par exemple un échantillon aléatoire de 120 personnes a subi un scanner corps entier.

Recherche épidémiologique

Enfin, une gigantesque enquête épidémiologique a été décidée en août 2011 : le 25 juillet 2011, le Parlement japonais a voté un budget de 1,2 milliard de dollars au sein duquel serait financé le suivi épidémiologique de l'ensemble de la population de la préfecture de Fukushima (soit plus de 2 millions de résidents) [2]. À partir de juin, un questionnaire de douze pages avait été distribué à tous les habitants de la préfecture de Fukushima Dai-ichi afin d'estimer les expositions individuelles ; il était aussi prévu que les 360 000 jeunes de moins de 18 ans aient un examen de la thyroïde et que les 20 000 femmes enceintes ainsi que leur enfant à venir soient suivies. Il est prévu que le suivi de cette enquête s'étalera sur 30 ans ; l'ambition de ce projet est à la fois de santé publique (mieux connaître les besoins) et scientifique puisque la base de données recueillie permettra peut-être de fournir des résultats nouveaux sur les risques des faibles expositions aux radiations.

Fukushima : la prise en charge par l'InVs de la santé des ressortissants français au Japon

Le département international de l'Institut national de veille sanitaire (voir Annexe 9 pour une description de l'InVs) a organisé une enquête reposant sur un autoquestionnaire destiné à être distribué à « tous » les ressortissants français présents au Japon le 11 mars 2011 (d'après le site de l'InVs : 9 000

s'y trouvaient, dont plusieurs centaines dans la région du Sendai). Cet autoquestionnaire est destiné à fournir une base pour un travail éventuel ultérieur, puisqu'il devrait permettre de localiser les personnes (donc de faire une dosimétrie) et d'obtenir des informations d'« attitude » face aux risques (mise à l'abri et prise de comprimés d'iode).

1979 : Three Mile Island (TMI)

L'accident de Three Mile Island est survenu le 28 mars 1979. Cet accident, classé au niveau 5 de l'échelle l'INES, a causé une faible contamination du milieu¹³, *a priori* peu susceptible de provoquer des victimes. Pourtant l'émotion dans le public a été grande, sur le moment et par la suite (voir Annexe 7). Plus de 140 000 femmes et enfants furent évacués. Dans de telles conditions, une enquête épidémiologique est indispensable, non seulement pour apporter des connaissances scientifiques mais tout autant parce qu'elle est le seul moyen de fournir des éléments de preuve au public, sur la réalité ou l'absence des conséquences à long terme de l'irradiation. La mise en œuvre rapide et efficace de l'enquête par le CDC (Centers for Disease Control and Prevention), le Bureau du recensement (Bureau of Census) et le Département de santé publique de Pennsylvanie reste un modèle organisationnel (décrit en détail dans l'annexe 7).

Une autre leçon importante de l'accident de TMI fut l'impact qu'un tel accident peut avoir sur le système de soins (déprogrammation des soins dans les hôpitaux, modification des flux dans les urgences et les services de soins intensifs, absentéisme du personnel médical et soignant, etc.).

1986 : Tchernobyl

L'accident de Tchernobyl survint le 26 avril 1986 et fut classé de niveau 7 sur l'échelle INES (voir Annexe 8). Un bilan détaillé des conséquences sur la santé fut publié en 1997 dans *Epidemiologic Reviews*, revue de référence dans le domaine de l'épidémiologie [3], puis par le « Tchernobyl Forum » [4] vingt ans après la catastrophe, sous les auspices d'organisations internationales, notamment l'OMS : selon ce rapport, mi 2005, moins de 50 morts pouvaient être attribuées directement aux irradiations causées par la catastrophe, la plupart chez des sujets très fortement exposés dans le cadre de l'intervention et il était estimé qu'à peu près 4 000 personnes pourraient finalement mourir de cancer au cours de leur vie en conséquence de l'accident. Ces chiffres furent, et restent, controversés, et des chiffres très élevés circulent dans le grand

¹³On a estimé que la dose moyenne reçue par les 2 millions de personnes de la région était de 1 millirem, et que la dose maximum était de 100 millirems (l'exposition naturelle est de 100-125 millirems dans cette région). US nuclear regulatory commission, 2009 (<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>).

public [5]. Malheureusement, les chiffres provenant de comités composés d'un grand nombre des meilleurs experts travaillant sous le contrôle des organisations internationales sont souvent mis (au mieux) sur le même plan dans d'innombrables rubriques Internet que ceux provenant d'organisations diverses, voire d'individus, n'ayant ni les moyens ni une compétence technique comparables.

1.2.2 Impacts sanitaires des catastrophes environnementales

1.2.2.1 État de stress post-traumatique, dépression et conséquences psychologiques à long terme des catastrophes

L'état de stress post-traumatique (ESPT), ou *Post Traumatic Stress Disorders* (PTSD), est une entité définie depuis 1980, date à laquelle elle fut introduite dans le DMS-III¹⁴. Son épidémiologie a fait l'objet d'une revue générale analysant 192 articles [6]. Cinq concernaient un accident nucléaire (un concernait TMI et quatre Tchernobyl). Cependant ces accidents sont anciens, à une époque où l'importance de l'ESPT en santé publique n'était pas autant reconnue qu'elle l'est maintenant et où les moyens manquaient pour ces études. Ce sont donc surtout les événements catastrophiques autres que nucléaires qui apportent des leçons sur les méthodes et les résultats relatifs aux séquelles psychologiques des accidents et catastrophes environnementales. Ainsi, Galéa et ses collègues [7] ont recherché, un an après l'attaque du 11 Septembre, les déterminants du stress post-traumatique et de la dépression dans la population. Tout ou partie de leur méthodologie pourrait être réutilisée dans le contexte d'un accident nucléaire.

1.2.2.2 Syndromes cliniques non spécifiques à distance de la catastrophe

On observe souvent, à la suite de catastrophes naturelles et technologiques, des syndromes cliniques (et non plus psychologiques) très variés, désignés en anglais par « *medical unexplained physical symptoms* » (MUPS). Van den Berg et ses collègues [8] ont analysé en détail 57 articles concernant ce sujet, dont 10 ont concerné des tremblements de terre, 7 des inondations et 8 des accidents nucléaires (4 pour TMI et 4 pour Tchernobyl). Pour les accidents nucléaires, les enquêtes ont lieu entre 4 mois et 11 ans après TMI et entre 6 ans et 11 ans pour Tchernobyl.

