

# L'accident de Fukushima Daiichi



Rapport du Directeur général



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique

# L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

## RAPPORT DU DIRECTEUR GÉNÉRAL

Les États ci-après sont Membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique :

AFGHANISTAN	GÉORGIE	PALAOS
AFRIQUE DU SUD	GHANA	PANAMA
ALBANIE	GRÈCE	PAPOUASIE-NOUVELLE-GUINÉE
ALGÉRIE	GUATEMALA	PARAGUAY
ALLEMAGNE	GUYANA	PAYS-BAS
ANGOLA	HAÏTI	PÉROU
ARABIE SAOUDITE	HONDURAS	PHILIPPINES
ARGENTINE	HONGRIE	POLOGNE
ARMÉNIE	ÎLES MARSHALL	PORTUGAL
AUSTRALIE	INDE	QATAR
AUTRICHE	INDONÉSIE	RÉPUBLIQUE ARABE
AZERBAÏDJAN	IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'	SYRIENNE
BAHAMAS	IRAQ	RÉPUBLIQUE
BAHREÏN	IRLANDE	CENTRAFRICAINE
BANGLADESH	ISLANDE	RÉPUBLIQUE DE MOLDOVA
BÉLARUS	ISRAËL	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BELGIQUE	ITALIE	DU CONGO
BELIZE	JAMAÏQUE	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BÉNIN	JAPON	POPULAIRE LAO
BOLIVIE, ÉTAT	JORDANIE	RÉPUBLIQUE DOMINICAINE
PLURINATIONAL DE	KAZAKHSTAN	RÉPUBLIQUE TCHÈQUE
BOSNIE-HERZÉGOVINE	KENYA	RÉPUBLIQUE-UNIE DE
BOTSWANA	KIRGHIZISTAN	TANZANIE
BRÉSIL	KOWEÏT	ROUMANIE
BRUNÉI DARUSSALAM	LESOTHO	ROYAUME-UNI
BULGARIE	LETTONIE	DE GRANDE-BRETAGNE
BURKINA FASO	L'EX-RÉPUBLIQUE YOUGOSLAVE	ET D'IRLANDE DU NORD
BURUNDI	DE MACÉDOINE	RWANDA
CAMBODGE	LIBAN	SAINT-MARIN
CAMEROUN	LIBÉRIA	SAINT-SIÈGE
CANADA	LIBYE	SÉNÉGAL
CHILI	LIECHTENSTEIN	SERBIE
CHINE	LITUANIE	SEYCHELLES
CHYPRE	LUXEMBOURG	SIERRA LEONE
COLOMBIE	MADAGASCAR	SINGAPOUR
CONGO	MALAISIE	SLOVAQUIE
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	MALAWI	SLOVÉNIE
COSTA RICA	MALI	SOUDAN
CÔTE D'IVOIRE	MALTE	SRI LANKA
CROATIE	MAROC	SUÈDE
CUBA	MAURICE	SUISSE
DANEMARK	MAURITANIE	SWAZILAND
DJIBOUTI	MEXIQUE	TADJIKISTAN
DOMINIQUE	MONACO	TCHAD
ÉGYPTE	MONGOLIE	THAÏLANDE
EL SALVADOR	MONTÉNÉGRO	TOGO
ÉMIRATS ARABES UNIS	MOZAMBIQUE	TRINITÉ-ET-TOBAGO
ÉQUATEUR	MYANMAR	TUNISIE
ÉRYTHRÉE	NAMIBIE	TURQUIE
ESPAGNE	NÉPAL	UKRAINE
ESTONIE	NICARAGUA	URUGUAY
ÉTATS-UNIS	NIGER	VENEZUELA,
D'AMÉRIQUE	NIGERIA	RÉP. BOLIVARIENNE DU
ÉTHIOPIE	NORVÈGE	VIET NAM
FÉDÉRATION DE RUSSIE	NOUVELLE-ZÉLANDE	YÉMEN
FIDJI	OMAN	ZAMBIE
FINLANDE	OUGANDA	ZIMBABWE
FRANCE	OUZBÉKISTAN	
GABON	PAKISTAN	

Le Statut de l'Agence a été approuvé le 23 octobre 1956 par la Conférence sur le Statut de l'AIEA, tenue au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York ; il est entré en vigueur le 29 juillet 1957. L'Agence a son Siège à Vienne. Son principal objectif est « de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ».

**L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI**  
**RAPPORT DU DIRECTEUR GÉNÉRAL**



## **AVANT-PROPOS**

**par Yukiya Amano**  
**Directeur général**

Le présent rapport est une évaluation des causes et conséquences de l'accident survenu le 11 mars 2011 à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon. Provoqué par un gigantesque tsunami qui a suivi un violent séisme, cet accident est le pire jamais arrivé dans une centrale nucléaire depuis la catastrophe de Tchernobyl en 1986.

Le rapport examine les facteurs humains, organisationnels et techniques et vise à faire comprendre ce qui s'est passé et les causes des événements, afin que les gouvernements, les organismes de réglementation et les exploitants des centrales nucléaires du monde entier puissent donner suite aux enseignements nécessaires qui en seront tirés. Les mesures prises après l'accident, tant au Japon qu'à l'échelle internationale, sont aussi passées en revue.

Il convient de ne pas négliger le formidable impact de l'accident de Fukushima Daiichi sur les populations. Plus de 100 000 personnes ont été évacuées en raison du rejet de radionucléides dans l'environnement. Au moment de l'établissement du présent rapport, en 2015, nombre d'entre elles ne pouvaient toujours pas regagner leurs foyers.

Je me suis rendu à la centrale de Fukushima Daiichi quelques mois après l'accident et j'ai vu de mes propres yeux l'impact puissant et destructeur du tsunami. Ce fut une expérience choquante qui donne à réfléchir.

Cependant, j'ai été profondément impressionné par le courage et le dévouement des travailleurs et des responsables qui sont restés à leur poste après l'arrivée du tsunami et qui ont lutté, dans des conditions effroyables, pour reprendre le contrôle des réacteurs touchés. Ils ont dû improviser une intervention dans des circonstances auxquelles ils n'avaient pas été préparés, souvent sans le matériel approprié. Ils méritent notre respect et notre admiration.

Un facteur majeur qui a contribué à l'accident a été le postulat largement répandu au Japon selon lequel les centrales nucléaires de ce pays étaient si sûres qu'un accident de cette ampleur était tout simplement impensable. Les exploitants des centrales nucléaires y adhéraient et ni les organismes de réglementation ni le gouvernement ne le remettaient en question. Par conséquent, en mars 2011, le Japon n'était pas suffisamment préparé à faire face à un accident nucléaire grave.

L'accident de Fukushima Daiichi a mis en lumière certaines défaillances du cadre réglementaire japonais. Plusieurs organismes se partageaient les responsabilités et on ne savait pas toujours très bien qui était responsable de quoi.

La conception des centrales, les dispositions concernant la préparation et la conduite des interventions d'urgence et la planification de la gestion d'un accident grave laissaient aussi un peu à désirer. On était parti de l'hypothèse que dans une centrale nucléaire il n'y aurait jamais de perte totale de l'alimentation électrique pendant plus qu'un court laps de temps. La possibilité que plusieurs réacteurs d'une même installation se trouvent en situation de crise au même moment n'avait pas été envisagée. De plus, il n'avait pas été suffisamment prévu qu'un accident nucléaire puisse survenir au même moment qu'une catastrophe naturelle majeure.

Depuis l'accident, le Japon a réformé son système réglementaire pour qu'il soit davantage conforme aux normes internationales. Il a attribué aux organismes de réglementation des responsabilités plus claires et des pouvoirs renforcés. Le nouveau cadre réglementaire sera examiné par des experts internationaux dans le cadre d'une mission du Service intégré

d'examen de la réglementation de l'AIEA. Les dispositions concernant la préparation et la conduite des interventions d'urgence ont aussi été consolidées.

D'autres pays ont pris des mesures après l'accident qui ont consisté notamment à effectuer des 'tests de résistance' pour réévaluer la conception de leurs centrales nucléaires face à des aléas naturels extrêmes susceptibles d'affecter leur site, à installer des sources d'énergie électrique de secours ainsi que des conduites d'approvisionnement en eau supplémentaires et à renforcer la protection des centrales contre les événements externes extrêmes.

Bien que la sûreté nucléaire relève toujours de la responsabilité de chaque pays, les accidents nucléaires ne connaissent pas de frontières. L'accident de Fukushima Daiichi a souligné l'importance vitale d'une coopération internationale efficace, dont l'AIEA est un acteur majeur. Nos États Membres ont adopté le *Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire* quelques mois après l'accident et mettent en œuvre ses dispositions de grande portée pour améliorer la sûreté nucléaire dans le monde.

L'AIEA, qui a fourni au Japon un appui technique et un savoir-faire particulier après l'accident et a communiqué au monde des informations sur la crise en cours, a réexaminé et amélioré ses propres procédures d'intervention face à une situation d'urgence nucléaire. Notre rôle en pareille circonstance a été étoffé pour que nous puissions en analyser les conséquences potentielles et présenter des scénarios possibles quant à l'évolution d'une crise.

Les normes de sûreté de l'AIEA sont l'exemple même d'un consensus international sur ce qui constitue un niveau de sûreté élevé. Après l'accident, elles ont été réexaminées par la Commission des normes de sûreté. Quelques modifications ont été proposées et adoptées. J'encourage tous les pays à appliquer ces normes dans leur intégralité.

Les examens par des pairs de l'AIEA ont un rôle décisif à jouer dans le domaine de la sûreté nucléaire à travers le monde, car ils permettent aux pays de bénéficier des points de vue indépendants d'experts internationaux de premier plan qui reposent sur le cadre de référence commun constitué par les normes de sûreté de l'AIEA. Ils portent sur des questions comme la sûreté d'exploitation des centrales nucléaires, l'efficacité des organismes de réglementation et la conception des sites de centrales nucléaires face à certains dangers. Nous avons renforcé notre programme d'examen par des pairs depuis l'accident et continuerons de le faire.

Je suis convaincu que l'accident de Fukushima Daiichi aura pour effet de mettre davantage l'accent sur la sûreté nucléaire, quel que soit le lieu. J'ai constaté que des améliorations avaient été apportées aux mesures et procédures de sûreté dans toutes les centrales nucléaires que j'ai visitées. Il est largement admis que tout ce qui est humainement possible doit être fait pour qu'un tel accident ne se reproduise plus jamais. Ceci est d'autant plus primordial que l'électronucléaire est appelé à se développer encore plus dans les décennies à venir.

Aucun pays ne doit céder à l'autosatisfaction en matière de sûreté nucléaire. Certains des facteurs qui ont contribué à l'accident de Fukushima Daiichi ne sont pas propres au Japon. L'exercice permanent de l'esprit critique et de l'aptitude à apprendre de l'expérience est à la base de la culture de sûreté et indispensable pour quiconque travaille dans l'électronucléaire. La sûreté doit toujours venir en premier.

J'exprime ma gratitude aux experts de nombreux pays et organisations internationales qui ont contribué au présent rapport, ainsi qu'à mes collègues de l'AIEA qui l'ont rédigé et révisé. J'espère que ce rapport et les volumes techniques dont il est assorti aideront tous les pays qui recourent, ou prévoient de recourir, à l'électronucléaire à continuer inlassablement d'améliorer la sûreté.

## REMERCIEMENTS

Une assistance financière a été fournie par le Canada, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, le Japon et le Royaume-Uni.

Des contributions en nature ont été reçues des pays suivants : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Australie, Bélarus, Brésil, Canada, Chine, Cuba, Émirats arabes unis, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Ghana, Inde, Indonésie, Islande, Israël, Italie, Japon, Malaisie, Maroc, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Philippines, Pologne, République arabe syrienne, République de Corée, République tchèque, République-Unie de Tanzanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, Suisse, Turquie et Ukraine. Des contributions en nature ont en outre été reçues de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, de l'Association mondiale des exploitants nucléaires, du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, de la Commission européenne, de la Commission internationale de protection radiologique, du Groupe international pour la sûreté nucléaire, de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, de l'Organisation internationale du Travail et de l'Organisation météorologique mondiale.

Le gouvernement japonais a apporté un soutien précieux en communiquant une quantité considérable d'informations, en prenant des dispositions pour que des experts japonais apportent leur appui aux travaux sur le rapport et en assurant un soutien logistique pour les réunions bilatérales au Japon.

Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a apporté son concours à l'AIEA en mettant à sa disposition la base de références pertinentes tirées de son rapport de 2013 et en autorisant la reproduction d'informations et de figures provenant de ce rapport.

L'AIEA remercie les très nombreux experts qui ont participé à l'établissement du présent rapport. Ce dernier est le fruit des efforts dévoués de nombreuses personnes. Tous les participants énumérés à la fin du présent rapport y ont apporté des contributions de valeur, mais les coprésidents et les coordonnateurs des groupes de travail ont assumé une lourde part de la tâche. L'AIEA est aussi profondément reconnaissante aux spécialistes chargés du réexamen, y compris les membres du Groupe consultatif technique international, de leurs efforts.



## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	1
RAPPORT DE SYNTHÈSE.....	23
1. INTRODUCTION .....	23
1.1. RAPPORT SUR L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI .....	24
2. L'ACCIDENT ET SON ÉVALUATION .....	27
2.1. DESCRIPTION DE L'ACCIDENT .....	27
2.1.1. Événement initiateur et réponse .....	27
2.1.2. Progression de l'accident.....	38
2.1.3. Efforts de stabilisation .....	51
2.2. CONSIDÉRATIONS DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE .....	56
2.2.1. Vulnérabilité de la centrale aux événements externes .....	56
2.2.2. Application du concept de défense en profondeur.....	61
2.2.3. Évaluation de l'incapacité de remplir des fonctions de sûreté fondamentales.....	64
2.2.4. Évaluation des accidents hors dimensionnement et gestion des accidents.....	70
2.2.5. Évaluation de l'efficacité de la réglementation .....	75
2.2.6. Évaluation des facteurs humains et organisationnels.....	80
2.3. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS.....	84
3. PRÉPARATION ET CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE.....	89
3.1. INTERVENTION INITIALE AU JAPON APRÈS L'ACCIDENT .....	90
3.1.1. Notification.....	91
3.1.2. Actions d'atténuation.....	92
3.1.3. Gestion de la situation d'urgence .....	94
3.2. PROTECTION DES MEMBRES DES ÉQUIPES D'INTERVENTION.....	97
3.2.1. Protection du personnel de la centrale après le séisme et le tsunami.....	98
3.2.2. Mesures de protection pour les membres des équipes d'intervention.....	99
3.2.3. Désignation des membres des équipes d'intervention .....	100
3.2.4. Prise en charge médicale des membres des équipes d'intervention.....	100
3.3. PROTECTION DU PUBLIC .....	101
3.3.1. Actions protectrices urgentes et relogement .....	102
3.3.2. Actions protectrices concernant les denrées alimentaires, l'eau de boisson et l'agriculture.....	107
3.3.3. Information du public .....	108
3.3.4. Commerce international.....	109
3.3.5. Gestion des déchets en phase d'urgence .....	110
3.4. PASSAGE DE LA PHASE D'URGENCE À LA PHASE DE RELÈVEMENT ET ANALYSES DE L'INTERVENTION.....	111
3.4.1. Passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement .....	111
3.4.2. Analyses de l'intervention .....	112
3.5. L'INTERVENTION DANS LE CONTEXTE DU CADRE INTERNATIONAL POUR LA PRÉPARATION ET LA CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE.....	113
3.6. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS.....	116

4.	CONSEQUENCES RADIOLOGIQUES .....	121
4.1.	RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT .....	127
4.1.1.	Rejets .....	128
4.1.2.	Dispersion .....	129
4.1.3.	Dépôt .....	133
4.1.4.	Produits de consommation .....	135
4.2.	PROTECTION DES PERSONNES CONTRE LA RADIOEXPOSITION .....	138
4.2.1.	Limitation de l'exposition du public .....	139
4.2.2.	Limitation de l'exposition professionnelle, y compris l'exposition des membres des équipes d'intervention .....	143
4.3.	RADIOEXPOSITION .....	143
4.3.1.	Exposition du public .....	145
4.3.2.	Expositions professionnelles .....	152
4.4.	EFFETS SUR LA SANTÉ .....	155
4.4.1.	Effets sanitaires précoces induits par les rayonnements .....	157
4.4.2.	Effets sanitaires tardifs possibles induits par les rayonnements .....	157
4.4.3.	Effets des rayonnements chez les enfants .....	158
4.4.4.	Effets sanitaires prénataux induits par les rayonnements .....	160
4.4.5.	Conséquences psychologiques .....	160
4.5.	CONSEQUENCES RADIOLOGIQUES POUR LES ORGANISMES AUTRES QUE LES HUMAINS .....	162
4.6.	OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS .....	163
5.	RELÈVEMENT APRÈS L'ACCIDENT .....	168
5.1.	REMÉDIATION DES ZONES HORS SITE TOUCHÉES PAR L'ACCIDENT .....	168
5.1.1.	Mise en place d'un cadre juridique et réglementaire pour la remédiation .....	169
5.1.2.	Stratégie de remédiation adoptée .....	170
5.1.3.	État d'avancement de la remédiation .....	172
5.2.	STABILISATION SUR LE SITE ET PRÉPARATIFS EN VUE DU DÉCLASSEMENT .....	176
5.2.1.	Plan stratégique .....	177
5.2.2.	Préparatifs en vue du déclassé .....	178
5.2.3.	Gestion de l'eau contaminée .....	179
5.2.4.	Enlèvement du combustible usé et des débris de combustible .....	182
5.2.5.	Stade final du déclassé du site .....	183
5.3.	GESTION DES MATIÈRES CONTAMINÉES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS .....	184
5.3.1.	Gestion des déchets .....	185
5.3.2.	Activités hors site .....	185
5.3.3.	Activités sur le site .....	188
5.4.	REVITALISATION DES COLLECTIVITÉS ET ENGAGEMENT DES PARTIES PRENANTES .....	190
5.4.1.	Conséquences socio-économiques .....	191
5.4.2.	Revitalisation .....	192
5.4.3.	Engagement des parties prenantes et communication avec celles-ci .....	192
5.5.	OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS .....	194
6.	INTERVENTION DE L'AIEA APRÈS L'ACCIDENT .....	198
6.1.	ACTIVITÉS DE L'AIEA .....	198
6.1.1.	Activités initiales .....	198
6.1.2.	Missions de l'AIEA au Japon .....	200
6.1.3.	Conférence ministérielle de l'AIEA sur la sûreté nucléaire .....	201

6.1.4.	Le plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire.....	203
6.1.5.	Coopération avec la préfecture de Fukushima .....	204
6.1.6.	Conférence ministérielle de Fukushima sur la sûreté nucléaire.....	205
6.2.	RÉUNIONS DES PARTIES CONTRACTANTES À LA CONVENTION .....	
	SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE .....	206
6.2.1.	Réunion extraordinaire des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire .....	206
6.2.2.	Sixième réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire .....	207
6.2.3.	Conférence diplomatique et Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire .....	207
	RÉFÉRENCES .....	209
	ABRÉVIATIONS ET SIGLES .....	231
	PERSONNES AYANT COLLABORÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN .....	233
	GRUPE CONSULTATIF TECHNIQUE INTERNATIONAL .....	244
	RÉUNIONS .....	245
	NOTE CONCERNANT LE DROIT D'AUTEUR .....	247
	NOTE DE L'ÉDITEUR .....	248



# L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

## RÉSUMÉ

Le Grand séisme de l'est du Japon s'est produit le 11 mars 2011. Il a été provoqué par la libération soudaine d'énergie à l'interface où la plaque tectonique du Pacifique s'enfonce sous la plaque tectonique nord-américaine. Une section de la croûte terrestre mesurant, d'après les estimations, environ 500 km de long et 200 km de large, s'est brisée en provoquant un violent séisme de magnitude 9 et un tsunami qui s'est abattu sur une grande partie des côtes japonaises, et notamment la côte nord-est, où plusieurs vagues ont atteint une hauteur de plus de dix mètres. Le séisme et le tsunami ont causé de grandes pertes en vies humaines et des dévastations étendues au Japon. Plus de 15 000 personnes ont été tuées, plus de 6 000 blessées et, au moment de l'établissement du présent rapport<sup>1</sup>, environ 2 500 personnes étaient toujours portées disparues. Les bâtiments et l'infrastructure ont subi des dommages considérables, en particulier le long de la côte nord-est du Japon.

À la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, exploitée par la Compagnie d'électricité de Tokyo (TEPCO), le séisme a endommagé les lignes d'alimentation électrique du site et le tsunami a détruit une grande partie de l'infrastructure opérationnelle et de sûreté sur le site. Leur effet combiné a entraîné la perte des alimentations électriques hors site et sur le site. Il en est résulté une perte de la fonction de refroidissement dans les trois tranches en service<sup>2</sup> et les piscines d'entreposage du combustible usé. Les quatre autres centrales nucléaires<sup>3</sup> situées le long de la côte ont aussi été touchées, à des degrés différents, par le séisme et le tsunami. Toutefois, toutes les tranches en service dans ces centrales ont été mises à l'arrêt en toute sécurité.

Malgré les efforts déployés par les opérateurs à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, le cœur des réacteurs dans les tranches 1 à 3 a surchauffé, le combustible nucléaire a fondu et les trois cuves de confinement se sont rompues. De l'hydrogène a été libéré à partir des cuves sous pression des réacteurs, ce qui a entraîné, à l'intérieur des bâtiments des réacteurs des tranches 1, 3 et 4, des explosions qui ont endommagé les structures et les équipements et blessé des membres du personnel. Des radionucléides ont été relâchés par la centrale dans l'atmosphère et se sont déposés à la surface du sol et de l'océan. Il y a eu aussi des rejets directs dans l'océan.

Les personnes vivant dans un rayon de 20 km autour du site et dans d'autres zones désignées ont été évacuées, et celles qui se trouvaient dans un rayon de 20 à 30 km ont reçu pour instructions de se mettre à l'abri avant qu'on leur conseille, ultérieurement, d'évacuer volontairement. Des restrictions ont été imposées sur la distribution et la consommation d'aliments et la consommation d'eau de boisson. Au moment de l'établissement du présent rapport, de nombreuses personnes vivaient toujours hors des zones d'où elles avaient été évacuées.

---

<sup>1</sup> Mars 2015. Dans certains cas, des informations allant jusqu'en juin 2015 étaient disponibles et ont été incluses lorsque cela était possible.

<sup>2</sup> Les tranches 1, 2 et 3, sur les six que compte la centrale de Fukushima Daiichi, fonctionnaient au moment de l'accident, les tranches 4, 5 et 6 étant en arrêt programmé.

<sup>3</sup> Centrales nucléaires d'Higashidori, d'Onagawa, de Fukushima Daini et de Tokai Daini.

Une fois stabilisé l'état des réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi<sup>4</sup>, des travaux ont été entrepris en vue d'en préparer le déclassement à terme. Les efforts de relèvement dans les zones touchées par l'accident, y compris la remédiation et la revitalisation des collectivités et de l'infrastructure, ont débuté en 2011.

Immédiatement après l'accident, l'AIEA s'est acquittée de ses fonctions en matière d'intervention d'urgence. Elle a activé son Système des incidents et des urgences, coordonné les interventions interorganisations et organisé plusieurs séances d'information pour les États Membres et les médias.

Le Directeur général s'est rendu immédiatement au Japon et l'AIEA y a envoyé plusieurs missions, dont une mission internationale de recherche d'informations et des missions d'examen par des pairs en vue du déclassement et de la remédiation.

En juin 2011, l'AIEA a organisé une Conférence ministérielle internationale sur la sûreté nucléaire qui a conduit à l'adoption d'une déclaration ministérielle sur la sûreté nucléaire. Celle-ci présentait plusieurs mesures destinées à améliorer encore la sûreté nucléaire, la préparation des interventions d'urgence et la radioprotection des personnes et de l'environnement à travers le monde. Les États Membres de l'AIEA s'y engageaient fermement à veiller à l'application de ces dernières.

Dans la déclaration ministérielle, le Directeur général était par ailleurs prié d'élaborer un projet de Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire (le Plan d'action)<sup>5</sup>, en consultation avec les États Membres. Ce plan, qui définit un programme de travail destiné à renforcer le cadre mondial de sûreté nucléaire, a été approuvé à l'unanimité par la Conférence générale de l'AIEA à sa 55<sup>e</sup> session ordinaire, en 2011.

L'AIEA a aussi mené des activités de coopération à Fukushima en vertu d'un mémorandum de coopération qu'elle avait conclu avec la préfecture de Fukushima. Celui-ci posait les fondements d'une coopération dans les domaines suivants : contrôle radiologique et remédiation, santé humaine et préparation et conduite des interventions d'urgence.

L'AIEA a aussi animé et organisé plusieurs conférences internationales et réunions de ses États Membres et des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire. Nombre de ces activités se sont déroulées dans le cadre du Plan d'action.

Depuis l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, il y a eu un grand nombre d'analyses de ses causes et conséquences, ainsi que des études détaillées de ses répercussions sur la sûreté nucléaire, menées par des États Membres de l'AIEA et des organisations internationales ainsi que par des États parties à des instruments internationaux sur la sûreté nucléaire, en particulier la Convention sur la sûreté nucléaire. Une réunion extraordinaire des

---

<sup>4</sup> Le 16 décembre 2011, le Bureau gouvernement-TEPCO chargé d'assurer une intervention intégrée a annoncé que les conditions voulues pour un « état d'arrêt à froid » avaient été réunies dans les tranches 1 à 3. À l'époque, le gouvernement japonais a donné à l'expression « état d'arrêt à froid » une définition spécifique pour la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Sa définition diffère de celle employée dans la terminologie de l'AIEA et d'autres.

<sup>5</sup> Ce plan d'action définissait un programme de travail pour renforcer le cadre mondial de sûreté nucléaire. Il consiste en 12 mesures principales axées sur les évaluations de la sûreté ; les examens par des pairs de l'AIEA ; la préparation et la conduite des interventions d'urgence ; les organismes nationaux de réglementation ; les organismes exploitants ; les normes de sûreté de l'AIEA ; le cadre juridique international ; les États Membres qui envisagent de lancer un programme électronucléaire ; le renforcement des capacités ; la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ; la communication et la diffusion d'informations ; et la recherche-développement. Pour plus de détails, voir la section 6.1.

Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire s'est tenue en août 2012, avec pour objectif d'examiner les premières analyses de l'accident et l'efficacité de cette convention et d'en débattre.

À la sixième réunion d'examen, en mars-avril 2014, les Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire ont fait rapport sur la mise en œuvre de mesures de mise à niveau de la sûreté, notamment les suivantes : application de nouveaux moyens permettant de résister à une panne prolongée de l'alimentation électrique et du système de refroidissement, consolidation des systèmes d'alimentation électrique pour améliorer la fiabilité, réévaluation des aléas naturels externes auxquels les sites sont exposés et des événements affectant les centrales à plusieurs tranches, amélioration des centres de crise sur site et hors site pour assurer une protection contre les événements externes extrêmes et les risques radiologiques, renforcement des mesures destinées à maintenir l'intégrité du confinement, et enfin amélioration des dispositions et des directives sur la gestion des accidents graves.

En février 2015, au cours d'une conférence diplomatique organisée à l'initiative du Directeur général de l'AIEA, les Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire ont adopté la Déclaration sur la sûreté nucléaire qui énonce des principes visant à atteindre le troisième objectif de la convention, à savoir prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et atténuer ces conséquences au cas où de tels accidents se produiraient.

## RAPPORT SUR L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

À la session de la Conférence générale de l'AIEA tenue en septembre 2012, le Directeur général a annoncé que l'AIEA élaborerait un rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi. Il a indiqué ultérieurement que celui-ci constituerait « une évaluation faisant autorité, factuelle et équilibrée des causes et des conséquences de l'accident ainsi que des enseignements qui en ont été tirés ».

Le rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi est le fruit d'un vaste effort déployé en collaboration au niveau international, auquel ont participé cinq groupes de travail avec quelque 180 experts de 42 États Membres (dotés ou non de programmes électronucléaires) et de plusieurs organismes internationaux. Une large représentativité pour ce qui est de l'expérience et des connaissances a ainsi été assurée. Un groupe consultatif technique international a donné des avis sur des questions techniques et scientifiques. Un groupe restreint, composé de hauts fonctionnaires de l'AIEA, a été créé pour fournir des orientations et faciliter la coordination et l'examen du rapport. Des mécanismes internes et externes supplémentaires ont également été mis en place.

Le présent rapport du Directeur général se compose d'un résumé et d'un rapport de synthèse. Il s'inspire des cinq volumes techniques détaillés établis par des experts internationaux et des contributions des nombreux experts et organismes internationaux participants. Il fournit une description de l'accident et de ses causes, de son évolution et de ses conséquences sur la base d'une évaluation des données et des informations provenant des nombreuses sources qui étaient disponibles en mars 2015, y compris les résultats des travaux menés dans le cadre de l'application du Plan d'action, et il souligne les principales observations qui ont été faites et les principaux enseignements qui ont été tirés. D'importantes quantités de données ont été fournies par le gouvernement japonais et d'autres organismes du Japon.

## CONSIDÉRATIONS DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

### *Vulnérabilité de la centrale aux événements externes*

Le séisme du 11 mars 2011 a causé des mouvements vibratoires du sol qui ont secoué les structures, systèmes et composants de la centrale. Il a été suivi par une série de vagues de tsunami, dont l'une a inondé le site. Tant les mouvements sismiques du sol que les hauteurs de vagues de tsunami enregistrés ont largement dépassé les hypothèses de risques qui avaient été formulées lors de la conception initiale de la centrale. Le séisme et le tsunami associé ont eu des effets préjudiciables sur plusieurs tranches de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

Le risque sismique et les vagues de tsunami pris en compte dans la conception initiale étaient évalués principalement sur la base de données historiques sur les séismes et d'informations concernant les tsunamis récents au Japon. Cette évaluation initiale ne tenait pas suffisamment compte des critères tectoniques et géologiques et aucune réévaluation sur la base de ces derniers n'a été entreprise.

Avant le séisme, la Fosse du Japon était classée comme zone de subduction avec une fréquence élevée de séismes de magnitude 8 ; un séisme de magnitude 9 au large de la préfecture de Fukushima n'était pas considéré comme crédible par les scientifiques japonais. Pourtant, des magnitudes similaires ou plus élevées avaient été enregistrées dans différentes régions ayant des environnements tectoniques similaires au cours des quelques décennies précédentes.

Il ne semble pas que les principales caractéristiques de sûreté de la centrale aient été affectées par les mouvements vibratoires du sol générés par le séisme du 11 mars 2011. Cela s'explique par l'approche prudente retenue pour la conception et la construction des centrales nucléaires au Japon face aux séismes et qui aboutit à des centrales ayant des marges de sûreté suffisantes. Toutefois, la conception initiale ne prévoyait pas de marges de sûreté comparables pour les phénomènes externes extrêmes d'inondation, comme les tsunamis.

La vulnérabilité de la centrale de Fukushima Daiichi aux dangers externes n'avait pas été réévaluée de manière systématique et approfondie pendant sa vie utile. Au moment de l'accident, il n'y avait pas au Japon de prescription réglementaire concernant de telles réévaluations, et les réglementations et lignes directrices existantes ne tenaient pas suffisamment compte de l'expérience d'exploitation nationale et internationale pertinente. Les lignes directrices réglementaires au Japon concernant les méthodes de prise en compte des effets d'événements associés aux séismes, comme les tsunamis, étaient générales et brèves et ne contenaient pas de critères spécifiques ou d'orientations détaillées.

Avant l'accident, l'exploitant avait procédé à certaines réévaluations des niveaux d'inondation liés aux tsunamis extrêmes, en appliquant une méthodologie consensuelle élaborée au Japon en 2002, qui avaient abouti à des valeurs plus élevées que les estimations de la base de conception initiale. Quelques mesures compensatoires avaient donc été prises, mais elles se sont avérées insuffisantes au moment de l'accident.

En outre, l'exploitant avait fait, avant l'accident, plusieurs calculs expérimentaux en utilisant des modèles de sources de vagues ou des méthodologies qui allaient au-delà de la méthodologie consensuelle. Ainsi, un calcul expérimental avec le modèle de source proposé par le Centre japonais de promotion de la recherche sur les séismes en 2002, qui utilisait les

informations les plus récentes et appliquait une approche différente dans ses scénarios, prévoyait un tsunami considérablement plus fort que ceux de la conception initiale et des estimations faites dans les réévaluations précédentes. Au moment de l'accident, d'autres évaluations étaient en cours, mais dans l'intervalle, aucune autre mesure compensatoire n'avait été prise. Les valeurs estimées étaient similaires aux niveaux d'inondation enregistrés en mars 2011.

D'après l'expérience d'exploitation dans le monde, il y a eu des cas où les aléas naturels ont été au-delà de ce qui était prévu dans la base de conception d'une centrale nucléaire. Plus particulièrement, l'expérience tirée de certains de ces événements a démontré la vulnérabilité des systèmes de sûreté aux inondations.

- **L'évaluation des aléas naturels doit être suffisamment prudente. La prise en compte de données essentiellement historiques dans la base de conception des centrales nucléaires n'est pas suffisante pour caractériser les risques d'aléas naturels extrêmes. Même quand des données détaillées sont disponibles, du fait des périodes d'observation relativement courtes, il subsiste d'importantes incertitudes dans la prévision des aléas naturels.**
- **La sûreté des centrales nucléaires doit être réévaluée périodiquement pour tenir compte du progrès des connaissances, et les mesures correctives ou compensatoires nécessaires doivent être appliquées rapidement.**
- **L'évaluation des aléas naturels doit prendre en compte la possibilité d'une combinaison de plusieurs d'entre eux, survenant soit simultanément, soit successivement, et leurs effets conjugués sur une centrale nucléaire. Elle doit aussi prendre en considération leurs effets sur les différentes tranches d'un site de centrale nucléaire.**
- **Les programmes d'analyse de l'expérience d'exploitation doivent intégrer l'expérience de sources tant nationales qu'internationales. Les améliorations de la sûreté répertoriées dans ces programmes doivent être mises en œuvre rapidement. Il faut réévaluer périodiquement et en toute indépendance la manière dont l'expérience d'exploitation est mise à profit.**

#### *Application du concept de défense en profondeur*

La défense en profondeur est un concept qui a été appliqué pour assurer la sûreté des installations nucléaires depuis les débuts de l'électronucléaire. Son objectif est de compenser les défaillances humaines et matérielles potentielles grâce à plusieurs niveaux de protection. La défense est assurée par des moyens multiples et indépendants à chaque niveau de protection.

La conception de la centrale de Fukushima Daiichi intégrait des équipements et systèmes pour les trois premiers niveaux de défense en profondeur : 1) les équipements prévus pour assurer un fonctionnement normal fiable ; 2) les équipements prévus pour remettre la centrale dans un état sûr après un événement anormal ; et 3) les systèmes de sûreté prévus pour gérer les conditions accidentelles. Les bases de conception étaient déduites à partir d'une série de dangers postulés ; toutefois, les risques externes, comme les tsunamis, n'étaient pas pleinement pris en compte. En conséquence, l'inondation résultant du tsunami a simultanément mis à l'épreuve les trois premiers niveaux de défense en profondeur, ce qui a

entraîné des défaillances de cause commune des équipements et systèmes à chacun de ces niveaux.

Les défaillances de cause commune de multiples systèmes de sûreté ont créé dans la centrale des conditions qui n'étaient pas prévues dans la conception. Par conséquent, les moyens de protection destinés à assurer le quatrième niveau de défense en profondeur, à savoir la prévention de la progression des accidents graves et l'atténuation de leurs conséquences, n'étaient pas disponibles pour rétablir le refroidissement du réacteur et maintenir l'intégrité du confinement. La perte totale d'alimentation électrique, le manque d'informations sur les paramètres de sûreté pertinents dû à l'indisponibilité des instruments nécessaires, la perte des dispositifs de contrôle et l'insuffisance des procédures d'exploitation n'ont pas permis d'arrêter la progression de l'accident et d'en limiter les conséquences.

Le fait qu'il n'y avait pas de moyens de protection suffisants à chaque niveau de défense en profondeur a entraîné de graves dommages dans les tranches 1, 2 et 3 et des rejets de matières radioactives importants depuis ces mêmes tranches.

- **Le concept de défense en profondeur reste valide, mais son application doit être renforcée à tous les niveaux par une indépendance, une redondance, une diversité et une protection contre les dangers externes et internes adéquates. Il faut se concentrer non seulement sur la prévention des accidents, mais aussi sur l'amélioration des mesures d'atténuation des conséquences.**
- **Les systèmes de contrôle-commande doivent rester opérationnels pendant les accidents hors dimensionnement pour que l'on puisse surveiller les paramètres de sûreté essentiels et pour faciliter les opérations.**

#### *Évaluation de l'incapacité de remplir des fonctions de sûreté fondamentales*

Les trois fonctions de sûreté fondamentales sont le contrôle de la réactivité dans le combustible nucléaire ; l'évacuation de la chaleur du cœur du réacteur et de la piscine d'entreposage du combustible usé ; et le confinement des matières radioactives. À la suite du séisme, la première fonction de sûreté fondamentale – le contrôle de la réactivité – a été remplie dans les six tranches de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

La deuxième fonction de sûreté fondamentale – l'évacuation de la chaleur du cœur du réacteur et de la piscine d'entreposage du combustible usé – n'a pas pu être maintenue, car les opérateurs étaient privés de presque tous les moyens de contrôle sur les réacteurs des tranches 1, 2 et 3 et sur les piscines d'entreposage du combustible usé du fait que la plupart des systèmes électriques CA et CC ne fonctionnaient plus. La perte de cette deuxième fonction de sûreté fondamentale est due, en partie, à l'incapacité d'utiliser d'autres moyens d'injection d'eau à cause de retards dans la dépressurisation des cuves sous pression des réacteurs. La perte de refroidissement a entraîné une surchauffe et la fusion du combustible dans les réacteurs.

La fonction de confinement a été perdue à la suite de la perte de l'alimentation CA et CC, qui a rendu inopérants les systèmes de refroidissement et empêché les opérateurs d'utiliser le système d'éventage du confinement. L'éventage du confinement était nécessaire pour réduire la pression et prévenir la défaillance de ce dernier. Les opérateurs ont pu éventer les tranches 1 et 3 pour réduire la pression dans les enveloppes de confinement primaire. Toutefois, cela a donné lieu à des rejets radioactifs dans l'environnement. Même si les événements

du confinement des tranches 1 et 3 étaient ouverts, les enveloppes de confinement primaire de ces tranches ont fini par être détériorées. L'éventage du confinement de la tranche 2 n'a pas réussi, et le confinement a lâché, ce qui a provoqué des rejets radioactifs.

- **Des systèmes de refroidissement robustes et fiables pouvant fonctionner en cas aussi bien d'accident de dimensionnement que d'accident hors dimensionnement doivent être en place pour l'évacuation de la chaleur résiduelle.**
- **Il est nécessaire d'assurer une fonction de confinement fiable pour les accidents hors dimensionnement afin d'empêcher des rejets importants de matières radioactives dans l'environnement.**

### *Évaluation des accidents hors dimensionnement et gestion des accidents*

Les analyses de la sûreté faites pendant la procédure d'autorisation de la centrale de Fukushima Daiichi et pendant l'exploitation n'avaient pas pleinement pris en compte la possibilité d'une séquence complexe d'événements pouvant aboutir à un endommagement grave des cœurs des réacteurs. En particulier, elles n'ont pas révélé la vulnérabilité de la centrale à l'inondation et les faiblesses des procédures d'exploitation et des principes directeurs pour la gestion des accidents. Les études probabilistes de sûreté n'ont pas pris en compte la possibilité d'inondation interne, et les hypothèses concernant la performance humaine en matière de gestion des accidents étaient optimistes. En outre, l'organisme de réglementation n'avait imposé que des exigences limitées aux exploitants pour qu'ils envisagent l'éventualité d'accidents graves.

Les exploitants n'étaient pas totalement préparés à la perte d'alimentation électrique et de refroidissement dans plusieurs tranches par suite du tsunami. La TEPCO avait élaboré des principes directeurs pour la gestion des accidents graves, mais ils ne couvraient pas cette combinaison improbable d'événements. Les exploitants n'avaient donc pas reçu une formation appropriée, ni participé à des exercices pertinents concernant les accidents graves, et les équipements dont ils disposaient n'étaient pas adéquats dans la situation dégradée de la centrale.