¹⁴ Diagnostic and statistical manual of mental disorders III (1980).

1.2.2.3 Impact des catastrophes sur la santé perçue

Rappelons d'abord que la santé perçue (aussi dite « santé subjective ») est une réalité que le scientifique doit prendre autant en compte que la santé « objective ». Non seulement, par définition, cela mesure le ressenti des individus, mais même vu du point de vue froid de l'économiste de la santé, on comprend que c'est la perception subjective de l'état de santé qui pilote les attitudes d'utilisation du système de santé, les consommations de soins, et de prévention.

L'impact de Tchernobyl sur la perception de la santé a par exemple été étudié aux âges de 11 et 19 ans chez des jeunes nés au moment de l'accident de Tchernobyl (soit *in utero*, soit âgés de moins de 15 mois au moment de l'accident). L'étude effectuée chez des adolescents de Kiev a concerné 262 évacués de la région de Tchernobyl comparés à 261 camarades de leurs classes (et non évacués) et à un troisième groupe de 325 enfants tirés au sort dans la population de Kiev. Ce travail a permis de montrer que les enfants anciens évacués avaient une santé subjective plus mauvaise que les adolescents des deux autres groupes, et qu'un facteur de risque de cette mauvaise santé subjective était la perception qu'ils avaient du risque de Tchernobyl et la perception de ces risques par leur mère.

Une étude semblable fut aussi menée chez les mères de jeunes enfants, 11 ans après la catastrophe [9]. Elle montra que les mères du groupe « déplacées » avaient une moins bonne santé subjective et avaient un nombre de jours d'absence pour maladie plus grand que les témoins.

De telles études donnent des pistes d'action et de prévention (par exemple, en montrant l'importance d'une communication appropriée sur l'état des connaissances relatives aux risques objectifs des radiations).

1.2.2.4 Impact des catastrophes sur le système de soins

Un éditorial de l'*American Journal of Public Health* [10] a rappelé, dès 1982, que les spécialistes de santé publique se devaient de travailler à la préparation de la gestion sanitaire des accidents nucléaires.

Les impacts sanitaires possibles (et déjà observés) d'une catastrophe sont très divers : en santé environnementale, causés par les regroupements de population au cours des évacuations (eau potable, animaux vecteurs d'épidémies, eaux usées...) ; en nutrition ; en approvisionnement ; en traitement des malades chroniques (hypertendus, diabétiques, etc.) ; en gestion des morgues, etc. [11]. Ces impacts sanitaires concernent l'ensemble du système hospitalier, à travers la non-disponibilité des équipements, la

difficulté de gérer la balance entre la prise en charge des urgences et des malades en place et à travers l'impact sur la disponibilité du personnel soignant.

1.2.3 L'abord sociologique des risques « réels » et « perçus »

Si, à ce jour, il n'est pas possible de disposer à Fukushima de grandes bases de données validées sur la situation psychosociale de la population exposée (et de celle qui se perçoit comme exposée), on peut émettre un certain nombre de questions, d'hypothèses ou d'assertions que seules des enquêtes en population permettront de vérifier ou d'infirmer. Ces hypothèses et assertions se fondent en partie sur la littérature du risque et des catastrophes et sur celle, plus spécifique, représentée par la perception du risque nucléaire à la suite d'accidents graves. Mais on doit remarquer que la nature de ce risque, sa durée, les multiples domaines qu'il peut concerner (environnement, santé, aliments, habitat, etc.) dessinent un cadre totalement inédit dans une population d'un pays développé.

1.2.3.1 *Quelques questions que soulève la catastrophe du tsunami et l'accident nucléaire de Fukushima ainsi que leurs conséquences*

Catastrophe naturelle ou provoquée par les activités humaines ?

La question de la causalité est au cœur des jugements portés sur tout événement qui entraîne des pertes (humaines, matérielles). Le fait que la cause soit perçue comme d'origine nucléaire ou bien naturelle aura de lourdes conséquences sur la perception de la responsabilité, sur celle du nucléaire civil et de son avenir. Certains affirmeront que l'accident nucléaire n'aurait pas eu lieu sans le séisme-tsunami de très grande ampleur, d'autres que la réalisation du risque nucléaire et de ses conséquences n'aurait jamais pu avoir lieu en l'absence d'installation nucléaire. Débat impossible à trancher mais qui va structurer la polémique et la politique du nucléaire civil.

Pourquoi l'accident de Fukushima suscitera-t-il une perception du risque élevée ?

Cette catastrophe nucléaire associe deux paramètres bien identifiés pour être associés à une perception du risque élevée [12] : d'une part la nouveauté, d'autre part son caractère effrayant, car invisible et sournois. Nouveauté pour la population japonaise qui, malgré une connaissance du danger nucléaire, n'en a aucune expérience (sauf, pour les plus âgés, celle terrible d'Hiroshima

et Nagasaki) et découvre le problème sans disposer (elle-même) de solutions : nouveau, c'est-à-dire incontrôlable car inconnu. Effrayant par la multitude de risques (inconnus) qui se profilent, sans trop savoir qui et avec quelle intensité/conséquences en sera affecté... et jusqu'à quand.

Les travaux (enquêtes publiées) sur la perception du risque (PR) suite à des accidents nucléaires (relativement mineurs) indiquent de façon indiscutable des modifications significatives de la PR du nucléaire civil. Ainsi, T. Katsuya [13] montre que, suite à un accident survenu en 1999 dans une centrale nucléaire au Japon (Tokai) entraînant la contamination par des substances radioactives de l'environnement et l'irradiation de trois employés dont un en est mort :

- la confiance et l'acceptabilité du nucléaire civil ont baissé ;
- la probabilité perçue d'accident a augmenté ;
- la proportion d'opposants au nucléaire civil a augmenté considérablement, tandis que celle de ses partisans s'est modérément réduite.

L'après Fukushima : une situation sans équivalent dans l'histoire humaine ?