L'Autorité de réglementation nucléaire (NRA) a été créée en septembre 2012. Elle a élaboré, aux fins de la protection des personnes et de l'environnement, de nouveaux règlements relatifs aux centrales nucléaires, qui sont entrés en vigueur en 2013. Ces règlements ont renforcé les contre-mesures destinées à prévenir la perte simultanée de toutes les fonctions de sûreté due à des causes communes et comportaient une réévaluation de l'impact d'événements externes comme les séismes et les tsunamis. Pour les accidents graves, de nouvelles contre-mesures relatives à l'endommagement du cœur, à l'endommagement de l'enveloppe de confinement et à la diffusion de matières radioactives ont également été adoptées.

- **Il faut procéder à des études probabilistes et déterministes détaillées de sûreté pour confirmer la capacité d'une centrale à résister aux accidents hors dimensionnement pertinents et arriver à la profonde conviction que sa conception est robuste.**
- **Les dispositions en matière de gestion des accidents doivent être détaillées, bien conçues et à jour. Elles doivent être élaborées à partir d'un ensemble complet**

**d'événements initiateurs et d'états de la centrale et aussi prévoir la possibilité d'accidents qui touchent plusieurs tranches d'une même centrale.**

- **La formation, les exercices et les entraînements doivent faire une place aux accidents graves postulés pour que les opérateurs soient aussi bien préparés que possible. Ils doivent notamment inclure l'utilisation simulée des équipements qui seraient effectivement employés pour la gestion d'un accident grave.**

#### *Évaluation de l'efficacité de la réglementation*

La réglementation de la sûreté nucléaire au Japon au moment de l'accident était assurée par plusieurs organismes ayant des rôles et des responsabilités différents et des relations complexes. On ne savait pas exactement quel était l'organisme ayant la responsabilité et les pouvoirs de publier des instructions obligatoires sur la façon de traiter sans retard les problèmes de sûreté.

Le programme d'inspection réglementaire était structuré de façon rigide, ce qui diminuait la capacité de l'organisme de réglementation de vérifier la sûreté aux moments opportuns et de relever les nouveaux problèmes potentiels de sûreté.

Les règlements, principes directeurs et procédures en vigueur au moment de l'accident n'étaient pas pleinement conformes à la pratique internationale dans certains domaines clés, et tout particulièrement en ce qui concerne les examens périodiques de la sûreté, la réévaluation des dangers, la gestion des accidents graves et la culture de sûreté.

- **Pour une supervision réglementaire efficace de la sûreté des installations nucléaires, il est essentiel que l'organisme de réglementation soit indépendant et possède les pouvoirs juridiques et la compétence technique nécessaires, et une solide culture de sûreté.**

#### *Évaluation des facteurs humains et organisationnels*

Avant l'accident, le postulat de base au Japon était que la conception des centrales nucléaires et les mesures de sûreté qui avaient été prises étaient suffisamment solides pour que les centrales résistent à des événements externes de faible probabilité aux conséquences importantes.

En raison de ce postulat selon lequel les centrales nucléaires japonaises étaient sûres, la tendance parmi les organismes et leur personnel était de ne pas mettre en doute le niveau de sûreté. Du fait que les parties prenantes corroboraient ce postulat de base à propos de la robustesse de la conception technique des centrales nucléaires, les améliorations de la sûreté tardaient à être apportées.

L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a montré que, pour mieux déceler les vulnérabilités des centrales, il est nécessaire de suivre une approche intégrée qui tienne compte des interactions complexes entre les personnes, les organismes et la technologie.

- **Pour promouvoir et renforcer la culture de sûreté, il faut que les personnes et les organisations remettent sans cesse en question ou réexaminent en permanence**

**les postulats courants en matière de sûreté nucléaire et les incidences des décisions et des actions pouvant influencer sur la sûreté nucléaire.**

- **Une approche systémique de la sûreté doit prendre en compte les interactions entre les facteurs humains, organisationnels et techniques. Cette approche doit être suivie pendant la totalité du cycle de vie des installations nucléaires.**

## PRÉPARATION ET CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE

### *Intervention initiale au Japon après l'accident*

Au moment de l'accident, des dispositions distinctes étaient en place aux niveaux national et local pour faire face, d'une part, à des situations d'urgence nucléaire et, d'autre part, à des catastrophes naturelles. Il n'y en avait par contre aucune pour faire face à de tels événements survenant simultanément.

Selon les dispositions applicables aux situations d'urgence nucléaire, une fois détectées des conditions défavorables dans une centrale nucléaire (p. ex. perte de l'ensemble des alimentations en CA pendant plus de cinq minutes ou perte de toutes les capacités de refroidissement du réacteur), la centrale enverrait une notification aux autorités locales et nationales. Le gouvernement évaluerait ensuite la situation et déterminerait l'opportunité de la classer comme 'situation d'urgence nucléaire'<sup>6</sup>. Si tel était le cas, la situation d'urgence nucléaire serait décrétée à l'échelle nationale, et les actions protectrices à prendre seraient décidées en fonction des prévisions de doses.

Sur la base d'un rapport de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, le premier ministre a décrété l'état d'urgence nucléaire dans la soirée du 11 mars 2011 et ordonné la mise en œuvre d'actions protectrices en faveur de la population. L'intervention était dirigée au niveau national par le premier ministre et de hauts fonctionnaires de son cabinet à Tokyo.

Il a été extrêmement difficile d'intervenir sur le site du fait des conséquences du séisme et du tsunami et de l'augmentation de l'intensité du rayonnement. Nombre d'actions d'atténuation n'ont pu être mises en œuvre à temps en raison de la perte des alimentations en CA et CC, de la présence d'une énorme quantité de gravats qui a gêné l'application des mesures d'intervention sur le site, des répliques, des alertes à de nouveaux tsunamis et de l'augmentation de l'intensité du rayonnement. Le gouvernement est intervenu dans les décisions concernant l'action d'atténuation à entreprendre sur le site.

L'activation du Centre d'urgence hors site, situé à 5 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, a été rendue difficile en raison des dommages considérables causés aux infrastructures par le séisme et le tsunami. Il a fallu l'évacuer quelques jours plus tard en raison des conditions radiologiques défavorables.

- **Lors de la préparation de l'intervention face à une éventuelle situation d'urgence nucléaire, il est nécessaire d'envisager des situations susceptibles de causer de graves dommages au combustible nucléaire dans le cœur d'un réacteur ou au**

---

<sup>6</sup> Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire, Loi n° 156 de 1999, modifiée en dernier lieu par la Loi n° 118 de 2006, ci-après dénommée Loi sur les situations d'urgence nucléaire.

**combustible utilisé sur le site, y compris celles qui impliquent plusieurs tranches d'une même centrale et pouvant survenir en même temps qu'une catastrophe naturelle.**

- **Le système de gestion des situations d'urgence intervenant en cas d'urgence nucléaire doit clairement définir les rôles et responsabilités de l'organisme exploitant et des autorités locales et nationales. Le système, y compris les interactions entre l'organisme exploitant et les autorités, doit être testé régulièrement au cours d'exercices.**

#### *Protection des membres des équipes d'intervention*

Au moment de l'accident, la législation et les orientations nationales existant au Japon traitaient des mesures à prendre pour protéger les membres des équipes d'intervention, mais uniquement en termes généraux sans entrer suffisamment dans les détails.

Il a fallu faire appel à de nombreux travailleurs de différentes disciplines et de divers organismes et services publics pour appuyer l'intervention d'urgence. Cependant, il n'existait aucune disposition pour intégrer dans celle-ci ceux qui n'avaient pas été désignés avant l'accident.

L'application des dispositions relatives à la protection des travailleurs contre l'exposition aux rayonnements a beaucoup pâti des conditions extrêmes régnant sur le site. Afin de maintenir un niveau acceptable de protection des membres des équipes d'intervention sur le site, il a fallu mettre en œuvre diverses mesures improvisées. La limite de dose pour ceux d'entre eux qui effectuaient des tâches particulières a été temporairement relevée pour qu'il soit possible de continuer à mener les actions d'atténuation nécessaires. La prise en charge médicale des membres des équipes d'intervention a aussi été très perturbée et il a fallu faire des efforts majeurs pour répondre aux besoins de ceux qui travaillaient sur le site.

Des personnes du public, que l'on appellera « bénévoles », se sont portées volontaires pour participer à l'intervention d'urgence hors du site. Les autorités nationales ont publié des orientations sur le type d'activités que ces personnes pouvaient exécuter et sur les mesures à prendre pour les protéger.

- **Il faut désigner les membres des équipes d'intervention en leur confiant des tâches bien spécifiées, quel que soit l'organisme qui les emploie, leur dispenser une formation appropriée et leur assurer une bonne protection pendant une situation d'urgence. Il faut adopter des dispositions pour intégrer dans l'intervention d'urgence d'autres personnes que celles qui auront été désignées au préalable ainsi que les bénévoles qui se porteront volontaires pour prêter assistance.**

#### *Protection du public*

Les dispositions nationales d'urgence au moment de l'accident prévoyaient que les décisions concernant les actions protectrices seraient fondées sur les estimations de la dose au public prévue, qui seraient calculées au moment où une décision s'imposerait à l'aide d'un modèle de prévision de doses – le Système d'information pour la prévision des doses en situation d'urgence environnementale (SPEEDI). Elles ne prévoyaient pas de prendre les décisions

concernant les actions protectrices urgentes en faveur de la population en fonction d'un état prédéfini de telle ou telle centrale. Toutefois, après l'accident, les premières décisions relatives aux actions protectrices furent prises en fonction de l'état de la centrale. Des évaluations du terme source n'ont pas pu être saisies dans le système SPEEDI en raison de la perte des alimentations électriques sur le site.

Les dispositions avant l'accident comprenaient des critères pour la mise à l'abri, l'évacuation et la prophylaxie à l'iode exprimés en tant que dose prévue, mais pas sous la forme de grandeurs mesurables. Aucun critère n'avait été établi pour le relogement.

Les actions protectrices engagées en faveur de la population pendant l'accident ont englobé notamment l'évacuation, la mise à l'abri, la prophylaxie à l'iode (par administration d'iode stable), les restrictions à la consommation de denrées alimentaires et d'eau de boisson, le relogement et la communication d'informations.

L'évacuation de la population dans les environs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a débuté le soir du 11 mars 2011, le rayon de la zone d'évacuation autour de la centrale passant progressivement de 2 à 3 km, puis à 10 km. Dans la soirée du 12 mars, il a été porté à 20 km. De même, le rayon de la zone dans laquelle la population a été priée de se mettre à l'abri est passé de 3-10 km autour de la centrale juste après l'accident à 20-30 km au 15 mars. Dans un rayon de 20-30 km autour de la centrale, la population a reçu l'ordre de se mettre à l'abri jusqu'au 25 mars, date à laquelle le gouvernement a recommandé l'évacuation volontaire. L'administration d'iode stable à des fins prophylactiques n'a pas été organisée uniformément, essentiellement en raison de l'absence de dispositions détaillées.

L'évacuation a été compliquée par les dommages causés par le séisme et le tsunami et les problèmes de communication et de transport qui se sont ensuivis. Il a été aussi très difficile d'évacuer les patients des hôpitaux et des centres de soins dans la zone d'évacuation de 20 km de rayon.

Le 22 avril, la zone d'évacuation de 20 km de rayon a été érigée en 'zone d'accès restreint' où les retours étaient contrôlés. Une 'zone d'évacuation délibérée' a aussi été instituée au-delà de la 'zone d'accès restreint' là où les critères de dose spécifiques pour le relogement pouvaient être dépassés.

Lorsque des radionucléides étaient détectés dans l'environnement, des dispositions ont été prises pour l'application d'actions protectrices dans la zone agricole et de restrictions sur la consommation et la distribution des aliments et sur la consommation d'eau de boisson. En outre, un système de certification a été mis en place pour les aliments et autres produits destinés à l'exportation.

Plusieurs canaux de communication ont été utilisés pour tenir la population informée et répondre à ses préoccupations pendant la situation d'urgence, dont les services de télévision et de radio, l'Internet et des permanences téléphoniques. Les informations en retour reçues du public par le biais de ces services téléphoniques et d'accompagnement psychologique ont fait ressortir le besoin d'informations plus compréhensibles et de documentation supplémentaire.

**— Il faut adopter des dispositions pour permettre de prendre des décisions concernant la mise en œuvre d'actions protectrices urgentes prédéterminées en faveur de la population à partir d'états d'une centrale prédéfinis.**

- **Il faut adopter des dispositions permettant d'étendre les actions protectrices urgentes ou de les modifier en fonction de l'évolution de l'état de la centrale ou des résultats du contrôle radiologique. Il en faut aussi pour permettre d'engager rapidement des actions protectrices à partir des résultats du contrôle radiologique.**
- **Il faut adopter des dispositions pour faire en sorte que les actions protectrices et autres mesures d'intervention dans une situation d'urgence nucléaire fassent plus de bien que de mal. Les décisions à prendre doivent être envisagées sous un angle global pour que cet équilibre soit atteint.**
- **Il faut adopter des dispositions pour aider les décideurs, la population et d'autres personnes (p. ex. le personnel médical) à comprendre les dangers radiologiques que présente pour la santé une situation d'urgence nucléaire afin que les décisions concernant les actions protectrices soient prises en connaissance de cause. Il faut aussi en adopter pour répondre aux préoccupations des populations à l'échelle locale, nationale et internationale.**

*Passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement et analyse de l'intervention*

Des stratégies, lignes directrices, critères et dispositions spécifiques pour le passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement n'ont été élaborés qu'après l'accident de Fukushima Daiichi. À cet effet, les autorités japonaises ont appliqué les dernières recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

Des analyses de l'accident et de l'intervention d'urgence ont été effectuées et présentées sous forme de rapports, y compris ceux publiés par le gouvernement japonais, l'organisme exploitant (TEPCO) et deux comités d'enquête respectivement créés par le gouvernement et le parlement.

Après l'accident, les dispositions nationales en matière de préparation et de conduite des interventions d'urgence au Japon ont été révisées dans de nombreux cas pour tenir compte des résultats de ces analyses et des normes de sûreté de l'AIEA dans ce domaine.

- **Il faut élaborer des dispositions au stade de la préparation permettant de mettre fin aux actions protectrices et autres mesures d'intervention et de passer à la phase de relèvement.**
- **L'analyse en temps utile d'une situation d'urgence et de l'intervention en pareil cas, consistant à tirer des enseignements et à déterminer de possibles améliorations, consolide les dispositions d'urgence.**

## *L'intervention dans le contexte du cadre international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence*

Au moment de l'accident, il existait un solide cadre international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence, comprenant des instruments juridiques internationaux, des normes de sûreté de l'AIEA et des dispositions opérationnelles<sup>7</sup>.

Au moment de l'accident, l'AIEA avait quatre tâches à accomplir face à une situation d'urgence nucléaire ou radiologique : 1) la notification et l'échange d'informations officielles par l'intermédiaire de points de contact officiels ; 2) la communication d'informations à jour, claires et compréhensibles ; 3) la fourniture et la facilitation d'une assistance internationale sur demande ; et 4) la coordination des interventions interorganisations.

De nombreux pays et plusieurs organisations internationales ont participé à l'intervention internationale après l'accident.

L'AIEA a assuré la liaison avec le point de contact officiel au Japon, a communiqué des informations sur la situation d'urgence au fur et à mesure de son évolution et a tenu informés les États, les organisations internationales pertinentes et le public. La communication avec le point de contact officiel au Japon dans les premiers temps de l'intervention d'urgence a été difficile. La visite au Japon du Directeur général de l'AIEA et l'installation ultérieure d'agents de liaison à Tokyo ont amélioré la communication entre l'AIEA et le point de contact. L'AIEA a aussi envoyé des missions d'experts au Japon et coordonné l'intervention interorganisations.

Divers États<sup>8</sup> ont entrepris ou recommandé différentes actions protectrices en faveur de leurs ressortissants au Japon pour faire face à l'accident. Ces différences n'ont en général pas été bien expliquées au public, suscitant occasionnellement une certaine confusion et des inquiétudes.

Les organisations concernées participant au Comité interorganisations des situations d'urgence nucléaire et radiologique ont régulièrement échangé des informations. Des communiqués de presse conjoints ont aussi été publiés.

- **La mise en œuvre des arrangements internationaux relatifs à la notification et à l'assistance doit être renforcée.**
- **Il faut améliorer les processus de consultation et de partage des informations sur les actions protectrices et autres mesures d'intervention entre États.**

---

<sup>7</sup> Les principaux instruments juridiques internationaux sont la Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire et la Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique. Les normes internationales de sûreté applicables à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence au moment de l'accident étaient le n° GS-R-2 et le n° GS-G-2.1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA. Le n° 115 de la collection Sécurité de l'AIEA comprenait aussi des parties traitant de la préparation et de la conduite des interventions d'urgence. Parmi les dispositions opérationnelles internationales figuraient le Manuel des opérations techniques de notification et d'assistance en cas d'urgence (ENATOM), le Réseau d'intervention et d'assistance (RANET) de l'AIEA et le Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales (JPLAN).

<sup>8</sup> La responsabilité de la préparation et de l'intervention dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique incombe en premier lieu à l'État, tout comme celle de la protection de la vie humaine, de la santé, des biens et de l'environnement.

## CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES

### *Radioactivité dans l'environnement*

L'accident a entraîné des rejets de radionucléides dans l'environnement. Des évaluations de ces rejets ont été effectuées par de nombreuses organisations avec différents modèles. La plupart des rejets dans l'atmosphère ont été emportés vers l'est par les vents dominants, et les radionucléides se sont déposés et dispersés dans l'océan Pacifique Nord. Il a été difficile de lever les incertitudes dans les estimations de la quantité et de la composition des substances radioactives, notamment parce qu'il n'y avait pas de données de suivi sur le dépôt, à la surface de l'océan, des substances rejetées dans l'atmosphère.

La direction du vent étant variable, une partie relativement faible de ces substances s'est déposée sur le sol, essentiellement dans une direction nord-ouest depuis la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. La présence et l'activité des radionucléides déposés dans l'environnement terrestre ont été contrôlées et caractérisées. L'activité des radionucléides mesurée diminue au cours du temps en raison des processus de décroissance physique et de transport dans l'environnement ainsi que des opérations d'assainissement.

En plus des radionucléides qui ont pénétré dans l'océan à partir de l'atmosphère, des rejets et des effluents liquides émanant de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi se sont déversés directement dans la mer devant le site. Le mouvement précis des radionucléides dans l'océan est difficile à évaluer par des mesures uniquement, mais un certain nombre de modèles de transport océanique ont été utilisés pour l'estimation de leur dispersion dans l'océan.

Des radionucléides tels que l'iode 131, le césium 134 et le césium 137 ont été rejetés et retrouvés dans l'eau de boisson, les aliments et certains produits non comestibles. Des restrictions destinées à empêcher la consommation de ces denrées ont été établies par les autorités japonaises après l'accident.

**— Dans le cas d'un rejet accidentel de substances radioactives dans l'environnement, il est nécessaire de quantifier et de caractériser rapidement le volume et la composition du rejet. En cas de rejets importants, un programme complet et coordonné de contrôle radiologique de l'environnement à long terme est requis pour déterminer la nature et l'étendue de l'impact radiologique sur l'environnement aux niveaux local, régional et mondial.**

### *Protection des personnes contre une radioexposition*

Après l'accident, les autorités japonaises ont appliqué des niveaux de référence de dose prudents figurant dans les recommandations récentes de la CIPR<sup>9</sup>. L'application de certaines

---

<sup>9</sup> Des recommandations internationales sur la radioprotection sont publiées par la CIPR. Elles sont prises en compte dans l'établissement des normes internationales de sûreté, y compris les normes de radioprotection (Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements (Normes fondamentales internationales ou NFI)), qui ont été élaborées et établies par plusieurs organisations internationales sous les auspices de l'AIEA. Les NFI sont utilisées dans le monde entier pour l'élaboration des réglementations nationales de protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs potentiels des rayonnements ionisants. Les recommandations de la CIPR de 2007 ont fourni un cadre révisé pour la radioprotection. Elles ont consisté à instituer des niveaux de référence pour les stratégies de protection. Au moment de l'accident, les NFI étaient en cours de révision, entre autres pour tenir compte de ces recommandations.

mesures et actions protectrices s'est révélée difficile pour les autorités qui en étaient responsables et très éprouvante pour les populations touchées.

Il y avait des différences entre les critères et les principes directeurs nationaux et internationaux de contrôle de l'eau de boisson, des aliments et des produits de consommation non comestibles à plus long terme après l'accident, une fois passée la phase d'urgence.

- **Les organismes internationaux pertinents doivent expliquer les principes et les critères de radioprotection d'une manière compréhensible pour les non-initiés, afin que les décideurs et le public en comprennent mieux l'application. Certaines mesures de protection de longue durée ayant déstabilisé les populations touchées, il est nécessaire d'élaborer une meilleure stratégie de communication pour justifier ces mesures et actions auprès de toutes les parties prenantes, y compris la population.**
- **La prise de décisions prudentes en rapport avec l'activité spécifique et les concentrations d'activité dans les produits de consommation et l'activité des dépôts a entraîné des restrictions prolongées avec les difficultés qui en découlent. Dans une situation d'exposition prolongée, il est utile de veiller à la cohérence interne des normes internationales d'une part et à la cohérence entre les normes internationales et nationales d'autre part, particulièrement celles qui sont afférentes à l'eau de boisson, à l'alimentation, aux produits de consommation non comestibles et à l'activité des dépôts sur le sol.**

### *Radioexposition*

À court terme, les principaux facteurs d'exposition du public étaient : 1) l'exposition externe due aux radionucléides présents dans le panache et qui se sont déposés sur le sol ; et 2) l'exposition interne de la thyroïde due à l'incorporation d'iode 131, et l'exposition interne d'autres organes et tissus due essentiellement à l'incorporation de césium 134 et de césium 137. À long terme, le principal facteur d'exposition du public sera l'exposition externe due au dépôt de  $^{137}\text{Cs}$ .

Les premières évaluations des doses de rayonnements étaient basées sur des modèles de contrôle radiologique de l'environnement et d'estimation des doses et ont abouti à des surestimations. Pour les estimations figurant dans le présent rapport, les données de contrôle radiologique individuel communiquées par les autorités locales ont aussi été prises en compte pour fournir des informations plus fiables sur les doses individuelles effectivement reçues et leur distribution. Selon ces estimations, les doses efficaces reçues par les personnes du public étaient faibles, et généralement comparables à la fourchette des doses efficaces reçues du fait des niveaux mondiaux du rayonnement de fond naturel.

Après un accident nucléaire ayant entraîné des rejets d'iode 131 et l'incorporation de celui-ci par les enfants, son absorption par leur thyroïde et les doses ultérieures à cette glande constituent un sérieux sujet de préoccupation. Après l'accident de Fukushima Daiichi, les doses équivalentes à la thyroïde annoncées chez les enfants étaient faibles, parce que l'incorporation d'iode 131 par cette glande était limitée, notamment en raison des restrictions imposées sur l'eau de boisson et les aliments, y compris les légumes feuillus et le lait frais. Il y a des incertitudes en ce qui concerne l'incorporation d'iode immédiatement après l'accident

en raison du manque de données de contrôle radiologique individuel fiables pour cette période.

En décembre 2011, environ 23 000 membres des équipes d'intervention avaient participé aux opérations d'urgence. Les doses efficaces reçues par la plupart d'entre eux étaient inférieures aux limites de doses pour l'exposition professionnelle au Japon. Sur ce nombre, 174 personnes ont dépassé le critère établi initialement pour les membres de ces équipes et 6 ont dépassé le critère de dose efficace temporairement révisé établi pour une situation d'urgence par les autorités japonaises. Il y a eu des défaillances dans la mise en œuvre des prescriptions relatives à la radioprotection professionnelle, y compris pendant les premiers contrôles radiologiques et l'enregistrement des doses de rayonnements reçues par les membres des équipes d'intervention, mais aussi en ce qui concerne la disponibilité et l'utilisation de certains équipements de protection, et la formation connexe.

- **Le contrôle radiologique individuel de groupes représentatifs de personnes du public fournit des informations précieuses pour une estimation fiable des doses de rayonnements, et il doit être combiné avec des mesures de l'environnement et des modèles d'estimation de dose appropriés pour l'évaluation de la dose au public.**
- **Bien que les produits laitiers n'aient pas été la principale voie d'ingestion d'iode radioactif au Japon, il est clair que la méthode la plus importante pour limiter les doses à la thyroïde, particulièrement chez les enfants, consiste à restreindre la consommation de lait frais provenant de vaches au pâturage.**
- **Un système robuste est nécessaire pour le contrôle radiologique et l'enregistrement des doses d'exposition professionnelle, par toutes les voies pertinentes, en particulier celles qui sont dues à l'exposition interne éventuelle des travailleurs pendant des activités de gestion des accidents graves. Il est indispensable qu'un équipement de protection individuel approprié et suffisant soit mis à disposition pour limiter l'exposition des travailleurs pendant les activités d'intervention d'urgence, et que ceux-ci soient suffisamment formés à son utilisation.**

### *Effets sur la santé*

Aucun effet sanitaire radio-induit précoce pouvant être attribué à l'accident n'a été observé chez les travailleurs ou la population.

La période de latence avant l'apparition d'effets sanitaires tardifs dus aux rayonnements pouvant être de plusieurs décennies, il est impossible de sous-estimer la possibilité que de tels effets apparaissent dans une population exposée, en se basant sur des observations faites quelques années après l'exposition. Toutefois, vu les faibles niveaux de doses signalés parmi la population, les conclusions du présent rapport sont conformes à celles du rapport présenté par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) à l'Assemblée générale des Nations Unies<sup>10</sup>. Selon ce rapport, « on ne s'attend pas à une augmentation observable des effets sanitaires radio-induits chez les

---

<sup>10</sup> ORGANISATION DES NATIONS UNIES, Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, (A/68/46), Nations Unies, New York (2013) .

personnes du public exposées et leurs descendants » (constat fait dans le contexte des conséquences sur la santé liées aux « niveaux et effets de l'exposition aux rayonnements due à l'accident nucléaire consécutif au séisme et au tsunami majeurs qui ont frappé l'est du Japon en 2011 »)<sup>11</sup>. L'UNSCEAR a conclu pour le groupe des travailleurs ayant reçu des doses efficaces de 100 mSv ou plus qu'« une augmentation du risque de cancer à l'avenir est probable. Cependant, aucune augmentation observable de l'incidence du cancer dans ce groupe n'est attendue, car il est difficile de confirmer une augmentation aussi faible de l'incidence par rapport aux fluctuations statistiques normales de l'incidence du cancer »<sup>12</sup>.

L'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima a été mise en place pour suivre l'évolution de l'état de santé de la population touchée de la préfecture de Fukushima. Elle vise à détecter et traiter les maladies à un stade précoce, mais aussi à prévenir les maladies liées au mode de vie. Au moment de l'établissement du présent rapport, les enfants sont soumis à une surveillance thyroïdienne intensive dans le cadre de cette enquête. On utilise du matériel très sensible, qui a permis de détecter des anomalies thyroïdiennes asymptomatiques chez un grand nombre d'enfants examinés (lesquelles n'auraient pu être détectées par des moyens cliniques). Il est peu probable que les anomalies relevées dans l'enquête soient associées à une radioexposition consécutive à l'accident ; elles dénotent plus vraisemblablement l'existence à l'état naturel d'anomalies thyroïdiennes chez les enfants de cet âge. L'incidence du cancer de la thyroïde chez les enfants est l'effet sanitaire le plus probable après un accident ayant entraîné des rejets importants d'iode radioactif. Les doses à la thyroïde attribuables à l'accident qui ont été signalées étant généralement faibles, une augmentation des cas de cancer de la thyroïde attribuables à cet accident chez les enfants est improbable. Toutefois, des incertitudes persistaient quant aux doses équivalentes à la thyroïde reçues par les enfants immédiatement après l'accident.

On n'a pas observé d'effets des rayonnements dus à une exposition prénatale et on ne devrait pas en observer, car les doses relevées sont bien inférieures au seuil à partir duquel ces effets peuvent se manifester. Aucun cas d'interruption non volontaire de grossesse attribuable à la situation radiologique n'a été signalé. En ce qui concerne la possibilité que l'exposition des parents aient des effets héréditaires chez leurs descendants, l'UNSCEAR a conclu qu'en général, « bien qu'ayant été démontrée dans des études animales, aucune augmentation de l'incidence des effets héréditaires chez l'homme ne peut actuellement être imputée à l'exposition aux rayonnements »<sup>13</sup>.

Des troubles psychologiques dans la population touchée par l'accident nucléaire ont été relatés. Certaines de ces personnes ayant souffert des effets combinés d'un séisme majeur, d'un tsunami dévastateur et de l'accident, il est difficile d'évaluer dans quelle mesure ces effets pouvaient être attribués exclusivement à l'accident nucléaire. L'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima, qui a notamment porté sur la santé mentale et le mode de vie, révèle des problèmes psychologiques associés, tels qu'une hausse de l'anxiété et de l'état de stress post-traumatique, dans certains groupes vulnérables de la population touchée. L'UNSCEAR a estimé que l'effet sanitaire le plus important [de l'accident], qui affecte le bien-être psychologique et social, est lié à l'impact considérable du séisme, du tsunami et de

---

<sup>11</sup> En 2013, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a aussi publié une évaluation du risque sanitaire à partir d'une estimation préliminaire des doses, dont les résultats sont présentés dans le présent rapport.

<sup>12</sup> Voir la note 10.

<sup>13</sup> ORGANISATION DES NATIONS UNIES, Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, A/67/46, Nations Unies, New York (2012).

l'accident nucléaire, ainsi qu'à la peur et à la déconsidération associées au risque perçu d'exposition aux rayonnements ionisants<sup>14</sup>.

- **Il faut présenter clairement aux parties prenantes les risques de radioexposition et l'attribution d'effets sanitaires aux rayonnements, en indiquant sans ambiguïté qu'une quelconque augmentation de la présence d'effets sur la santé humaine n'est pas attribuable à la radioexposition si les niveaux de l'exposition sont similaires aux niveaux mondiaux moyens de rayonnement de fond.**
- **Après un accident nucléaire, les enquêtes sur la santé sont très importantes et utiles, mais elles ne devraient pas être interprétées comme des études épidémiologiques. Leurs résultats ont pour objet de fournir des informations à l'appui de l'assistance médicale apportée aux populations touchées.**
- **Des orientations en matière de radioprotection sont nécessaires pour que soient prises en considération les conséquences psychologiques chez des personnes des populations touchées après des accidents radiologiques. Un groupe de travail de la CIPR a recommandé la recherche de stratégies visant à atténuer les conséquences psychologiques graves découlant d'accidents radiologiques<sup>15</sup>.**
- **Il faut communiquer de manière compréhensible et en temps voulu des informations factuelles sur les effets des rayonnements aux habitants des zones touchées afin de leur permettre de comprendre les stratégies de protection, d'apaiser leurs craintes et de soutenir les initiatives de protection qu'elles ont prises.**

#### *Conséquences radiologiques pour le biote non humain*

Aucun cas observé d'effet radio-induit direct chez les plantes et les animaux n'a été signalé, bien que des études d'observation limitées aient été menées immédiatement après l'accident. Les méthodes disponibles d'évaluation des conséquences radiologiques sont certes incomplètes, mais sur la base des données d'expérience antérieures et des niveaux de radionucléides présents dans l'environnement, il est improbable que l'accident ait des conséquences radiologiques majeures sur les populations du biote ou les écosystèmes.

- **Pendant une phase d'urgence, quelle qu'elle soit, la priorité doit être la protection des personnes. Les doses au biote ne peuvent pas être contrôlées et pourraient éventuellement être importantes pour certains organismes. Il faut consolider les connaissances sur les impacts de l'exposition aux rayonnements sur le biote non humain grâce à une meilleure méthode d'évaluation des effets radio-induits sur les populations du biote et les écosystèmes, et une meilleure compréhension de ces effets. À la suite d'un rejet important de radionucléides dans l'environnement, il faut adopter une perspective intégrée pour assurer la durabilité de l'agriculture, de la foresterie, de la pêche et du tourisme, mais aussi de l'utilisation des ressources naturelles.**

---

<sup>14</sup> ORGANISATION NATIONS UNIES, Sources, effets et risques des rayonnements ionisants, Rapport de l'UNSCEAR pour 2013, Volume I, Annexe scientifique A : Niveaux et effets de l'exposition aux rayonnements ionisants due à l'accident consécutif au séisme et au tsunami majeurs qui ont frappé l'est du Japon en 2011, Comité scientifique pour l'études des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), Nations Unies, New York (2014).

<sup>15</sup> COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis-à-vis the ICRP System of Radiological Protection, CIPR, Ottawa (2012).

## RELÈVEMENT APRÈS L'ACCIDENT

### *Remédiation des zones hors site touchées par l'accident*

L'objectif à long terme du relèvement après l'accident<sup>16</sup> est de rétablir une situation acceptable pour que la société puisse pleinement fonctionner dans les zones touchées. Il faut tenir compte des opérations de remédiation<sup>17</sup> menées dans les zones touchées par l'accident pour réduire les doses de rayonnements, conformément aux niveaux de référence adoptés. En préparant le retour des évacués, il faut prendre en considération des facteurs comme la réhabilitation des infrastructures ainsi que la viabilité de la collectivité et son activité économique sur la durée.

Avant l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi, il n'existait au Japon aucune politique ni stratégie pour la remédiation après un accident et il est devenu nécessaire d'en élaborer après coup. La politique de remédiation a été promulguée en août 2011 par le gouvernement japonais<sup>18</sup>. Elle a assigné des responsabilités aux autorités nationales et locales, à l'exploitant et à la population et a mis en place les arrangements institutionnels nécessaires à l'exécution d'un programme de travail coordonné.

Une stratégie de remédiation a été élaborée et sa mise en œuvre a commencé. Elle précise que les zones prioritaires pour la remédiation sont les zones d'habitation, y compris les bâtiments et les jardins, les terres agricoles, les routes et les infrastructures, l'accent étant mis sur la réduction des expositions externes.

La principale voie d'exposition est la dose externe due aux radionucléides déposés sur le sol et autres surfaces. La stratégie de remédiation se concentre donc sur les activités de décontamination destinées à réduire les niveaux de radiocésium observés dans les zones prioritaires, afin de réduire ainsi la possibilité de telles expositions. Les doses internes continuent d'être contrôlées au moyen de restrictions sur les aliments et d'activités de remédiation menées sur les terres agricoles.

Après l'accident, les autorités japonaises ont adopté un 'niveau de référence' comme niveau de dose à atteindre pour l'ensemble de la stratégie de remédiation. Ce niveau était conforme aux valeurs seuils spécifiées dans des orientations internationales. L'application d'un niveau de référence bas a pour effet d'accroître le volume des matières contaminées générées par les activités de remédiation, ce qui augmente les coûts et met davantage à contribution des ressources limitées. L'expérience acquise au Japon pourrait servir à élaborer des orientations pratiques sur l'application des normes internationales de sûreté dans des situations de relèvement après un accident.

---

<sup>16</sup> Le relèvement après l'accident comprend : la remédiation des zones touchées par l'accident ; la stabilisation des installations endommagées sur le site et les préparatifs en vue du déclassement ; la gestion des matières contaminées et des déchets radioactifs résultant de ces activités ; et la revitalisation des collectivités et l'engagement des parties prenantes.

<sup>17</sup> Par remédiation, on entend toutes les mesures qui peuvent être mises en œuvre pour réduire l'exposition à des rayonnements due à une contamination existante de terres en agissant sur la contamination elle-même (la source) ou sur les voies d'exposition des êtres humains.

<sup>18</sup> 'Loi sur les mesures spéciales concernant le traitement de la pollution de l'environnement par des matières radioactives rejetées pendant l'accident de la centrale nucléaire associée au district du Tohoku en marge du séisme survenu le 11 mars 2011 dans l'océan Pacifique', Loi n° 110, 2011.

Deux catégories de zones contaminées ont été définies à partir des doses annuelles supplémentaires estimées à l'automne 2011. Le gouvernement a été chargé de formuler et d'exécuter des plans de remédiation dans la première zone (la 'zone de décontamination spéciale') – dans un rayon de 20 km autour du site de Fukushima Daiichi et dans des emplacements où des doses annuelles supplémentaires provenant de la contamination des sols devaient dépasser 20 mSv dans l'année suivant l'accident. C'est aux municipalités qu'il incombait d'exécuter les activités de remédiation dans l'autre zone (la 'zone d'étude intensive de la contamination'), où, selon les prévisions, les doses annuelles supplémentaires dépasseraient 1 mSv tout en restant inférieures à 20 mSv. Des objectifs précis de réduction des doses ont été fixés, dont un objectif à long terme de dose annuelle supplémentaire inférieure ou égale à 1 mSv.

- **Une planification en amont des activités de relèvement après un accident est nécessaire pour améliorer la prise de décisions dans la situation de stress qui suit immédiatement un tel événement. Il faut avoir élaboré à l'avance des stratégies et mesures nationales pour le relèvement afin de pouvoir mettre en place un programme de relèvement global efficace et approprié en cas d'accident nucléaire. Ces stratégies et mesures doivent inclure l'établissement d'un cadre législatif et réglementaire ; des stratégies génériques de remédiation et des critères pour les doses résiduelles de rayonnement et les niveaux de contamination ; un plan de stabilisation et de déclasserement des installations nucléaires endommagées ; et une stratégie générique de gestion des grandes quantités de matières contaminées et de déchets radioactifs.**
- **Les stratégies de remédiation doivent prendre en considération l'efficacité et l'applicabilité de chaque mesure ainsi que le volume des matières contaminées que générera le processus de remédiation.**
- **Dans le cadre de la stratégie de remédiation, l'exécution de tests et de contrôles rigoureux des denrées alimentaires est nécessaire pour prévenir ou réduire au minimum les doses par ingestion.**
- **De nouvelles orientations internationales sur la mise en application des normes de sûreté en radioprotection dans une situation de relèvement post-accidentelle sont nécessaires.**

#### *Stabilisation sur le site et préparatifs en vue du déclasserement*

Un plan stratégique complet de haut niveau a été élaboré conjointement par la TEPCO et les instances gouvernementales japonaises compétentes en vue de la stabilisation et du déclasserement de la centrale nucléaire endommagée. Il a d'abord été publié en décembre 2011, puis révisé pour qu'il soit tenu compte de l'expérience acquise et d'une meilleure compréhension de l'état de la centrale nucléaire endommagée, ainsi que de l'ampleur des futurs enjeux. Il prend en considération la nature complexe des travaux à mener sur le site et répertorie l'approche adoptée pour pourvoir à la sûreté, les mesures en vue du déclasserement, les systèmes et conditions propres à faciliter les travaux et les besoins en recherche-développement.

Au moment de la rédaction du présent rapport, des fonctions de sûreté avaient été rétablies et des structures, systèmes et composants étaient en place pour maintenir de manière fiable des

conditions stables. Toutefois, il était toujours nécessaire de contrôler les infiltrations d'eaux souterraines dans les bâtiments des réacteurs endommagés et contaminés. L'eau ainsi contaminée subissait un traitement destiné à en extraire les radionucléides dans la mesure du possible et était entreposée dans plus de 800 citernes. Il faut étudier des solutions plus durables, en envisageant toutes les options, y compris la reprise éventuelle des rejets contrôlés en mer. L'adoption d'une décision finale nécessitera la participation des parties prenantes concernées et la prise en compte de la situation socio-économique dans le processus de consultation, ainsi que l'exécution d'un programme détaillé de contrôle radiologique.

Des plans ont été élaborés pour la gestion du combustible usé et des débris de combustible, et le combustible usé présent dans les piscines d'entreposage a commencé à en être retiré<sup>19</sup>. Un modèle conceptuel pour les futures activités d'enlèvement des débris de combustible, tenant compte des nombreuses étapes préliminaires nécessaires, y compris une confirmation visuelle de la configuration et de la composition de ces débris, a été élaboré. En raison des niveaux de doses de rayonnements élevés dans les réacteurs endommagés, une telle confirmation n'avait pas pu être donnée au moment de la rédaction du présent rapport.

Les autorités japonaises ont estimé que les activités de déclassement prendront probablement entre 30 et 40 ans avant d'être achevées. Les décisions concernant l'état final de la centrale et du site feront l'objet d'autres analyses et discussions.

- **Après un accident, il est essentiel pour le relèvement du site d'établir un plan stratégique afin de maintenir des conditions stables sur le long terme et de déclasser les installations endommagées par l'accident. Ce plan doit être adaptable et facile à modifier en fonction de l'évolution de la situation et des nouvelles informations.**
- **Il est nécessaire de trouver des solutions adaptées en fonction de l'accident pour le retrait du combustible endommagé ainsi que pour la caractérisation et l'enlèvement des débris de combustible, et il faudra peut-être élaborer des méthodes et outils spéciaux.**

### *Gestion des matières contaminées et des déchets radioactifs*

Les opérations de stabilisation d'une centrale nucléaire endommagée et de décontamination sur le site et les activités de remédiation menées dans ses environs génèrent un volume important de matières contaminées et de déchets radioactifs. Sur le site, de grandes quantités de matières solides et liquides contaminées ont été générées à la suite des diverses activités de relèvement<sup>20</sup>. La gestion de ces matières – compte tenu de leurs caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques différentes – est complexe et requiert des efforts considérables.

---

<sup>19</sup> L'enlèvement du combustible usé de la piscine d'entreposage de la tranche 4 a été achevé en décembre 2014.

<sup>20</sup> La distinction entre matières contaminées et déchets radioactifs dépend des radionucléides et des concentrations d'activité associés aux matières.

À la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, il a été difficile de trouver des emplacements pour entreposer les grandes quantités de matières contaminées dues aux activités de remédiation hors site. Au moment de l'établissement du présent rapport, plusieurs centaines d'installations d'entreposage temporaire avaient été implantées dans des localités avoisinantes et les efforts faits pour construire une installation d'entreposage provisoire se poursuivaient.

- **Il faut que les stratégies et les mesures nationales de relèvement après un accident englobent l'élaboration d'une stratégie générique pour la gestion des matières liquides et solides contaminées et des déchets radioactifs, fondée sur des évaluations génériques de la sûreté des rejets, de l'entreposage et du stockage définitif.**

#### *Revitalisation des collectivités et engagement des parties prenantes*

L'accident nucléaire et les mesures de radioprotection prises pendant les phases d'urgence et de relèvement après l'accident ont eu des répercussions considérables sur le mode de vie de la population touchée. Les mesures d'évacuation et de relogement ainsi que l'imposition de restrictions sur les denrées alimentaires ont durement éprouvé les personnes concernées. Les projets de revitalisation et de reconstruction mis sur pied dans la préfecture de Fukushima ont pris en compte les conséquences socio-économiques de l'accident. Ils portent sur des questions telles que la reconstruction des infrastructures, la revitalisation des collectivités, le soutien à leur apporter et leur indemnisation.

La communication avec le public à propos des activités de relèvement est essentielle pour instaurer la confiance. Pour communiquer efficacement, il faut que les experts comprennent les besoins d'information de la population touchée et qu'ils lui fournissent des informations compréhensibles par les moyens appropriés. La communication s'est améliorée après l'accident et la population touchée a participé de plus en plus à la prise de décisions et aux mesures de remédiation.

- **Il est nécessaire de reconnaître les conséquences socio-économiques de tout accident nucléaire et des actions protectrices ultérieures, et de mettre au point des projets de revitalisation et de reconstruction qui traitent notamment les questions de reconstruction des infrastructures, de revitalisation des collectivités et d'indemnisation.**
- **L'appui des parties prenantes est essentiel pour tous les aspects du relèvement après un accident. En particulier, l'engagement de la population touchée dans les processus de prise de décisions est indispensable pour assurer le succès des opérations de relèvement, les faire accepter et les rendre efficaces, et pour revitaliser les collectivités. Un programme de relèvement ne peut être efficace que si la population touchée a confiance et y participe. Pour qu'elle ait confiance dans la mise en œuvre des mesures de relèvement, il faut dialoguer avec elle, lui communiquer des informations cohérentes, claires et à jour et la soutenir.**

# L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

## RAPPORT DE SYNTHÈSE

### 1. INTRODUCTION

Le Grand séisme de l'est du Japon s'est produit le 11 mars 2011. Il a été provoqué par la libération soudaine d'énergie à l'interface où la plaque tectonique du Pacifique s'enfonce sous la plaque tectonique nord-américaine. Une section de la croûte terrestre mesurant, d'après les estimations, environ 500 km de long et 200 km de large, s'est brisée en provoquant un violent séisme de magnitude 9 et un tsunami qui s'est abattu sur une grande partie des côtes japonaises, et notamment la côte nord-est, où plusieurs vagues ont atteint une hauteur de plus de dix mètres. Le séisme et le tsunami ont causé de grandes pertes en vies humaines et des dévastations étendues au Japon. Plus de 15 000 personnes ont été tuées et plus de 6 000 blessées et, au moment de l'établissement du présent rapport<sup>21</sup>, environ 2 500 personnes étaient toujours portées disparues [1]. Les bâtiments et l'infrastructure ont subi des dommages considérables, en particulier le long de la côte nord-est du Japon.

À la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, exploitée par la Compagnie d'électricité de Tokyo (TEPCO), le séisme a endommagé les lignes d'alimentation électrique du site et le tsunami a détruit une grande partie de l'infrastructure opérationnelle et de sûreté sur le site. Leur effet combiné a entraîné la perte des alimentations électriques hors site et sur le site. Il en est résulté une perte de la fonction de refroidissement dans les trois tranches en service<sup>22</sup> et les piscines d'entreposage du combustible usé. Les quatre autres centrales nucléaires<sup>23</sup> situées le long de la côte ont aussi été touchées, à des degrés différents, par le séisme et le tsunami. Toutefois, toutes les tranches en service dans ces centrales ont été mises à l'arrêt en toute sécurité.

Malgré les efforts déployés par les opérateurs à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, le cœur des réacteurs dans les tranches 1 à 3 a surchauffé, le combustible nucléaire a fondu et les trois cuves de confinement se sont rompues. De l'hydrogène a été libéré à partir des cuves sous pression des réacteurs, ce qui a entraîné, à l'intérieur des bâtiments des réacteurs des tranches 1, 3 et 4, des explosions qui ont endommagé les structures et les équipements et blessé des membres du personnel. Des radionucléides ont été relâchés par la centrale dans l'atmosphère et se sont déposés à la surface du sol et de l'océan. Il y a eu aussi des rejets directs dans l'océan.

Les personnes vivant dans un rayon de 20 km autour du site et dans d'autres zones désignées ont été évacuées, et celles qui se trouvaient dans un rayon de 20 à 30 km ont reçu pour instructions de se mettre à l'abri avant qu'on leur conseille, ultérieurement, d'évacuer volontairement. Des restrictions ont été imposées sur la distribution et la consommation

---

<sup>21</sup> Mars 2015. Dans certains cas, des informations allant jusqu'en juin 2015 étaient disponibles et ont été incluses lorsque cela était possible.

<sup>22</sup> Les tranches 1, 2 et 3, sur les six que compte la centrale de Fukushima Daiichi, fonctionnaient au moment de l'accident, les tranches 4, 5 et 6 étant en arrêt programmé.

<sup>23</sup> Centrales nucléaires d'Higashidori, d'Onagawa, de Fukushima Daini et de Tokai Daini.

d'aliments et la consommation d'eau de boisson. Au moment de l'établissement du présent rapport, de nombreuses personnes vivaient toujours hors des zones d'où elles avaient été évacuées.

Une fois stabilisé l'état des réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi<sup>24</sup>, des travaux ont été entrepris en vue d'en préparer le déclassement à terme. Les efforts de relèvement dans les zones touchées par l'accident, y compris la remédiation et la revitalisation des collectivités et de l'infrastructure, ont débuté en 2011.

## 1.1. RAPPORT SUR L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA DAIICHI

À la session de la Conférence générale de l'AIEA tenue en 2012, le Directeur général a annoncé que l'AIEA élaborerait un rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi. Il a indiqué ultérieurement que ce rapport constituerait « une évaluation faisant autorité, factuelle et équilibrée des causes et des conséquences de l'accident ainsi que des enseignements qui en ont été tirés » [2].

Le rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi est le fruit d'un vaste effort déployé en collaboration au niveau international, auquel ont participé cinq groupes de travail avec quelque 180 experts de 42 États Membres (dotés ou non de programmes électronucléaires) et de plusieurs organismes internationaux. Une large représentativité pour ce qui est de l'expérience et des connaissances a ainsi été assurée. Un groupe consultatif technique international a donné des avis sur des questions techniques et scientifiques. Un groupe restreint, composé de hauts fonctionnaires de l'AIEA, a été créé pour fournir des orientations et faciliter la coordination et l'examen du rapport. Des mécanismes internes et externes supplémentaires ont également été mis en place, ainsi qu'il est indiqué dans la figure 1.1.

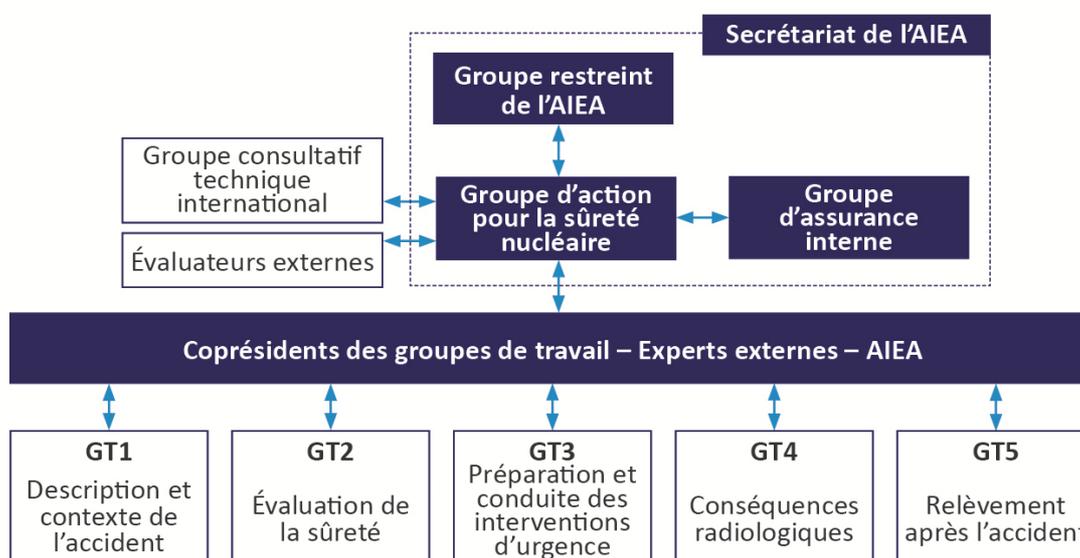


FIG. 1.1. Structure organisationnelle de l'AIEA pour l'établissement du Rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi.

<sup>24</sup> Le 16 décembre 2011, le Bureau gouvernement-TEPCO chargé d'assurer une intervention intégrée a annoncé que les conditions voulues pour un « état d'arrêt à froid » avaient été réunies dans les tranches 1 à 3. À l'époque, le gouvernement japonais a donné au terme « état d'arrêt à froid » une définition spécifique pour la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Cette définition diffère de celle employée dans la terminologie de l'AIEA et d'autres.

Le présent rapport du Directeur général se compose d'un résumé et d'un rapport de synthèse. Il s'inspire des cinq volumes techniques détaillés établis par des experts internationaux et des contributions des nombreux experts et organismes internationaux participants. Il fournit une description de l'accident et de ses causes, de son évolution et de ses conséquences sur la base d'une évaluation des données et des informations provenant des nombreuses sources qui étaient disponibles à la date de mars 2015, y compris les résultats des travaux menés dans le cadre de l'application du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire (le Plan d'action)<sup>25</sup>, et il souligne les principales observations qui ont été faites et les principaux enseignements qui ont été tirés. D'importantes quantités de données ont été fournies par le gouvernement japonais et d'autres organismes du Japon.

Les cinq volumes techniques s'adressent à un public averti qui comprend les autorités compétentes des États Membres de l'AIEA, les organisations internationales, les organismes de réglementation nucléaire, les organismes exploitants de centrales nucléaires, les concepteurs d'installations nucléaires et d'autres spécialistes des questions liées à l'électronucléaire.

Le présent rapport du Directeur général se compose des six sections suivantes :

- Section 1 : Introduction
- Section 2 : L'accident et ses causes, y compris une description de la séquence d'événements et une évaluation de la façon dont des événements naturels extrêmes ont conduit à l'accident nucléaire grave.
- Section 3 : Préparation et conduite des interventions d'urgence, y compris les dispositions relatives à la protection des membres des équipes d'intervention et du public et la mise en œuvre de ces dispositions pendant et immédiatement après l'accident.
- Section 4 : Conséquences radiologiques de l'accident, y compris l'exposition aux rayonnements des travailleurs et du public, et effets sur la santé et l'environnement.
- Section 5 : Activités de relèvement après l'accident, y compris le déclassement de la centrale, les stratégies de remédiation pour les zones touchées hors du site, la gestion des déchets et les stratégies de revitalisation.
- Section 6 : Aperçu des activités menées par l'AIEA et les parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire à la suite de l'accident.

Les principales observations et leçons découlant d'aspects particuliers de l'accident figurent dans les sections 2 à 5. Les liens entre le contenu du rapport du Directeur général et celui des volumes techniques sont illustrés dans la Fig. 1.2.

---

<sup>25</sup> Le Plan d'action, approuvé à l'unanimité lors de la 55<sup>e</sup> session de la Conférence générale en 2011, définit un programme de travail pour renforcer le cadre mondial dans ce domaine. Il consiste en 12 mesures principales axées sur les évaluations de la sûreté ; les examens par des pairs de l'AIEA ; la préparation et la conduite des interventions d'urgence ; les organismes nationaux de réglementation ; les organismes exploitants ; les normes de sûreté de l'AIEA ; le cadre juridique international ; les États Membres qui envisagent de lancer un programme électronucléaire ; le renforcement des capacités ; la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ; la communication et la diffusion d'informations ; et la recherche-développement. Pour un examen détaillé du Plan d'action, voir la section 6.1.

<b>Section 1: Introduction</b>	Rapport sur l'accident de Fukushima Daiichi					
<b>Section 2: L'accident et son évaluation</b>	Description de l'accident	Considérations de sûreté nucléaire	Volumes techniques 1 et 2			
<b>Section 3: Préparation et conduite des interventions d'urgence</b>	Intervention initiale au Japon après l'accident	Protection des membres des équipes d'intervention	Protection du public	Passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement et analyses de l'intervention	L'intervention dans le contexte du cadre international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence	Volume technique 3
<b>Section 4: Conséquences radiologiques</b>	Radioactivité dans l'environnement	Protection des personnes contre une radioexposition	Radioexposition	Effets sur la santé	Conséquences radiologiques pour le biote non humain	Volume technique 4
<b>Section 5: Relèvement après l'accident</b>	Remédiation des zones hors site touchées par l'accident	Stabilisation sur le site et préparatifs en vue du déclassement	Gestion des matériaux contaminés et des déchets radioactifs	Revitalisation des communautés et engagement des parties prenantes	Volume technique 5	
<b>Section 6: Intervention de l'AIEA après l'accident</b>	Activités de l'AIEA	Réunions des parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire	Volumes techniques 1 et 3			

FIG. 1.2. La structure du Rapport de synthèse et ses liens avec le contenu des volumes techniques.

## 2. L'ACCIDENT ET SON ÉVALUATION

La présente section donne une brève description de l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, puis une évaluation des facteurs dont on estime qu'ils ont contribué à ses causes et conséquences.

La section 2.1 décrit les principaux événements dans l'ordre chronologique, y compris l'impact du séisme et du tsunami et les événements ultérieurs.

La section 2.2 présente une évaluation des causes de l'accident. Elle commence par une évaluation de la vulnérabilité de la centrale de Fukushima Daiichi aux dangers externes et traite de sa conception, de la progression de l'accident, des efforts déployés par les opérateurs pour maintenir les fonctions de sûreté fondamentales et des mesures qu'ils ont prises. Cette section traite aussi de l'efficacité du cadre réglementaire au Japon, ainsi que de l'impact des facteurs humains et organisationnels sur la sûreté nucléaire.

### 2.1. DESCRIPTION DE L'ACCIDENT

La description qui suit est essentiellement basée sur les informations communiquées par le gouvernement japonais à l'AIEA [3, 4], les rapports des comités d'enquête établis par le gouvernement japonais [5, 65, 6], la Diète du Japon [7] et la TEPCO [8], y compris les suppléments et les mises à jour de cette dernière [9, 109, 10], de l'organisme de réglementation [11] et des missions de l'AIEA énumérées à la section 6. Les autres sources d'information sont citées séparément.

Les événements sont présentés dans l'ordre chronologique. Certains des principaux événements se sont produits parallèlement ou ont eu un impact sur des actions engagées dans d'autres emplacements du site.

#### 2.1.1. Événement initiateur et réponse

##### *Le séisme et la perte de réseau*

Le Grand séisme de l'est du Japon du 11 mars 2011 s'est produit à 14 h 46, temps légal du Japon, soit 5 h 46 UTC<sup>26</sup>, au large de la côte est du Japon. Il a été provoqué par une libération soudaine d'énergie à l'interface où la plaque tectonique du Pacifique s'enfonce sous la plaque nord-américaine (fig. 2.1). La secousse principale, d'une magnitude de 9 [12], a duré plus de deux minutes, avec plusieurs impulsions et répliques importantes. Cet événement compte parmi les séismes les plus importants enregistrés, dont la plupart se sont aussi produits dans des zones situées le long de la plaque tectonique du Pacifique : les séismes de 1960 et 2010 au Chili, d'une magnitude de 9,5 et 8,8 respectivement, et ceux survenus en Alaska (1964) et à Sumatra (2004), tous deux d'une magnitude de 9,2.

---

<sup>26</sup> Temps universel coordonné, qui est le temps légal du Japon moins neuf heures. Sauf indication contraire, toutes les heures sont indiquées en temps légal du Japon dans le présent rapport.



FIG. 2.1. L'épicentre du Grand séisme de l'est du Japon et les centrales nucléaires à proximité.

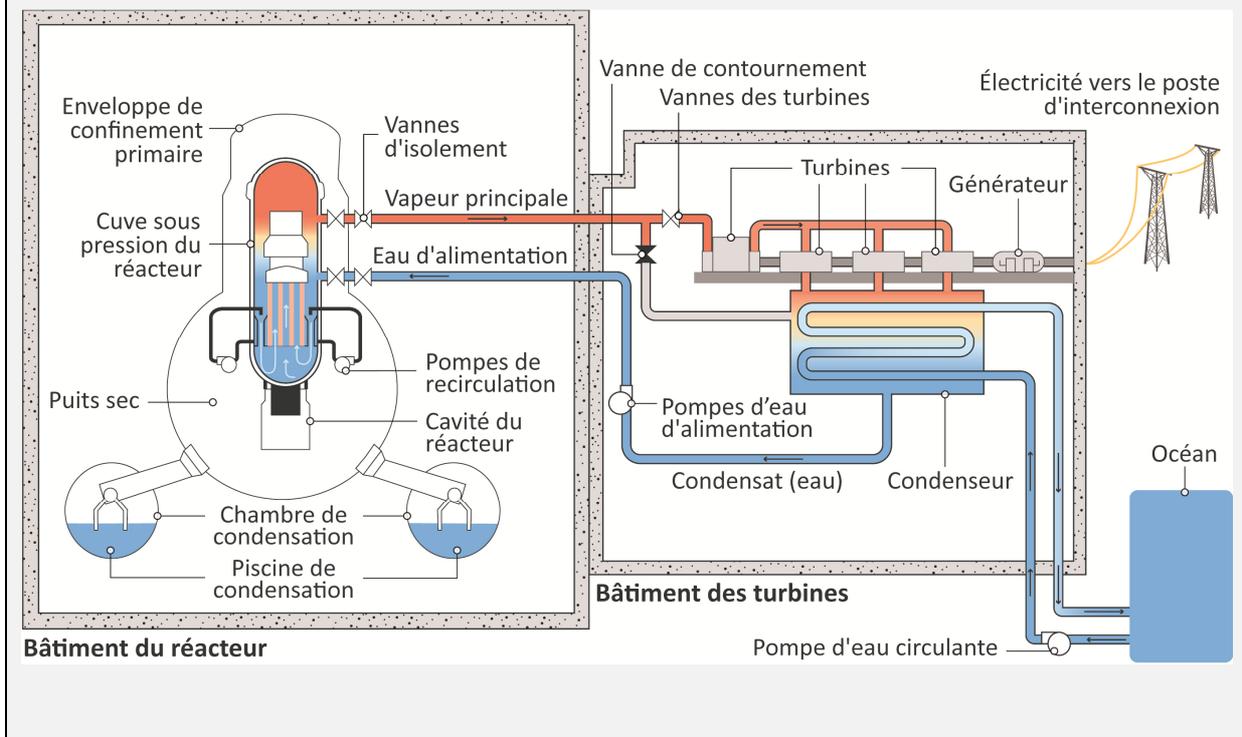
Lorsque le séisme s'est produit, trois des six réacteurs à eau bouillante (encadré 2.1) de la centrale de Fukushima Daiichi [13] fonctionnaient à pleine puissance et trois étaient à l'arrêt pour rechargement en combustible et maintenance. Les réacteurs en service des tranches 1 à 3 ont été arrêtés automatiquement lorsque les capteurs de la centrale ont détecté le mouvement du sol et déclenché les systèmes de protection des réacteurs conformément à la conception. Cette action automatique a permis le contrôle de la réactivité.

Une fois à l'arrêt, les cœurs des réacteurs ont continué de produire de la chaleur (dite chaleur résiduelle). Pour empêcher le combustible nucléaire de surchauffer, cette chaleur a dû être évacuée par des systèmes de refroidissement qui étaient principalement actionnés ou commandés par énergie électrique. Le séisme a endommagé les équipements du poste d'interconnexion sur le site, ceux de la sous-station hors site et les lignes d'alimentation CA extérieures de la centrale, ce qui a entraîné la perte totale de réseau. Les dispositifs

d'alimentation de remplacement du site – générateurs diesel de secours – qui étaient conçus pour faire face à de telles situations de perte de réseau, ont démarré automatiquement pour rétablir l'alimentation CA des six tranches.

**Encadré 2.1. Réacteurs à eau bouillante**

Les réacteurs à eau bouillante utilisent un cycle direct de vapeur en boucle fermée, comme le montre le schéma ci-dessous. Le fluide est de l'eau qui sert à la fois de caloporteur pour évacuer la chaleur et de modérateur pour contrôler la réactivité. L'eau de refroidissement bout dans le cœur du réacteur à une pression d'environ 7 MPa, et la vapeur qui est générée sert à faire tourner les turbines pour produire de l'électricité. Après son passage dans les turbines, la vapeur est condensée par refroidissement par les tubes du condenseur, qui sont remplis d'eau froide prélevée dans une source froide, p. ex. l'océan. L'eau qui résulte de la condensation est ensuite renvoyée vers le réacteur par pompage en tant qu'eau d'alimentation.



Les tranches 1 à 3 ont été automatiquement isolées de leurs systèmes de turbines du fait de la coupure de courant, ce qui a provoqué une augmentation de la température et de la pression des réacteurs sous l'effet de la chaleur résiduelle. Le refroidissement de ces réacteurs après qu'ils furent isolés a été opéré au moyen des dispositifs opérationnels et de conception suivants (encadré 2.2) :

- Dans la tranche 1, comme la pression du réacteur augmentait, les deux boucles du condenseur d'isolement ont démarré automatiquement et continué de refroidir le réacteur. Leur fonctionnement a fait baisser la pression et la température du réacteur si rapidement que les opérateurs les ont arrêtées manuellement, conformément aux procédures, pour éviter un choc thermique sur la cuve sous pression du réacteur. Par

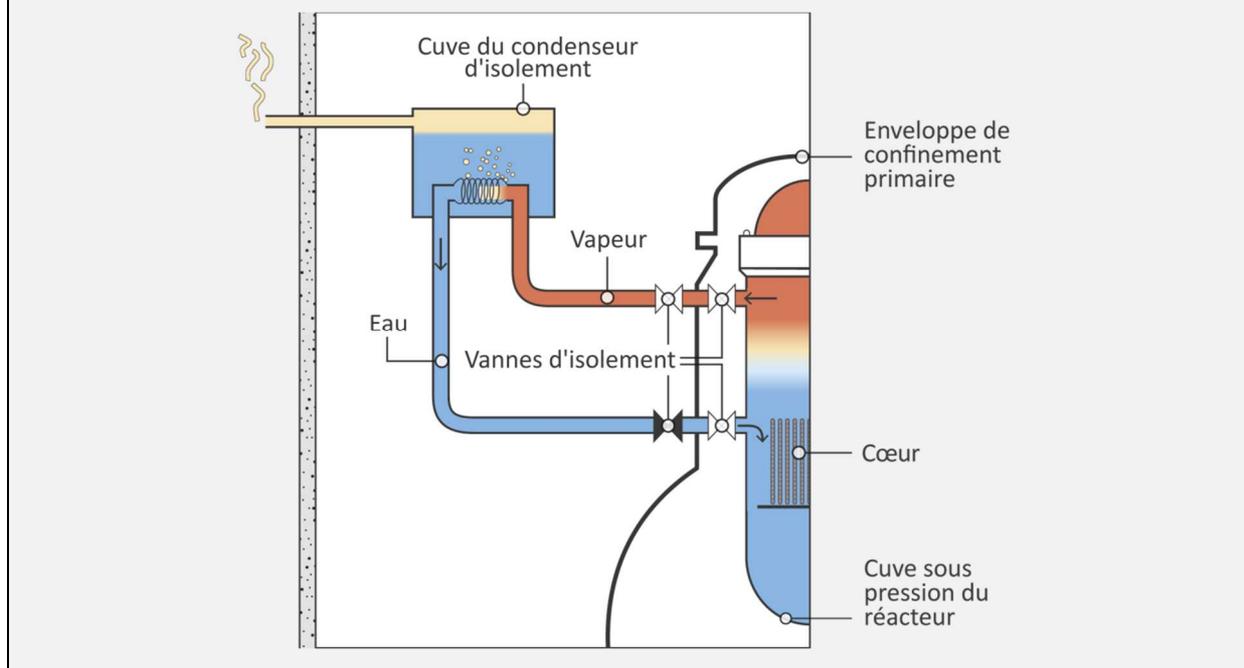
la suite, seule l'une des deux boucles a été utilisée par les opérateurs pour maintenir le taux de refroidissement<sup>27</sup> dans la fourchette prescrite par les procédures.

- Dans les tranches 2 et 3, l'élévation de la pression du réacteur a automatiquement activé les soupapes de décharge de sûreté, qui étaient conçues pour protéger le réacteur contre une surpression en évacuant la vapeur de la cuve du réacteur vers la piscine de condensation de l'enveloppe de confinement primaire. Cela a fait baisser les niveaux d'eau dans le réacteur. Les opérateurs ont activé manuellement le circuit de refroidissement du cœur isolé conformément aux procédures.

### **Encadré 2.2. Systèmes de refroidissement du cœur lorsque le réacteur est isolé des turbines**

Normalement, on assure le refroidissement des réacteurs à eau bouillante à l'arrêt à des pressions élevées en dirigeant la vapeur du réacteur vers le condenseur principal, en contournant les turbines (voir l'encadré 2.1). Toutefois, quand le réacteur est isolé, cette voie n'est pas disponible et le refroidissement du cœur est assuré par les systèmes conçus pour un réacteur isolé dans des conditions de pression élevée qui règnent après la mise à l'arrêt du réacteur. Dans la conception de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, il s'agissait du condenseur d'isolement (CI) pour la tranche 1 (conception antérieure) et du circuit de refroidissement du cœur isolé (CRCI) pour les tranches 2 à 6.

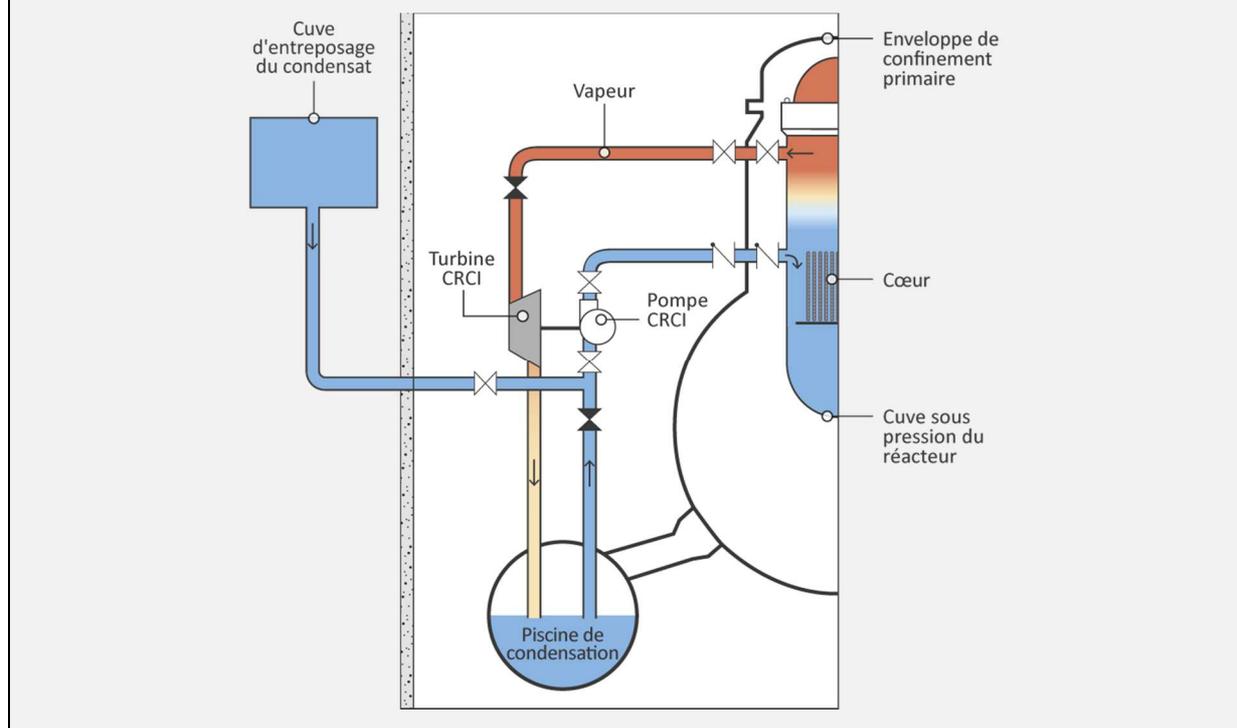
*Condenseur d'isolement.* Dans la conception de la tranche 1, le condenseur d'isolement comportait deux boucles séparées et redondantes. Dans ces boucles fermées, le côté primaire du condenseur d'isolement recevait la vapeur générée dans le réacteur et la condensait par refroidissement à l'intérieur des tubes de l'échangeur de chaleur submergés dans des cuves d'eau plus froide (piscines du condenseur d'isolement) situées en dehors de l'enveloppe de confinement primaire. La vapeur condensée était ensuite renvoyée sous forme d'eau froide vers le réacteur par gravité (voir le diagramme ci-dessous). Sans mélange avec l'eau radioactive du côté primaire, l'eau du côté secondaire des piscines du condenseur d'isolement bouillait et la vapeur était relâchée dans l'atmosphère, qui servait de source froide. Le volume d'eau du côté secondaire du condenseur d'isolement (deux voies ensemble) était suffisant pour huit heures de refroidissement avant nouveau remplissage à partir d'une source d'eau spéciale.



<sup>27</sup> Dans les réacteurs à eau bouillante, le taux de refroidissement est contrôlé et commandé par la réduction de la pression dans le réacteur, laquelle est elle-même liée à la baisse de la température à l'intérieur.

### Encadré 2.2. Systèmes de refroidissement du cœur lorsque le réacteur est isolé des turbines (suite)

*Refroidissement du cœur isolé.* La conception des tranches 2 à 6 comportait des circuits de refroidissement ouverts qui nécessitaient une source pour l'apport d'eau au réacteur. Dans les circuits de refroidissement du cœur isolé, la vapeur provenant du réacteur faisait tourner une petite turbine qui elle-même entraînait une pompe injectant de l'eau sous haute pression dans le réacteur. La vapeur qui faisait tourner la turbine était rejetée et s'accumulait dans la piscine de condensation de l'enveloppe de confinement primaire, qui servait de source froide pour l'absorption de la chaleur résiduelle. Les pertes d'eau du réacteur étaient compensées par de l'eau douce provenant de la cuve d'entreposage des condensats (voir le diagramme ci-dessous). Lorsque la cuve était vide ou que la piscine de condensation était pleine, on pouvait utiliser l'eau accumulée dans la piscine, ce qui transformait en fait le circuit en circuit fermé. Le circuit de refroidissement du cœur isolé était conçu pour fonctionner pendant au moins quatre heures.



La chaleur résiduelle provenant du combustible nucléaire des tranches 4 à 6 devait aussi être évacuée :

- Dans la tranche 4, les dispositifs de refroidissement et de renouvellement de l'eau de la piscine d'entreposage du combustible usé<sup>28</sup> ont cessé de fonctionner à cause de la perte de réseau. Des piscines d'entreposage de combustible usé de toutes les tranches, c'est celle de la tranche 4, contenant plus de 1 300 assemblages combustibles usés, qui avait la quantité de chaleur résiduelle à évacuer la plus importante.
- Dans la tranche 5, la pression du réacteur, qui était maintenue élevée par une pompe à des fins d'essais de pression au moment du séisme, a commencé par baisser quand la

<sup>28</sup> Les piscines d'entreposage du combustible usé, où sont entreposés les assemblages usés et neufs, sont remplies d'eau qui assure la protection contre les rayonnements et l'évacuation de la chaleur provenant du combustible nucléaire. Cependant, sans refroidissement, l'eau de la piscine chaufferait pour finalement commencer à s'évaporer. Si cette situation se poursuit sans remplacement de l'eau, le refroidissement du combustible cesse quand le niveau d'eau baisse et que le combustible n'est plus recouvert. La surchauffe et l'exposition endommagent le combustible et provoquent le rejet de radionucléides.

pompe a cessé de fonctionner du fait de la perte de réseau. Elle a ensuite commencé à augmenter sous l'effet de la chaleur résiduelle, mais contrairement à ce qui était le cas dans les tranches 2 et 3, elle est restée très inférieure aux niveaux fixés pour l'activation des soupapes de décharge de sûreté.

- Dans la tranche 6, le réacteur était presque à la pression atmosphérique et à la température ambiante avec du combustible dans le cœur, et la chaleur résiduelle était faible.

Dans les piscines d'entreposage du combustible usé de toutes les tranches et dans la piscine commune<sup>29</sup>, dont les capacités de refroidissement et de remplissage ont été perdues suite à la perte de réseau, la température de l'eau a commencé à augmenter sous l'effet de la chaleur résiduelle.

En réaction au séisme et à la perte de réseau, les opérateurs ont activé les procédures d'exploitation en situation anormale 'basées sur les événements' dans les trois salles de commande principales des six tranches<sup>30</sup>. Suite au séisme, une équipe d'intervention d'urgence a été mise en place dans le centre d'intervention d'urgence sur le site, situé dans le bâtiment 'sismiquement isolé'<sup>31</sup>. En tant que responsable du centre d'intervention d'urgence sur le site de la TEPCO, le Directeur du site était chargé de diriger l'intervention sur le site et d'assurer la coordination avec les organismes sur le site et hors du site. Trois chefs d'équipe dans chacune des salles de commande principales étaient chargés de diriger les opérations dans les tranches sous la supervision du Directeur du site.

Les tranches de la centrale de Fukushima Daiichi ont réagi à l'événement initiateur – le séisme et la perte de réseau simultanée – comme prévu par les concepteurs et comme stipulé dans les procédures d'exploitation (à l'exception de quelques actions des opérateurs qui ont été limitées ou retardées par les répliques) (Fig. 2.2).

---

<sup>29</sup> Installation auxiliaire partagée par toutes les tranches, la piscine commune d'entreposage du combustible usé, située dans un bâtiment distinct près de la tranche 4, contenait plus de 6 000 assemblages combustibles usés, dont il fallait évacuer la chaleur résiduelle.

<sup>30</sup> Chaque paire de tranches partageait une salle de commande principale comme suit : tranches 1 et 2, tranches 3 et 4, et tranches 5 et 6.

<sup>31</sup> Le bâtiment sismiquement isolé, construit à la lumière de l'expérience concernant les effets du tremblement de terre de Niigataken Chuetsu-oki à la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa en 2007, avait été mis en service en juillet 2010. Il était conçu pour résister aux séismes et équipé d'une alimentation électrique de secours. Il était doté de dispositifs de ventilation filtrée et de blindage pour assurer une protection contre la radioactivité.



### Le tsunami et la perte totale des alimentations électriques de la centrale

Outre qu'il a causé le fort mouvement du sol, le séisme a déplacé une masse d'eau considérable, déclenchant une série de vagues de tsunami importantes [14]. Quand celles-ci ont atteint la côte, elles ont eu un effet dévastateur sur une vaste zone (fig. 2.3).

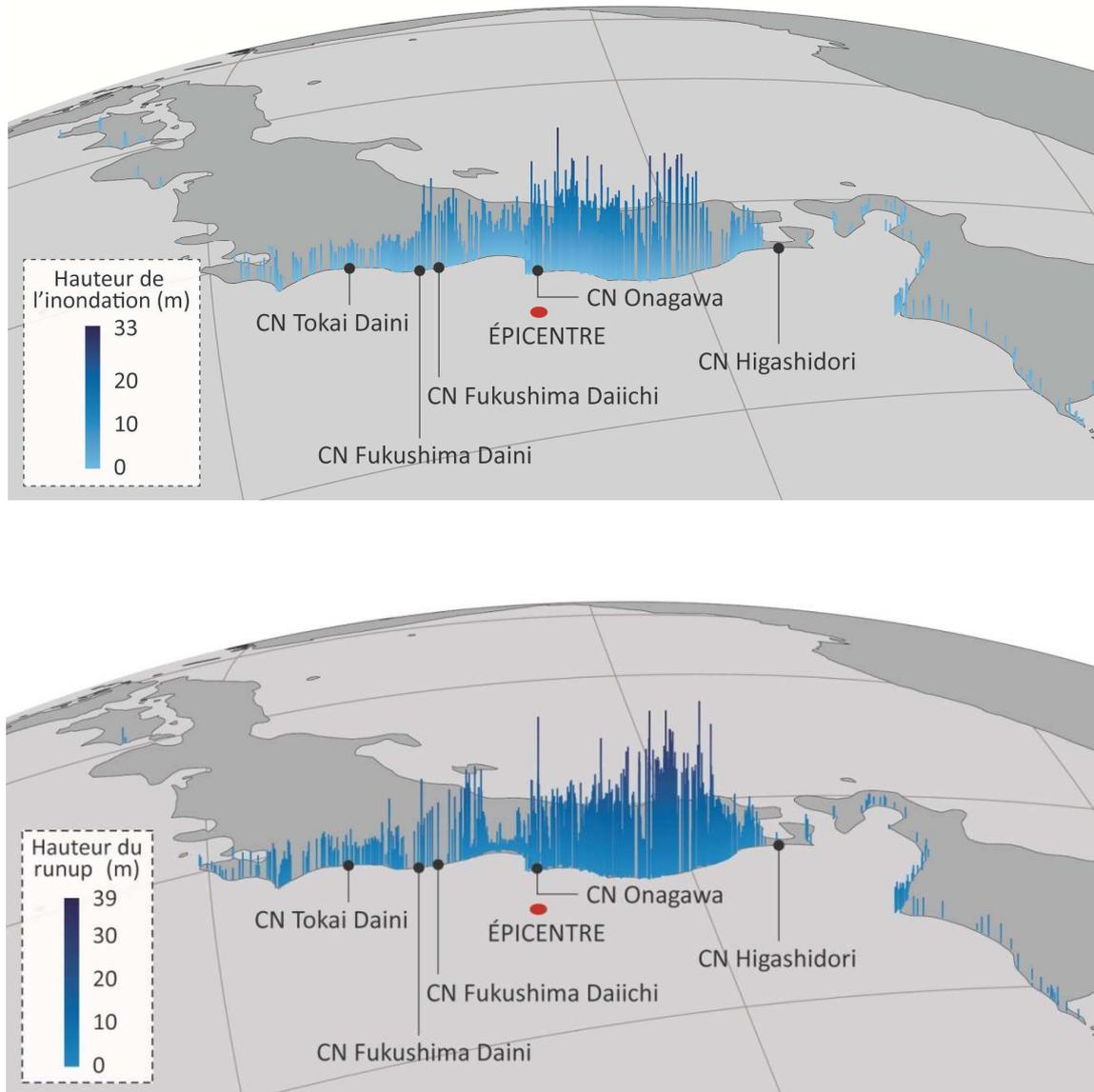


FIG. 2.3. Variation de l'impact des vagues de tsunami, inondation (en haut) et runup (en bas)<sup>32</sup>, en fonction de la géographie et de la topographie des côtes [15].