Le bilan d'une catastrophe comme Fukushima (catastrophe hybride, c'est-à-dire d'origine naturelle et humaine) ne se réduit pas à ses conséquences humaines et matérielles : des catastrophes au bilan bien plus important se sont produites (le tremblement de terre au Pakistan en 2005 a fait plus de 75 000 victimes et des millions de sans-abris, l'ouragan Katrina en 2005 a tué plus de 2 000 personnes et dévasté des villes entières, etc.) mais leur impact dévastateur direct s'achève en même temps que disparaît le phénomène qui les a déclenchées. Ici c'est différent, le bilan ne peut être fait car le(s) risque(s) demeure(nt). Le risque résiduel est ou peut être perçu comme supérieur à l'événement catastrophique lui-même. Peut-être pas en termes de morts à venir et de cancers radio-induits, mais en termes de permanence d'un environnement menaçant, hostile et souillé. La durée des irradiations, associée à leur invisibilité et à leur diffusion dans tous les milieux (terre, eau, air, aliments, faune, flore), inaugure une nouvelle ère : celle du risque perçu comme permanent et omniprésent. La vie peut-elle reprendre son cours normal dans un tel contexte ? Quelles vont être les réactions de la population exposée et de celle qui se croit l'être ?

Aussi la question suivante est : que faire qui puisse réduire l'incommensurable risque résiduel et ainsi la perception qu'en a la population ?

En règle générale, face à un risque nouveau, la première question est : que faut-il faire pour y faire face au niveau individuel et au niveau collectif ? Ici le

risque est différent : le risque s'est réalisé avant qu'aucune réponse n'ait pu être mise en œuvre, ce qui accroît les sentiments d'impuissance et de renoncement (c'est le propre des catastrophes imprévisibles et ponctuelles).

Une partie de la population vivant dans le périmètre de la centrale de Fukushima peut choisir de partir et d'aller vivre ailleurs afin d'échapper avec certitude à cet environnement menaçant durablement. Pour le reste de la population, soit par choix soit par impossibilité, elle aura à l'affronter. Le plus important serait bien entendu de rapidement parvenir à décontaminer le site. Mais cela ne pourra être que progressif, partiel et long. Surtout, il faudra parvenir à rendre compte des progrès accomplis, afin de rendre perceptible la réversibilité des conséquences de la catastrophe et rendre ainsi crédible qu'elle aura une fin à l'échelle temporelle humaine. Si l'objectif lointain est le retour à un environnement naturel neutre, l'objectif intermédiaire va être d'en faire percevoir la possibilité, concrétisée par des étapes significatives.

Il est important de garder présent à l'esprit que l'impact de Fukushima sur la perception du risque nucléaire est bien plus large que son impact géographique, limité à la zone de contamination. Non seulement il portera un impact sur l'ensemble de la population japonaise, mais il s'étendra à l'ensemble des pays disposant de centrales nucléaires ainsi qu'à ceux qui envisagent de s'en doter.

Autrement dit, l'enjeu du nucléaire civil va se jouer sur la capacité à rendre crédible une possible réduction progressive du risque résiduel. C'est un véritable changement de paradigme.

1.2.3.2 *Les modifications prévisibles de la demande de soins*

Non seulement de nouveaux problèmes sanitaires vont surgir, mais de plus la présence de la menace durable et diffuse qu'entraîne un environnement irradié va affecter la santé perçue de la population exposée. Autrement dit, à l'instar de la plupart des catastrophes et des situations traumatiques (guerres, attentats, etc.), va se créer une relation pernicieuse entre la perception du risque résiduel, la perception des conséquences sur la santé et une symptomatologie aussi multiforme qu'inédite. Ce qui risque d'entraîner une demande de soins dont l'importance sera fonction de nombreux facteurs et dont la prise en charge impliquera de ne pas opposer un déni face à une telle demande.

1.2.3.3 *À problème inédit, solutions innovantes ?*

Observer, analyser et suivre les perceptions des populations qui vont vivre dans le périmètre sensible de Fukushima est indispensable pour comprendre

comment et pourquoi certains groupes sociaux (et lesquels) vont s'y adapter et d'autres vivre des difficultés nouvelles, qu'elles soient somatiques, psychologiques ou existentielles. Découvrir les facteurs de fragilité et de résilience représente un premier objectif cognitif, préalable à toute innovation (pratique, relationnelle et communicationnelle) visant à atténuer la perception de ce risque, surtout si la communauté scientifique (internationale) s'avère en mesure d'en fournir une image objective. C'est de la confrontation patiente et rendue accessible entre deux formes de connaissance (celle sur le risque perçu et celle sur le risque observé, voire objectif ou réel) que pourra émerger une nouvelle représentation partagée de la « vie possible » après et autour de Fukushima.

1.2.3.4 Prévenir une telle catastrophe au Japon et ailleurs et s'y préparer en même temps ?

Le dilemme de la prévention des accidents nucléaires majeurs est que leur prévention (la sûreté nucléaire) reste difficilement compatible avec une réduction programmée des conséquences de leur survenue (*mitigation*). Car la première vise à rassurer les populations (« tout a été fait pour que cela n'arrive pas, ou jamais ») tandis que la seconde, qui en admet la possibilité, est un aveu de fragilité et une source d'angoisse. C'est là toute la différence avec une catastrophe naturelle (tremblement de terre, tsunamis, cyclones, etc.) sur laquelle l'essentiel de l'effort porte sur *la mitigation*, faute d'être en mesure d'en prévenir l'avènement.

Ce dilemme débouche sur la question majeure : quelle communication sur le risque nucléaire dans les pays développés exploitant des centrales nucléaires ? Une communication excluant le risque de catastrophe ou une communication qui y prépare ? La première, que Fukushima va rendre bien peu crédible, élargit le fossé entre les exploitants et la population. La seconde, qui vise à impliquer la population, les rassemble dans la perspective commune de gestion de la catastrophe.

Références

1. WHO, WHO SITREP 35, 2011.
2. Normile D. News and analysis: Fukushima Begins 30-Year Odyssey in Radiation Health. *Science* 2011.
3. Bard D, Verger P, Hubert P. Chernobyl, 10 years after: health consequences. *Epidemiol Rev* 1997;19(2):187-204.