Les vagues de tsunami ont commencé d'atteindre le site de la centrale de Fukushima Daiichi une quarantaine de minutes après le séisme. Le site a été protégé de la première vague, d'une hauteur de 4 à 5 m, par des digues conçues pour assurer une protection contre un tsunami d'une hauteur maximale de 5,5 m [16]. Toutefois, une dizaine de minutes après la première

<sup>32</sup> La hauteur de runup est la hauteur de la vague au point de pénétration maximale à l'intérieur des terres et la hauteur d'inondation est la hauteur de la crête d'une vague par rapport au niveau de la mer.

vague, la deuxième, plus importante, d'une hauteur de runup de 14 à 15 m, est passée par-dessus les digues et a inondé le site. Elle a recouvert toutes les structures et tous les équipements situés en bord de mer, ainsi que les principaux bâtiments (y compris ceux des réacteurs et des turbines et les bâtiments de service) situés plus haut<sup>33</sup> (fig. 2.4), provoquant la séquence d'événements ci-après :

- La vague a inondé et endommagé les pompes à eau de mer et les moteurs des prises d'eau de mer sur le rivage, qui étaient à découvert. De ce fait, des systèmes et composants essentiels de la centrale, y compris les générateurs diesel de secours refroidis par eau<sup>34</sup>, ne pouvaient pas être refroidis pour continuer à fonctionner.
- La vague a inondé et endommagé le bâtiment d'entreposage à sec des châteaux situé près du rivage entre les tranches 1 à 4 et les tranches 5 et 6. Il a été confirmé plus tard [17] qu'il n'y avait pas eu d'impact important sur les châteaux et le combustible qu'ils contenaient.
- L'eau a inondé les bâtiments, dont tous ceux des réacteurs et des turbines, celui de la piscine commune d'entreposage du combustible usé et celui des générateurs diesel. Elle a endommagé les bâtiments et les équipements électriques et mécaniques qui s'y trouvaient au rez-de-chaussée et dans les étages inférieurs. Parmi les équipements endommagés, il y avait les générateurs diesel de secours et les alimentations électriques associées, ce qui a entraîné la perte de l'alimentation CA de secours. Un seul générateur diesel de secours refroidi par air – celui de la tranche 6 – n'a pas été affecté par l'inondation<sup>35</sup>. Il a continué de fonctionner et d'alimenter en CA de secours les systèmes de sûreté de la tranche 6, permettant ainsi le refroidissement du réacteur.

Du fait de ces événements, les tranches 1 à 5 ont perdu toute alimentation CA, expérimentant une perte totale des alimentations électriques.

Du fait de cette perte totale des alimentations électriques des tranches 1 à 5, les procédures d'exploitation en situation d'urgence correspondant à la 'perte totale de l'alimentation CA' [18] ont été lancées. Un 'événement spécifique', tel que défini dans la réglementation associée à la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire [19], ci-après dénommée 'Loi sur les situations d'urgence nucléaire', sur la base du critère 'certains systèmes de sûreté cessent d'être disponibles', a été déclaré par le Directeur du site, qui supervisait le centre d'intervention d'urgence sur le site de l'organisme exploitant, la TEPCO. Les organismes compétents hors site ont été informés en conséquence, conformément aux dispositions de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire.

---

<sup>33</sup> Les bâtiments administratifs et le bâtiment sismiquement isolé qui abritait le centre d'intervention d'urgence sur le site se trouvaient sur une falaise à une hauteur d'environ 35 m (élévation topographique initiale du site avant les travaux d'excavation pendant la construction de la centrale).

<sup>34</sup> Chaque tranche avait une paire de générateurs diesel de secours, et la tranche 6 en avait un de plus. Sur ces 13 générateurs diesel, les tranches 2, 4 et 6 en avaient chacune un refroidi par air. L'opérabilité de ces générateurs n'a donc pas été directement affectée par la perte d'eau de refroidissement due à l'endommagement des pompes à eau de mer.

<sup>35</sup> Les générateurs diesel de secours refroidis par air des tranches 2 et 4 (situés au rez-de-chaussée du bâtiment de la piscine commune d'entreposage de combustible usé, ainsi que de la tranche 6 (logés au premier étage d'un bâtiment distinct plus en hauteur) paraissaient intacts après l'inondation. Toutefois, des composants (commutateurs, centrales de distribution, panneaux, etc.) des générateurs diesel de secours refroidis par air des tranches 2 et 4 qui étaient situés au sous-sol du bâtiment de la piscine commune d'entreposage de combustible usé avaient été endommagés par l'eau.

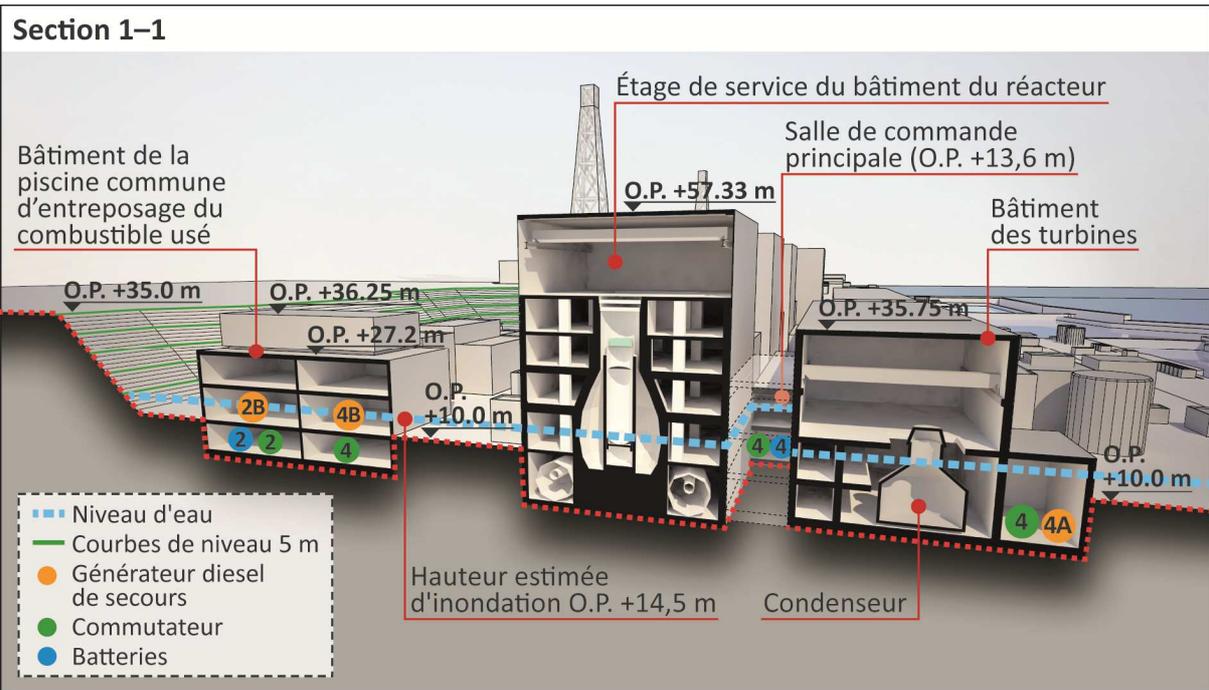
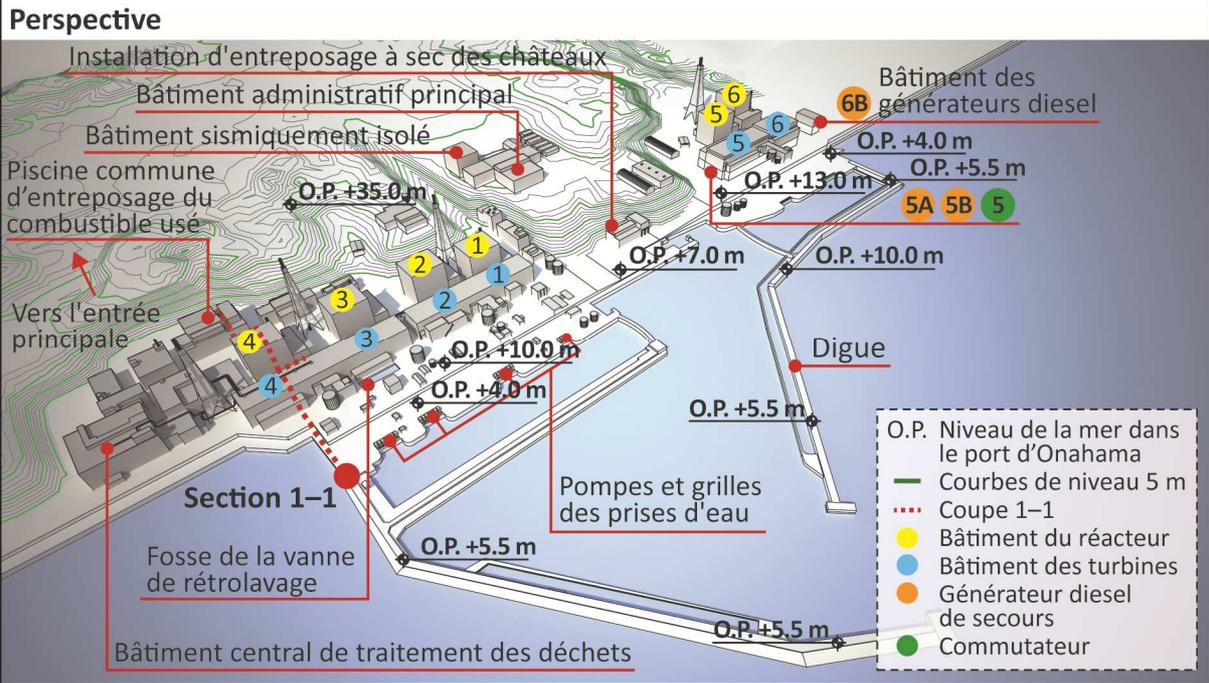


FIG. 2.4. Hauteurs et emplacements des structures et composants de la centrale de Fukushima Daiichi [20].

Les tranches de la centrale de Fukushima Daiichi, comme celles d'autres centrales du même âge, étaient conçues pour résister à une perte totale des alimentations électriques pendant huit heures, compte tenu de la capacité des batteries CC des tranches<sup>36</sup>.

#### *Perte d'alimentation CC dans les tranches 1, 2 et 4*

Toutes les tranches de la centrale de Fukushima Daiichi étaient équipées de sources CC sur site en tant que sources d'alimentation de secours, mais l'inondation a aussi affecté ces équipements dans les tranches 1, 2 et 4, recouvrant les batteries CC, les panneaux électriques ou les connexions. En conséquence, l'alimentation CC a été progressivement perdue dans les tranches 1, 2 et 4 dans les premières 10 à 15 minutes de l'inondation, et il a donc été difficile de faire face à la perte totale des alimentations électriques de la centrale.

Du fait de la perte de toutes les sources CA et CC, les opérateurs des tranches 1 et 2 pouvaient plus surveiller les paramètres essentiels de la centrale, comme la pression et le niveau d'eau du réacteur, ou l'état des systèmes et composants clés utilisés pour le refroidissement du cœur. Comme indiqué précédemment, la capacité d'évacuation de la chaleur des piscines d'entreposage du combustible usé de toutes les tranches avait déjà été perdue après la perte de réseau. À cause de la perte additionnelle de l'alimentation CC dans les tranches 1, 2 et 4, les opérateurs ne pouvaient plus surveiller la température et les niveaux de l'eau dans les piscines d'entreposage du combustible usé de ces tranches.

En l'absence de procédures concernant la perte de toutes les alimentations CA et CC, les opérateurs des tranches 1, 2 et 4 n'avaient pas d'instructions précises sur la façon de faire face à une perte totale des alimentations électriques dans ces conditions. Les opérateurs et le personnel du centre d'intervention d'urgence ont commencé de passer en revue les options disponibles et de définir les moyens éventuels de rétablir l'alimentation et de retrouver ainsi la capacité de surveiller et de contrôler la centrale.

#### *Intervention dans les tranches 3, 5 et 6*

Les tranches 3, 5 et 6 ayant conservé une alimentation, les opérateurs pouvaient encore observer l'état de la centrale, car les indicateurs et les témoins de la salle de commande principale continuaient de fonctionner. Cela leur a permis de continuer d'appliquer les procédures d'exploitation en situation d'urgence « basées sur les symptômes » en réponse aux événements :

- Dans la tranche 3, les soupapes de décharge de sûreté se sont ouvertes automatiquement pour protéger la cuve du réacteur contre une surpression, et les opérateurs ont redémarré manuellement le circuit de refroidissement du cœur isolé, contrôlant et surveillant l'injection d'eau dans le réacteur grâce à l'alimentation CC disponible. Ils ont aussi arrêté des équipements non essentiels pour maximiser la disponibilité des batteries CC afin d'allonger la durée pendant laquelle ils pourraient faire face à la perte totale des alimentations électriques de la centrale.

---

<sup>36</sup> Les centrales nucléaires sont généralement équipées de sources d'énergie CC et de sources CA de secours supplémentaires (turbo-alternateurs à gaz ou moteurs diesel) pour résister à une perte totale des alimentations électriques pendant une durée variant entre 4 et 72 heures. Le choix de la durée en question dépend principalement du temps qu'il faut pour rétablir l'alimentation CA de la centrale et de la capacité des mesures disponibles. Pendant ce délai, des équipements comme des batteries CC, des onduleurs CC/CA et d'autres sources secondaires CA de secours (turbines à gaz ou générateurs diesel, p. ex.) sont utilisés.

- L'alimentation CC était aussi disponible dans la tranche 5. Le réacteur ne produisait pas de vapeur, de sorte que l'évacuation de la chaleur résiduelle par un système de refroidissement à haute pression n'était pas possible. D'autres moyens de diminuer la pression dans la cuve du réacteur pour permettre l'injection de caloporteur par des systèmes basse pression ont été essayés sans succès, et la température et la pression dans la cuve du réacteur, qui était sous pression et remplie d'eau, ont continué de s'élever.
- La tranche 6 n'a pas connu de perte totale des alimentations électriques, car l'alimentation CA était assurée par un générateur diesel de secours opérationnel. Ici, les efforts ont porté sur le maintien des fonctions de sûreté fondamentales face à la perte de réseau. Le réacteur était à la pression atmosphérique, ce qui a permis d'utiliser les systèmes basse pression pour injecter de l'eau de refroidissement ; toutefois, certains des composants indispensables de ces systèmes avaient été endommagés par l'inondation et devaient être rétablis.

### **2.1.2. Progression de l'accident**

#### *L'urgence nucléaire dans les tranches 1 et 2*

Du fait de la perte totale des alimentations électriques dans les tranches 1 et 2, les opérateurs ne disposaient pas d'indications pour déterminer si les systèmes de sûreté fonctionnaient correctement, ou même s'ils fonctionnaient tout court, pour maintenir les fonctions de sûreté fondamentales<sup>37</sup>. Incapables de déterminer le niveau d'eau dans le réacteur et l'état opérationnel des systèmes de refroidissement, les opérateurs ont déclaré que la fonction de sûreté fondamentale de refroidissement du cœur était perdue. Le centre d'intervention d'urgence sur le site a donc informé les organismes hors site, le siège de la TEPCO et les autorités gouvernementales compétentes que les conditions d'une urgence nucléaire étaient réunies pour les tranches 1 et 2 sur la base de 'l'incapacité d'injection d'eau du système de refroidissement de secours du cœur', comme prévu dans la réglementation [21].

#### *Établissement de la stratégie de gestion des accidents graves*

Le personnel du centre d'intervention d'urgence sur le site a commencé par suivre les principes directeurs pour la gestion des accidents graves établis, et les opérateurs de la salle de commande principale commune aux tranches 1 et 2 ont activé la procédure d'exploitation en cas d'accident grave. Comme le refroidissement du cœur semblait compromis, la stratégie de gestion de l'accident a été axée sur l'injection d'eau dans les réacteurs afin de prévenir, ou d'atténuer, de potentiels dommages au combustible nucléaire. Deux options d'injection d'eau dans les réacteurs ont été définies :

- L'utilisation de systèmes pouvant injecter l'eau directement dans les réacteurs, même à haute pression, ce qui nécessitait le rétablissement de l'alimentation CA.

---

<sup>37</sup> La fonction de sûreté fondamentale de contrôle de la réactivité avait été confirmée avant la perte totale des alimentations électriques de la centrale par des indications montrant que les barres de commande étaient insérées et que la réaction de fission était arrêtée.

- L'utilisation d'autres équipements, comme des autopompes et les pompes à incendie diesel fixes pouvant injecter de l'eau à basse pression, ce qui nécessitait la dépressurisation des réacteurs et l'alignement des conduites du système de protection contre l'incendie pour injecter l'eau dans le cœur<sup>38</sup>.

Le centre d'intervention d'urgence sur le site a adopté une stratégie de refroidissement du cœur consistant à utiliser les pompes à incendie diesel fixes et les autopompes par l'intermédiaire du système de protection contre l'incendie pour injecter l'eau dans les réacteurs, et à connecter des sources temporaires d'alimentation électrique.

Cette stratégie de gestion de l'accident a bénéficié de la priorité la plus élevée dans les tranches 1 et 2 et était applicable à toutes les autres tranches à quelques variations près. Par exemple, dans la tranche 5, la mesure de gestion de l'accident a consisté à rétablir l'alimentation CA en utilisant la ligne d'interconnexion<sup>39</sup> avec le générateur diesel de secours opérationnel de la tranche 6.

### *État du refroidissement du cœur dans les tranches 1 et 2*

Juste avant l'arrivée du tsunami, les opérateurs avaient arrêté le condenseur d'isolement de la tranche 1 conformément aux procédures d'exploitation établies pour contrôler le taux de refroidissement du réacteur. Pour cela, ils avaient fermé les vannes (situées en dehors de l'enveloppe de confinement primaire et actionnées par CC, comme indiqué dans l'encadré 2.2). Environ 2 heures et demie après la perte des indications, à 18 h 18 le 11 mars, il a été constaté que certaines des lampes-témoins de ces vannes fonctionnaient et confirmaient que les vannes étaient fermées. Les opérateurs ont essayé de démarrer le condenseur d'isolement en ouvrant ces vannes. Toutefois, le condenseur d'isolement ne s'est pas mis en route, signe que les vannes d'isolement actionnées par CA à l'intérieur de l'enveloppe de confinement primaire étaient fermées<sup>40</sup>. Ainsi, la fonction de sûreté fondamentale de refroidissement du cœur à la tranche 1 était perdue lorsque les opérateurs ont arrêté le condenseur d'isolement juste avant le tsunami, et la température du cœur de la tranche 1 a augmenté à partir de ce moment-là.

En outre, des mesures faites localement (dans le bâtiment du réacteur) à 20 h 07 indiquaient que le réacteur était encore proche de la pression de régime de 70 bars (7 MPa), ce qui empêchait l'injection d'eau par d'autres méthodes, qui n'aurait été possible qu'en dessous de 8 bars (0,8 MPa).

---

<sup>38</sup> Le système de protection contre l'incendie était conçu principalement pour la lutte contre les incendies et l'inondation de la cuve de confinement, pas pour l'injection d'eau dans le réacteur.

<sup>39</sup> Des lignes d'interconnexion avaient été installées à la centrale de Fukushima Daiichi près d'une décennie auparavant, dans le cadre d'une amélioration de la conception pour la gestion des accidents. Partager la source de secours opérationnelle de la tranche 6 n'était possible que pour la tranche 5, car ces interconnexions n'avaient été installées qu'entre les paires de tranches, à savoir les tranches 1 et 2, les tranches 3 et 4 et les tranches 5 et 6.

<sup>40</sup> Les opérateurs ne connaissaient pas clairement les positions des vannes du fait des incertitudes quant au moment et à la séquence de chaque type de perte d'alimentation qui déterminerait l'état des vannes d'isolement. Toutes les vannes du condenseur d'isolement resteraient dans la même position après la perte de l'alimentation CA, mais les vannes d'isolement alimentées par CA se fermentaient de par leur conception en cas de perte de l'alimentation de contrôle (c.-à-d. CC).

Après plusieurs rapports du centre d'intervention d'urgence sur le site sur l'état de la tranche 1 et des autres tranches, et après l'approbation du premier ministre, une situation d'urgence nucléaire a été déclarée par le gouvernement japonais à 19 h 03, le 11 mars<sup>41</sup>.

Dans la tranche 2, où il n'y avait pas non plus d'indications du fonctionnement du système de refroidissement du cœur ni de la pression et de la température du cœur, les opérateurs sont partis de l'hypothèse la plus pessimiste, à savoir que le circuit de refroidissement du cœur isolé ne fonctionnait pas et que la température du cœur de la tranche 2 montait. À 21 h 01, le centre d'intervention d'urgence sur le site a informé les autorités gouvernementales que le cœur de la tranche 2, sans aucun refroidissement, serait probablement à découvert à environ 21 h 40. Compte tenu de cette prévision, le premier ministre, en tant que directeur général du Centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire, a publié le 11 mars, à 21 h 23, un décret d'évacuation de la population dans un rayon de 3 km et de mise à l'abri dans un rayon de 3 à 10 km autour du site<sup>42</sup>.

Le dénoyage du cœur de la tranche 1 a été confirmé lorsque des intensités de rayonnement élevées ont été mesurées dans le bâtiment du réacteur de la tranche 1 par une équipe envoyée à 21 h 51 pour vérifier l'état de fonctionnement du condenseur d'isolement<sup>43</sup>. C'était là une indication de la gravité de la situation du réacteur de la tranche 1 et d'un endommagement possible du cœur.

#### *Détérioration de la situation du confinement de la tranche 1*

Après la confirmation de la perte du refroidissement du cœur de la tranche 1, d'autres sollicitations de l'autre fonction de sûreté fondamentale – le confinement – se sont manifestées lorsqu'il a été possible de mesurer pour la première fois la pression dans l'enveloppe de confinement, le 11 mars à 23 h 50. La pression dans l'enveloppe de confinement avait dépassé la valeur nominale maximale et cette information a incité le Directeur du site à ordonner des préparatifs en vue de l'éventage de l'enveloppe de confinement de la tranche 1. Cette situation justifiait aussi une notification de situation d'urgence, sur la base d'une 'augmentation anormale de la pression dans l'enveloppe de confinement primaire', comme prévu dans la réglementation associée à la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19].

Les mesures de la pression dans l'enveloppe de confinement de la tranche 1 ont enregistré les valeurs maximales à 2 h 30 et 2 h 45 le 12 mars.

---

<sup>41</sup> Parallèlement, le Centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire a été établi au sein du bureau du premier ministre, et celui-ci a assumé les responsabilités de directeur général de l'intervention contre l'urgence nucléaire à l'échelle nationale.

<sup>42</sup> Plus tôt, à 20 h 50, les autorités locales de la préfecture de Fukushima avaient publié un décret d'évacuation des résidents dans un rayon de 2 km autour de la centrale après avoir évalué la déclaration de situation d'urgence nucléaire nationale et discuté des incertitudes concernant l'état des centrales avec les représentants de la TEPCO.

<sup>43</sup> Les dosimètres personnels ont enregistré des intensités aussi élevées que 0,8 mSv en une dizaine de secondes après l'entrée de l'équipe dans le bâtiment.

### *Confirmation de l'état de la tranche 2 et accent mis sur le rétablissement de la fonction de sûreté dans la tranche 1*

À 2 h 10, le 12 mars, une équipe a pu pénétrer dans la salle où se trouvaient les équipements du circuit de refroidissement du cœur isolé de la tranche 2 et relever les valeurs des paramètres pour déterminer l'état du circuit. L'état opérationnel a été communiqué au centre d'intervention d'urgence sur le site à 2 h 55 le 12 mars et a permis de clarifier la situation précédemment inconnue s'agissant du refroidissement du cœur de la tranche 2 environ 11 heures après la perte de surveillance dans la salle de commande principale. Après confirmation du refroidissement du cœur de la tranche 2 et compte tenu de la très forte sollicitation de la fonction de confinement de la tranche 1, le Directeur du site a décidé d'axer la gestion de l'accident sur les efforts d'éventage dans la tranche 1.

Tandis que des plans d'éventage étaient en préparation, la stratégie de gestion de l'accident visant à rétablir le refroidissement du cœur de la tranche 1 par injection d'eau au moyen de la pompe à incendie n'a pas pu être mise en œuvre, car il est apparu, à 1 h 48 le 12 mars, que la pompe était hors d'usage. On a alors appliqué la solution consistant à utiliser des autopompes connectées à l'orifice d'injection du bâtiment des turbines, qui avait été installé l'année précédente en tant que mesure de protection contre l'incendie compte tenu de l'expérience acquise lors du tremblement de terre de Niigataken Chuetsu-oki.

### *Montée en température de la tranche 5 et rétablissement de l'alimentation CA*

Au même moment à peu près, une soupape de décharge de sûreté de la tranche 5 s'est ouverte automatiquement pour la première fois environ 10 heures après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, car la pression du réacteur avait atteint la valeur fixée pour l'ouverture, à 1 h 40 le 12 mars. La soupape s'est ouverte et fermée automatiquement plusieurs fois pour maintenir la pression dans une fourchette déterminée à la conception, car le réacteur de la tranche 5 avait continué de s'échauffer en l'absence de mesures d'évacuation de la chaleur.

Les soupapes de décharge de sûreté fonctionnaient automatiquement pour limiter la pression, mais ne pouvaient pas être utilisées pour la réduire, car la fonction de dépressurisation de la plupart d'entre elles avait été neutralisée pour l'essai mené juste avant l'accident. Un autre moyen de réduire la pression a été envisagé, à savoir ouvrir une petite vanne (tuyère d'évent haut) sur la cuve du réacteur, car on disposait d'alimentation CC à cette fin. Plus tard, à 6 h 06 le 12 mars, environ 14 heures et demie après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, la tuyère d'évent haut a été ouverte à distance et laissée ouverte pour dépressuriser la cuve du réacteur remplie d'eau. En outre, la connexion électrique entre la tranche 5 et le générateur diesel de secours opérationnel de la tranche 6 a été achevée près de 16 heures et demie après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, ce qui a permis d'alimenter en CA des équipements de la tranche 5, comme les pompes et les vannes requises pour l'évacuation de la chaleur du réacteur.

### *Méthode de remplacement pour le refroidissement du cœur de la tranche 1*

Dans l'intervalle, la pression du réacteur de la tranche 1 avait suffisamment baissé<sup>44</sup> pour que l'on puisse utiliser une autre solution d'injection d'eau. Une méthode de refroidissement de remplacement, à savoir l'injection d'eau douce par autopompes dans le réacteur de la tranche 1 pour rétablir le refroidissement du cœur, a commencé d'être appliquée à 4 heures le 12 mars, soit 12 heures et demie environ après la perte totale des alimentations électriques de la centrale. L'injection s'est poursuivie par intermittence pendant quelque 5 heures et demie, car il n'y avait qu'une seule autopompe qui devait se réapprovisionner périodiquement au réservoir d'eau douce. Parallèlement, les travaux de construction d'une conduite directe depuis le réservoir se sont poursuivis. Plus tard, juste un peu plus de 17 heures et demie après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, a commencé l'injection continue d'eau douce directement depuis le réservoir.

### *Éventage du confinement de la tranche 1*

La mesure de la pression du confinement de la tranche 1 à 4 h 19 le 12 mars a montré que celle-ci avait baissé depuis la mesure précédente (à 2 h 45) sans intervention des opérateurs et sans voie d'éventage établie, ce qui indiquait qu'une dépressurisation involontaire s'était produite par une voie inconnue. En outre, les intensités de rayonnement mesurées à l'entrée principale peu après étaient en hausse<sup>45</sup>. C'était une autre indication d'un rejet incontrôlé de matières radioactives depuis le confinement primaire, c'est-à-dire d'une dégradation du confinement. La détérioration de la situation radiologique sur le site, combinée à l'élévation de la pression du confinement dans la tranche 1, a conduit le gouvernement à élargir la zone d'évacuation à 10 km à 5 h 44 le 12 mars.

Les activités de préparation de l'éventage du confinement de la tranche 1 devaient commencer à 9 heures le 12 mars. Dès réception de la confirmation par les autorités de la préfecture de Fukushima, à 9 h 02, de l'achèvement de l'évacuation de la ville d'Okuma<sup>46</sup>, les équipes ont commencé à manipuler les vannes pour mettre en place la voie d'éventage du confinement de la tranche 1. Après 5 heures et demie d'efforts, la voie d'éventage (encadré 2.3) a été mise en place avec l'ouverture de la dernière vanne à environ 14 heures le 12 mars. Le succès de l'opération d'éventage a été confirmé par la baisse de la pression du confinement, mesurée à 14 h 30<sup>47</sup>, et les autorités gouvernementales compétentes en ont été informées. Bien qu'il n'y ait pas eu de changement important immédiat des intensités de rayonnement mesurées dans les limites du site, une heure plus tard environ, un débit de dose de quelque 1 mSv/h a été enregistré à 15 h 29<sup>48</sup> par l'un des détecteurs installés près de la limite du site au nord-ouest de la tranche 1.

---

<sup>44</sup> La dépressurisation du réacteur s'était produite sans intervention des opérateurs ou des systèmes de la centrale, et s'était donc faite par une voie inconnue.

<sup>45</sup> Une augmentation de près de dix fois (0,000 069 mSv/h à 4 heures contre 0,000 59 mSv/h à 4 h 23).

<sup>46</sup> Il avait été convenu avec les autorités de la préfecture de Fukushima d'attendre la fin de l'évacuation pour commencer l'éventage.

<sup>47</sup> En tout, il s'est écoulé 14 heures et demie entre l'ordre du directeur du site (aux environs de minuit) et le début de l'éventage, à cause des intensités de rayonnement élevées autour de la chambre de condensation, où les vannes devaient être manœuvrées manuellement, et du manque d'air comprimé pour actionner les vannes.

<sup>48</sup> À 16 h 17, le centre d'intervention d'urgence a noté que l'intensité du rayonnement mesurée à 15 h 31 près de l'entrée principale était de 0,569 mSv/h et en a informé les autorités à 16 h 27, car la valeur dépassait de 0,5 mSv/h le critère légal de notification. La notification a été corrigée à 16 h 53, quand on s'est aperçu que l'intensité de rayonnement mesurée à 15 h 29 était de 1,015 mSv/h, c'est-à-dire après l'éventage de la tranche 1 (mais avant l'explosion dans cette tranche).

### *Perte du refroidissement normal du cœur et début du refroidissement de secours à la tranche 3*

Pendant la préparation de l'éventage de la tranche 1, l'intervention à la suite de la perte totale des alimentations électriques dans la tranche 3 a dû être modifiée lorsque le circuit de refroidissement du cœur isolé a cessé de fonctionner à 11 h 36 le 12 mars, après près de 20 heures et demie de fonctionnement ininterrompu. Les opérateurs ont essayé, mais en vain, de redémarrer le circuit à plusieurs reprises, en sorte que l'eau dans le réacteur a continué de bouillir et de s'évaporer et le niveau d'eau dans la cuve de baisser.

Lorsque le niveau d'eau a atteint le point auquel le système d'injection de caloporteur à haute pression – un système de refroidissement de secours du cœur – était activé automatiquement, à 12 h 35, celui-ci a automatiquement maintenu le niveau d'eau du réacteur dans la fourchette prédéterminée. Cependant, les opérateurs ont pris le contrôle manuel pour éviter des démarrages et des arrêts automatiques répétés du système afin de pouvoir disposer de l'alimentation CC plus longtemps, conformément aux procédures d'intervention en cas de perte totale des alimentations électriques de la centrale.

### *Injection d'eau de mer et ligne d'alimentation électrique de la tranche 1*

Après environ 11 heures d'injection d'eau dans le cœur de la tranche 1, le réservoir d'eau douce destinée à la protection contre l'incendie était presque vide. L'injection d'eau douce dans la tranche 1 a donc été arrêtée à 14 h 53 le 12 mars. Le Directeur du site a alors décidé d'injecter dans le réacteur de la tranche 1 de l'eau de mer provenant de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3, où de l'eau de mer s'était accumulée après le tsunami, car c'était la seule source d'eau disponible à ce moment-là. Le dispositif d'injection d'eau de mer a été mis en place en un peu plus d'une demi-heure.

À peu près au même moment, les travaux de connexion des alimentations électriques mobiles<sup>49</sup> aux tranches 1 et 2 au moyen d'un transformateur intact de la tranche 2 ont été achevés, et un réseau basse tension pour l'alimentation CA de la tranche 1 a été réactivé à 15 h 30 le 12 mars.

Près de 24 heures après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, les dispositifs d'injection d'eau de mer et d'alimentation CA ont été connectés à la tranche 1. Toutefois, quelques minutes après la connexion, une explosion dans le bâtiment du réacteur a endommagé ces dispositifs avant même qu'ils ne puissent fonctionner.

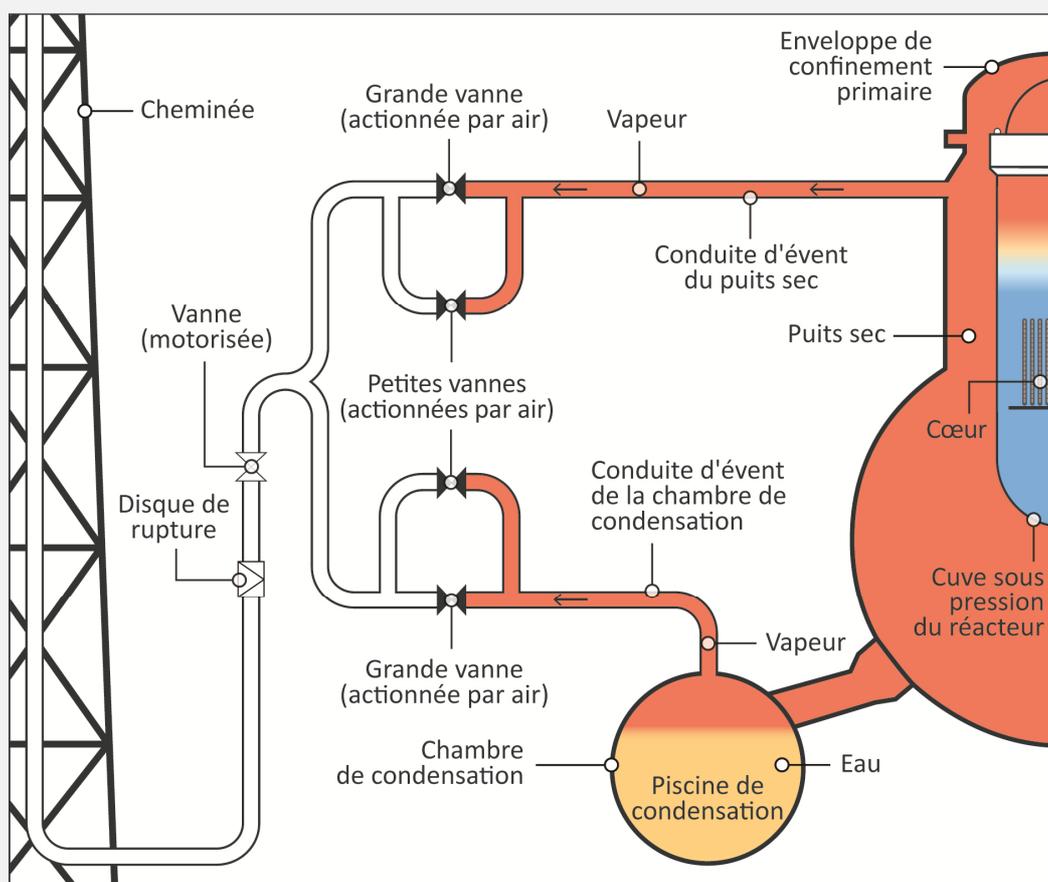
---

<sup>49</sup> Près d'une heure après la perte totale des alimentations électriques de la centrale le 11 mars, des équipements mobiles d'alimentation électrique (véhicules d'alimentation haute et basse tension) ont été envoyés sur les sites des centrales de Fukushima Daiichi et Fukushima Daini. Le premier véhicule, de Tohoku Electric, est arrivé aux alentours de 22 heures le 11 mars, c'est-à-dire près de six heures après la perte totale des alimentations électriques de la centrale. D'autres véhicules d'autres installations de la TEPCO et de Tohoku Electric ainsi que des Forces japonaises d'autodéfense sont arrivés sur les sites tout au long de la nuit. À 10 h 15 le 12 mars, 23 véhicules au total se trouvaient sur le site.

### Encadré 2.3. Événement du confinement

Pour améliorer la capacité de faire face à des accidents graves, des 'événements renforcés' (c'est-à-dire des dispositifs de dépressurisation avec une tuyauterie à parois relativement épaisses) avaient été installés dans les tranches de la centrale de Fukushima Daiichi dans les années 1990 à la suite d'une décision réglementaire [22, 23]. L'objectif était d'empêcher une surpressurisation du confinement primaire en permettant l'événement (voir la figure ci-dessous). Bien que la voie d'événement privilégiée soit la chambre de condensation, pour tirer parti de l'élimination des radio-isotopes par la piscine d'eau, le dispositif d'événement comprenait une autre voie à partir du puits sec. Il était possible d'aligner les deux voies en actionnant les vannes depuis la salle de commande principale, tout en contrôlant le volume et la durée du rejet par une cheminée commune à la paire de tranches.

Dans la centrale de Fukushima Daiichi, la ligne d'événement comportait aussi un disque de rupture réglé pour céder quand la pression du confinement dépassait la valeur prédéterminée, empêchant ainsi un événement prématuré. La doctrine au Japon était de ne pas dépressuriser tant que l'on pouvait l'éviter, et de ne le faire qu'en dernier recours pour maintenir l'intégrité du confinement primaire afin de retarder ou d'empêcher le rejet direct de matières radioactives dans l'environnement.



### Explosion dans le bâtiment du réacteur de la tranche 1

À 15 h 36 le 12 mars, une explosion s'est produite à l'étage de service du bâtiment du réacteur de la tranche 1, endommageant la structure supérieure du bâtiment et blessant des travailleurs. Bien que l'explosion ne semble pas avoir endommagé le confinement primaire, elle a causé des dommages considérables au confinement secondaire (bâtiment du réacteur). Le personnel de la centrale ne connaissait pas la cause de l'explosion, mais supposait que de l'hydrogène libéré par le cœur s'était échappé du confinement primaire par une voie inconnue. En conséquence, le centre d'intervention d'urgence sur le site a ordonné

l'évacuation du personnel des tranches 1 à 4 et des zones alentour, y compris les deux salles de commande principales communes, à l'exception des trois membres les plus gradés.

Environ trois heures après l'explosion dans la tranche 1 (quatre heures après l'éventage du confinement de la tranche 1), à 18 h 25 le 12 mars, le gouvernement a étendu à 20 km la zone d'évacuation.

### *Injection d'eau de mer dans la tranche 1*

L'explosion dans la tranche 1 non seulement a gravement endommagé les dispositifs d'injection d'eau de mer et d'alimentation électrique temporaire, mais aussi a empêché leur réparation du fait des gravats éparpillés autour du site et des débits de dose localement élevés émanant des gravats contaminés. Après une opération d'évacuation d'environ deux heures, les équipes sont revenues pour réparer ou remplacer les équipements endommagés.

Après la réparation et le remplacement des équipements endommagés, l'injection d'eau dans le réacteur de la tranche 1 à l'aide d'autopompes et à partir de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3 (eau de mer) a commencé à 19 h 04 le 12 mars et s'est poursuivie<sup>50</sup> par la suite. De l'acide borique a été ajouté plus tard compte tenu du risque de retour à l'état critique pour garantir la fonction de sûreté fondamentale de contrôle de la réactivité. Dans l'ensemble, entre la fin de l'injection d'eau douce et le début de l'injection d'eau de mer, le cœur de la tranche 1 n'a pas été refroidi pendant près de quatre heures.