4. The Chernobyl Forum: 2003-2005: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, 2005.
5. Nussbaum RH. Manipulating public health research: the nuclear and radiation health establishments. *Int J Occup Environ Health* 2007;13(3):328-30
6. Galea S, Nandi A, Vlahov D. The epidemiology of post-traumatic stress disorder after disasters. *Epidemiol Rev* 2005;27:78-91.
7. Galea S, Ahern J, Resnick H, Kilpatrick D, Bucuvalas M, Gold J, Vlahov D. Psychological sequelae of the September 11 terrorist attacks in New York City. *N Engl J Med* 2002;346(13):982-7.
8. van den Berg B, Grievink L, Yzermans J, Lebret E. Medically unexplained physical symptoms in the aftermath of disasters. *Epidemiol Rev* 2005;27:92-106.
9. Adams RE, Bromet EJ, Panina N, Golovakha E, Goldgaber D, Gluzman S. Stress and well-being in mothers of young children 11 years after the Chernobyl nuclear power plant accident. *Psychol Med* 2002;32(1):143-56.
10. MacLeod GK. A role for public health in the nuclear age. *Am J Public Health* 1982;72(3):237-9.
11. Noji EK. Public health issues in disasters. *Crit Care Med* 2005;33(1 Suppl): S29-33.
12. Slovic P. Perception of risk. *Science* 1987;236(4799):280-5.
13. Katsuya T. Public response to the Tokai nuclear accident. *Risk Anal* 2001;21(6):1039-46.

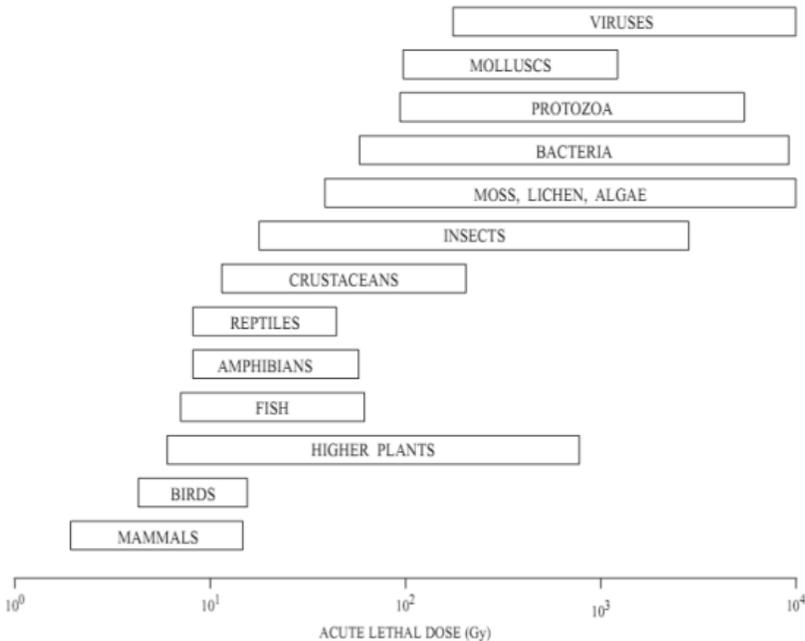
2 | Conséquences environnementales

Deux aspects sont à considérer : ceux qui concernent directement les conséquences des rejets radioactifs sur la faune et la flore et ceux qui résultent de la contamination des productions locales. Ce dernier aspect est important car l'impact des rejets radioactifs affecte gravement la valeur économique des territoires affectés, nuisant à la commercialisation des produits quand bien même les normes qui en limitent les dangers sont respectées.

2.1 Impacts de l'exposition aux radiations sur la faune et la flore terrestres

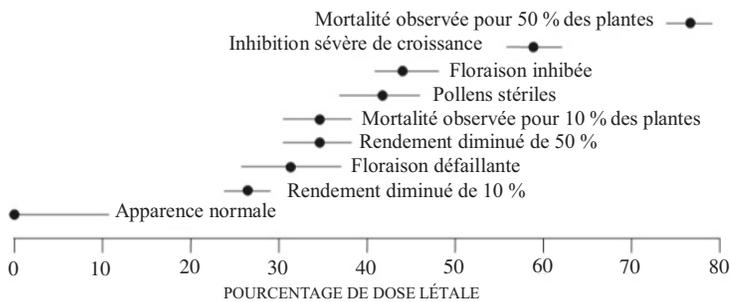
2.1.1 Aspects généraux

Bien qu'il soit impossible de déterminer les effets des radiations pour toutes les espèces connues, la figure ci-dessous établie par l'UNSCEAR permet de se rendre compte que la sensibilité aux radiations ionisantes est différente entre les animaux, les végétaux et les micro-organismes :



Ces données établies par l'UNSCEAR donnent sens à la position proférée par la CIPR dans ses anciennes recommandations ; « qui protège l'homme protège l'environnement ». Malgré certaines contestations, la démonstration inverse n'est toujours pas faite.

Pour les plantes, par exemple, il est possible de déterminer les effets sur différentes fonctions biologiques exprimées en fonction de la dose létale, en examinant la figure suivante.



À partir des conséquences de l'accident de Tchernobyl, il est possible d'avoir une description des impacts des radiations sur la flore et la faune de l'écosystème entourant la centrale nucléaire de Tchernobyl.

2.1.2 Impact à Tchernobyl

- Les doses élevées de rayonnements reçues pendant quelques semaines après l'accident, observées pour des dépôts de 0,7-3,9 GBq m⁻², ont conduit à des effets délétères dans une zone de quelques dizaines de kilomètres de diamètre (zone évacuée de 30 km autour de la centrale de Tchernobyl).
- Un accroissement de la mortalité a été constaté dans cette zone sur les animaux, les invertébrés du sol et sur les conifères qui sont les végétaux les plus sensibles (d'où l'expression « forêt rousse » utilisée pour cette zone par les médias). Un affaiblissement reproductif a été constaté aussi bien chez les plantes que les animaux sauvages (mammifères, oiseaux, etc.).
- Après une atteinte à l'équilibre écologique de la plupart des espèces, en quelques années, dans la zone évacuée de 30 km autour de la centrale, les champs abandonnés et les forêts sont devenus des refuges pour de nombreuses espèces de plantes ou d'animaux sauvages qui ont pu occuper les niches écologiques abandonnées et s'y reproduire.

- Pour les invertébrés du sol, dans la zone des 30 km, après une réduction drastique par un facteur 30 de leurs populations, les populations ont retrouvé environ dix ans après leur diversité initiale.

De l'ensemble des observations effectuées depuis plus de vingt ans peuvent être tirés les enseignements suivants :

- pour les plantes terrestres les plus sensibles (conifères), des doses chroniques de l'ordre de 400 microGy/h (10 mGy/j) ont des effets très faibles, alors qu'elles sont sans effets sur les autres types de végétaux ;
- pour la plupart des communautés aquatiques (eaux douces), les doses chroniques inférieures à 400 microGy/h (10 mGy/j), pour les individus les plus exposés, ne semblent pas susceptibles de produire des effets délétères ;
- pour les animaux terrestres les plus sensibles (mammifères), des doses chroniques à 40 microGy/h (1 mGy/j) ne semblent pas avoir d'impact sur leurs capacités reproductives. Il en est de même pour les oiseaux, les reptiles et les invertébrés qui sont en général moins radiosensibles que les mammifères.