### *Perte du refroidissement du cœur de la tranche 3*

Alors que la tranche 1 avait reçu le rang de priorité le plus élevé s'agissant du maintien des fonctions de sûreté fondamentales pendant la première journée et demie après le séisme et le tsunami, la situation du refroidissement du cœur de la tranche 3 a commencé à susciter des inquiétudes le matin du dimanche 13 mars.

Après 14 heures de fonctionnement ininterrompu du système d'injection de secours de caloporteur à haute pression, les opérateurs de la tranche 3 ont commencé à s'inquiéter de la fiabilité et de la défaillance éventuelle de sa turbine actionnant la pompe d'injection, qui fonctionnait alors à faible pression de vapeur. Ils étaient préoccupés par son possible endommagement et l'ouverture d'une voie de rejet depuis la cuve du réacteur. Ceci était susceptible de provoquer un rejet incontrôlable de vapeur radioactive, directement en dehors du confinement primaire. Cette inquiétude s'est accrue lorsque la turbine ne s'est pas arrêtée automatiquement, comme elle était censée le faire, quand la pression du réacteur est descendue en dessous de la valeur correspondante.

En conséquence, les opérateurs ont décidé d'arrêter le système d'injection de caloporteur à haute pression et d'utiliser à la place l'injection à basse pression (pompe à incendie diesel). Ils ont pensé pouvoir le faire sans interrompre le refroidissement du cœur, car la pression du réacteur était déjà inférieure à celle de la pompe à incendie diesel et pouvait être maintenue basse par les vannes de dépressurisation. Les opérateurs ont donc arrêté le système

---

<sup>50</sup> En une occasion, d'après l'enquête [7], un dirigeant de la TEPCO qui représentait la compagnie auprès du bureau du premier ministre a demandé par téléphone au Directeur du site d'arrêter l'injection d'eau de mer dans la tranche 1. Cette instruction n'a pas été suivie, et l'injection d'eau de mer n'a pas cessé.

d'injection de caloporteur à haute pression de la tranche 3 et ont ensuite commencé à essayer d'ouvrir les vannes de dépressurisation.

Toutefois, toutes les tentatives en ce sens ont échoué et la pression du réacteur est rapidement montée au-dessus de la valeur à laquelle l'injection par les pompes à incendie diesel était possible, provoquant l'arrêt du refroidissement du cœur de la tranche 3 environ 35 heures après la perte totale des alimentations électriques de la centrale. Face à cet échec, les opérateurs ont essayé pendant près de 45 minutes de revenir à l'injection par le système d'injection de secours de caloporteur à haute pression, mais en vain. Sans aucune capacité de refroidir le réacteur, un rapport de situation d'urgence pour 'perte de la fonction de refroidissement du réacteur' a été publié, comme prévu dans la réglementation associée à la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19], en ce qui concerne la tranche 3, à 5 h 10 le 13 mars. Le cœur de la tranche 3 est resté sans refroidissement pendant les heures qui ont suivi et la tranche est devenue la suivante à perdre le refroidissement du cœur.

Suite à la perte du refroidissement, le Directeur du site a ordonné à 5 h 15 le recours à une autre méthode d'injection d'eau pour refroidir le cœur de la tranche 3 grâce aux autopompes. Compte tenu de la détérioration de la situation, il a aussi ordonné la mise en place d'une voie d'éventage du confinement de la tranche 3.

#### *Méthode de remplacement pour le refroidissement du cœur de la tranche 3 et éventage du confinement*

Les autopompes des tranches 5 et 6 ont été envoyées à la tranche 3 et on a entrepris, à 5 h 21 le 13 mars, les travaux visant à mettre en place une ligne d'injection d'eau de mer dans le cœur de la tranche 3 à partir de la fosse de la vanne de rétrolavage par l'intermédiaire des lignes de protection contre l'incendie. Une autopompe supplémentaire est arrivée de la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa à 6 h 30. La ligne d'injection d'eau de mer a été mise en place en une heure. Cependant, son utilisation a été reportée par le Directeur du site à la suite d'une communication du siège de la TEPCO<sup>51</sup>. La ligne d'injection a donc été reconnectée à la source d'eau douce borée par l'intermédiaire des lignes de protection contre l'incendie et des autopompes.

Les efforts visant à ramener la pression du réacteur en dessous de la pression des autopompes afin de maintenir l'injection d'eau nécessitaient d'activer les vannes de dépressurisation. On y est parvenu en utilisant les batteries CC d'automobiles, qui ont été rassemblées dans la salle de commande principale commune aux tranches 3 et 4.

Pendant ce temps, le dispositif concernant l'éventage de la tranche 3 a aussi été achevé en un peu plus de trois heures, à 8 h 41 le 13 mars, mais la pression du confinement était encore inférieure à la pression nominale de confinement, pas assez pour faire céder le disque de rupture, comme prévu. Continuant de chercher à réduire la pression du réacteur en ouvrant la soupape de décharge de sûreté, les opérateurs de la salle de commande principale ont observé une chute de pression dans la tranche 3 à 9 h 08, alors que les lampes-témoins ne permettaient pas de savoir avec certitude si les vannes étaient ouvertes ou non. Parallèlement à cette

---

<sup>51</sup> Un directeur de division au centre d'intervention d'urgence hors site au siège de la TEPCO, qui participait à une réunion dans le bureau du premier ministre, avait demandé précédemment au Directeur du site, par téléphone, s'il restait de l'eau douce. Il a informé le Directeur du site de l'avis des participants à la réunion, qui étaient disposés à poursuivre l'injection d'eau douce aussi longtemps que possible. Le Directeur du site a interprété cette communication comme une instruction de ne pas injecter d'eau de mer tant que l'on disposait d'eau douce.

dépressurisation de la cuve du réacteur, il s'est produit une forte augmentation de la pression dans le confinement primaire, indice d'une décharge depuis la cuve du réacteur dans l'enveloppe de confinement. À 9 h 20 le 13 mars, la pression du confinement a fini par dépasser la pression nominale maximale et, par la suite, elle est tombée rapidement, signe d'un éventage du confinement de la tranche 3 suite à la rupture du disque de rupture.

Après la dépressurisation du réacteur, obtenue par l'ouverture d'autres soupapes de décharge de sûreté, la pression dans le réacteur est tombée en dessous de la pression des autopompes et l'injection d'eau douce borée dans la tranche 3 a commencé à 9 h 25, après plus de quatre heures sans refroidissement.

L'éventage du confinement de la tranche 3 a été de courte durée, une vanne de la ligne d'éventage se refermant<sup>52</sup>, car il n'y avait pas assez d'air comprimé pour la maintenir ouverte. Après six heures et demie d'efforts, la vanne a été rouverte grâce à un compresseur mobile.

### *Mesures de précaution pour les fonctions de sûreté fondamentales à la tranche 2*

À environ 10 h 15 le 13 mars, comme les conditions du maintien des fonctions de sûreté fondamentales pertinentes dans les tranches 1 et 3 devenaient plus difficiles, le Directeur du site a ordonné que la voie d'éventage du confinement de la tranche 2 soit établie à titre préventif. L'intention était de tirer parti de conditions radiologiques encore favorables par rapport à celles des autres tranches et d'une tendance observable sur le site<sup>53</sup> pour mener des travaux dans le bâtiment du réacteur de la tranche 2 où les vannes devaient être actionnées. Les travaux ont été réalisés en 45 minutes, mais l'éventage n'a pas été réalisé, car la pression à l'intérieur du confinement de la tranche 2 n'était pas suffisante pour faire céder le disque de rupture.

Aux environs de 12 h 05, le Directeur du site a aussi ordonné des préparatifs de précaution en vue de l'injection d'eau de mer dans la tranche 2 au cas où le système de refroidissement viendrait à être défaillant. À cette fin, des autopompes devaient être connectées aux lignes de protection contre l'incendie de la tranche 2 pour y injecter de l'eau à partir de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3 si nécessaire.

### *Injection d'eau de mer dans la tranche 3 et augmentation des intensités de rayonnement*

Comme la réserve d'eau douce des cuves pour la protection contre l'incendie était épuisée à 12 h 20 le 13 mars, le Directeur du site a décidé d'injecter de l'eau de mer dans le réacteur de la tranche 3. Les autopompes ont été repositionnées, et l'injection d'eau de mer à partir de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3 a commencé près d'une heure plus tard, à 13 h 12.

À 14 h 15 le 13 mars, un débit de dose élevé (presque 1 mSv/h) a été mesuré près de la limite du site et les organismes gouvernementaux compétents ont été informés à 14 h 23 d'une 'augmentation anormale de l'intensité de rayonnement à la limite du site', comme prévu dans la réglementation associée à la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19]. Quinze minutes plus tard, le débit de dose dépassait 100 à 300 mSv/h aux portes d'entrée du bâtiment

<sup>52</sup> Comme on l'a découvert deux heures plus tard.

<sup>53</sup> Entre 5 h 30 et 10 h 50 le 13 mars, des neutrons ont été détectés à environ 1 km des bâtiments des réacteurs 1 à 4, près de l'entrée principale, signe d'une éventuelle rupture de la cuve de confinement, bien que la source des neutrons soit inconnue.

du réacteur de la tranche 3. Comme les débits de dose mesurés du côté de la tranche 3 dans la salle de commande principale commune aux tranches 3 et 4 dépassaient 12 mSv/h, l'équipe de quart est passée du côté de la tranche 4.

Le centre d'intervention d'urgence sur le site a déduit de ces niveaux de dose que des gaz radioactifs s'étaient échappés du réacteur de la tranche 3, ce qui signifiait que de l'hydrogène s'était aussi échappé. Conscient du risque d'une explosion d'hydrogène similaire à celle survenue dans la tranche 1, le Directeur du site a décidé, à 14 h 45, d'évacuer temporairement les travailleurs se trouvant dans la salle de commande principale commune aux tranches 3 et 4 et dans les zones voisines de la tranche 3.

Les zones évacuées comprenaient aussi celle de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3, ce qui a arrêté les activités d'injection d'eau. L'ordre d'évacuation a été levé à 17 heures, et les travailleurs sont retournés dans la zone de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3 pour poursuivre les activités d'injection d'eau et d'éventage.

#### *Établissement du refroidissement du cœur dans la tranche 5*

Dans l'intervalle, le générateur diesel de secours de la tranche 6 a été connecté à 20 h 48 le 13 mars à la pompe du système normal à basse pression d'évacuation de la chaleur de la tranche 5 et a été activé à 20 h 54. Une ligne d'injection d'eau dans le réacteur de la tranche 5 par l'intermédiaire de l'un des deux systèmes d'évacuation de la chaleur résiduelle a été mise en place et les vannes des conduites de connexion au système de condensat d'eau d'appoint ont été ouvertes, 53 heures après la perte totale des alimentations électriques de la centrale. Toutefois, il n'y a pas eu injection d'eau car la pression du réacteur avait progressivement augmenté et dépassé la pression d'injection. En réaction, une soupape de décharge de sûreté a été ouverte, en utilisant l'alimentation CC et l'azote disponibles. Cela a permis de réduire la pression dans la cuve sous pression du réacteur et d'injecter de l'eau dans le réacteur de la tranche 5 à 5 h 30 le 14 mars, opération qui s'est poursuivie par la suite<sup>54</sup>.

#### *Perte du refroidissement par l'eau de mer dans les tranches 1 et 3*

Comme l'injection d'eau de mer dans les tranches 1 et 3 à partir de la fosse de la vanne de rétrolavage de la tranche 3 s'est poursuivie le lundi 14 mars, le niveau d'eau dans la fosse a tellement baissé que l'opération d'injection a dû être interrompue à 1 h 10. Après que le tuyau d'aspiration eut été placé plus profondément dans la fosse, le reste de l'eau présente a été réservé pour injection dans la tranche 3, qui a repris deux heures plus tard. Le refroidissement du cœur de la tranche 1 a été reporté jusqu'à ce que la fosse soit remplie.

Dans les heures qui ont suivi, il est apparu que la pression du confinement de la tranche 3 augmentait et que le niveau d'eau dans le réacteur continuait de baisser. Le niveau d'eau dans le réacteur de la tranche 3 est sorti de la plage de mesure à 6 h 20 le 14 mars, ce qui indiquait aux opérateurs que le cœur était dénoyé. Le Directeur du site a ordonné une évacuation de tous les travailleurs, du fait de préoccupations quant à une éventuelle explosion d'hydrogène dans la tranche 3, arrêtant ainsi les activités de remplissage de la fosse.

---

<sup>54</sup> En outre, l'alimentation CA pour le fonctionnement du système de contrôle de la pression du bâtiment du réacteur était assurée par le générateur diesel de secours de la tranche 6. Un peu plus de deux jours après la perte totale des alimentations électriques, la pression dans le bâtiment du réacteur était inférieure à la pression atmosphérique, ce qui assurait un confinement secondaire.

La pression du confinement dans la tranche 3 a atteint un maximum à 7 heures, mais était légèrement inférieure à 7 h 20. Elle est ensuite restée stable en dessous de la pression nominale maximale. Le Directeur du site a alors décidé de reprendre les travaux de mise en place d'une ligne pour remplir la fosse de la vanne de rétrolavage depuis l'océan. Pendant les deux à quatre heures suivantes, les lignes d'injection d'eau de mer ont été rétablies pour toutes les tranches et le remplissage de la fosse a commencé, avec deux autopompes supplémentaires pour pomper l'eau de l'océan et des camions-citernes des Forces japonaises d'autodéfense, arrivés sur le site à 10 h 26, pour transporter l'eau vers la fosse.

L'injection d'eau de mer dans la tranche 1 était près de reprendre quand toutes les activités, y compris l'injection en cours d'eau de mer dans le réacteur de la tranche 3, ont dû être arrêtées à cause de l'explosion dans cette tranche. L'explosion a endommagé les tuyaux et les autopompes autour de la fosse de la vanne de rétrolavage et nécessité l'évacuation temporaire des travailleurs depuis les zones extérieures.

### *Explosion dans le bâtiment du réacteur de la tranche 3*

À 11 h 01, le 14 mars, une explosion s'est produite dans la partie supérieure du bâtiment du réacteur de la tranche 3, détruisant la structure au-dessus de l'étage de service et blessant des travailleurs. Outre la destruction du dispositif d'injection d'eau de remplacement, la capacité d'éventage du confinement dans la tranche 2 a été perdue par suite de l'explosion, qui a affecté la voie d'éventage du confinement de cette tranche précédemment mise en place. Après l'explosion, il est apparu que la vanne d'isolement de la ligne d'éventage de la tranche 2 était fermée et ne pouvait pas être rouverte.

### *Redémarrage du refroidissement par l'eau de mer dans les tranches 1 et 3*

Les travaux de rétablissement de la ligne d'injection d'eau de mer, cette fois directement depuis l'océan, ont repris après une interruption de deux heures. Après le rétablissement des lignes d'injection, l'injection d'eau de mer a repris d'abord pour la tranche 3 dans l'après-midi du 14 mars et plus tard, dans la soirée, pour la tranche 1. Les cœurs étaient restés sans refroidissement par injection d'eau pendant 9 heures pour la tranche 3 et pendant 19 heures pour la tranche 1.

### *Perte de refroidissement et injection d'eau de mer dans la tranche 2*

À environ 13 heures le 14 mars, la tranche 2 a été la suivante à subir une perte de refroidissement, les mesures faites montrant que le niveau d'eau du réacteur avait baissé et que sa pression avait augmenté. Cela suggérait la défaillance possible du circuit de refroidissement du cœur isolé de la tranche 2, comme supposé par les opérateurs de la tranche et par le centre d'intervention d'urgence sur le site. En conséquence, un rapport de 'perte des fonctions de refroidissement du réacteur' a été publié pour la tranche 2, comme prévu dans la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19].

Après la défaillance du circuit de refroidissement du cœur isolé, l'injection d'eau de mer par l'intermédiaire du système de protection contre l'incendie a été tentée à 13 h 5, mais la pression du réacteur était trop élevée pour les autopompes. Il semblait probable que sans injection d'eau le cœur serait très rapidement dénoyé. Il a donc été décidé d'utiliser les soupapes de décharge pour dépressuriser le réacteur afin de permettre l'injection d'eau à

basse pression, tout en tenant compte de l'impact potentiel négatif sur le confinement du fait du rejet de vapeur du réacteur dans le confinement<sup>55</sup>.

Après la dépressurisation de la cuve du réacteur et le remplissage des autopompes, l'injection d'eau de mer dans la tranche 2 par l'intermédiaire du système de protection contre l'incendie a commencé peu avant 20 heures le 14 mars, d'abord avec une autopompe et peu après avec deux.

### *Dégradation du confinement de la tranche 2*

À environ 21 h 55 le 14 mars, les équipements de contrôle radiologique récemment rétablis dans le confinement indiquaient que l'intensité de rayonnement dans le confinement de la tranche 2 avait considérablement augmenté depuis les mesures précédentes, huit heures auparavant<sup>56</sup>. Par ailleurs, les pressions du réacteur et du confinement ont eu tendance à augmenter après 22 h 30 le 14 mars. La pression du confinement a dépassé la pression nominale à 22 h 50, nécessitant une déclaration de situation d'urgence pour la tranche 2, pour cause 'd'augmentation inhabituelle de la pression dans l'enveloppe de confinement' conformément à la réglementation associée à la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19]. Cette situation a été signalée aux autorités gouvernementales compétentes à 23 h 39. Pendant les trois à quatre heures suivantes, d'autres soupapes de décharge ont été ouvertes pour réduire la pression du réacteur afin de permettre l'injection d'eau dans le réacteur de la tranche 2. En conséquence, la pression du confinement a encore augmenté tandis que l'équipe chargée d'établir la ligne d'éventage pour réduire la pression du confinement était incapable d'ouvrir les vannes d'éventage. Pour protéger la fonction de confinement et permettre l'éventage le plus rapidement possible, le personnel de la TEPCO dans les centres d'intervention d'urgence sur le site et hors site a décidé d'éventer directement depuis le puits sec, tout en sachant que cela augmenterait les rejets radioactifs dans l'environnement. Toutefois, il n'a pas été possible non plus d'ouvrir les vannes des événements du puits sec, et l'éventage de la tranche 2 n'a donc pas pu être réalisé.

À 4 h 17 le mardi 15 mars, les organismes gouvernementaux compétents ont été informés que la dépressurisation du confinement de la tranche 2 et du réacteur n'avait pas été efficace et que la pression du confinement continuait d'augmenter.

### *Événements dans les tranches 2 et 4, suivis par l'évacuation du site*

À 6 h 14 le 15 mars, une explosion a été entendue sur le site et des tremblements ont été ressentis dans la salle de commande principale commune des tranches 1 et 2. Cela a été suivi par une chute de la pression mesurée du confinement de la tranche 2 (chambre de condensation). Le personnel de la salle de commande principale a commencé par signaler au centre d'intervention d'urgence sur le site que la pression de la chambre de condensation de

---

<sup>55</sup> La chambre de condensation de l'enveloppe de confinement primaire était déjà presque saturée.

<sup>56</sup> L'intensité de rayonnement a été multipliée par 5 000 dans l'atmosphère du confinement (de 1,08 mSv/h à 5 360 mSv/h) et par 40 dans la piscine de condensation du confinement (de 10,3 mSv/h à 383 mSv/h). En outre, des neutrons avaient été détectés entre 21 heures le 14 mars et 1 h 40 le 15 mars, à nouveau près de l'entrée principale. La TEPCO a pensé que les neutrons provenaient de la fission spontanée d'actinides libérés après l'endommagement du cœur de l'un des trois réacteurs.

la tranche 2 était retombée presque à la pression atmosphérique<sup>57</sup>, indice d'une éventuelle perte de la fonction de confinement.

Ces informations suggéraient une éventuelle défaillance de l'enveloppe de confinement et la possibilité de rejets incontrôlés depuis la tranche 2. Dans ces conditions, le centre d'intervention d'urgence sur le site a ordonné à tout le personnel de toutes les tranches d'évacuer temporairement vers le bâtiment sismiquement isolé, où se trouvait le centre d'intervention. À peu près au même moment que l'événement associé à la chambre de condensation de la tranche 2, une explosion dans la partie supérieure du bâtiment du réacteur de la tranche 4 a été signalée par le personnel en cours d'évacuation.

Après les événements des tranches 2 et 4, le Directeur du site a donné pour instruction à tout le personnel, à l'exception des personnes nécessaires pour le contrôle radiologique et l'intervention d'urgence, de se rendre dans un emplacement radiologiquement sûr. Quelque 650 personnes ont compris cet ordre comme une évacuation du site et se sont rendues à la centrale de Fukushima Daini. De 50 à 70 personnes<sup>58</sup>, dont le Directeur du site, seraient restées sur le site de Fukushima Daiichi. Les organismes gouvernementaux compétents ont été informés de l'évacuation par le centre d'intervention d'urgence sur le site à 7 heures le 15 mars.

Environ deux heures plus tard a été observé un rejet de fumée blanche (ou de vapeur) à partir du bâtiment du réacteur de la tranche 2, près du cinquième étage. Un débit de dose de près de 12 mSv/h a été mesuré à l'entrée principale à 9 heures le 15 mars, soit la valeur la plus élevée depuis le début de l'accident. En raison des fortes intensités de rayonnement, les autorités gouvernementales ont publié deux heures plus tard, à 11 heures, un décret ordonnant à toutes les personnes vivant dans un rayon de 20 à 30 km autour de la centrale de Fukushima Daiichi de se mettre à l'abri à l'intérieur.

Pendant cette séquence d'événements, des fonctions de sûreté fondamentales des tranches 1 à 3 ont été perdues ou gravement dégradées (fig. 2.5), et les efforts ont porté sur l'évaluation des dommages ainsi que sur le rétablissement et la stabilisation de ces fonctions.

### **2.1.3. Efforts de stabilisation**

#### *Remplissage de la piscine d'entreposage du combustible usé des tranches 3 et 4*

Une inspection visuelle à distance depuis un hélicoptère pour répondre aux préoccupations quant à l'état des piscines d'entreposage du combustible usé des tranches 3 et 4 a été réalisée dans l'après-midi du mercredi 16 mars. Elle a confirmé qu'il y avait suffisamment d'eau dans la piscine de la tranche 4 pour couvrir les assemblages combustibles ; toutefois, les observations n'étaient pas concluantes en ce qui concerne la piscine de la tranche 3, faisant de son remplissage une priorité élevée.

Le premier apport d'eau à la piscine d'entreposage du combustible usé de la tranche 3 a eu lieu entre 9 h 30 et 10 heures le 17 mars, lorsque des hélicoptères ont largué de l'eau de mer.

---

<sup>57</sup> Après vérification des valeurs indiquées, il a été confirmé que la pression de la chambre de condensation était sortie de la plage de mesure, mais la pression du puits sec n'avait pas baissé significativement dans la tranche 2.

<sup>58</sup> Comme indiqué dans plusieurs rapports d'enquête, leur nombre exact n'est pas certain [6, 8]. Il convient de noter également que le personnel qui s'était rendu à la centrale nucléaire de Fukushima Daini est revenu sur le site de la centrale de Fukushima Daiichi le même jour.

Entre 19 h 05 et 20 h 07 le même jour, des camions-citernes ont pulvérisé de l'eau douce. L'aspersion d'eau de mer ou d'eau douce dans la piscine d'entreposage du combustible usé de la tranche 4 a commencé le 20 mars<sup>59</sup>.

L'aspersion dans les piscines à l'aide d'un canon à eau et d'autopompes ou de pompes à béton s'est poursuivie par intermittence en mars pour faire en sorte que le combustible usé ne soit pas exposé. Le système de refroidissement et de nettoyage de la piscine d'entreposage du combustible a aussi été utilisé en avril et pendant une grande partie de mai 2011.

#### *Rétablissement des alimentations électriques et fin de la perte totale des alimentations électriques de la centrale*

Entre le 17 et le 20 mars, des travaux ont été réalisés pour poser des câbles électriques temporaires vers les tranches 1 et 2. À 15 h 46 le dimanche 20 mars, presque exactement neuf jours après la perte totale des alimentations électriques de la centrale, l'alimentation CA extérieure a été rétablie dans les tranches 1 et 2 grâce à ce dispositif temporaire, ce qui a mis fin à la perte totale des alimentations de ces tranches.

Dans la tranche 6, l'alimentation électrique du système de refroidissement du deuxième générateur diesel de secours refroidi par eau a été rétablie au moyen d'une ligne électrique connectée au générateur refroidi par air opérationnel. Le générateur diesel de secours refroidi par eau a commencé à fonctionner à 4 h 22 le 19 mars, assurant l'alimentation CA des tranches 5 et 6.

---

<sup>59</sup> La même méthode a été utilisée pour ajouter de l'eau dans la piscine d'entreposage du combustible usé de la tranche 1. Comme le bâtiment du réacteur de la tranche 2 couvrait encore la piscine d'entreposage du combustible usé, l'aspersion n'a pas pu être utilisée pour cette tranche.

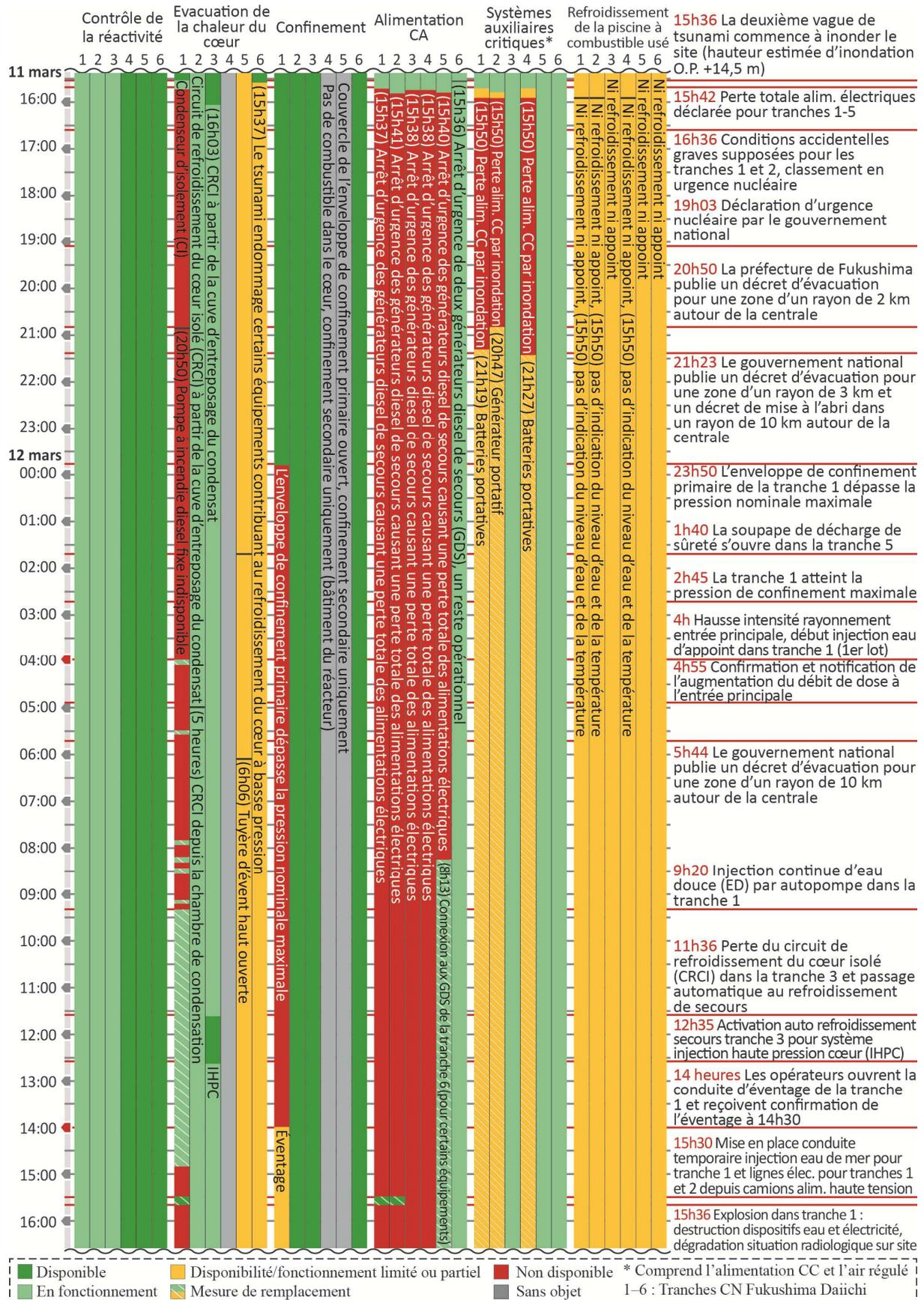


FIG. 2.5. Fonctions de sûreté fondamentales et auxiliaires lors de l'intervention après l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi (11-15 mars 2011).

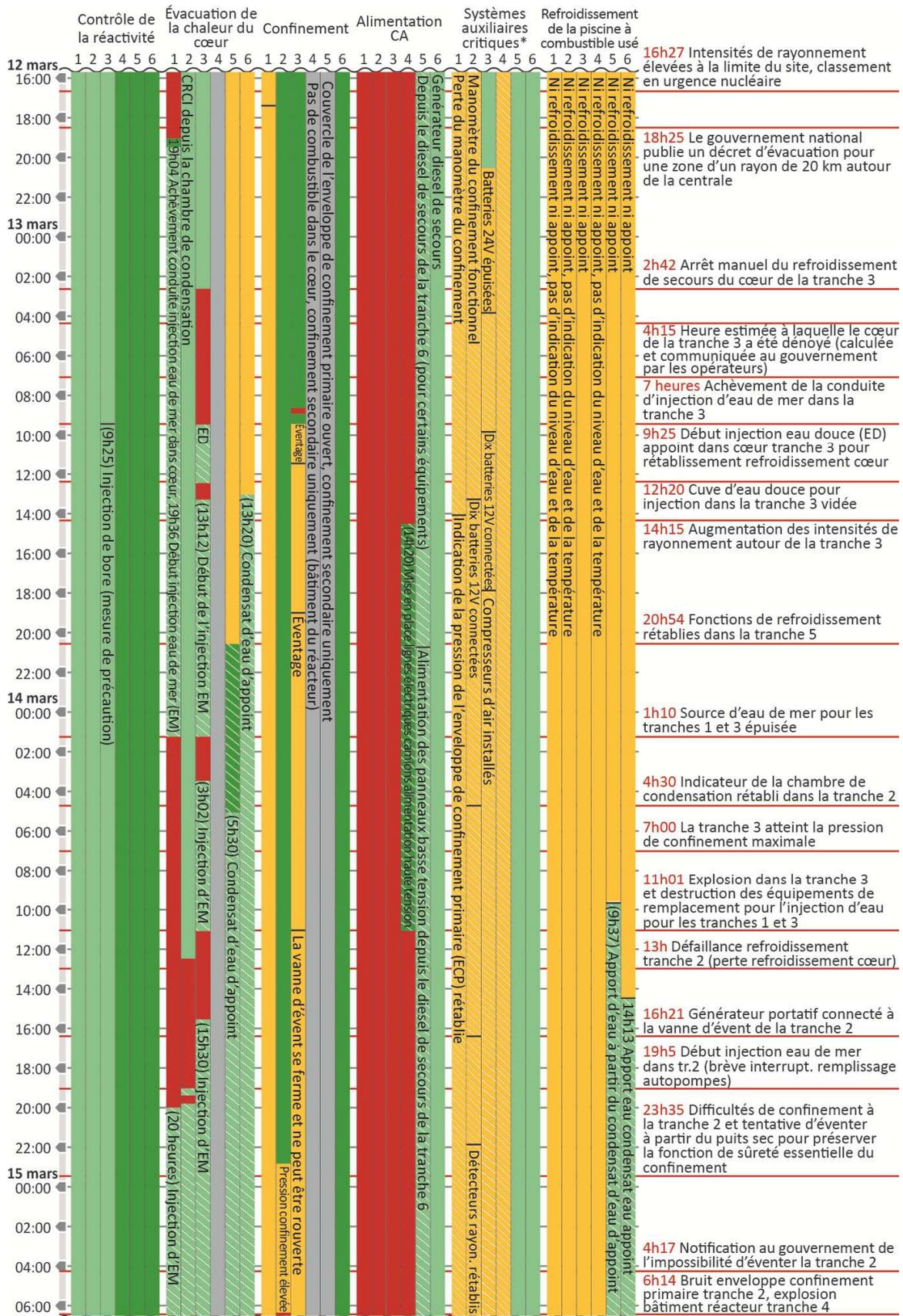


FIG. 2.5 (suite). Fonctions de sûreté fondamentales et auxiliaires lors de l'intervention après l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi (11-15 mars 2011).

La perte totale des alimentations électriques des tranches 3 et 4 a été terminée, après plus de 14 jours, avec le rétablissement de l'alimentation extérieure temporaire de ces tranches le 26 mars.

### Obtention de conditions stables

La tranche 5 a été la première à être mise en mode arrêt à froid quand son système normal d'évacuation de la chaleur résiduelle a été mis en service à 12 h 25 le 20 mars. La température du réacteur est passée sous les 100 °C en environ deux heures, et la tranche a été mise en mode arrêt à froid à 14 h 30 le 20 mars 2011, près de neuf jours après le début de l'accident.

Le système normal d'évacuation de la chaleur résiduelle de la tranche 6 a été remis en service, selon une procédure similaire à celle suivie dans la tranche 5, à 18 h 48 le même jour. La température du réacteur est passée sous les 100 °C en moins d'une heure, et la tranche a été mise en mode arrêt à froid à 19 h 27 le 20 mars (fig. 2.6).

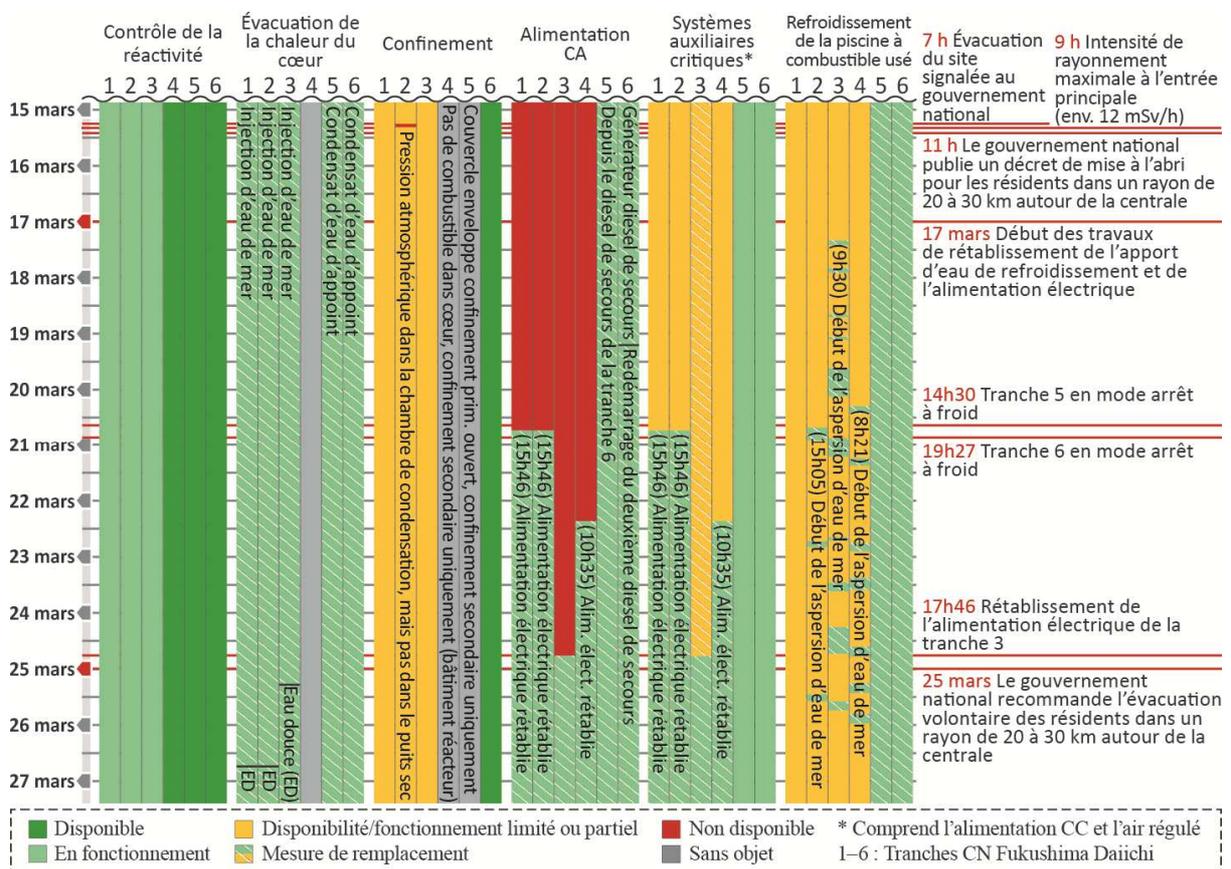


FIG. 2.6. Rétablissement temporaire des fonctions de sûreté fondamentales à la centrale de Fukushima Daiichi.

Pour les tranches 1 à 3, la TEPCO a publié le 17 avril 2011 un plan d'action sous la forme d'une feuille de route pour le relèvement après l'accident de sa centrale de Fukushima Daiichi [24]. Cette feuille de route comprenait les mesures à prendre pour établir le refroidissement stable des réacteurs et du combustible usé ; réduire et surveiller les rejets radioactifs ; contrôler l'accumulation d'hydrogène ; et empêcher le retour à la criticité. Ces mesures ont été mises en œuvre dans les neuf mois qui ont suivi l'accident.

La feuille de route énonçait deux conditions qui définiraient la fin de la situation accidentelle, ou « état d'arrêt à froid »<sup>60</sup> : obtention d'une réduction importante des rejets radiologiques et baisse régulière des débits de dose ; et obtention de valeurs cibles pour certains paramètres de la centrale comme prescrit dans la feuille de route. Le gouvernement du Japon et la TEPCO ont annoncé le 19 juillet que la première condition avait été satisfaite dans les tranches 1 à 3, et le 16 décembre 2011 que la deuxième condition y avait également été satisfaite. Cette annonce a officiellement<sup>61</sup> mis fin à la phase 'accident' des événements à la centrale de Fukushima Daiichi.

Toutefois, il subsistait dans la centrale quelques conditions instables, comme des variations de températures, dont on avait expliqué qu'elles étaient dues à des défaillances de l'instrumentation, ou des fluctuations de la mesure des produits de fission. Une plus grande stabilité des paramètres de la centrale a été obtenue en mars et avril 2012, tandis que les activités de gestion post-accidentelle se poursuivaient. En outre, les problèmes de gestion des déchets, comme les difficultés que crée l'accumulation d'eau radioactive due à la pénétration d'eaux souterraines dans les bâtiments et à des défaillances occasionnelles du matériel ont continué de se poser. Au moment de la rédaction du présent rapport, le gouvernement japonais considérait la centrale de Fukushima Daiichi comme une « installation spécifiée en tant que lieu d'accident »<sup>62</sup>.

## 2.2. CONSIDÉRATIONS DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

### 2.2.1. Vulnérabilité de la centrale aux événements externes

*Le séisme du 11 mars 2011 a causé des mouvements vibratoires du sol qui ont secoué les structures, systèmes et composants de la centrale. Il a été suivi par une série de vagues de tsunami, dont l'une a inondé le site. Tant les mouvements sismiques du sol que les hauteurs de vagues de tsunami enregistrés ont largement dépassé les hypothèses de risques qui avaient été formulées lors de la conception initiale de la centrale. Le séisme et le tsunami associé ont eu des effets préjudiciables sur plusieurs tranches de la centrale de Fukushima Daiichi.*

*Le risque sismique et les vagues de tsunami pris en compte dans la conception initiale étaient évalués principalement sur la base de données historiques sur les séismes et d'informations concernant les tsunamis récents au Japon. Cette évaluation initiale ne tenait pas suffisamment compte des critères tectoniques et géologiques et aucune réévaluation sur la base de ces derniers n'a été entreprise.*

---

<sup>60</sup> À l'époque, le gouvernement japonais a donné à l'expression « état d'arrêt à froid » une définition spécifique pour les réacteurs de Fukushima Daiichi. Sa définition diffère de celle employée dans la terminologie de l'AIEA et d'autres.

<sup>61</sup> D'après les critères fixés à l'époque par le gouvernement japonais.

<sup>62</sup> D'après la définition d'« installation nucléaire spécifiée », à savoir une installation qui nécessiterait des mesures spéciales pour la sûreté ou la protection physique de matières nucléaires spécifiées, établie par l'actuel organisme de réglementation, l'Autorité de réglementation nucléaire (NRA), le 7 novembre 2012.