Les mutations génétiques ou somatiques qui peuvent être produites par des niveaux bas d'exposition peuvent n'avoir aucun impact ou un niveau d'impact faible au niveau des biocénoses (équilibres des populations animales et végétales), par suite de la sélection naturelle ou du fait d'échanges avec les populations présentes dans les milieux voisins non contaminés.

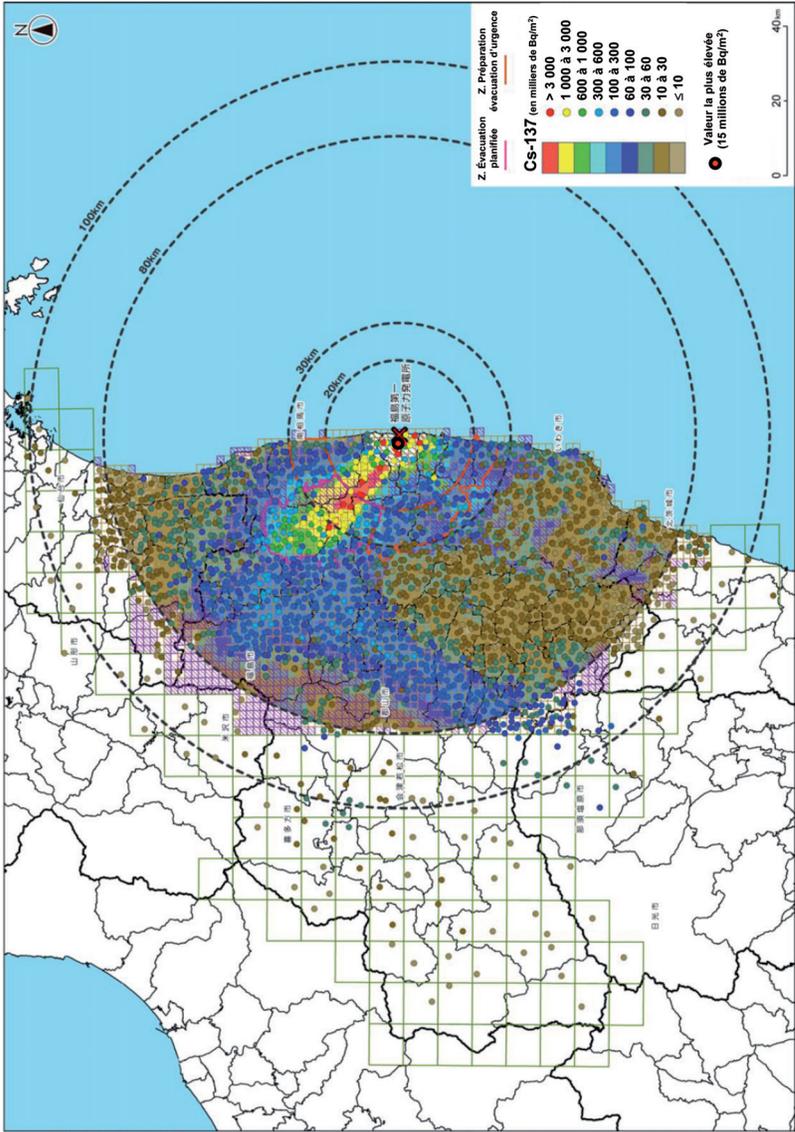
2.1.3 Situation à Fukushima

Bien que globalement la radioactivité rejetée à Fukushima soit 10 % de celle de Tchernobyl, les niveaux de radioactivité au sol dans les zones les plus contaminées sont comparables. Les mêmes impacts peuvent donc en être attendus. Cependant, les deux accidents ne sont pas de même nature. À Fukushima, seule la dispersion d'éléments volatils a eu lieu suite à la fusion du cœur du réacteur ; il n'y a pas eu de dispersion de fragments de combustible nucléaire. On peut s'attendre cependant à ce que la solubilité des radionucléides contaminants soit supérieure à celle des mêmes radionucléides piégés dans des particules de combustible.

2.2 Impact sur les produits végétaux de consommation : les différents modes de déposition

2.2.1 Le transfert aux végétaux

Après l'accident, les radionucléides se déposent par gravité (voie sèche) ou par entraînement par l'eau de pluie ou la neige (voie humide). Cette deuxième



Carte des activités surfaciques en césium 137 publiée par le MEXT. Zones colorées : d'après mesures aéroportées du rayonnement gamma ambiant (MEXT). Point colorés : d'après mesures sur des prélèvements (5 premiers centimètres de sol). Cercle noir : plus forte valeur en césium 137. Source : IRSN.

voie est beaucoup plus importante que la première et conduit à des dépositions très différentes selon la pluviométrie. Cela s'est caractérisé par une contamination « en taches de léopard ».

Le transfert des radionucléides déposés sur la végétation est essentiellement foliaire. Il a lieu l'année de la contamination. La surface foliaire est un élément déterminant. Dans un deuxième temps, après migration lente dans le sol, le transfert devient racinaire. Le transfert foliaire est plus élevé que le transfert racinaire, c'est pourquoi la contamination des plantes est maximale l'année de l'accident. Le transfert foliaire dépend essentiellement du stade de développement de la plante. La vitesse de migration dépend essentiellement de la nature des sols. Elle est très lente dans les prairies et sous-bois ; la contamination des produits de la forêt, champignons et baies, restera donc importante durant de nombreuses années.

Suite aux retombées de l'accident de Fukushima, parmi les productions agricoles, les radioactivités les plus élevées n'ont concerné que les légumes, principalement les légumes à feuilles (épinards notamment). La filière laitière a été touchée modérément et la contamination de la viande, à cinétique plus lente, concerne principalement des animaux alimentés avec des fourrages stockés en extérieur dans des zones où les dépôts ont été très importants.

Trois types de produits ont présenté une contamination significative : les pousses de bambou, les feuilles de thé crues ou raffinées et les abricots du Japon. Ci-dessous figure un extrait de la synthèse faite par l'IRSN le 13 juillet 2011, concernant la contamination de la chaîne alimentaire au Japon.