*Avant le séisme, la Fosse du Japon était classée comme zone de subduction avec une fréquence élevée de séismes de magnitude 8 ; un séisme de magnitude 9 au large de la préfecture de Fukushima n'était pas considéré comme crédible par les scientifiques japonais. Pourtant, des magnitudes similaires ou plus élevées avaient été enregistrées dans différentes régions ayant des environnements tectoniques similaires au cours des quelques décennies précédentes.*

*Il ne semble pas que les principales caractéristiques de sûreté de la centrale aient été affectées par les mouvements vibratoires du sol générés par le séisme du 11 mars 2011. Cela s'explique par l'approche prudente retenue pour la conception et la construction des centrales nucléaires au Japon face aux séismes et qui aboutit à des centrales ayant des marges de sûreté suffisantes. Toutefois, la conception initiale ne prévoyait pas de marges de sûreté comparables pour les phénomènes externes extrêmes d'inondation, comme les tsunamis.*

*La vulnérabilité de la centrale de Fukushima Daiichi aux dangers externes n'avait pas été réévaluée de manière systématique et approfondie pendant sa vie utile. Au moment de l'accident, il n'y avait pas au Japon de prescription réglementaire concernant de telles réévaluations, et les réglementations et lignes directrices existantes ne tenaient pas suffisamment compte de l'expérience d'exploitation nationale et internationale pertinente. Les lignes directrices réglementaires au Japon concernant les méthodes de prise en compte des effets d'événements associés aux séismes, comme les tsunamis, étaient générales et brèves et ne contenaient pas de critères spécifiques ou d'orientations détaillées.*

*Avant l'accident, l'exploitant avait procédé à certaines réévaluations des niveaux d'inondation liés aux tsunamis extrêmes, en appliquant une méthodologie consensuelle élaborée au Japon en 2002, qui avaient abouti à des valeurs plus élevées que les estimations de la base de conception initiale. Quelques mesures compensatoires avaient donc été prises, mais elles se sont avérées insuffisantes au moment de l'accident.*

*En outre, l'exploitant avait fait, avant l'accident, plusieurs calculs expérimentaux en utilisant des modèles de sources de vagues ou des méthodologies qui allaient au-delà de la méthodologie consensuelle. Ainsi, un calcul expérimental avec le modèle de source proposé par le Centre japonais de promotion de la recherche sur les séismes en 2002, qui utilisait les informations les plus récentes et appliquait une approche différente dans ses scénarios, prévoyait un tsunami considérablement plus fort que ceux de la conception initiale et des estimations faites dans les réévaluations précédentes. Au moment de l'accident, d'autres évaluations étaient en cours, mais dans l'intervalle, aucune autre mesure compensatoire n'avait été prise. Les valeurs estimées étaient similaires aux niveaux d'inondation enregistrés en mars 2011.*

*D'après l'expérience d'exploitation dans le monde, il y a eu des cas où les aléas naturels ont été au-delà de ce qui était prévu dans la base de conception d'une centrale nucléaire. Plus particulièrement, l'expérience tirée de certains de ces événements a démontré la vulnérabilité des systèmes de sûreté aux inondations.*

#### **Encadré 2.4. Tsunamis [25]**

Un tsunami – mot japonais signifiant vague (nami) de port (tsu) – est une série de vagues se propageant avec de grandes longueur d’onde (de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres) et période (de plusieurs minutes à des dizaines de minutes, et exceptionnellement des heures), produites par une déformation ou des perturbations du plancher océanique (ou, en termes génériques, du fond sous-marin). Les séismes, les phénomènes volcaniques, les glissements de terrain sous-marins et côtiers, les chutes de rochers et les éboulements de falaises peuvent provoquer un tsunami. Des tsunamis peuvent survenir dans toutes les régions océaniques et tous les bassins maritimes de la planète, et même les fjords et les grands lacs.

Les vagues de tsunami se propagent à partir du lieu d’origine dans toutes les directions, la direction principale de propagation de l’énergie étant déterminée par les dimensions et l’orientation de la source. Pendant la propagation du tsunami en eaux profondes, les vagues progressent comme des ondes de gravité ordinaires, à une vitesse qui dépend de la profondeur d’eau. Par exemple, en plein océan, les vitesses peuvent dépasser les 800 km/h, avec une hauteur de vague généralement inférieure à quelques dizaines de centimètres et, si la source est un séisme, des longueurs d’onde dépassant souvent les 100 km. Pendant la propagation, la topographie sous-marine influe sur la vitesse et la hauteur des vagues de tsunami. La réfraction, la réflexion sur une montagne ou une chaîne sous-marine (archipel) et la diffraction sont des facteurs importants qui influent sur la propagation des vagues de tsunami en eaux profondes.

La cambrure et la hauteur des vagues augmentent aux abords des eaux peu profondes, parce que la vitesse des vagues se réduit et que leur longueur d’onde se raccourcit quand la profondeur diminue. Dans la zone côtière, la topographie et la bathymétrie locales (péninsule ou canyon sous-marin, p. ex.) peuvent causer une augmentation supplémentaire de la hauteur des vagues, qui peut aussi être amplifiée par la présence d’une baie, d’un estuaire ou d’un port ou par les brèches d’un lagon quand le tsunami s’approche des terres. Plusieurs grandes vagues peuvent survenir, la première pouvant ne pas être la plus grande. Le niveau de la mer peut aussi baisser avant la première vague et avant chacune des suivantes. Un tsunami peut causer une inondation à l’intérieur des terres, car sa longueur d’onde est si grande qu’une énorme masse d’eau suit le front d’onde. Ceci peut avoir un impact dévastateur.

Selon les normes de sûreté de l’AIEA en vigueur au moment de l’accident, avant la construction d’une centrale nucléaire, les dangers externes auxquels le site est exposé, comme les séismes et les tsunamis, doivent être répertoriés et leurs impacts sur la centrale nucléaire doivent être évalués dans le cadre d’une caractérisation détaillée et complète du site [26]. Des bases de conception adéquates doivent être établies pour mettre en place des marges de sûreté suffisantes pendant la durée de vie utile de la centrale nucléaire [27]. Ces marges doivent être suffisamment importantes pour tenir compte du haut degré d’incertitude associé à l’évaluation des événements externes. Il faut aussi réévaluer périodiquement les dangers liés au site afin de déterminer les changements à apporter en fonction d’informations et de connaissances nouvelles pendant la durée de vie de la centrale [26].

Dans les années 1960 et 1970, la pratique internationale courante était d’utiliser les données historiques pour l’application des méthodes d’estimation des risques sismiques et des risques concomitants (tsunamis, par exemple). Conformément à cette pratique courante, on accroissait les marges de sûreté en augmentant l’intensité ou la magnitude du séisme maximal historiquement enregistré dans la région du site et en supposant qu’un tel événement se produirait à la distance la plus courte du site [28]. On procédait ainsi pour tenir compte des incertitudes dans les observations concernant les intensités ou les magnitudes et aussi pour compenser le fait que les valeurs maximales potentielles pourraient ne pas être atteintes au cours d’une période d’observation relativement courte alors que, généralement, la période d’observation doit englober les données préhistoriques afin de fournir des estimations robustes des risques évalués. Or, l’évaluation du risque sismique pour la conception des tranches 1 et 2 de la centrale de Fukushima Daiichi a été faite principalement sur la base des données sismiques historiques concernant la région sans que les marges de sûreté aient été

accrues comme indiqué ci-dessus. Pendant l'obtention des permis de construire pour les tranches ultérieures, on a appliqué une nouvelle méthodologie combinant les données sismiques historiques et les dimensions des failles géomorphologiques [16, 29].

Les informations concernant les failles intraplaques provenaient de sources officielles ainsi que de levés spécifiques réalisés par l'exploitant, et des valeurs prudentes des paramètres ont été utilisées dans l'analyse pour prédire la magnitude d'un éventuel séisme. Concernant la Fosse du Japon, on a estimé initialement qu'un séisme de magnitude 8 était l'événement maximal, i) sans justification suffisante basée sur la tectonique et ii) sans utiliser les analogues mondiaux, en faisant largement appel aux données historiques.

Des séismes de forte magnitude (M 9) s'étaient produits ailleurs le long de la « ceinture de feu » du Pacifique, par exemple au Chili en 1960 et en Alaska en 1964, peu avant que l'autorisation de la construction de la tranche 1 de Fukushima Daiichi soit accordée. Ces séismes n'ont pas donné lieu à un consensus parmi les sismologues japonais quant à la possibilité qu'un tel événement survienne près des côtes du Japon dans un environnement tectonique similaire à ceux où des séismes s'étaient produits dans d'autres zones de la plaque tectonique du Pacifique.

Pendant l'évaluation initiale des risques d'inondation externe utilisée pour le « permis d'établissement » de la centrale, les concepteurs de la centrale ont appliqué la méthodologie et les critères prévalant au Japon à l'époque, qui reposaient sur l'étude et l'interprétation des données historiques sur les séismes et les tsunamis. Le tsunami distant qui s'était produit à la suite de l'un des séismes les plus puissants connus dans le monde, survenu au Chili en 1960, a été l'événement utilisé aux fins de la conception pour la protection contre les inondations externes. Cet événement avait causé une hauteur de tsunami observée dans le port d'Onahama, dans la préfecture de Fukushima, de 3,1 m au-dessus du niveau de la mer.

Pour ce qui est des sources de tsunami situées au niveau de la Fosse du Japon, au large de la côte est, il y avait un manque de données historiques sur les niveaux d'inondation dus aux tsunamis à l'emplacement du site de Fukushima Daiichi, ainsi qu'un manque de preuves sur la survenue de séismes au large du site. L'absence de données sur les sources de tsunamis proches étayait le choix du niveau maximal d'inondation de 3,1 m retenu aux fins de la conception. La TEPCO n'a pas pris en considération les séismes de forte magnitude survenus ailleurs et ne les a pas postulés comme sources locales de tsunamis au niveau de la Fosse du Japon.

Malgré l'absence de prescriptions réglementaires au Japon sur la réévaluation du risque sismique et du risque de tsunami, la TEPCO avait procédé à plusieurs réévaluations pendant la durée de vie de la centrale de Fukushima Daiichi. [30]. La TEPCO et d'autres organismes exploitants au Japon avaient réévalué les niveaux d'inondation par les tsunamis en utilisant une méthodologie élaborée par la Société japonaise des ingénieurs civils et publiée en 2002 [31]. Cette méthodologie faisait appel à un modèle standard de source pour les tsunamis proches ou locaux, sur la base de données historiques, dans lequel aucun séisme provoquant un tsunami n'était supposé se produire le long de la Fosse du Japon au large du site de Fukushima Daiichi. L'hypothèse du modèle standard de source, décrit ci-dessus, a été appliquée dans toutes les évaluations réalisées selon cette méthodologie.

Les principes directeurs de 2006 de la Commission de la sûreté nucléaire du Japon (NSC) [32] exigeaient la prise en considération des séismes interplaques ainsi que des séismes crustaux intraplaques. Ces principes directeurs sur la sûreté sismique et les événements

associés ont servi à évaluer les risques sismiques, mais les principes concernant les risques de tsunami ne contenaient que des assertions générales et brèves et n'énonçaient pas de prescriptions, critères ou méthodes spécifiques. Ces séismes ont été considérés par la TEPCO comme relevant de la classe M 8 lors de son 'contrôle a posteriori' de la sûreté sismique demandé par l'Agence de sûreté nucléaire et industrielle (NISA). Toutefois, du fait de la distance entre le site et ces séismes interplaques, l'approche donnait de plus petites valeurs de risque associées à cette structure tectonique par rapport aux sources sismogéniques intraplaques. Leur impact sur le risque de mouvement du sol n'a donc pas été étudié. Au moment de l'accident, la TEPCO n'avait pas achevé la réévaluation de la vulnérabilité de la centrale aux séismes et aux tsunamis.

En 2009, la TEPCO a estimé à 6,1 m la hauteur maximale de tsunami sur la base des données bathymétriques et de marée les plus récentes. À la suite de cette nouvelle estimation, des modifications ont été apportées à la conception de la centrale de Fukushima Daiichi ; on a notamment surélevé les moteurs des pompes servant à évacuer la chaleur résiduelle. Pendant l'accident, cette mesure s'est avérée insuffisante à elle seule. Aucune autre mesure de sûreté n'avait été prise pour renforcer la protection contre l'inondation, comme des mesures pour éviter le noyage des générateurs diesel de secours.

Outre les réévaluations effectuées selon la méthodologie de la Société japonaise des ingénieurs civils, la TEPCO avait procédé avant l'accident à des calculs expérimentaux des niveaux d'inondation par un tsunami. Un de ces calculs expérimentaux [30] appliquait le modèle de source proposé par le Centre de promotion de la recherche sur les séismes, qui utilisait les informations les plus récentes et envisageait différents scénarios [30, 33]. Cette approche consistait à étudier le potentiel de la Fosse du Japon au large de la préfecture de Fukushima de causer des tsunamis. Elle ne reposait pas uniquement sur des données historiques sur les tsunamis pour cette partie de la zone tectonique de subduction.

La nouvelle approche, appliquée entre 2007 et 2009, postulait un séisme de magnitude 8,3 au large de la côte de Fukushima. Un tel séisme pourrait provoquer un runup d'environ 15 m sur le site de la centrale de Fukushima Daiichi (similaire à la hauteur effective le 11 mars 2011), qui inonderait les principaux bâtiments. Sur la base de cette nouvelle analyse, la TEPCO, la NISA et d'autres organismes japonais ont estimé que d'autres études et recherches étaient nécessaires. La TEPCO et d'autres compagnies d'électricité ont demandé à la Société japonaise des ingénieurs civils de réexaminer l'adéquation des modèles de sources de tsunamis ; ces activités étaient en cours en mars 2011.

La TEPCO n'a pas pris de mesures compensatoires intérimaires pour tenir compte de l'augmentation de la hauteur estimée des tsunamis, et la NISA n'a pas exigé que la TEPCO donne rapidement une suite à ces résultats [30].

Malgré les difficultés et les incertitudes de l'évaluation du risque sismique, les événements survenus à la centrale de Fukushima Daiichi ont démontré la robustesse des centrales nucléaires japonaises face aux mouvements sismiques vibratoires du sol. Le 11 mars 2011, les accélérations maximales enregistrées à la base des bâtiments des tranches 1 à 5 de Fukushima Daiichi étaient considérablement plus fortes que ce qui avait été estimé à la conception de la centrale. Pourtant, il ne semble pas que les mouvements du sol aient causé des dommages notables aux structures, systèmes ou composants liés à la sûreté [34]. Toutefois, les défenses contre l'inondation due au tsunami se sont révélées insuffisantes contre des vagues de tsunami d'une hauteur bien supérieure que celles retenues dans la conception de la centrale de Fukushima Daiichi. Un scénario impliquant des aléas naturels

extrêmes survenant simultanément et touchant plusieurs tranches n'avait pas été pris en considération dans la conception de la centrale de Fukushima Daiichi. L'envoi en temps voulu de ressources pour mettre en œuvre les actions de gestion des accidents graves dans la centrale de Fukushima Daiichi a été mis en échec par le chaos régnant dans la région en raison des dommages considérables causés aux infrastructures par le séisme et le tsunami.

L'expérience d'exploitation des centrales nucléaires en service au Japon et ailleurs pendant les 12 années précédant l'accident montrait qu'une inondation pouvait avoir des conséquences graves. L'expérience pertinente concernait notamment une tempête ayant causé l'inondation de deux réacteurs à la centrale nucléaire du Blayais (France) en 1999, le tsunami dans l'océan Indien en 2004, qui avait inondé deux pompes à eau de mer à la centrale nucléaire de Madras (Inde), et le tremblement de terre de Niigataken Chuetsu-oki (Japon) en 2007. Ce dernier avait touché la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa de la TEPCO, provoquant l'inondation du bâtiment du réacteur de la tranche 1 par suite d'une défaillance de la tuyauterie souterraine de lutte contre les incendies extérieurs [35-38].

### **2.2.2. Application du concept de défense en profondeur**

*La défense en profondeur est un concept qui a été appliqué pour assurer la sûreté des installations nucléaires depuis les débuts de l'électronucléaire. Son objectif est de compenser les défaillances humaines et matérielles potentielles grâce à plusieurs niveaux de protection. La défense est assurée par des moyens multiples et indépendants à chaque niveau de protection.*

*La conception de la centrale de Fukushima Daiichi intégrait des équipements et systèmes pour les trois premiers niveaux de défense en profondeur : 1) les équipements prévus pour assurer un fonctionnement normal fiable ; 2) les équipements prévus pour remettre la centrale dans un état sûr après un événement anormal ; et 3) les systèmes de sûreté prévus pour gérer les conditions accidentelles. Les bases de conception étaient déduites à partir d'une série de dangers postulés ; toutefois, les risques externes, comme les tsunamis, n'étaient pas pleinement pris en compte. En conséquence, l'inondation résultant du tsunami a simultanément mis à l'épreuve les trois premiers niveaux de défense en profondeur, ce qui a entraîné des défaillances de cause commune des équipements et systèmes à chacun de ces niveaux.*

*Les défaillances de cause commune de multiples systèmes de sûreté ont créé dans la centrale des conditions qui n'étaient pas prévues dans la conception. Par conséquent, les moyens de protection destinés à assurer le quatrième niveau de défense en profondeur, à savoir la prévention de la progression des accidents graves et l'atténuation de leurs conséquences, n'étaient pas disponibles pour rétablir le refroidissement du réacteur et maintenir l'intégrité du confinement. La perte totale d'alimentation électrique, le manque d'informations sur les paramètres de sûreté pertinents dû à l'indisponibilité des instruments nécessaires, la perte des dispositifs de contrôle et l'insuffisance des procédures d'exploitation n'ont pas permis d'arrêter la progression de l'accident et d'en limiter les conséquences.*

*Le fait qu'il n'y avait pas de moyens de protection suffisants à chaque niveau de défense en profondeur a entraîné de graves dommages dans les tranches 1, 2 et 3 et des rejets de matières radioactives importants depuis ces mêmes tranches.*

Le séisme du 11 mars 2011 a provoqué des dommages majeurs aux infrastructures de la région, y compris la perte des connexions entre le réseau électrique externe et la centrale de Fukushima Daiichi. Il en est résulté un écart par rapport au fonctionnement normal de la centrale (niveau 1 de défense en profondeur). Après le séisme, l'alimentation électrique a été assurée grâce à des sources sur le site, et tous les systèmes de sûreté du niveau 3 de défense en profondeur ont continué de fonctionner comme prévu. Cela montre que les systèmes et équipements de sûreté ont résisté au risque sismique [8].

La centrale avait été construite près du niveau de la mer et la protection contre le risque d'inondation n'était pas suffisante, car ce risque n'avait pas été correctement estimé [27]. Les équipements de sûreté essentiels n'étaient pas protégés par des compartiments étanches ou par leur emplacement à une hauteur suffisante pour les mettre à l'abri d'une inondation. De ce fait, on a perdu la possibilité d'appliquer les dispositions prévues pour l'évacuation de la chaleur résiduelle et le refroidissement du confinement aux niveaux 1, 2 et 3 de défense en profondeur.

***Encadré 2.5. Le concept de défense en profondeur applicable au moment de l'accident [27]***

En vertu du concept de défense en profondeur, tel qu'il est appliqué à toutes les activités de sûreté, qu'elles aient trait à l'organisation, au comportement du personnel ou à la conception, ces activités sont soumises à des dispositions qui se recouvrent partiellement, de telle sorte que si une défaillance venait à se produire, elle serait détectée et compensée ou corrigée par des mesures appropriées. Ce concept a été précisé depuis 1988 [39, 40]. Son application pendant toute la conception et l'exploitation assure une protection graduée contre les transitoires, les incidents de fonctionnement prévus et les accidents les plus divers, y compris ceux qui résultent d'une défaillance du matériel ou d'une action humaine à l'intérieur de la centrale, ainsi que les événements ayant leur origine hors de la centrale.

L'application du concept de défense en profondeur à la conception d'une centrale assure une série de niveaux de défense (caractéristiques intrinsèques, équipements et procédures) destinés à prévenir les accidents et à assurer une protection appropriée en cas d'échec de la prévention.

- 1) Le premier niveau de défense a pour objet d'empêcher tout écart par rapport au fonctionnement normal et de prévenir les défaillances des systèmes. Il s'ensuit que la centrale doit être conçue, construite, entretenue et exploitée de manière correcte et prudente et conformément à des niveaux de qualité adéquats et à des pratiques techniques appropriées, telles que l'application des principes de redondance, d'indépendance et de diversité. Pour atteindre cet objectif, il convient d'accorder l'attention voulue au choix des codes de calcul et des matériaux appropriés ainsi qu'au contrôle de la fabrication des composants et de la construction de la centrale. Les options de conception qui peuvent aider à réduire les dangers internes potentiels (par exemple en maîtrisant la réaction à un événement initiateur postulé), atténuer les conséquences d'un événement initiateur postulé donné ou réduire le terme source correspondant aux rejets probables à la suite d'une séquence accidentelle contribuent à ce niveau de défense. Il faut aussi prêter attention aux procédures suivies pour la conception, pour la fabrication, pour la construction et pour l'inspection en service, la maintenance et les essais de la centrale, à la facilité d'accès pour ces activités, à la façon dont la centrale est exploitée et dont l'expérience d'exploitation est mise à profit. Tout ce processus est étayé par une analyse détaillée qui détermine les exigences à respecter pour l'exploitation et la maintenance de la centrale.
- 2) Le deuxième niveau de défense a pour objet de déceler et de prévenir les écarts par rapport aux conditions normales de fonctionnement, afin d'empêcher des incidents de fonctionnement prévus de dégénérer en conditions accidentelles. Il est ainsi admis que des événements initiateurs postulés surviendront probablement pendant la durée de vie en service d'une centrale nucléaire malgré les précautions prises pour les éviter. Ce niveau de défense exige la mise en place des systèmes spécifiques déterminés dans l'analyse de sûreté et la définition de procédures d'exploitation propres à éviter ou à réduire le plus possible les dommages dus à ces événements.

**Encadré 2.5. (suite) Le concept de défense en profondeur applicable au moment de l'accident [27]**

- 3) Dans le cas du troisième niveau de défense, on se place dans l'hypothèse - très improbable - où le niveau précédent n'empêcherait pas certains incidents de fonctionnement prévus ou certains événements initiateurs postulés de dégénérer en des événements plus graves. Ces événements improbables sont pris en compte dans la base de conception de la centrale, et l'on prévoit des dispositifs de sûreté intrinsèque, une conception sûre après défaillance, des équipements et des procédures supplémentaires pour en maîtriser les conséquences et pour parvenir à des états stables et acceptables après de tels événements. Il s'ensuit que l'on doit prévoir des dispositifs de sauvegarde qui soient capables d'amener la centrale, d'abord à un état maîtrisé, puis à un état sûr à l'arrêt et de préserver au moins une barrière pour confiner les matières radioactives.
- 4) Le quatrième niveau de défense a pour objet de faire face aux accidents graves dans lesquels la base de conception peut être dépassée et d'assurer le maintien des rejets radioactifs à un niveau aussi bas que possible. À ce niveau de défense, l'objectif le plus important est de protéger la fonction de confinement. Il peut être atteint grâce non seulement aux procédures de gestion des accidents, mais aussi à des mesures et à des procédures complémentaires destinées à empêcher la progression de l'accident ainsi qu'à l'atténuation des conséquences de certains accidents graves. La protection assurée par le confinement peut être démontrée au moyen de méthodes du type « meilleure estimation ».
- 5) Le cinquième et dernier niveau de défense vise à atténuer les conséquences radiologiques des rejets potentiels de matières radioactives qui peuvent résulter de conditions accidentelles. Cela nécessite la mise en place d'un centre de crise bien équipé (voir la section 3 sur la préparation et la conduite des interventions d'urgence).

Dans la mise en œuvre de la défense en profondeur, il convient de prévoir à la conception une série de barrières physiques pour confiner les matières radioactives en des points spécifiés. Le nombre de barrières physiques qui seront nécessaires dépendra des dangers internes et externes potentiels, ainsi que des conséquences potentielles des défaillances. Dans le cas des réacteurs refroidis par eau, ces barrières sont généralement constituées par la matrice du combustible, la gaine du combustible, l'enveloppe du circuit primaire du réacteur et l'enceinte de confinement.

L'inondation a été la cause commune de la défaillance du système d'alimentation électrique de secours, de la perte presque totale de l'alimentation CC des dispositifs de mesure et de contrôle, et de la destruction des structures et composants assurant le refroidissement de la centrale par l'eau de mer.

Les objectifs du niveau 4 de défense en profondeur sont d'empêcher la progression de l'accident et d'atténuer les conséquences d'un accident grave. Pour les actions correspondant au niveau 4, les opérateurs devaient utiliser tous les moyens disponibles pour apporter de l'eau au réacteur afin d'assurer une évacuation adéquate de la chaleur résiduelle. Pour cela, il fallait disposer d'instruments donnant des informations fiables sur les paramètres de sûreté clés et de moyens simples et fiables de réduire la pression dans le réacteur. En outre, les opérateurs devaient avoir des orientations claires et la formation voulue pour pouvoir prendre des mesures de gestion de l'accident [41].

Pendant la progression de l'accident, les opérateurs ont perdu la capacité de mesurer de façon fiable d'importants paramètres de sûreté depuis la salle de commande. Ces informations étaient nécessaires pour évaluer l'état du réacteur et prendre des décisions en connaissance de cause concernant des actions et méthodes inhabituelles de refroidissement des réacteurs. Néanmoins, les opérateurs ont donné une priorité élevée au refroidissement des réacteurs et réussi à préparer rapidement des lignes d'approvisionnement en eau dans l'intention d'injecter du caloporteur dans les réacteurs au moyen des pompes basse pression disponibles. Cependant, les tentatives de réduction de la pression des réacteurs ont échoué, car aucune disposition n'avait été prise pour l'exécution de cette fonction après une perte totale

d'alimentation électrique. L'alimentation électrique de contrôle requise n'a pas pu être rétablie à temps pour empêcher l'endommagement du cœur [8].

La dernière barrière physique prévue au niveau 4 de la défense en profondeur est le confinement du réacteur. Son but est d'atténuer les conséquences des accidents en empêchant les rejets radioactifs de grande ampleur dans l'environnement après l'endommagement d'un réacteur. Suivant le type de confinement, divers systèmes ou équipements sont nécessaires pour protéger le confinement contre les phénomènes physiques associés aux accidents d'endommagement du cœur qui pourraient porter atteinte à l'intégrité du confinement. Les tranches de la centrale de Fukushima Daiichi comportaient des moyens d'éventage contrôlé du confinement pour évacuer la surpression pouvant résulter d'une fuite de vapeur depuis le circuit de refroidissement du réacteur. En outre, l'atmosphère à l'intérieur du confinement était remplie d'azote inerte afin d'éliminer la possibilité d'une combustion d'hydrogène et d'empêcher d'éventuelles explosions.

D'après les mesures effectuées pendant l'accident, les pressions du confinement des tranches 1, 2 et 3 ont atteint par moment des valeurs qui étaient proches ou au-dessus de celles en fonction desquelles le confinement avait été conçu. Cette augmentation de la pression était due à la perte des systèmes de refroidissement du confinement et à la production de vapeur par les cœurs surchauffés des réacteurs. Bien que certains dispositifs d'éventage du confinement aient pu être ouverts, il apparaît qu'il y a eu défaillance du confinement des tranches 1, 2 et 3, avec pour conséquence le rejet de matières radioactives et d'hydrogène. L'atmosphère azotée du confinement a effectivement empêché la combustion et l'explosion d'hydrogène dans cet espace confiné. Cependant, après la fuite d'hydrogène du confinement dans le bâtiment du réacteur, des explosions d'hydrogène se sont produites dans les tranches 1, 3 et 4 [8].

L'accident de Fukushima Daiichi a démontré que les aléas naturels extrêmes peuvent annuler ou neutraliser les multiples niveaux de défense en profondeur [42, 43]. Une identification et une évaluation systématiques des dangers externes et une solide protection contre ces dangers doivent donc être envisagées pour tous les niveaux de défense en profondeur. En outre, l'accident a montré que des dispositions de conception et des capacités de gestion des accidents de substitution pouvaient encore permettre d'apporter de l'eau de refroidissement au réacteur même si tous les systèmes de sûreté primaires conçus pour protéger le réacteur contre les accidents étaient inopérants. Toutefois, l'activation de ces dispositions en temps voulu nécessite des instruments à même de fournir des informations fiables sur les paramètres de sûreté clés et des moyens simples et fiables de réduire la pression dans le réacteur, de sorte que n'importe quel moyen puisse être utilisé pour apporter de l'eau de refroidissement au réacteur.

### **2.2.3. Évaluation de l'incapacité de remplir des fonctions de sûreté fondamentales**

*Les trois fonctions de sûreté fondamentales sont le contrôle de la réactivité dans le combustible nucléaire ; l'évacuation de la chaleur du cœur du réacteur et de la piscine d'entreposage du combustible usé ; et le confinement des matières radioactives. À la suite du séisme, la première fonction de sûreté fondamentale, le contrôle de la réactivité, a été remplie dans les six tranches de la centrale de Fukushima Daiichi.*

*La deuxième fonction de sûreté fondamentale – l'évacuation de la chaleur du cœur du réacteur et de la piscine d'entreposage du combustible usé – n'a pas pu être maintenue, car*

*les opérateurs étaient privés de presque tous les moyens de contrôle sur les réacteurs des tranches 1, 2 et 3 et sur les piscines d'entreposage du combustible usé du fait que la plupart des systèmes électriques CA et CC ne fonctionnaient plus. La perte de cette deuxième fonction de sûreté fondamentale est due, en partie, à l'incapacité d'utiliser d'autres moyens d'injection d'eau à cause de retards dans la dépressurisation des cuves sous pression des réacteurs. La perte de refroidissement a entraîné une surchauffe et la fusion du combustible dans les réacteurs.*

*La fonction de confinement a été perdue à la suite de la perte de l'alimentation CA et CC, qui a rendu inopérants les systèmes de refroidissement et empêché les opérateurs d'utiliser le système d'éventage du confinement. L'éventage du confinement était nécessaire pour réduire la pression et prévenir la défaillance de ce dernier. Les opérateurs ont pu éventer les tranches 1 et 3 pour réduire la pression dans les enveloppes de confinement primaire. Toutefois, cela a donné lieu à des rejets radioactifs dans l'environnement. Même si les événements du confinement des tranches 1 et 3 étaient ouverts, les enveloppes de confinement primaire de ces tranches ont fini par être détériorées. L'éventage du confinement de la tranche 2 n'a pas réussi, et le confinement a lâché, ce qui a provoqué des rejets radioactifs.*

#### **Encadré 2.6. Fonctions de sûreté fondamentales**

Les trois fonctions de sûreté fondamentales sont les suivantes :

- 1) Contrôle de la réactivité ;
- 2) Évacuation de la chaleur ;
- 3) Confinement des matières radioactives.

Avant l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi, il y avait eu deux accidents impliquant l'incapacité de maintenir une ou plusieurs fonctions de sûreté fondamentales. L'accident survenu en 1979 à la centrale nucléaire de Three Mile Island, aux États-Unis d'Amérique, est dû à la perte de la deuxième de ces fonctions de sûreté, mais les rejets radioactifs dans l'environnement ont pu être empêchés par la troisième fonction, le confinement des matières radioactives par l'enceinte de confinement. L'accident survenu en 1986 à la centrale nucléaire de Tchernobyl, dans l'ex-Union soviétique, a résulté de la perte de la première de ces fonctions de sûreté. Cette centrale n'avait pas d'enceinte de confinement. En conséquence, l'accident de Tchernobyl a entraîné un rejet de matières radioactives très important dans l'environnement. L'accident de Fukushima Daiichi a résulté de la perte des deuxième et troisième de ces fonctions de sûreté par suite d'une combinaison d'événements externes extrêmes.

#### *Contrôle de la réactivité du combustible nucléaire dans le cœur du réacteur*

Les systèmes de sûreté pour le contrôle de la réactivité du combustible nucléaire dans le cœur du réacteur sont le système de protection du réacteur et le mécanisme d'entraînement des barres de commande. Avant le séisme, les tranches 1 à 3 de Fukushima Daiichi étaient en fonctionnement ; les tranches 4 à 6 étaient à l'arrêt pour maintenance. Les réacteurs des tranches 1 à 3 ont été automatiquement arrêtés par leurs systèmes de protection, qui ont été activés par les équipements de surveillance sismique. L'insertion des barres de commande par le mécanisme d'entraînement de ces barres a mis fin à la réaction nucléaire en chaîne dans le combustible nucléaire et a mis les réacteurs à l'arrêt.

#### *Évacuation de la chaleur du combustible nucléaire*

Après l'arrêt des tranches 1 à 3, la chaleur résiduelle, produite par la décroissance en cours des substances radioactives dans le combustible, a été évacuée grâce aux systèmes de refroidissement des réacteurs. La deuxième fonction de sûreté fondamentale a pu ainsi être

maintenue. Les systèmes de refroidissement comprenaient à la fois des boucles de circulation en circuit fermé pour transférer la chaleur à de l'eau de mer et divers moyens d'injecter de l'eau à haute et basse pression dans les cœurs des réacteurs pour évacuer cette chaleur résiduelle (voir la section 2.1).

Nombre de ces systèmes avaient besoin d'une alimentation CA pour fonctionner, et tous d'une alimentation CC pour le contrôle de leur fonctionnement. La plupart des sources d'alimentation ont été perdues lors de l'accident ; la présente partie du rapport examine l'impact de cette perte.

### *Tranche 1*

Le condenseur d'isolement (voir l'encadré 2.2) pour le refroidissement de la tranche 1 a démarré automatiquement sur un signal de pression élevée dans la cuve du réacteur. Il a ouvert les vannes d'isolement dans les lignes de retour du condensat (d'autres vannes d'isolement dans les lignes étaient ouvertes en fonctionnement normal) quand le réacteur a été mis à l'arrêt après le séisme. Comme prévu par les procédures d'exploitation, les opérateurs ont arrêté et redémarré plusieurs fois le condenseur d'isolement pour empêcher un refroidissement trop rapide du réacteur et un stress thermique dépassant les valeurs de conception de la cuve sous pression du réacteur. Ils l'ont fait en ouvrant et en fermant les vannes d'isolement dans les lignes de retour du condensat [8].

Au moment où le tsunami a inondé le site et où l'alimentation électrique a été perdue, les opérateurs venaient juste d'arrêter le condenseur d'isolement en fermant une vanne sur la ligne de retour en dehors de l'enveloppe de confinement primaire. Ils ne disposaient pas d'informations sur les positions des vannes du condenseur d'isolement, et ce n'est qu'environ trois heures plus tard qu'ils ont essayé pour la première fois de redémarrer manuellement le condenseur d'isolement. Les opérateurs n'avaient pas reçu toute la formation requise pour comprendre comment les vannes fonctionnaient dans ces conditions. Ils ont essayé en vain par deux fois de redémarrer le condenseur d'isolement depuis la salle de commande principale en ouvrant les vannes d'isolement extérieures. Ils ne disposaient pas de procédures pour le fonctionnement manuel du condenseur d'isolement. Au moment de la rédaction du présent rapport, on ne connaît pas la position exacte de toutes les vannes dans le condenseur d'isolement, mais il semble que le condenseur d'isolement n'a pas fonctionné après le tsunami [8].

Le système d'injection de caloporteur à haute pression actionné par turbine à vapeur n'était pas disponible faute d'alimentation CC.

Après la perte du condenseur d'isolement et du système d'injection de caloporteur à haute pression, il fallait un autre moyen d'injecter de l'eau dans la cuve sous pression du réacteur en utilisant des équipements basse pression, comme des pompes à incendie ou des autopompes. Les opérateurs ont préparé les voies d'injection à temps, mais pour pouvoir injecter de l'eau à basse pression, il fallait aussi réduire la pression à l'intérieur de la cuve sous pression du réacteur grâce aux soupapes de décharge de sûreté. Ces soupapes n'ont pas pu être ouvertes à cause de la perte d'alimentation électrique de contrôle et d'air comprimé. La pression tant dans la cuve du réacteur que dans le confinement était trop élevée pour permettre l'injection de suffisamment d'eau pour refroidir le combustible sans éventage du confinement et dépressurisation de la cuve sous pression du réacteur. Les autres moyens d'injection d'eau à basse pression ne pouvaient donc pas servir à injecter de l'eau dans la cuve sous pression du réacteur.

La pression dans la cuve du réacteur est restée élevée jusqu'à ce que le cœur soit gravement endommagé. Elle n'a très probablement baissé que parce que la cuve a été percée sous l'effet de la fusion [44]. L'hypothèse d'une baisse de la pression due à une brèche est étayée par le fait que la pression a augmenté dans le confinement quelques heures après que des indications d'un grave endommagement du cœur eurent été obtenues. La baisse de la pression qui en est résulté a créé les conditions pour la première injection d'eau dans la cuve sous pression du réacteur environ 12 heures après le tsunami. À ce moment, cependant, un endommagement important du combustible s'était déjà produit [8].

On estime que le cœur du réacteur a été endommagé environ 4 à 5 heures après le tsunami, et qu'une fois fondu il a percé le fond de la cuve du réacteur entre 6 et 8 heures après le tsunami. Les premiers signes de rejet radioactif dans l'environnement ont été observés quelque 12 heures après le tsunami et un rejet important s'est produit quand le confinement de la tranche 1 a été éventé pour empêcher qu'il ne s'y crée une brèche, due à la pression élevée, environ 23 heures après le tsunami. Des réactions chimiques entre le gainage du combustible et l'eau avaient généré de grandes quantités d'hydrogène qui est passé de la cuve sous pression du réacteur dans l'enveloppe de confinement primaire et s'est échappé ensuite dans le bâtiment du réacteur.

### *Tranche 2*

La tranche 2 était d'une conception différente s'agissant de l'évacuation de la chaleur résiduelle du cœur du réacteur. Le circuit de refroidissement du cœur isolé (voir l'encadré 2.2) utilisait la vapeur provenant de la cuve sous pression du réacteur pour entraîner une turbine qui pompait l'eau vers la cuve du réacteur. Le circuit de refroidissement du cœur isolé de la tranche 2 a été activé manuellement après la perte de réseau. Pour le faire fonctionner à distance, une alimentation CC était nécessaire, et il était conçu pour fonctionner pendant au moins quatre heures. Toutefois, le circuit a continué de fonctionner dans des conditions difficiles pendant environ 68 heures sans alimentation CC et sans intervention des opérateurs [8]. Il a réussi à maintenir le niveau d'eau dans la cuve sous pression du réacteur au-dessus du combustible et assuré la fonction de refroidissement.

Selon certaines indications, après environ 68 heures, le circuit de refroidissement du cœur isolé a cessé de fonctionner. Il n'était donc plus possible d'injecter de l'eau dans la cuve du réacteur, car il y régnait une pression élevée. On estime que le niveau d'eau dans la cuve du réacteur a chuté jusqu'au haut du cœur en quelques heures après l'arrêt du circuit de refroidissement du cœur isolé. Les opérateurs ont recouru à d'autres moyens pour injecter de l'eau à basse pression, comme pour la tranche 1. Après quelques difficultés initiales, ils ont réussi à réduire la pression dans la cuve du réacteur en utilisant les soupapes de décharge de sûreté, bien que l'injection soit intervenue trop tard pour empêcher l'échauffement rapide du combustible et l'endommagement du cœur du réacteur.

Le système d'éventage du confinement n'a pas permis de réduire la pression dans la tranche 2. On suppose que cette défaillance est due au fait que le disque de rupture n'a pas cédé. On estime que la fusion du cœur du réacteur de la tranche 2 a commencé environ 76 heures après le tsunami. Les rejets radioactifs ont commencé environ 89 heures après le tsunami, à la suite d'une brèche dans l'enceinte de confinement, comme indiqué par la chute rapide de la pression du confinement [45].

### *Tranche 3*

Dans la tranche 3, l'alimentation CC a été disponible pendant environ deux jours, contrairement à ce qui s'est passé dans les tranches 1 et 2. Le circuit de refroidissement du cœur isolé et le système d'injection de caloporteur à haute pression à l'aide de pompes à vapeur étaient donc disponibles. Initialement, les opérateurs ont pu maintenir les niveaux d'eau dans le cœur en injectant de l'eau grâce au circuit de refroidissement du cœur isolé. Ils ont suivi des procédures leur permettant de maximiser la durée de vie des batteries disponibles pour le circuit de refroidissement du cœur isolé [8].

En outre, la décharge de vapeur de la cuve sous pression du réacteur dans la chambre de condensation était possible, et la pression de la chambre de condensation pouvait être contrôlée par aspersion d'eau grâce aux pompes à incendie. Cette situation a duré pendant 20 heures, jusqu'à ce que le circuit de refroidissement du cœur isolé s'arrête et ne puisse pas être redémarré. Le système d'injection de caloporteur à haute pression a démarré automatiquement, injectant de l'eau dans la cuve sous pression du réacteur pour maintenir le niveau d'eau.

Le système d'injection de caloporteur à haute pression est conçu pour remplir rapidement la cuve sous pression après une fuite dans le circuit de refroidissement du réacteur. Ce système a permis de réduire efficacement la pression dans la cuve. Toutefois, cela a eu pour conséquence que la pression de vapeur à l'entrée de la turbine de la pompe est tombée sous la valeur normale de fonctionnement de la pompe, et que celle-ci a perdu beaucoup de son efficacité. Les opérateurs ont décidé d'arrêter le système après environ 14 heures, car ils s'inquiétaient qu'il puisse tomber en panne et commencer à relâcher des matières radioactives en dehors du confinement.

Après l'arrêt du système d'injection de caloporteur à haute pression, les opérateurs ont préparé une ligne d'injection dans la cuve du réacteur et se préparaient à y injecter de l'eau de mer. Toutefois, compte tenu de la pression élevée du réacteur, il n'était pas possible d'injecter de l'eau de mer tant que ce dernier n'était pas dépressurisé. Ainsi, du fait du retard dans l'injection d'eau de mer dans la cuve du réacteur, le niveau d'eau a continué de baisser pour atteindre presque le haut du combustible. On pense qu'un signal automatique, supposé erroné, a déclenché la dépressurisation automatique rapide par les soupapes de décharge de sûreté avant que les opérateurs ne puissent ouvrir les soupapes de sûreté de manière plus contrôlée [46]. On estime que la dépressurisation, combinée au niveau bas de l'eau dans la cuve sous pression, a provoqué un flash de vapeur de l'eau qui restait dans le cœur du réacteur, avec pour conséquence la perte d'un refroidissement adéquat du cœur. Les événements ultérieurs conduisant à la perte du refroidissement du cœur ont été similaires à ceux survenus dans la tranche 2.

Le cœur a commencé à surchauffer et l'important rejet de vapeur de la cuve du réacteur dans la chambre de condensation du confinement a fait augmenter la pression jusqu'à un niveau qui a fait céder le disque de rupture dans la ligne d'éventage, ouvrant une voie de rejet dans l'environnement [8]. On estime que la fusion du cœur du réacteur de la tranche 3 a commencé environ 43 heures après le tsunami. D'importants rejets radioactifs ont commencé environ 47 heures après le tsunami [8].

#### *Tranche 4*

La tranche 4 était en cours d'inspection programmée et avait été arrêtée avant l'accident. Tout le combustible se trouvait dans la piscine d'entreposage du combustible usé au moment de l'accident. Par conséquent, il n'était pas nécessaire de refroidir le cœur du réacteur. Le refroidissement de la piscine d'entreposage du combustible usé n'étant pas possible du fait de la perte de l'alimentation électrique, la température a donc commencé d'y augmenter.

#### *Piscines d'entreposage du combustible usé*

Dans les tout premiers jours après le tsunami, les opérateurs ont estimé qu'il y avait suffisamment d'eau dans les piscines d'entreposage du combustible usé et que la surchauffe du combustible n'était pas un problème immédiat. Cette opinion a changé le 15 mars, quand le bâtiment du réacteur de la tranche 4 a explosé. À ce moment-là, on a pensé que la cause de l'explosion était l'hydrogène et que la seule source possible d'hydrogène dans la tranche 4 était le combustible surchauffé de la piscine d'entreposage du combustible usé en raison de son dénoyage. Cela a immédiatement suscité des préoccupations quant au volume d'eau restant dans cette piscine, et des efforts ont été faits pour déterminer le niveau d'eau dans les piscines.

Le 16 mars, d'après des inspections visuelles, il restait de l'eau dans la piscine de la tranche 4. Cependant, la situation dans la tranche 3 a suscité des préoccupations qui ont conduit à divers efforts d'atténuation, y compris le largage d'eau par hélicoptères. Les analyses et les inspections ultérieures ont révélé que le niveau d'eau dans les piscines d'entreposage du combustible usé des tranches 3 et 4 n'était pas tombé jusqu'au haut du combustible usé. Ces inspections ont confirmé que l'explosion dans la tranche 4 était due à l'hydrogène, et que la source de l'hydrogène n'était pas le combustible dans la piscine d'entreposage du combustible usé, mais la migration d'hydrogène de la tranche 3 à la tranche 4 par le système de ventilation commun. Toutefois, le manque de connaissances à propos des conditions réelles dans les piscines d'entreposage du combustible usé pendant l'accident, du fait de la perte de l'instrumentation, a poussé à ajouter de l'eau dans la piscine. Une description détaillée des événements concernant la piscine d'entreposage du combustible usé est donnée à la section 2.1.

#### *Tranches 5 et 6*

Les tranches 5 et 6 ont aussi été touchées par le tsunami, mais leurs réacteurs produisaient moins de chaleur résiduelle, car ils étaient à l'arrêt depuis un temps considérable avant l'accident. En outre, l'un des générateurs diesel de secours de la tranche 6 avait résisté à l'inondation et fonctionnait. Les opérateurs avaient donc plus de temps pour réagir, et les systèmes de refroidissement des deux tranches étaient alimentés par le seul générateur diesel de secours restant. Cette alimentation a permis de maintenir le refroidissement des cœurs des réacteurs et d'assurer ultérieurement le refroidissement des piscines d'entreposage du combustible usé des tranches 5 et 6, les deux réacteurs ayant été refroidis jusqu'à un état sûr [8].

#### *Confinement des matières radioactives et contrôle des rejets radioactifs*

Du fait de l'endommagement des cœurs des réacteurs des tranches 1 à 3, de grandes quantités de vapeur et d'hydrogène se sont échappées des cuves sous pression des réacteurs. Cela a fait augmenter la pression et la température des enveloppes de confinement primaire. Celles-ci

ont été percées, et de la vapeur, de l'hydrogène et d'autres gaz, ainsi que des matières radioactives, ont été rejetés dans les bâtiments des réacteurs et ultérieurement dans l'environnement.

Les enveloppes de confinement primaire des réacteurs n'avaient pas été conçues pour résister à la pression pouvant être générée par un accident grave ; des systèmes d'éventage avaient donc été installés dans les années 1990 [22, 23] pour limiter la pression dans les enceintes de confinement en cas d'accident. Selon certaines indications, les enveloppes de confinement primaire des tranches 1 à 3 ont été détériorées à différentes étapes de la progression de l'accident, en raison de la pression et de la température dans l'enveloppe de confinement primaire, qui ont augmenté jusqu'à des valeurs très supérieures à la capacité nominale avant que l'éventage puisse être mis en place (voir la section 2.1). La fuite de matières radioactives depuis les cœurs des réacteurs a été partiellement atténuée par les piscines de condensation, qui ont retenu certains des radionucléides provenant des cuves sous pression des réacteurs.

#### **2.2.4. Évaluation des accidents hors dimensionnement et gestion des accidents**

*Les analyses de la sûreté faites pendant la procédure d'autorisation de la centrale de Fukushima Daiichi et pendant l'exploitation n'avaient pas pleinement pris en compte la possibilité d'une séquence complexe d'événements pouvant aboutir à un endommagement grave des cœurs des réacteurs. En particulier, elles n'ont pas révélé la vulnérabilité de la centrale à l'inondation et les faiblesses des procédures d'exploitation et des principes directeurs pour la gestion des accidents. Les études probabilistes de sûreté n'ont pas pris en compte la possibilité d'inondation interne, et les hypothèses concernant la performance humaine en matière de gestion des accidents étaient optimistes. En outre, l'organisme de réglementation n'avait imposé que des exigences limitées aux exploitants pour qu'ils envisagent l'éventualité d'accidents graves.*

*Les opérateurs n'étaient pas totalement préparés à la perte d'alimentation électrique et de refroidissement dans plusieurs tranches par suite du tsunami. La TEPCO avait élaboré des principes directeurs pour la gestion des accidents graves, mais ils ne couvraient pas cette combinaison improbable d'événements. Les opérateurs n'avaient donc pas reçu une formation appropriée, ni participé à des exercices pertinents concernant les accidents graves, et les équipements dont ils disposaient n'étaient pas adéquats dans la situation dégradée de la centrale.*

*En septembre 2012 a été créée l'Autorité de réglementation nucléaire (NRA). La NRA a élaboré, aux fins de la protection des personnes et de l'environnement, de nouveaux règlements relatifs aux centrales nucléaires, qui sont entrés en vigueur en 2013. Ces règlements ont renforcé les contre-mesures destinées à prévenir la perte simultanée de toutes les fonctions de sûreté due à des causes communes et comportaient une réévaluation de l'impact d'événements externes comme les séismes et les tsunamis. Pour les accidents graves, de nouvelles contre-mesures relatives à l'endommagement du cœur, à l'endommagement de l'enveloppe de confinement et à la diffusion de matières radioactives ont également été adoptées.*

Les normes de sûreté de l'AIEA en vigueur au moment de l'accident prescrivaient une évaluation visant à déterminer si les fonctions de sûreté pouvaient être assurées pour tous les modes de fonctionnement normal, les conditions accidentelles et les accidents hors dimensionnement, y compris les accidents graves. Les séquences d'événements importantes

susceptibles de conduire à un accident grave doivent être déterminées par une combinaison de méthodes probabilistes, de méthodes déterministes et d'un bon jugement technique [27]. En outre, des analyses déterministes spécifiques des accidents hors dimensionnement doivent être exécutées pour étudier les scénarios d'accidents crédibles pouvant permettre d'améliorer les mesures de gestion des accidents [41]. Il est donc nécessaire de déterminer si les fonctions de sûreté peuvent être remplies dans les conditions d'un accident hors dimensionnement.

***Encadré 2.7. Études déterministes et probabilistes de sûreté [47, 48]***

Les analyses de la sûreté sont des évaluations analytiques des phénomènes physiques survenant dans des centrales nucléaires. Les études déterministes de la sûreté d'une centrale nucléaire anticipent sa réponse à des événements initiateurs postulés. Un ensemble particulier de règles et de critères d'acceptation est employé. Habituellement, ceux-ci devraient porter sur les aspects neutronique, thermohydraulique, radiologique, thermomécanique et structurel, qui sont souvent analysés avec différents outils informatiques.

L'objectif des études déterministes de la sûreté basées sur la meilleure estimation devrait être de confirmer les stratégies élaborées pour rétablir des conditions de fonctionnement normal dans une centrale après des transitoires dus à des incidents de fonctionnement prévus et des accidents de dimensionnement. Ces stratégies sont reprises dans les procédures d'exploitation en situation d'urgence qui définissent les actions à engager en pareil cas. Les études déterministes de la sûreté doivent fournir les données nécessaires pour préciser les mesures que doivent prendre les exploitants confrontés à certains accidents et elles devraient être un élément important de l'examen des stratégies de gestion des accidents. Lors de l'élaboration des stratégies de relèvement, afin de déterminer le temps dont dispose un exploitant pour engager une action efficace, il faudrait procéder à des calculs de sensibilité pour déterminer en combien de temps il prend les mesures nécessaires, sur lesquels on pourra s'appuyer pour optimiser les procédures.

Les études déterministes de la sûreté devraient aussi faciliter l'élaboration de la stratégie que devrait suivre un exploitant si les procédures d'exploitation en situation d'urgence ne parviennent pas à empêcher un accident grave. Elles devraient permettre de déterminer les difficultés qui pourraient surgir pendant la progression des accidents et les phénomènes qui se produiront. On devrait s'en inspirer pour élaborer un ensemble de principes directeurs pour la gestion des accidents et l'atténuation de leurs conséquences.

Si les études déterministes peuvent servir à vérifier que les critères d'acceptation sont respectés, les études probabilistes de la sûreté (EPS), quant à elles, peuvent aider à déterminer la probabilité de dommage à chaque barrière. L'EPS peut donc être un bon outil d'évaluation du risque induit par des séquences d'événements de faible fréquence débouchant sur un endommagement des barrières, alors qu'une analyse déterministe est appropriée pour des événements plus fréquents.

Les études déterministes de la sûreté contribuent largement à la réalisation d'une EPS, car elles donnent des informations permettant de déterminer si le scénario accidentel entraînera la défaillance d'une barrière contre les produits de fission. Un arbre de défaillances est un outil efficace d'une EPS dont on peut se servir pour confirmer des hypothèses couramment établies pendant le calcul déterministe de la disponibilité des systèmes.

Une EPS a pour objectifs de déterminer tous les facteurs importants qui contribuent aux risques radiologiques associés à une installation ou à une activité et d'évaluer la mesure dans laquelle la conception globale est équilibrée et répond aux critères probabilistes de sûreté lorsque ceux-ci ont été définis. En ce qui concerne la sûreté des réacteurs, elle offre une approche exhaustive et structurée pour déterminer les scénarios de défaillance. C'est aussi un outil conceptuel et mathématique pour chiffrer les estimations des risques. L'approche probabiliste s'appuie sur des hypothèses réalistes chaque fois que cela est possible et fournit un cadre pour traiter explicitement un grand nombre d'incertitudes. Elle peut donner des indications sur le comportement, la fiabilité, les interactions des systèmes et les lacunes de la conception, sur l'application du concept de défense en profondeur et sur les risques qu'il est parfois impossible de dégager à partir d'une analyse déterministe.

**Encadré 2.7. (suite) Études déterministes et probabilistes de sûreté [47, 48]**

Des améliorations apportées à l'approche globale de l'analyse de la sûreté ont permis de mieux intégrer les approches déterministe et probabiliste. Avec des modèles et des données de meilleure qualité, il est possible de mettre au point des études déterministes plus réalistes et d'utiliser les informations tirées d'études probabilistes pour sélectionner des scénarios accidentels. On privilégie actuellement de plus en plus les méthodes probabilistes pour définir comment il faut démontrer le respect des critères déterministes de sûreté, par exemple en spécifiant des intervalles de confiance, et comment établir les marges de sûreté.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour exécuter une EPS. L'approche habituelle consiste à utiliser une combinaison d'arbres d'événements et d'arbres de défaillances. La taille relative (complexité) des arbres d'événements et des arbres de défaillances est largement une question de préférence et dépend aussi du logiciel utilisé.

Les arbres d'événements présentent les caractéristiques générales des séquences accidentelles, qui commencent avec l'événement initiateur et, selon la réussite ou l'échec des systèmes de sûreté et liés à la sûreté, aboutissent à un résultat positif ou à un endommagement du cœur, ou à l'un des états d'endommagement de la centrale (requis pour une EPS de niveau 2). Les arbres de défaillances servent à modéliser l'incapacité des systèmes de sûreté et des systèmes auxiliaires à remplir leurs fonctions de sûreté.

Les arbres de défaillances devraient permettre d'obtenir un modèle de défaillance logique pour les états de défaillance des systèmes de sûreté recensés par l'analyse par arbre d'événements. Le critère de défaillance qui correspond à l'événement supérieur de l'arbre de défaillances pour chaque fonction d'un système de sûreté devrait être l'inverse logique du critère de réussite pour la séquence accidentelle. Les événements de base modélisés dans les arbres de défaillances devraient être compatibles avec les données disponibles sur les défaillances de composants. Les modèles d'arbres de défaillances devraient être élaborés jusqu'au niveau des modes importants de défaillance des divers composants (pompes, vannes, générateurs diesel, etc.) et des diverses erreurs humaines, et devraient inclure tous les événements de base qui pourraient aboutir, directement ou en combinaison avec d'autres événements de base, à l'événement supérieur de l'arbre de défaillances.

La TEPCO a entrepris des études probabilistes de sûreté, ainsi que certaines études déterministes de sûreté pour les séquences accidentelles les plus importantes au début des années 1990. Conformément à la pratique des États Membres de l'AIEA à l'époque, ces études étaient limitées aux événements dans les centrales nucléaires à une seule tranche. Bien que la centrale de Fukushima Daiichi soit située dans une région où les tsunamis sont possibles, ces études ne portaient pas sur les défaillances de cause commune causées par une inondation ou la perte prolongée d'alimentation électrique [8]. Les études probabilistes de sûreté de la centrale de Fukushima Daiichi ne portaient pas non plus sur les inondations ou les incendies internes, et les hypothèses concernant les actions de l'exploitant étaient optimistes.

Une étude probabiliste de sûreté détaillée, incluant les séquences d'inondation interne, est nécessaire pour mettre en lumière la vulnérabilité à l'inondation de systèmes vitaux, comme les générateurs diesel de secours et les commutateurs électriques. En 1991, dans la tranche 1 de la centrale de Fukushima Daiichi, un tuyau corrodé avait laissé échapper de l'eau à un débit de 20 mètres cubes par heure, laquelle avait pénétré dans la salle du système d'alimentation électrique de secours par la porte et les passages de câbles. Cet événement avait démontré la vulnérabilité à l'inondation en ce qui concerne l'emplacement des générateurs diesel de secours et du commutateur électrique dans le sous-sol.

Les orientations en matière de gestion des accidents avaient aussi été évaluées à la centrale de Fukushima Daiichi au moyen d'études probabilistes de sûreté de portée limitée. Par exemple, ces études portaient sur l'utilisation du système d'événage du confinement par l'application d'une approche basée sur l'arbre de défaillances pour simuler les défaillances d'équipements avec une probabilité d'erreur humaine pour le fonctionnement manuel. Cependant, il n'y a eu aucune évaluation approfondie des problèmes de gestion des accidents graves (entre autres la

formation et les instructions limitées données au personnel de la centrale). Il n'a pas été reconnu que les hypothèses concernant la probabilité de défaillance étaient trop optimistes et que les études ne débouchaient pas sur des améliorations des procédures et des instructions [47] (voir l'encadré 2.8 sur la gestion des accidents).

La centrale de Fukushima Daiichi avait quelques faiblesses qui n'avaient pas été suffisamment évaluées par une étude probabiliste de sûreté, comme recommandé dans les normes de sûreté de l'AIEA [47, 49]. On peut citer comme exemples le manque de protection des générateurs diesel de secours, des salles des batteries et des commutateurs contre l'inondation, et la faible probabilité de réussite des interventions en cas d'accident grave compte tenu des instructions, de la formation et des connaissances limitées du personnel de la centrale en matière de gestion des accidents graves. Les accidents hors dimensionnement n'étaient pas suffisamment pris en compte, ce qui affectait la capacité de maintenir le refroidissement du cœur d'un réacteur, la capacité des opérateurs à surveiller les paramètres de sûreté importants et la gestion des accidents graves (voir la figure 2.7).

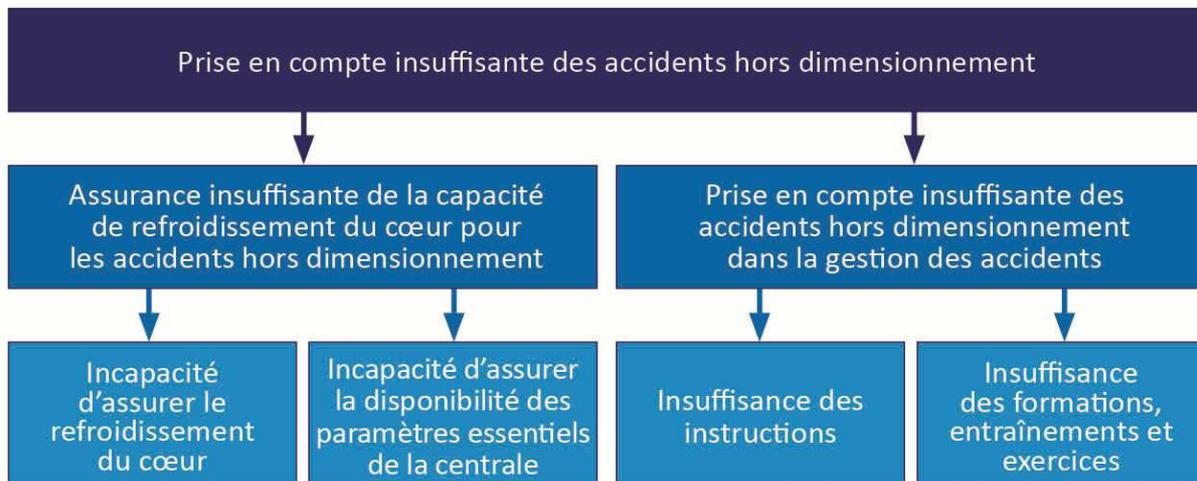


FIG. 2.7. Impact de la prise en compte insuffisante des accidents hors dimensionnement sur la capacité de maintenir le refroidissement du cœur d'un réacteur, la capacité des opérateurs à surveiller les paramètres de sûreté importants et la gestion des accidents graves [27, 52].

**Encadré 2.8. Gestion des accidents [41]**

Un programme de gestion des accidents devrait être élaboré pour toutes les centrales, quelles que soient la fréquence d'endommagement du cœur et la fréquence de rejet de produits de fission calculées pour la centrale. Une approche descendante structurée devrait être utilisée pour l'élaboration d'instructions sur la gestion des accidents. Cette approche devrait commencer par les objectifs et les stratégies et aboutir à des procédures et des principes directeurs, et devrait couvrir aussi bien la prévention que l'atténuation des conséquences.

Au niveau supérieur, les objectifs de la gestion des accidents sont définis comme suit : empêcher un endommagement important du cœur ; mettre fin à la progression de l'endommagement du cœur une fois qu'elle a commencé ; maintenir l'intégrité du confinement aussi longtemps que possible ; réduire le plus possible les rejets de matières radioactives ; parvenir à un état stable à long terme. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs stratégies devraient être élaborées.

**Encadré 2.8. (suite) Gestion des accidents [41]**

À partir des stratégies, il faudrait définir des mesures appropriées et efficaces de gestion des accidents. Ces mesures comprennent les modifications de la centrale, lorsqu'elles sont jugées importantes pour la gestion des accidents hors dimensionnement et des accidents graves, et les actions du personnel. Elles comprennent aussi la réparation des équipements en panne. Des orientations appropriées, sous forme de procédures et de principes directeurs, devraient être élaborées à l'intention du personnel chargé d'appliquer les mesures de gestion des accidents.

Pour l'élaboration d'orientations sur la gestion des accidents, il faudrait tenir compte de l'ensemble des capacités nominales de la centrale, en ayant recours aux systèmes de sûreté comme aux systèmes non liés à la sûreté, et inclure l'utilisation possible de certains systèmes au-delà de leur fonction initialement prévue et éventuellement au-delà de leur base de conception. Le point de transfert des responsabilités et des pouvoirs de la prévention à l'atténuation des conséquences devrait être spécifié et être choisi en fonction de critères convenablement définis et documentés.

Pour tout changement de la configuration de la centrale ou si les recherches sur des phénomènes physiques donnent des résultats nouveaux, il faudrait analyser les incidences sur les orientations en matière de gestion des accidents et, si nécessaire, réviser ces orientations.

La portée limitée des prescriptions de l'organisme de réglementation concernant les accidents hors dimensionnement a contribué à ce que les exploitants de la centrale ne prennent pas correctement en compte les risques y afférents. Cela avait été souligné lors d'une mission du Service intégré d'examen de la réglementation (IRRS) de l'AIEA en juin 2007, qui avait conclu qu'il n'existait pas de réglementation concernant la prise en compte des accidents hors dimensionnement, car les centrales japonaises étaient considérées comme suffisamment sûres grâce aux mesures préventives. Par exemple, le processus d'examen périodique de la sûreté au Japon n'exigeait pas que les organismes exploitants actualisent leurs analyses pour utiliser les techniques les plus récentes [52].

Le programme de gestion des accidents de la TEPCO supposait que l'alimentation CA serait rapidement rétablie dans la centrale de Fukushima Daiichi. La TEPCO supposait aussi que d'autres services essentiels, comme l'alimentation CC et l'air comprimé, seraient disponibles à tout moment pour assurer l'alimentation de l'instrumentation et le fonctionnement des vannes. Le programme et les principes directeurs ne prévoyaient pas la possibilité qu'un accident grave puisse toucher plusieurs tranches simultanément, ni celle qu'il soit difficile de recevoir un soutien de l'extérieur du site en raison de graves perturbations de l'infrastructure hors site. Cette approche était conforme à la pratique internationale habituelle à l'époque. L'accident a montré que le fonctionnement de certains systèmes en situation d'accidents hors dimensionnement exigeait des compétences exceptionnelles de la part des opérateurs pour le maintien des fonctions de sûreté fondamentales.

Les orientations pour la gestion des accidents en vigueur à la centrale de Fukushima Daiichi comprenaient une documentation à l'usage des opérateurs, dont des procédures d'exploitation en situation d'urgence et des principes directeurs pour la gestion des accidents graves. Ces derniers étaient utilisables par le personnel d'appui technique de la TEPCO appartenant à l'organisme d'intervention en cas d'urgence. Cette documentation couvrait l'ensemble des interventions en cas d'accident de dimensionnement et d'accident hors dimensionnement, y compris les accidents graves. L'absence d'alimentation électrique et le manque d'informations adéquates sur l'état de la centrale ont empêché les opérateurs de réagir efficacement aux événements qui se produisaient. Les principes directeurs pour la gestion des accidents ne prévoyaient pas de dispositions en cas d'indisponibilité des instruments

nécessaires à l'affichage des paramètres clés qui permettent aux opérateurs de déterminer l'état de la centrale. En outre, ils ne comportaient aucune recommandation pour la gestion d'accidents au cours desquels tous les systèmes électriques liés à la sûreté, puis un grand nombre des systèmes de sûreté dépendants, sont hors service.

Le personnel n'était pas formé pour appliquer des mesures de gestion des accidents en situation de perte totale prolongée des alimentations électriques ou d'information limitée ou indisponible. Malgré cela, il a exécuté ses tâches correctement dans les conditions très difficiles créées par l'accident. Toutefois, l'impossibilité d'obtenir des informations fondamentales sur l'état de la centrale et la nécessité d'improviser des mesures d'atténuation ont entravé l'intervention. L'absence de prescriptions en matière de gestion des accidents graves dans le cadre réglementaire a aussi contribué au manque de préparation de la TEPCO. La NSC avait publié un guide sur la gestion des accidents en 1992 [23] et, la même année, le Ministère du commerce international et de l'industrie (MITI) avait publié une feuille de route pour la gestion des accidents. Le ministère avait aussi demandé aux organismes exploitants du secteur nucléaire de prendre des mesures pour gérer des accidents plus graves que ceux pris en compte dans la conception initiale. Toutefois, cette demande n'était pas une exigence impérative et elle n'a donné lieu qu'à des actions volontaires limitées de la part des organismes exploitants. La mission IRRS de l'AIEA au Japon en 2007 a donné à entendre qu'il fallait des prescriptions réglementaires pour les accidents hors dimensionnement et suggéré que la NISA continue d'élaborer une approche systématique de la prise en compte de tels événements et aussi de l'utilisation complémentaire des études probabilistes de sûreté et de la gestion des accidents graves [51]. Les suggestions de la mission d'examen n'ont pas suscité d'autres efforts dans ce domaine.

#### **2.2.5. Évaluation de l'efficacité de la réglementation**

*La réglementation de la sûreté nucléaire au Japon au moment de l'accident était assurée par plusieurs organismes ayant des rôles et des responsabilités différents et des relations complexes. On ne savait pas exactement quel était l'organisme ayant la responsabilité et les pouvoirs de publier des instructions obligatoires sur la façon de traiter sans retard les problèmes de sûreté.*

*Le programme d'inspection réglementaire était structuré de façon rigide, ce qui diminuait la capacité de l'organisme de réglementation de vérifier la sûreté aux moments opportuns et de relever les nouveaux problèmes potentiels de sûreté.*

*Les règlements, principes directeurs et procédures en vigueur au moment de l'accident n'étaient pas pleinement conformes à la pratique internationale dans certains domaines clés, et tout particulièrement en ce qui concerne les examens périodiques de la sûreté, la réévaluation des dangers, la gestion des accidents graves et la culture de sûreté.*

Dans le cadre juridique de la sûreté nucléaire applicable au Japon au moment de l'accident, le gouvernement avait établi des lois principales qui étaient complétées par des lois subordonnées et des ordonnances et règlements ministériels. La structure générale du cadre législatif et réglementaire au moment de l'accident est illustrée par les figures 2.8 et 2.9. La structure réglementaire au Japon au moment de l'accident comprenait plusieurs ministères et autres organismes ayant des responsabilités en matière de sûreté nucléaire. La structure avait été revue deux fois, après l'incident radiologique survenu à bord du navire à propulsion nucléaire Mutsu en 1974, et après l'accident de criticité à l'installation de la JCO à

Tokaimura en 1999, mais certaines questions fondamentales concernant la clarté des rôles et des responsabilités n'avaient pas été résolues [53, 54]. La mission IRRS de l'AIEA en 2007 a donné à entendre qu'il fallait améliorer, préciser et clarifier plusieurs aspects de la réglementation [51], comme la réglementation concernant le traitement des accidents hors dimensionnement et la clarification des rôles et responsabilités de la NISA et de la NSC au sein du dispositif réglementaire japonais.

Le Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) était responsable de l'élaboration de la politique de développement et d'utilisation de l'énergie nucléaire, ainsi que de la réglementation des installations nucléaires commerciales. Au sein du METI, l'Agence des ressources naturelles et de l'énergie (ANRE) était chargée de la supervision de l'approvisionnement national en énergie, y compris de la promotion de l'énergie nucléaire. La NISA a été créée en 2001 en tant qu'agence spéciale rattachée à l'ANRE et des responsabilités lui ont été attribuées en tant qu'organisme de réglementation de la sûreté nucléaire. La loi disposait qu'en cas de conflit entre la sûreté et la promotion, le ministre de l'économie, du commerce et de l'industrie donnerait la priorité à la sûreté. Le METI a élaboré son plan stratégique national sur la base de cette définition des priorités, et la mission IRRS de l'AIEA en 2007 a conclu que la NISA était effectivement indépendante de l'ANRE s'agissant de la prise des décisions en matière de réglementation. Toutefois, la mission a aussi suggéré que l'indépendance de la NISA par rapport au METI soit inscrite plus clairement dans la loi.

Le Ministère de l'éducation, de la culture, des sports, des sciences et de la technologie (MEXT) avait aussi des responsabilités réglementaires, y compris la supervision de la radioprotection et de l'application des garanties aux matières nucléaires dans les centrales nucléaires, les réacteurs de recherche et certaines installations de recherche-développement pour l'électronucléaire. Il supervisait aussi l'Institut national des sciences radiologiques (NIRS) et l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA).

La NSC, établie au sein du Bureau du Cabinet et qui rendait compte au premier ministre, était un organe indépendant ayant un rôle à la fois consultatif et de supervision dans le cadre de la réglementation nucléaire. Elle élaborait et publiait les documents d'orientation et les guides réglementaires concernant la sûreté nucléaire qui étaient utilisés par la NISA dans son travail de réglementation. La NSC était habilitée par la loi à exiger des rapports de la NISA et supervisait le travail de cette dernière. Elle disposait aussi de son propre personnel pour mener des examens et des évaluations indépendants des demandes d'autorisation de centrale nucléaire et pour confirmer les conclusions de la NISA. La mission IRRS de l'AIEA en 2007 a suggéré que le rôle de la NISA en tant qu'organisme de réglementation par rapport à la NSC devait être clarifié.

La NISA était appuyée par l'Organisation japonaise de sûreté de l'énergie nucléaire (JNES), créée en 2003 en vertu d'une loi adoptée en 2002 [51]. Les principales fonctions de la JNES étaient de mener des inspections dans les installations nucléaires, de revoir les inspections périodiques des titulaires de licences, d'appuyer les activités de préparation aux situations d'urgence nucléaire, et de coordonner les projets de recherche sur la sûreté. Un programme d'inspection détaillé est nécessaire pour qu'un organisme de réglementation puisse détecter de façon indépendante les problèmes de sûreté dans une centrale. Au Japon, au moment de l'accident, malgré les efforts de la NISA [56], les inspections étaient structurées de manière rigide, leur type et leur fréquence étant fixés par la loi. En 2011, le rapport du Japon au titre de la Convention sur la sûreté nucléaire indiquait que les activités de gestion de la sûreté des exploitants étaient régies par les inspections de la sûreté d'exploitation que la NISA avait

approuvées. La NISA effectuait des inspections trimestrielles pour vérifier que les exploitants procédaient aux examens périodiques de la sûreté. La NISA et la JNES ont aussi mené des inspections périodiques, à des intervalles ne dépassant pas 13 mois, axées sur la maintenance par les exploitants des structures, systèmes et composants des centrales nucléaires. Elles portaient plus particulièrement sur les structures, systèmes et composants importants pour la sûreté, comme ceux du système de mise à l'arrêt du réacteur, de l'enveloppe du circuit primaire, du système d'évacuation de la chaleur résiduelle et de l'enveloppe de confinement. Ces procédures réglementaires s'ajoutaient aux visites d'inspection visuelle et aux activités de gestion de la maintenance des exploitants, aux évaluations périodiques de la sûreté et aux évaluations techniques relatives au vieillissement des centrales nucléaires. La NISA ne pouvait guère étendre la portée des inspections au-delà de la limite légalement définie, ce qui restreignait sa capacité de relever les lacunes et les écarts et de tirer des enseignements [51]. Cette approche limitait l'efficacité des inspections réglementaires pour ce qui était de déceler les problèmes de sûreté et de vérifier la sûreté des activités des titulaires de licences et leur respect des prescriptions.

La NSC a publié un ensemble de principes directeurs considérés en fait comme des prescriptions [34]. Ces principes ont été complétés par des normes consensuelles publiées par des associations professionnelles et universitaires. Toutefois, dans certains domaines clés, les règlements et les principes directeurs n'étaient pas totalement conformes à la pratique internationale au moment de l'accident. Les différences les plus marquées concernaient les examens périodiques de la sûreté, la réévaluation des dangers, la gestion des accidents graves et la culture de sûreté [52, 57, 58].

Un examen périodique de la sûreté est un mécanisme formel de réexamen, par les titulaires de licences et l'organisme de réglementation, de la conception et des dangers externes à la lumière d'informations nouvelles et des normes et de la technologie du moment [52]. Des examens périodiques de la sûreté à des intervalles de dix ans étaient requis par la réglementation japonaise promulguée en 2003 [51], mais ils avaient une portée limitée et n'étaient pas pleinement conformes à la pratique internationale, parce qu'ils ne prévoyaient pas de réexamen des dangers externes [51, 52, 58].

Législation	Décret du Cabinet	Ordonnance ministérielle	Avis public ministériel
Loi fondamentale sur l'énergie atomique			
Loi sur la réglementation des réacteurs	Décret du Cabinet relatif à la Loi sur la réglementation des réacteurs	Ordonnance ministérielle relative aux réacteurs de puissance commerciaux	Avis public ministériel relatif à la limitation des doses sur la base des dispositions concernant les réacteurs de puissance commerciaux
			Avis public ministériel relatif aux critères concernant les responsables de l'exploitation
		Ordonnance ministérielle relative aux réacteurs au stade de la recherche-développement	Avis public ministériel relatif aux détails techniques du transport des matières combustibles nucléaires, etc., dans les usines ou sur les lieux de travail
			Avis public ministériel relatif aux équipements liés à la sûreté importants
Loi sur la prévention des risques radiologiques	Décret du Cabinet relatif à la Loi sur la prévention des risques radiologiques	Ordonnance ministérielle relative à la Loi sur la prévention des risques radiologiques	Avis public ministériel relatif à la limitation des doses sur la base des dispositions concernant les réacteurs au stade de la recherche-développement
Loi sur le secteur de l'électricité	Décret du Cabinet relatif à la Loi sur le secteur de l'électricité	Ordonnance ministérielle relative à la Loi sur le secteur de l'électricité	Avis public ministériel relatif aux prescriptions techniques concernant l'équivalent de dose, etc., dû aux rayonnements provenant d'installations de production d'énergie d'origine nucléaire
		Ordonnance ministérielle relative à l'élaboration de normes techniques pour les installations de production d'énergie d'origine nucléaire	
		Ordonnance ministérielle relative à l'élaboration de prescriptions techniques pour les matières combustibles nucléaires pour la production d'énergie	
Loi fondamentale sur les contre-mesures en cas de catastrophe			
Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	Décret du Cabinet portant application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	Ordonnance ministérielle portant application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	

FIG. 2.8. Le cadre législatif et réglementaire de la sûreté des installations nucléaires au Japon au moment de l'accident [55].

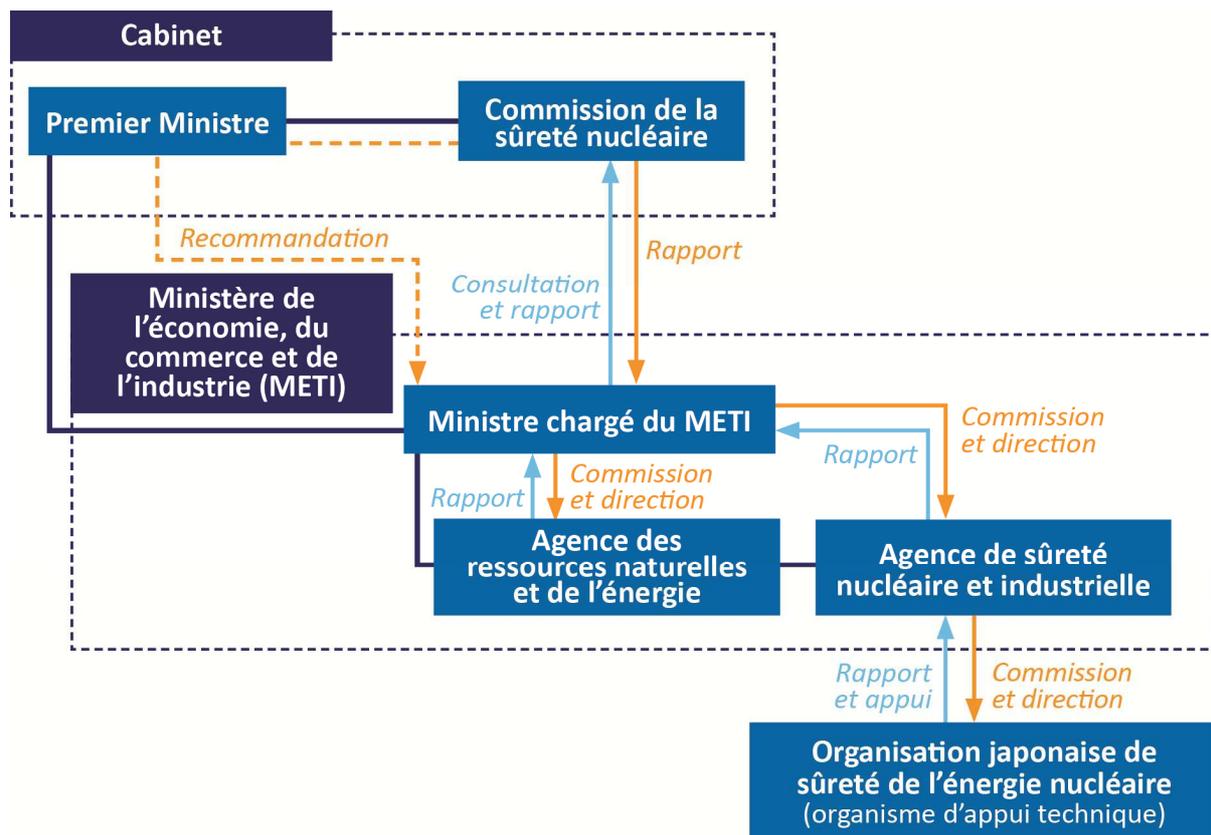


FIG. 2.9. Place de la NISA dans le gouvernement japonais.

La mission IRRS de l'AIEA en 2007 a suggéré que la NISA soit à même d'apporter une contribution majeure à l'élaboration de la réglementation de la sûreté. Elle a aussi donné à entendre que la NISA avait besoin de pouvoir modifier son programme d'inspections de manière souple pour optimiser son efficacité et son ciblage et de pouvoir mener des inspections relatives à la sûreté dans des emplacements et à des moments qu'elle choisirait elle-même [51]. La mission IRRS a aussi suggéré que la NISA encourage des relations ouvertes et franches avec l'industrie nucléaire et les organismes exploitants pour communiquer directement aux responsables les préoccupations en matière réglementaire.