« Les activités massiques mesurées ($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$) peuvent dépasser de l'ordre de 1 000 Bq/kg frais pour le thé issu de la première récolte (1 330 Bq/kg frais à Kanagawa et 981 Bq/kg frais à Shizuoka le 21 juin) et de 2 000 Bq/kg frais pour les pousses de bambou (2 060 Bq/kg à Minamisoma et 1 070 Bq/kg à Souma le 23 juin). Ces niveaux de contamination pourraient correspondre à des dépôts de césium relativement modérés, estimés à quelques dizaines de milliers de Bq/m², qui ont pu se former jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de la centrale de Fukushima Dai-ichi. Il est donc possible que des contaminations beaucoup plus importantes de ces produits puissent être observées dans des productions en provenance de zones plus touchées par les retombées radioactives. Les mesures effectuées sur les feuilles de thé et les pousses de bambou sont relatives aux premières récoltes après les dépôts... les feuilles de thé qui ont fait l'objet d'une seconde coupe sont moins contaminées que celles de la première coupe : les activités en césium mesurées en juin varient entre 29 et 306 Bq/kg frais.

Toutefois, la consommation de ces denrées n'est pas immédiate et les produits conditionnés issus des premières récoltes sont susceptibles de perdurer sur le marché durant des mois.

Les abricots du Japon (umé) sont les fruits d'arbres à floraison très précoce, qui étaient probablement déjà en fleurs mi-mars... Les résultats de mesure les plus récents dans les abricots japonais récoltés dans la préfecture de Fukushima varient entre 137 et 700 Bq/kg frais pour les isotopes 134 et 137 du césium... Cette contamination résulte de l'interception des dépôts radioactifs par les organes végétatifs présents à ce moment-là. Il est probable que la contamination des abricots japonais ne se limitera pas à cette première récolte. Toutefois ces productions devraient être, dans l'avenir, moins sensibles à cette pollution radioactive que les feuilles de thé ou les pousses de bambous. »

Les conséquences immédiates de l'accident de Fukushima sur la chaîne alimentaire au Japon doivent donc être analysées en considérant l'influence de la date d'occurrence des dépôts qui les a considérablement limitées, compte tenu de la saison. Les conséquences à long terme doivent en revanche tenir compte du niveau de contamination des sols et des coefficients de transferts des contaminants (principalement le césium) vers les parties consommées des végétaux.

2.2.2 Contamination de la faune aquatique

L'IRSN a publié le 11 juillet 2011 (et réactualisé le 26 octobre 2011) une synthèse de la contamination en milieu marin. Une forte contamination radioactive du milieu marin s'est produite après l'accident de Fukushima. Elle a pour origine le déversement des eaux contaminées qui ont servi à refroidir les réacteurs endommagés et dans une moindre mesure les retombées dans l'océan d'une partie des radionucléides rejetés dans l'atmosphère les dix premiers jours qui ont suivi l'accident, lorsque les vents étaient dirigés vers la mer.

Pour l'iode 131, qui se fixe dans la faune et la flore marine, la concentration a rapidement décru en raison de sa période radioactive courte, à partir de valeurs maximales atteignant plusieurs centaines de milliers de Bq/L à proximité du canal de décharge des eaux de refroidissement.

La concentration pour les deux isotopes du césium a atteint plusieurs dizaines de milliers de Bq/L à proximité de la côte pour décroître rapidement fin avril aux environs de 100 Bq/L.

Les isotopes radioactifs solubles du césium ont été transportés par les courants marins et se sont dispersés dans les masses d'eaux océaniques. La diminution de la concentration du césium dans le milieu marin proche de la centrale se fait avec une période de onze jours.

En août 2011, l'AIEA a publié une synthèse des conséquences sur les produits de la pêche côtière. Seuls les lançons ont fait l'objet de dépassements réguliers des valeurs limites, atteignant plus de 10 000 Bq/kg d'iode 131 dans une zone de pêche située à 40-60 km au sud de Fukushima. Toutes les pêcheries ont été gelées dans la préfecture de Fukushima et, partiellement, au sud pour les pêcheries d'Ibaraki.

2.3 Décontamination des milieux

2.3.1 Réduction de la contamination en milieu bâti

L'objectif principal des actions de réduction d'une contamination faisant suite à un accident nucléaire est d'améliorer la situation radiologique de l'environnement et de réduire en conséquence l'exposition des populations qui seraient maintenues sur place ou qui se réinstalleraient après un éloignement temporaire. En aucun cas ces actions ne permettront un retour à l'état initial, c'est-à-dire une décontamination totale. La prise en compte de cette dimension impose que la population fasse confiance aux dispositions prises par les pouvoirs publics.

2.3.2 Voies d'exposition majeures en milieu bâti et actions de réduction de la contamination

C'est la contamination des toits des habitations, des routes, des trottoirs et de la végétation « urbaine » qui contribue principalement à l'irradiation externe des populations, l'importance respective de chacune de ces sources d'exposition variant évidemment selon le mode de vie (habitat individuel ou collectif) et le type de dépôt (humide ou sec). Les phénomènes de concentration dus au recueil par l'eau de pluie des particules déposées (gouttières pour le toit des habitations, égouts pour les grandes surfaces urbaines) sont à prendre en compte. L'accident de Tchernobyl a montré qu'il fallait être vigilant également avec les systèmes de ventilation des habitations et immeubles.

Les actions possibles pour la réduction de la contamination présentent des contraintes spécifiques de mise en œuvre qui dépendent de la disponibilité opérationnelle des moyens techniques et du temps écoulé depuis le début de

l'accident. Ces actions, qui peuvent apporter une réduction d'un facteur 2 à 3, sont détaillées dans l'annexe 14 « Réduction de la contamination en milieu bâti ».

2.3.3 Mesures de restauration des sols contaminés

L'expérience acquise à Tchernobyl a montré qu'on ne pouvait restaurer complètement la qualité des sols : l'essentiel est de redonner aux territoires contaminés une valeur économique. Ce programme très complexe nécessite plusieurs étapes, détaillées dans l'annexe 15. En résumé, les actions supposent une bonne connaissance des terrains contaminés, la mise au point de techniques mécaniques et physicochimiques de décontamination, le choix de cultures appropriées soit pour leurs propriétés couvrantes, soit pour leur aptitude à concentrer ou ignorer le césium, soit pour leur usage industriel retardé, ou en tant que biomasse pour la production d'énergie dans des installations dédiées.

2.4 Déchets contaminés

Le traitement des déchets est un *problème politique majeur* au Japon, il concerne d'une part les débris du tsunami et les liquides récupérés et stockés « temporairement » sur un site qui sera créé à proximité de la centrale et d'autre part tous les résidus résultant du traitement des surfaces dans les zones à réhabiliter.

Les Japonais se sont fixés comme objectif de traiter les zones où l'activité peut conduire à des doses de 5 mSv/an (correspondant à 1 μ Sv par heure). Pour les zones où l'exposition est inférieure à 5 mSv, le gouvernement japonais estime que cette activité évoluera rapidement à un niveau inférieur à la dose limite pour les populations (1 mSv/an avec le temps et les conditions météorologiques, pluie et vent).

Pour les zones évacuées, toujours dans l'optique de récupération de territoires, des décapages importants sur une profondeur de 5 cm où se situent les césiums seront nécessaires ; ils aboutiront à des volumes de déchets de l'ordre de 400 tonnes à l'hectare pour une division par 4 à 5 du facteur de dose. Ce travail de décontamination par décapage n'est pas envisagé à ce jour pour les forêts (70 % des zones à traiter). Le seul ramassage des feuilles et un élagage pourraient suffire. De plus, le volume de déchets contaminés pourrait être réduit par incinération, avec cependant une concentration de la contamination.

Dans les zones qui n'ont pas été évacuées, il sera procédé à un diagnostic précis de l'état des surfaces, et les supports les plus contaminés seront enlevés et stockés selon un concept proche de notre gestion des déchets de très faible activité. Il sera procédé à des labours plus ou moins profonds, à l'utilisation d'engrais, etc., tous procédés testés à Tchernobyl et résumés dans le rapport UNSCEAR de 2011¹⁵.

Le ministère de l'Environnement japonais évalue la surface à traiter à 2 400 km², répartis autour de Fukushima, et le volume de terres contaminées à entreposer à 29 millions de m³.

Pour mémoire, à Tchernobyl, dans les zones les plus contaminées autour de la centrale accidentée, les déchets avaient été évacués et enfouis dans la zone de la « forêt rousse ». Cette opération avait été réalisée dans l'optique d'une amélioration de l'accessibilité à la centrale, non pour rendre viable cette zone contaminée.

¹⁵ UNSCEAR Report 2008: *Sources and effects of ionizing radiation*, Vol II, Annex E: *Effects of ionizing radiation on non human biota*, United Nations, New-York 2011.

RECOMMANDATIONS

1 | Éducation, information et communication

En cas de catastrophe, quelle qu'en soit la nature, l'information et la communication jouent un rôle essentiel pour diffuser les consignes des autorités compétentes visant à protéger les populations et à éviter les phénomènes de panique particulièrement délétères (rappelons que, lors de l'accident nucléaire de Three Mile Island, les seules victimes ont été celles d'accidents de la voie publique parmi les personnes fuyant des rejets, en réalité très limités). Comparé avec l'accident de Tchernobyl, l'accident de Fukushima a montré une avancée significative dans la diffusion de l'information au Japon et dans la transparence en France – garantie par le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN). Cette avancée est illustrée par :

- l'effort quotidien de communication institutionnelle, comme par exemple celle de l'Autorité de sûreté nucléaire ;
- la disponibilité des experts et scientifiques auprès des médias ;
- le travail de mise en ligne d'informations actualisées sur des sites comme celui de l'IRSN, qui apportaient de nombreuses réponses aux questions posées.

Néanmoins, la difficulté de l'exercice pour les médias est le traitement médiatique en continu d'un afflux d'informations quelquefois alarmistes, parfois contradictoires, qu'il est nécessaire de vérifier. À cet égard, l'importance prise récemment par les réseaux sociaux est une donnée dont on doit tenir compte.

L'Académie fait les recommandations suivantes :

1. Fournir aux professionnels de santé et au public la possibilité de trouver rapidement des informations synthétiques sur des sites Internet labellisés par le HCTISN.
2. Aménager les programmes d'enseignement secondaire et supérieur pour que, dans toutes les séries, soient incluses les informations techniques et sanitaires régulièrement validées, sur les différents domaines énergétiques¹⁶.

¹⁶Le programme du baccalauréat comprend actuellement *Les transformations nucléaires* en série S et *Enjeux planétaires énergétiques* pour les séries ES et L.

Cela nécessite notamment que des experts soient associés à l'élaboration des manuels scolaires.

3. Intégrer à la communication sur le risque nucléaire la possibilité d'accidents, et organiser en conséquence la gestion anticipée de ce risque.
4. Installer, en cas d'accident grave de centrale nucléaire, des groupes pluralistes d'experts associant scientifiques et représentants de la population, dont la mission sera de mettre à la disposition de l'ensemble de la population concernée les informations acquises au cours du temps sur l'état de l'environnement, et l'estimation actualisée des risques.
5. Intégrer dans les cellules de crise des spécialistes des nouveaux médias de type réseaux sociaux.

2 | Organisation de l'industrie nucléaire

1. Encourager la création de forces d'action rapide, susceptibles d'intervenir en moins de 24 heures pour maîtriser les conséquences d'un accident nucléaire, y compris entraînant la fusion du cœur. La mise en place de ces forces permettra de créer une culture approfondie de l'accident et de l'intervention au sein du personnel des centrales nucléaires.
2. Revoir l'échelle INES, séparant, en cas d'accident, l'évaluation de la sûreté des installations de celle des conséquences sanitaires et environnementales.
3. Faire aboutir les travaux du Comité directeur de gestion des phases post-accidentelles (CODIRPA)¹⁷.

3 | Recherche au plan national et au plan international

L'accident de Fukushima, dont l'impact sanitaire et environnemental a été local, a suscité une émotion mondiale rappelant que les accidents nucléaires n'ont pas de frontière.

¹⁷ Le Comité DIRecteur de gestion des phases Post-Accidentelles (CODIRPA) a été mis en place par l'autorité de sûreté (ASN) en 2005. Il s'est plus particulièrement investi depuis cette date dans la gestion de la phase de transition, entre celle définie par les plans de réponse à l'urgence radiologique d'une part et celle d'autre part liée aux conséquences à plus long terme de la gestion des territoires contaminés (gestion sanitaire des populations, conséquences économiques, réhabilitation des conditions de vie).

Ce constat appelle une mobilisation mondiale quant aux leçons à tirer conduisant à des recommandations pour la poursuite, le financement et l'approfondissement de thèmes de recherche et pour la mise en place d'organisations spécifiques¹⁸.

L'Académie recommande que ces collaborations s'exercent en priorité sur les points suivants :

1. Étudier les conséquences des longues expositions à de faibles doses d'irradiation par des rayonnements ionisants, connaissance indispensable pour établir des seuils d'évacuation qui protègent les populations sans conduire à des déplacements abusifs, dont l'impact en termes de santé publique est négatif.
2. Prendre mieux en compte le bilan des études de décontamination interne¹⁹.
3. Développer la recherche en matière de marqueurs des cancers radio-induits.
4. Développer des moyens industriels de décontamination et de réhabilitation des sols s'appuyant sur des technologies validées sur des sites de démonstration et sur des sites contaminés par de précédents accidents. Inventorier, à partir des résultats obtenus, les ressources végétales selon leur capacité à concentrer ou non les radionucléides.
5. Constituer et entretenir des stocks de ressources génétiques végétales, spécifiquement sélectionnées pour leur capacité à concentrer des radionucléides, afin d'agir rapidement sur les terres contaminées.
6. Renforcer les études et le développement d'une robotique adaptée aux situations dégradées et irradiantes.

¹⁸ Il est également nécessaire de poursuivre les exercices INEX mis en place par l'AEN après l'accident de Tchernobyl, tout comme la mise en place du système ECURIE par l'Union européenne, qui ont considérablement amélioré les transmissions des informations entre États et la définition de contre-mesures.

¹⁹ Après l'accident de Tchernobyl, différentes initiatives médicales ou paramédicales ont été faites à l'échelon local pour tenter de diminuer l'exposition individuelle aux radionucléides déposés dans l'environnement. Si cette attitude est indiscutablement fondée dans le cas de la contamination par les iodes radioactifs car l'administration d'iode stable, effectuée dans les conditions prévue par les autorités sanitaires, évite efficacement l'exposition de la thyroïde aux rayonnements ionisants, pour les autres radionucléides et en particulier les radio-isotopes du césium le bénéfice à attendre d'une telle approche est très incertain. Les pratiques proposées n'ont fait l'objet d'aucune analyse d'efficacité équivalente à l'exigence de la médecine EBM (*Evidence Based Medicine*) et laissent ouverte la possibilité de pratiques commerciales suspectes.

4 | Gestion sanitaire

1. Mettre en place des outils simples d'évaluation des contaminations internes en situation dégradée.
2. Surveiller l'apport alimentaire en iode stable dans la population générale française.
3. Mieux informer sur les conditions de prise d'iode stable, basée sur un niveau de dose entraînant un risque mesurable sur la thyroïde.
4. Améliorer la formation des médecins généralistes sur les principes de base de la radioprotection.
5. Actualiser, à la lumière de l'expérience de Fukushima, les protocoles de prise en charge des intervenants et des populations exposées.
6. Repenser l'organisation du système hospitalier :

En cas d'accident nucléaire majeur, comme en cas de toute catastrophe environnementale, l'organisation hospitalière capable de répondre doit être repensée, aussi bien en ce qui concerne les soins d'urgence et intensifs qu'en ce qui concerne l'impact sur les soins courants et les hospitalisations programmées.

- S'agissant des soins d'urgence directement liés à l'accident :

- Les cellules NRBC (nucléaire, radiologique, biologique et chimique) doivent être mises à un niveau fonctionnel.
- Les personnels médicaux et soignants doivent être formés à la prise en charge des patients contaminés.

- S'agissant des soins courants et des hospitalisations programmées, une rupture éventuelle de la continuité doit être anticipée dès la survenue de l'événement pour permettre un rétablissement de la balance entre l'offre et la demande de soins :

- en transférant, à titre préventif et avant leur aggravation, les patients hospitalisés ou ambulatoires susceptibles de s'aggraver dans les heures ou les jours qui suivent ;
- en mettant en place, à proximité, des lieux de regroupements des victimes, des structures de soins ambulatoires temporaires permettant d'assurer la continuité des soins des maladies chroniques ;
- ceci implique de déterminer les critères médicaux de tri pour prioriser les patients devant bénéficier de telles mesures.

En conséquence, il semble nécessaire, vraisemblablement au niveau des ARS ou des ARS de zone défense :

- de réaliser un recensement des moyens d'évacuation, médicalisés ou non, des patients ambulatoires susceptibles de s'aggraver, et de déterminer les modalités de leur mobilisation opérationnelle ;
 - d'identifier les équipes médicales susceptibles de prendre le relais de la continuité des soins dans la zone sinistrée et dans les régions non touchées par la catastrophe, les établissements de soins susceptibles d'accueillir ces patients jusqu'au retour à une situation locale compatible avec leur état.
- *Enfin, de façon plus prospective :*
- Encourager des recherches permettant, notamment en s'appuyant sur la simulation informatique, de modéliser des scénarios de réponse de l'ensemble du système de soins à des accidents ou catastrophes environnementales, notamment nucléaires.
7. Planifier la mobilisation rapide des ressources épidémiologiques techniques et humaines en cas d'accident majeur de centrale nucléaire : un système de surveillance épidémiologique en temps réel doit pouvoir documenter à la fois les événements de santé physique, les conséquences psychosociales, les perceptions des risques ainsi que leurs déterminants, en s'appuyant notamment sur l'aide des groupes pluralistes prévus par la recommandation 1.4. Ce système doit intégrer un dispositif d'évaluation des pratiques d'intervention utilisées,
 8. Planifier, de même, les ressources épidémiologiques techniques et humaines nécessaires à l'organisation des enquêtes épidémiologiques de suivi à moyen et long terme des personnes exposées à la contamination, ainsi que de celles se jugeant exposées. Le suivi médical doit concerner non seulement les pathologies cancéreuses et de la reproduction *a priori* en relation possible avec l'irradiation, mais aussi la santé mentale et les pathologies *a priori* non spécifiques de l'exposition aux radiations. La mesure régulière de l'évolution à distance de l'événement des perceptions des risques dans la population pourra s'appuyer sur la méthodologie déjà développée par l'IRSN pour son enquête permanente.
 9. Organiser la formation universitaire en santé publique spécialisée dans la prise en charge des conséquences sanitaires des catastrophes et accidents environnementaux et encourager des programmes de recherche intégrant une expertise des médias permettant d'évaluer leur rôle dans ces contextes d'accident environnemental.