#### *Création de la nouvelle autorité de réglementation*

L'Autorité de réglementation nucléaire (NRA) a été créée en septembre 2012 [59]. Elle a procédé à un examen des principes directeurs et des prescriptions réglementaires en matière de sûreté afin de formuler de nouveaux règlements pour la protection des personnes et de l'environnement. En 2013, les nouvelles prescriptions réglementaires concernant les centrales nucléaires sont entrées en vigueur. Sur la base du concept de défense en profondeur, l'accent a été mis sur les troisième et quatrième niveaux et sur la prévention d'une perte simultanée de toutes les fonctions de sûreté due à des causes communes. Les hypothèses précédentes sur l'impact des séismes, des tsunamis et d'autres événements externes comme les éruptions volcaniques, les tornades et les feux de forêts ont été réévaluées, et des contre-mesures pour assurer la sûreté nucléaire face à ces événements externes ont été envisagées. Des mesures contre les incendies et les inondations internes et des améliorations de la fiabilité de l'alimentation électrique sur site et hors site pour faire face au risque de perte totale des alimentations électriques de la centrale ont aussi été envisagées.

Par ailleurs, il fallait aussi des contre-mesures en cas d'accident grave en ce qui concerne l'endommagement du cœur, l'endommagement de l'enveloppe de confinement et le rejet de matières radioactives, des mesures renforcées pour l'injection d'eau dans les piscines d'entreposage du combustible usé, des contre-mesures en cas de chute d'aéronef, et l'installation d'un centre d'intervention d'urgence.

On peut notamment donner comme exemples des nouvelles prescriptions réglementaires élaborées à la lumière de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi : 1) les prescriptions renforcées concernant la résistance aux séismes/tsunamis ; 2) les prescriptions renforcées ou nouvelles concernant la base de conception ; 3) les prescriptions nouvelles concernant les mesures contre les accidents graves [60].

Les rôles et les responsabilités qui avaient été attribués à différents organes gouvernementaux ont été intégrés à la NRA. Celle-ci a compétence sur une partie des activités du NIRS et de la JAEA. Le principal organisme d'appui technique à la sûreté nucléaire, le JNES, a fusionné avec la NRA le 1<sup>er</sup> mars 2014.

La NRA a adopté un processus d'examen périodique de la sûreté conforme aux normes de sûreté de l'AIEA qui a été mis en vigueur en décembre 2013. En vertu de ce système, les titulaires de licences relatives à des centrales nucléaires doivent procéder à une évaluation d'ensemble de la sûreté des réacteurs et en soumettre les résultats à la NRA dans les six mois qui suivent la fin de l'inspection périodique en faisant ressortir les points suivants :

- Respect des prescriptions réglementaires ;
- Mesures volontaires d'amélioration de la sûreté ;
- Évaluation et examen des marges de sûreté en vue d'une amélioration et évaluation probabiliste du risque ;
- Réévaluation approfondie sur la base de ces résultats et plans d'action pour améliorer la sûreté.

Le Japon a demandé à l'AIEA d'effectuer une mission IRRS vers la fin de 2015, en vue de consolider la sûreté nucléaire et de renforcer la compétence de la NRA en tant qu'organisme de réglementation indépendant par un processus d'apprentissage continu, transparent et ouvert.

#### **2.2.6. Évaluation des facteurs humains et organisationnels**

*Avant l'accident, le postulat de base au Japon était que la conception des centrales nucléaires et les mesures de sûreté qui avaient été prises étaient suffisamment solides pour que les centrales résistent à des événements externes de faible probabilité aux conséquences importantes.*

*En raison de ce postulat selon lequel les centrales nucléaires japonaises étaient sûres, la tendance parmi les organismes et leur personnel était de ne pas mettre en doute le niveau de sûreté. Du fait que les parties prenantes corroboraient ce postulat de base à propos de la robustesse de la conception technique des centrales nucléaires, les améliorations de la sûreté tardaient à être apportées.*

*L'accident de la centrale de Fukushima Daiichi a montré que, pour mieux déceler les vulnérabilités des centrales, il est nécessaire de suivre une approche intégrée qui tienne compte des interactions complexes entre les personnes, les organismes et la technologie.*

Avant l'accident, l'insuffisance de la prise en compte des événements externes de faible probabilité ayant des conséquences importantes n'avait pas été détectée. Cela s'explique en partie par le fait que le postulat de base au Japon, conforté pendant plusieurs décennies, était que la robustesse de la conception technique des centrales nucléaires assurerait une protection suffisante contre les risques postulés. En conséquence, les événements qui ont conduit à l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi sortaient du champ des postulats de base des organismes exploitants, de l'organisme de réglementation et du gouvernement. Ces postulats influençaient les décisions et les actions de tout un ensemble de parties prenantes, qui ne se limitait pas à celles directement concernées par l'exploitation et la réglementation des centrales nucléaires.

#### **Encadré 2.9. Culture de sûreté**

Dans l'INSAG-4, publication du Groupe international pour la sûreté nucléaire (INSAG), la culture de sûreté est définie comme : « l'ensemble des caractéristiques et des attitudes qui, dans les organismes et chez les individus, font que les questions relatives à la sûreté des centrales nucléaires bénéficient, en priorité, de l'attention qu'elles méritent en raison de leur importance » [61].

Le n° GS-G-3.5 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA [62] et le n° 11 de la collection Rapports de sûreté [63] indiquent clairement que la culture de sûreté est elle-même un sous-ensemble de la culture de l'ensemble de l'organisation, laquelle résulte du mélange de valeurs partagées, d'attitudes et de types de comportements qui donnent à l'organisation son caractère particulier.

Les organisations passent habituellement par plusieurs phases pour la mise en place et le renforcement de leur culture de sûreté. Le n° 11 de la collection Rapports de sûreté dénombre trois stades :

- 1) La sûreté répond à un objectif de conformité et est basée principalement sur des règles et des règlements. À ce stade, la sûreté est considérée comme une question technique, et la conformité à des règles et règlements imposés de l'extérieur est jugée adéquate pour la sûreté.
- 2) Une bonne performance en matière de sûreté devient un objectif de l'organisation et est traitée principalement en termes d'objectifs de sûreté.
- 3) La sûreté est considérée comme un processus continu d'amélioration auquel chacun peut contribuer.

En réalité, les trois stades ne sont pas distincts et toute organisation peut avoir certaines parties qui sont en avance par rapport à d'autres dans le renforcement de la culture de sûreté.

Les postulats de base ont conduit la NISA à ne pas suffisamment exercer son autorité et elle n'a donc pas pu remettre en question d'autres postulats concernant la sûreté nucléaire. Elle a été restreinte dans l'accomplissement de son rôle de supervision par l'absence d'un cadre réglementaire approprié et aussi par des contraintes légales explicites [6, 51]. Par exemple, la mission IRRS de l'AIEA en 2007 a constaté que les inspecteurs de la NISA n'avaient pas librement accès aux installations des titulaires de licences pour procéder aux inspections et n'étaient autorisés à mener les inspections qu'à certains moments. En raison du postulat de base selon lequel la robustesse de la conception technique assurerait une protection suffisante contre les risques postulés, la NISA a généralement travaillé de manière plus réactive qu'intégrative, s'attachant dans certains cas aux activités à court terme, et ne s'est pas occupée d'aspects plus fondamentaux et à long terme comme l'examen et l'application des normes de sûreté de l'AIEA. Dans certains cas, la réglementation n'était pas actualisée et des entraînements d'urgence complexes n'étaient pas organisés, car on s'inquiétait que la population puisse avoir l'impression que les centrales nucléaires n'étaient pas sûres, contrairement au postulat de base [5].

Ce même postulat selon lequel les centrales nucléaires étaient sûres a aussi influencé les actions de la TEPCO, lui donnant confiance dans la capacité des caractéristiques techniques

de ses centrales d'empêcher les accidents nucléaires graves. C'est la raison pour laquelle elle n'était pas suffisamment préparée à atténuer les conséquences de l'accident de mars 2011 [6, 7, 65]. Le risque d'une inondation déclenchant un accident nucléaire sortait du champ du postulat de base ; aussi les orientations internationales les plus récentes sur la gestion des accidents graves n'ont-elles pas toujours été suivies [66]. Le postulat de base excluait aussi la possibilité d'une défaillance de cause commune pouvant conduire à une perte totale des alimentations électriques d'une centrale à plusieurs tranches.

Le fait que les organisations concernées et leur personnel n'ont pas remis en question ou réexaminé les postulats de base relatifs à la sûreté nucléaire révèle une lacune de la culture de sûreté. Comme indiqué dans l'encadré 2.9, le troisième stade d'un programme de culture de sûreté a trait à la nécessité d'un processus continu d'amélioration, qui devrait inclure le réexamen périodique de l'adéquation de la sûreté nucléaire. L'un des moyens de remettre en question les postulats de base est d'appliquer une approche systémique de la sûreté nucléaire et de comprendre la complexité de l'ensemble des interactions entre les facteurs humains, organisationnels et techniques. Le fait de ne pas avoir suffisamment tenu compte de ces interactions est l'un des facteurs qui ont contribué à l'accident, car le postulat de base est resté caché.

***Encadré 2.10. Postulats de base [64]***

Pour comprendre la culture de sûreté dans sa totalité, il faut dégager les artéfacts et le comportement, les valeurs embrassées et les postulats de base qui constituent les trois niveaux du concept de culture tel qu'il s'applique à la sûreté. L'application du modèle des trois niveaux à une organisation donnée tiendrait compte du caractère unique de celle-ci, et permettrait d'établir des liens logiques entre les artéfacts, les valeurs embrassées et les postulats de base. Les liens logiques ne sont pas apparents dans les exemples indicatifs ci-dessous, car ceux-ci ne concernent aucune organisation en particulier.

Les artéfacts sont les plus faciles à observer, mais leur sens est le plus difficile à interpréter. La connaissance des valeurs embrassées aidera à comprendre le sens, mais c'est seulement quand les postulats de base sont compris que le sens des éléments au niveau de l'artéfact deviendra apparent.

**Artéfacts et comportement :** Architecture, rituels de salutation, vêtements, titres – visibles ;

**Valeurs embrassées :** Stratégies, buts, doctrines – peuvent être déduites ;

**Postulats de base :** Nature humaine, base sur laquelle les personnes sont respectées – inconscients et habituellement tacites.

Les postulats de base sont au niveau le plus profond de la culture. Ce sont des croyances fondamentales qui paraissent tellement légitimes que la plupart des membres d'un groupe culturel y souscrivent, mais inconsciemment. Pour comprendre une culture, il faut mettre au jour ces postulats de base. Dans le cas d'une organisation, ils refléteront aussi son histoire et les valeurs, les croyances et les postulats des fondateurs et des principaux dirigeants qui en ont fait le succès. Les postulats de base sont rarement discutés et confrontés et ils sont extrêmement difficiles à changer.

**Encadré 2.11. Approche systémique de la sûreté [67]**

L'approche systémique de la sûreté traite l'ensemble d'un système en examinant les interactions dynamiques au sein de tous les facteurs pertinents du système et entre eux – facteurs individuels (p. ex. connaissances, pensées, décisions, actions), facteurs techniques (p. ex. technologie, outils, équipements) et facteurs organisationnels (p. ex. système de gestion, structure organisationnelle, gouvernance, ressources).

L'approche systémique de la sûreté considère ce système complexe d'interactions comme un tout. Par exemple, parmi les facteurs importants à prendre en considération dans ces interactions dans une centrale nucléaire figurent ceux qui sont liés aux individus, comme les connaissances, les décisions, les pensées, les émotions et les actions. Les facteurs techniques comprennent les aspects physiques de la centrale nucléaire et l'ensemble des outils et équipements techniques utilisés pour son exploitation. Les facteurs organisationnels comprennent le système de gestion, la structure organisationnelle, la gouvernance de la centrale et les ressources financières et humaines, compte étant tenu du fait que les interactions entre tous les facteurs individuels, techniques et organisationnels font apparaître la complexité et la non-linéarité du fonctionnement d'une centrale nucléaire. Il faut examiner plus avant comment les faiblesses et les forces de tous ces facteurs s'influencent réciproquement afin de réduire ou d'éliminer les risques de manière proactive.

La tendance de la majorité des parties prenantes à ne pas remettre en question l'adéquation des caractéristiques de sûreté existantes de la centrale a renforcé le postulat selon lequel la robustesse de la conception technique de celle-ci et les mesures de sûreté déjà prises suffiraient à la protéger. De ce fait, des améliorations de la sûreté qui s'imposaient n'ont pas été apportées de façon proactive et rapide [5-7].

Les opérateurs qui sont intervenus directement au début de l'accident l'ont fait dans des circonstances extrêmes. L'anxiété et le stress associés à leurs actions ont été aggravés par le fait qu'ils n'avaient souvent pas d'informations quant à la sécurité de leurs familles ou à l'état de leurs maisons. Les personnes sur le site ne savaient pas comment l'accident progresserait, ce qui créait une importante incertitude ; malgré cela, elles ont fait tout ce qu'elles pouvaient pour protéger la population et l'environnement. L'exploitant a été confronté à une situation sans précédent – gérer un accident dans une centrale à plusieurs tranches pendant une crise nationale avec une infrastructure fortement endommagée. Cela a créé un environnement de travail extrêmement défavorable du double point de vue physique et psychologique.

L'interaction des facteurs humains, organisationnels et techniques entre toutes les organisations parties prenantes et entre les différents niveaux d'une même organisation s'inscrit dans le champ d'application plus large de la culture de sûreté de l'organisation et en ce sens la reflète. Avec une approche systémique de la sûreté qui analyse les facteurs humains, organisationnels et techniques, une organisation peut mieux se préparer à un événement inattendu. La sûreté nucléaire dépendra aussi des attitudes et du comportement des personnes [67]. Les facteurs humains et organisationnels qui amènent à ne pas remettre en question ou à ne pas examiner les postulats de base sur la sûreté peuvent conduire les organisations et les personnes à prendre des décisions et exécuter des actions pouvant compromettre involontairement la sûreté nucléaire. Il est important d'être conscient de ces postulats de base et de tenter de comprendre leur impact sur la sûreté nucléaire.

### 2.3. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS

Plusieurs observations et enseignements ont été compilés à l'issue de l'évaluation des considérations de sûreté nucléaire relatives à l'accident.

- **L'évaluation des aléas naturels doit être suffisamment prudente. La prise en compte de données essentiellement historiques dans la base de conception des centrales nucléaires n'est pas suffisante pour caractériser les risques d'aléas naturels extrêmes. Même quand des données détaillées sont disponibles, du fait des périodes d'observation relativement courtes, il subsiste d'importantes incertitudes dans la prévision des aléas naturels.**

Les événements naturels extrêmes de très faible probabilité peuvent avoir des conséquences importantes, et la prévision des aléas naturels extrêmes reste difficile et controversée à cause de l'existence d'incertitudes. En outre, ces prévisions peuvent évoluer pendant la durée de vie d'une centrale nucléaire à mesure que davantage d'informations deviennent disponibles et que les méthodes d'analyse se perfectionnent. Il est donc nécessaire d'utiliser toutes les données disponibles pertinentes, tant nationales qu'internationales, pour établir des prévisions crédibles des aléas, définir une base de conception fiable et réaliste en fonction des événements naturels extrêmes et concevoir des centrales nucléaires ayant des marges de sûreté suffisantes.

- **La sûreté des centrales nucléaires doit être réévaluée périodiquement pour tenir compte du progrès des connaissances, et les mesures correctives ou compensatoires nécessaires doivent être appliquées rapidement.**

Le programme d'examens périodiques de la sûreté à la centrale de Fukushima Daiichi n'a pas conduit à des améliorations de la sûreté sur la base de prescriptions réglementaires. La TEPCO a procédé volontairement à la réévaluation en tenant compte du progrès des connaissances, y compris des nouvelles informations et données. Face à une estimation révisée d'un danger qui est supérieure aux prévisions précédentes, il est important d'assurer la sûreté de l'installation en appliquant des mesures correctives intérimaires tenant compte de la nouvelle estimation en attendant que l'exactitude de la valeur révisée soit évaluée. Si celle-ci est confirmée, l'organisme exploitant et l'organisme de réglementation doivent s'entendre sur un échéancier et un plan d'action détaillé pour étudier comment faire face à cette augmentation du danger afin d'assurer la sûreté de la centrale.

- **L'évaluation des aléas naturels doit prendre en compte la possibilité d'une combinaison de plusieurs d'entre eux, survenant soit simultanément, soit successivement, et leurs effets conjugués sur une centrale nucléaire. Elle doit aussi prendre en considération leurs effets sur les différentes tranches d'une centrale nucléaire.**

L'accident de Fukushima Daiichi a montré qu'il était nécessaire d'étudier de manière approfondie la possibilité d'une combinaison d'aléas naturels touchant plusieurs tranches d'une même centrale. Il faut prendre en considération les scénarios complexes résultant d'une combinaison d'aléas naturels lorsqu'on envisage les mesures d'atténuation d'un accident et les actions de relèvement.

- **Les programmes d'analyse de l'expérience d'exploitation doivent intégrer l'expérience de sources tant nationales qu'internationales. Les améliorations de la sûreté répertoriées dans ces programmes doivent être mises en œuvre rapidement. Il faut réévaluer périodiquement et en toute indépendance la manière dont l'expérience d'exploitation est mise à profit.**

Le programme d'évaluation de l'expérience d'exploitation à la centrale de Fukushima Daiichi n'a pas conduit à des modifications de la conception prenant en compte l'expérience d'exploitation aussi bien nationale qu'internationale en matière d'inondation. Le réexamen de l'expérience d'exploitation doit être un élément standard des processus de supervision des centrales, et il doit être tenu compte de sources pertinentes comme le Système de notification des incidents de l'AIEA et de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire. Les organismes de réglementation doivent procéder à des examens indépendants de l'expérience d'exploitation nationale et internationale pour confirmer que les organismes exploitants prennent des mesures concrètes pour améliorer la sûreté.

- **Le concept de défense en profondeur reste valide, mais son application doit être renforcée à tous les niveaux par une indépendance, une redondance, une diversité et une protection contre les dangers externes et internes adéquates. Il faut se concentrer non seulement sur la prévention des accidents, mais aussi sur l'amélioration des mesures d'atténuation des conséquences.**

L'inondation résultant du tsunami a simultanément mis à l'épreuve les trois premiers niveaux de défense en profondeur, ce qui a entraîné des défaillances de cause commune des équipements et systèmes. Confrontés à cette situation, les opérateurs ont quand même réussi à appliquer, bien qu'avec retard, des stratégies efficaces d'atténuation. Tous les niveaux de défense en profondeur associés à la fois à la prévention et à l'atténuation des conséquences des accidents devraient être renforcés par une indépendance, une redondance, une diversité et une protection adéquates de façon qu'ils ne soient pas sollicités simultanément par un danger externe ou interne et qu'ils ne risquent pas d'être l'objet d'une défaillance de cause commune. Il faut réexaminer périodiquement l'application du concept de défense en profondeur pendant la durée de vie d'une centrale nucléaire pour s'assurer que tout changement de la vulnérabilité aux événements externes est compris et que la conception est modifiée en conséquence. Il faut traiter les dangers externes extrêmes dans les examens périodiques de la sûreté, car ils peuvent entraîner des défaillances de cause commune pouvant compromettre simultanément plusieurs niveaux de défense en profondeur.

- **Les systèmes de contrôle-commande doivent rester opérationnels pendant les accidents hors dimensionnement pour que l'on puisse surveiller les paramètres de sûreté essentiels et pour faciliter les opérations.**

En raison de la perte du contrôle-commande pendant l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi, les opérateurs n'avaient que peu d'indications sur les conditions réelles de la centrale. La perte des systèmes de contrôle-commande a eu un fort impact sur les tentatives faites pour éviter un accident grave ou en atténuer les conséquences. La portée et la nature des systèmes de contrôle-commande nécessaires doivent être définies avec soin, selon les caractéristiques de conception de la centrale, y compris les piscines d'entreposage du combustible usé. Ces systèmes doivent être

protégés de façon à être disponibles en cas de besoin. Cela a aussi montré qu'il fallait améliorer les stratégies visant à permettre la commande manuelle des équipements vitaux.

- **Des systèmes de refroidissement robustes et fiables pouvant fonctionner en cas aussi bien d'accident de dimensionnement que d'accident hors dimensionnement doivent être en place pour l'évacuation de la chaleur résiduelle.**

À la centrale de Fukushima Daiichi, les opérateurs ont fini, bien qu'avec retard, par pouvoir déployer des équipements mobiles pour injecter de l'eau dans les réacteurs. Il faut homologuer et tester des systèmes de refroidissement faisant appel à des équipements fixes ou mobiles pour s'assurer qu'ils fonctionnent et peuvent être déployés par les opérateurs en cas de besoin.

- **Il est nécessaire d'assurer une fonction de confinement fiable pour les accidents hors dimensionnement afin d'empêcher des rejets importants de matières radioactives dans l'environnement.**

À la centrale de Fukushima Daiichi, la défaillance de l'éventage du confinement et la défaillance consécutive du bâtiment du réacteur due à l'explosion d'hydrogène ont entraîné un important rejet de matières radioactives dans l'environnement. Il faut évaluer la fonction de confinement pour s'assurer que tous les dangers possibles sont pris en compte dans la conception des équipements censés maintenir l'intégrité du confinement.

- **Il faut procéder à des études probabilistes et déterministes détaillées de sûreté pour confirmer la capacité d'une centrale à résister aux accidents hors dimensionnement pertinents et arriver à la profonde conviction que sa conception est robuste.**

Les analyses de la sûreté peuvent servir à la fois à évaluer et à élaborer des stratégies d'intervention pour les accidents hors dimensionnement et peuvent faire appel à des méthodes aussi bien déterministes que probabilistes. Les études probabilistes de sûreté menées pour la centrale de Fukushima Daiichi étaient de portée limitée et n'envisageaient pas la possibilité d'inondation à partir de sources internes et externes. Les limitations de ces études sont un des facteurs qui ont restreint la portée des procédures de gestion des accidents dont les opérateurs disposaient.

- **Les dispositions en matière de gestion des accidents doivent être détaillées, bien conçues et à jour. Elles doivent être élaborées à partir d'un ensemble complet d'événements initiateurs et d'états de la centrale et aussi prévoir la possibilité d'accidents qui touchent plusieurs tranches d'une même centrale.**

Les procédures de gestion des accidents dont les opérateurs de la centrale de Fukushima Daiichi disposaient n'envisageaient pas la possibilité d'un accident touchant plusieurs tranches, et ne donnaient pas non plus d'instructions en cas de perte totale de l'alimentation électrique. Les dispositions en matière de gestion des accidents doivent reposer sur une analyse spécifique de la centrale combinant des méthodes déterministes et probabilistes. Les orientations et les procédures de gestion des accidents doivent prendre en compte la possibilité d'événements se produisant dans plusieurs tranches simultanément et dans les piscines d'entreposage du

combustible usé. Elles doivent aussi tenir compte de l'éventualité de perturbations de l'infrastructure régionale, et notamment d'une sérieuse désorganisation des communications, des transports et des services publics. Enfin, elles devraient aussi tenir compte des meilleures orientations élaborées par la communauté internationale et être mises à jour périodiquement en fonction des informations nouvelles.

- **La formation, les exercices et les entraînements doivent faire une place aux accidents graves postulés pour que les opérateurs soient aussi bien préparés que possible. Ils doivent notamment inclure l'utilisation simulée des équipements qui seraient effectivement employés pour la gestion d'un accident grave.**

Les opérateurs de la centrale de Fukushima Daiichi n'avaient pas été spécialement formés à la façon de faire fonctionner manuellement des systèmes tels que le condenseur d'isolement de la tranche 1 et les autopompes en tant que source de substitution pour l'injection d'eau à basse pression. Dans la formation du personnel, il faut prêter une attention particulière à l'intervention dans les conditions d'une perte prolongée de toute l'alimentation électrique avec des informations limitées sur l'état de la centrale et aucune information sur les paramètres de sûreté importants. Il faut que la formation, les exercices et les entraînements du personnel simulent de façon réaliste la progression des accidents graves, y compris la survenue simultanée d'accidents dans plusieurs tranches d'un même site. Ils doivent s'adresser non seulement au personnel de gestion des accidents sur le site, mais aussi à tous les intervenants hors site au niveau de l'organisme exploitant et aux niveaux local, régional et national.

- **Pour une supervision réglementaire efficace de la sûreté des installations nucléaires, il est essentiel que l'organisme de réglementation soit indépendant et possède les pouvoirs juridiques et la compétence technique nécessaires, et une solide culture de sûreté.**

La NISA n'avait pas suffisamment de pouvoirs pour prendre les mesures nécessaires, y compris en ce qui concerne l'inspection des installations réglementées. Il est essentiel que l'organisme de réglementation puisse prendre des décisions indépendantes en matière de sûreté pendant toute la durée de vie des installations. Pour garantir cette indépendance de la prise des décisions, l'organisme de réglementation doit être compétent et avoir suffisamment de ressources humaines, des pouvoirs juridiques adéquats – y compris le droit de suspendre l'exploitation et/ou d'imposer des améliorations de la sûreté aux organismes exploitants – et des ressources financières adéquates. Il doit être habilité à adapter son programme d'inspection en fonction des informations nouvelles en matière de sûreté. Il doit aussi pouvoir s'assurer que les prescriptions réglementaires nationales et les instructions correspondantes pour l'évaluation de la sûreté des installations nucléaires sont révisées périodiquement en fonction des progrès scientifiques et techniques, de l'expérience d'exploitation et des normes et pratiques internationales.

- **Pour promouvoir et renforcer la culture de sûreté, il faut que les personnes et les organisations remettent sans cesse en question ou réexaminent en permanence les postulats courants en matière de sûreté nucléaire et les incidences des décisions et des actions pouvant influencer sur la sûreté nucléaire.**

Pour cela, les personnes et les organisations adoptent une attitude de questionnement afin de mettre au jour la nature, les limites et les menaces potentielles de leurs propres postulats communs concernant la sûreté nucléaire. L'institutionnalisation d'un dialogue continu au sein des organisations et entre les différentes organisations sur les questions liées à la sûreté nucléaire et leur importance et leur impact sur les décisions et les actions est essentielle. Des évaluations périodiques de la culture de sûreté peuvent aider à favoriser la réflexion et le dialogue sur les postulats de base.

- **Une approche systémique de la sûreté doit prendre en compte les interactions entre les facteurs humains, organisationnels et techniques. Cette approche doit être suivie pendant la totalité du cycle de vie des installations nucléaires.**

L'accident à la centrale de Fukushima Daiichi a montré qu'il était difficile de repérer les vulnérabilités de systèmes qui supposent des interactions complexes entre les personnes, les organisations et la technologie, car le postulat de base sur la sûreté nucléaire peut rester caché. Une approche systémique prenant en compte les facteurs humains, technologiques et organisationnels est nécessaire pour comprendre comment les éléments de l'ensemble du système opèrent et interagissent en fonctionnement normal et dans des conditions accidentelles.

### 3. PRÉPARATION ET CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE

La présente section décrit les principaux événements survenus et mesures d'intervention prises depuis le début de l'accident le 11 mars 2011. Elle traite aussi du système national de préparation et de conduite des interventions d'urgence en place au Japon avant l'accident et du cadre international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence.

Les principales dispositions internationales concernant la préparation à une situation d'urgence nucléaire qui existaient avant l'accident sont exposées dans l'encadré 3.1.

#### ***Encadré 3.1. Principales dispositions concernant la préparation à une situation d'urgence nucléaire des normes de sûreté de l'AIEA avant l'accident***

Les normes de sûreté de l'AIEA [68, 69] en vigueur avant l'accident prescrivaient :

1) D'appliquer une approche tous risques lors de l'élaboration des dispositions relatives à la préparation et à la conduite des interventions<sup>63</sup> ; 2) d'établir un système de classement des situations d'urgence à partir de conditions observables et de critères mesurables (niveaux d'action urgente) et d'entreprendre des actions protectrices urgentes prédéterminées en faveur de la population (dans les zones prédéfinies) rapidement après le classement de la situation d'urgence par l'exploitant ; 3) de créer des zones d'urgence pour l'ensemble des situations d'urgence possibles, y compris celles de faible probabilité ; 4) d'établir des dispositions pour la mise en œuvre d'actions protectrices dans les zones d'urgence et au-delà, selon les besoins ; 5) d'instituer des critères nationaux pour les décisions concernant les actions protectrices à prendre en faveur de la population (évacuation, mise à l'abri, prophylaxie à l'iode, relogement, restrictions à la consommation et à la distribution d'aliments et d'eau de boisson, contrôle radiologique et décontamination de la population) en termes de doses et de grandeurs mesurables (niveaux opérationnels d'intervention) en prenant en considération un ensemble de facteurs (comme les aspects financiers et sociaux) ; 6) d'adopter des dispositions pour la conduite du contrôle radiologique, l'échantillonnage de l'environnement et son évaluation afin de détecter rapidement les nouveaux dangers et adapter la stratégie d'intervention ; 7) de déterminer, au stade de la préparation, des groupes de population particuliers (p. ex. personnes handicapées, patients hospitalisés), pour lesquels il convient d'adopter des dispositions spéciales ; 8) de prévoir des dispositions pour les membres des équipes d'intervention, et notamment de fixer les critères de dose pour différents types de tâches, de désigner les membres de ces équipes et d'en assurer la protection, de donner des orientations pour gérer, contrôler et enregistrer leurs doses, et de fournir des équipements de protection, des procédures et une formation spécialisés ; 9) de planifier la transition entre la phase d'urgence et les opérations de relèvement à long terme et la reprise d'activités socio-économiques normales (notamment répartir clairement les responsabilités, mettre en commun et transférer les informations, évaluer les conséquences, établir des processus formels de décision pour la levée des restrictions et autres dispositions imposées pendant l'urgence, établir des principes et critères pertinents et consulter la population) ; 10) d'indiquer clairement les rôles, responsabilités et pouvoirs pour la préparation et la conduite de l'intervention d'urgence à tous les niveaux dans les plans d'urgence ; 11) de déterminer les liens et interactions entre les organismes exploitants et ceux chargés de l'intervention et de préparer des protocoles d'opérations pour coordonner l'intervention d'urgence à tous les niveaux ; 12) d'élaborer et de coordonner des plans et procédures d'urgence à tous les niveaux en fonction des dangers évalués ; 13) de prévoir l'appui logistique en procurant des outils, instruments, fournitures, équipements, systèmes de communication, moyens fonctionnels et documents particuliers, et d'en planifier le fonctionnement et l'utilisation dans les conditions radiologiques, de travail et environnementales postulées pour l'intervention d'urgence ; 14) de planifier et de conduire des formations, des entraînements et des exercices ; et 15) de mettre en place un programme d'assurance de la qualité pour que l'ensemble des fournitures, équipements, systèmes de communication, moyens et documents, etc., puisse être constamment tenu à jour, disponible et prêt à être utilisé en cas d'urgence.

<sup>63</sup> 'Dispositions' – Ensemble intégré des éléments d'infrastructure qui sont nécessaires pour pouvoir exécuter une fonction ou une tâche spécifique requise lors d'une intervention en cas d'urgence nucléaire ou radiologique. Ces éléments sont notamment les suivants : pouvoirs et responsabilités, organisation, coordination, personnel, plans, procédures, installations, équipements et formation.

Les types d'actions protectrices à entreprendre dans une situation d'urgence nucléaire sont résumés dans l'encadré 3.2.

**Encadré 3.2. Types d'actions protectrices dans une situation d'urgence nucléaire [48, 69]**

**Actions d'atténuation** : Actions immédiates visant à réduire le risque d'apparition de conditions qui pourraient entraîner une exposition ou un rejet de matières radioactives nécessitant des actions urgentes sur le site ou hors du site ou à atténuer les conditions dans la centrale qui pourraient entraîner une exposition ou un rejet de matières radioactives nécessitant des actions urgentes sur le site ou hors du site.

**Actions protectrices urgentes** : Actions qui doivent être engagées rapidement (en l'espace de quelques heures) pour être efficaces. Les plus courantes dans une situation d'urgence nucléaire sont l'évacuation, la mise à l'abri, la prophylaxie à l'iode, les restrictions à la consommation d'aliments éventuellement contaminés et la décontamination des personnes.

**Actions protectrices rapides** : Actions qui doivent être engagées en l'espace de quelques jours ou semaines pour être efficaces. Elles peuvent durer, même après la fin de la situation d'urgence. Contrairement aux actions protectrices urgentes, elles peuvent généralement être établies à partir des résultats du contrôle radiologique qui tient compte de la nature particulière des matières radioactives émises et de leur dispersion dans l'environnement. Il peut s'agir d'opérations de relogement, de restrictions à la consommation d'aliments et d'eau de boisson et de contrôle des produits agricoles.

### 3.1. INTERVENTION INITIALE AU JAPON APRÈS L'ACCIDENT

*Au moment de l'accident, des dispositions distinctes étaient en place aux niveaux national et local pour faire face, d'une part, à des situations d'urgence nucléaire et, d'autre part, à des catastrophes naturelles. Il n'y en avait par contre aucune pour faire face à de tels événements survenant simultanément.*

*Selon les dispositions applicables aux situations d'urgence nucléaire, une fois détectées des conditions défavorables dans une centrale nucléaire (p. ex. perte de l'ensemble des alimentations en CA pendant plus de cinq minutes ou perte de toutes les capacités de refroidissement du réacteur), la centrale enverrait une notification aux autorités locales et nationales. Le gouvernement évaluerait ensuite la situation et déterminerait l'opportunité de la classer comme 'situation d'urgence nucléaire'<sup>64</sup>. Si tel était le cas, la situation d'urgence nucléaire serait décrétée à l'échelle nationale, et les actions protectrices à prendre seraient décidées en fonction des prévisions de doses.*

*Sur la base d'un rapport de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, le gouvernement a décrété l'état d'urgence nucléaire dans la soirée du 11 mars 2011 et ordonné la mise en œuvre d'actions protectrices en faveur de la population. L'intervention était dirigée au niveau national par le premier ministre et de hauts fonctionnaires de son cabinet à Tokyo.*

*Il a été extrêmement difficile d'intervenir sur le site du fait des conséquences du séisme et du tsunami et de l'augmentation de l'intensité du rayonnement. Nombre d'actions d'atténuation n'ont pu être mises en œuvre à temps en raison de la perte des alimentations en CA et CC, de la présence d'une énorme quantité de gravats qui a gêné l'application des mesures d'intervention sur le site, des répliques, des alertes à de nouveaux tsunamis et de*

<sup>64</sup> Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire, Loi n° 156 de 1999, modifiée en dernier lieu par la Loi n° 118 de 2006, ci-après dénommée Loi sur les situations d'urgence nucléaire.

*L'augmentation de l'intensité du rayonnement. Le gouvernement est intervenu dans les décisions concernant l'action d'atténuation à entreprendre sur le site.*

*L'activation du Centre d'urgence hors site, situé à 5 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, a été rendue difficile en raison des dommages considérables causés aux infrastructures par le séisme et le tsunami. Il a fallu l'évacuer quelques jours plus tard en raison des conditions radiologiques défavorables.*

La principale législation sur laquelle reposait le système national de préparation et de conduite des interventions d'urgence au Japon était constituée par la Loi fondamentale sur les contre-mesures en cas de catastrophe [70] et la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire [19] (encadré 3.3).

*Encadré 3.3. Principaux documents définissant le système national de préparation et de conduite des interventions en cas d'urgence nucléaire au Japon au moment de l'accident*

Législation nationale			
Loi fondamentale sur les contre-mesures en cas de catastrophe*		Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	
Planification à l'échelle nationale			
Plan-cadre pour la gestion des catastrophes*	Décret d'application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	Ordonnance portant application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire	Guide réglementaire sur la préparation des interventions d'urgence dans les installations nucléaires
Plans et manuels d'opérations			
Niveau national	Plan des opérations de gestion des catastrophes*	Manuel d'intervention en cas d'urgence nucléaire	
Préfectures/agglomérations/villes/villages	Plans des opérations de gestion des catastrophes des préfectures/agglomérations/villes/villages*	Manuels nucléaires des préfectures/agglomérations/villes/villages	
Exploitants	Plans des actions urgentes des exploitants nucléaires	Manuels des exploitants nucléaires pour les interventions d'urgence	
* Ces documents traitent de divers types de catastrophes, y compris les situations d'urgence nucléaire			

### 3.1.1. Notification

En vertu de l'article 10 de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19], la centrale nucléaire était tenue d'envoyer une notification aux autorités locales et nationales quand certains 'événements particuliers' prédéfinis se seraient produits, comme une panne de l'ensemble des alimentations en CA pendant plus de cinq minutes [55]. En vertu de l'article 15 de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire, un rapport sur une « situation d'urgence nucléaire » serait envoyé lorsque certains critères prédéfinis seraient remplis ou dépassés, comme la perte de toutes les capacités de refroidissement du réacteur [21, 71].

On tenait pour acquis qu'un rapport sur un événement serait envoyé en application de l'article 15 après notification d'un événement en application de l'article 10 [72]. La

notification déclencherait une évaluation du gouvernement qui déterminerait s'il s'agissait d'une 'situation d'urgence nucléaire'. Dans l'affirmative, le premier ministre en serait avisé et un projet de déclaration de « situation d'urgence nucléaire » lui serait soumis. Il reviendrait de décréter une « situation d'urgence nucléaire » et d'ordonner<sup>65</sup> et/ou de recommander des actions protectrices en faveur de la population [73].

Les principales mesures à prendre si un événement relevait de l'article 10 et/ou de l'article 15 de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire sont récapitulées dans la figure 3.1 [19, 70, 73-75].

La vague de tsunami qui a submergé la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi est arrivée à 15 h 36 le 11 mars 2011 [10]. Le même jour, à 15 h 42, en application de l'article 10 de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19], la centrale a notifié aux autorités nationales et locales un 'événement particulier' affectant les tranches 1 à 5, puis, à 16 h 45, a envoyé un rapport sur un événement concernant les tranches 1 et 2 classé comme 'situation d'urgence nucléaire', en application de l'article 15 de la loi [3, 8, 76, 77].

L''événement particulier' notifié en vertu de l'article 10 était une 'perte totale des alimentations électriques' des tranches 1 à 5 [76]. L'événement signalé comme 'situation d'urgence nucléaire' en vertu de l'article 15 était initialement l''incapacité d'injection d'eau du système de refroidissement de secours du cœur' des tranches 1 et 2 [77]. Après avoir reçu la notification, le gouvernement a évalué la situation et jugé qu'il s'agissait d'une 'situation d'urgence nucléaire' [6].

Le premier ministre a décrété une situation d'urgence nucléaire à 19 h 03, soit plus de deux heures après avoir été avisé par la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi d'un événement affectant les tranches 1 et 2 classé comme 'situation d'urgence nucléaire' en vertu de l'article 15 de la loi, et après de longues délibérations de responsables extérieurs au site [3].

### **3.1.2. Actions d'atténuation**

Un centre d'intervention d'urgence, supervisé par le Directeur du site, a été créé à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, conformément au Manuel d'intervention en cas de catastrophe de la TEPCO, environ 15 minutes après le séisme [6, 8]. Il était situé dans le bâtiment 'sismiquement isolé', qui était doté d'équipements spéciaux, notamment d'une alimentation électrique autonome et de systèmes de ventilation avec filtres. Construit<sup>66</sup> à partir des leçons tirées de l'expérience acquise à la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa après le tremblement de terre de Niigata Chuetsu-oki en 2007, ce bâtiment a permis aux actions d'atténuation de se poursuivre sur le site pendant l'intervention après l'accident [8].

---

<sup>65</sup> S'agissant de l'adoption des actions protectrices, les termes 'instructions' et 'recommandations' sont employés dans la Loi sur les situations d'urgence nucléaire [19] et la Loi fondamentale sur les contre-mesures en cas de catastrophe [70]. Une 'instruction' a un caractère obligatoire et la population est donc tenue de s'y conformer. Une 'recommandation' n'est qu'une suggestion et n'a donc aucun caractère obligatoire. Néanmoins, dans un souci de clarté, les termes 'ordonner' ou 'ordres' seront employés comme équivalents du mot 'instructions' dans le présent rapport.

<sup>66</sup> Mis en chantier en mars 2009, le bâtiment avait été mis en service en juillet 2010.

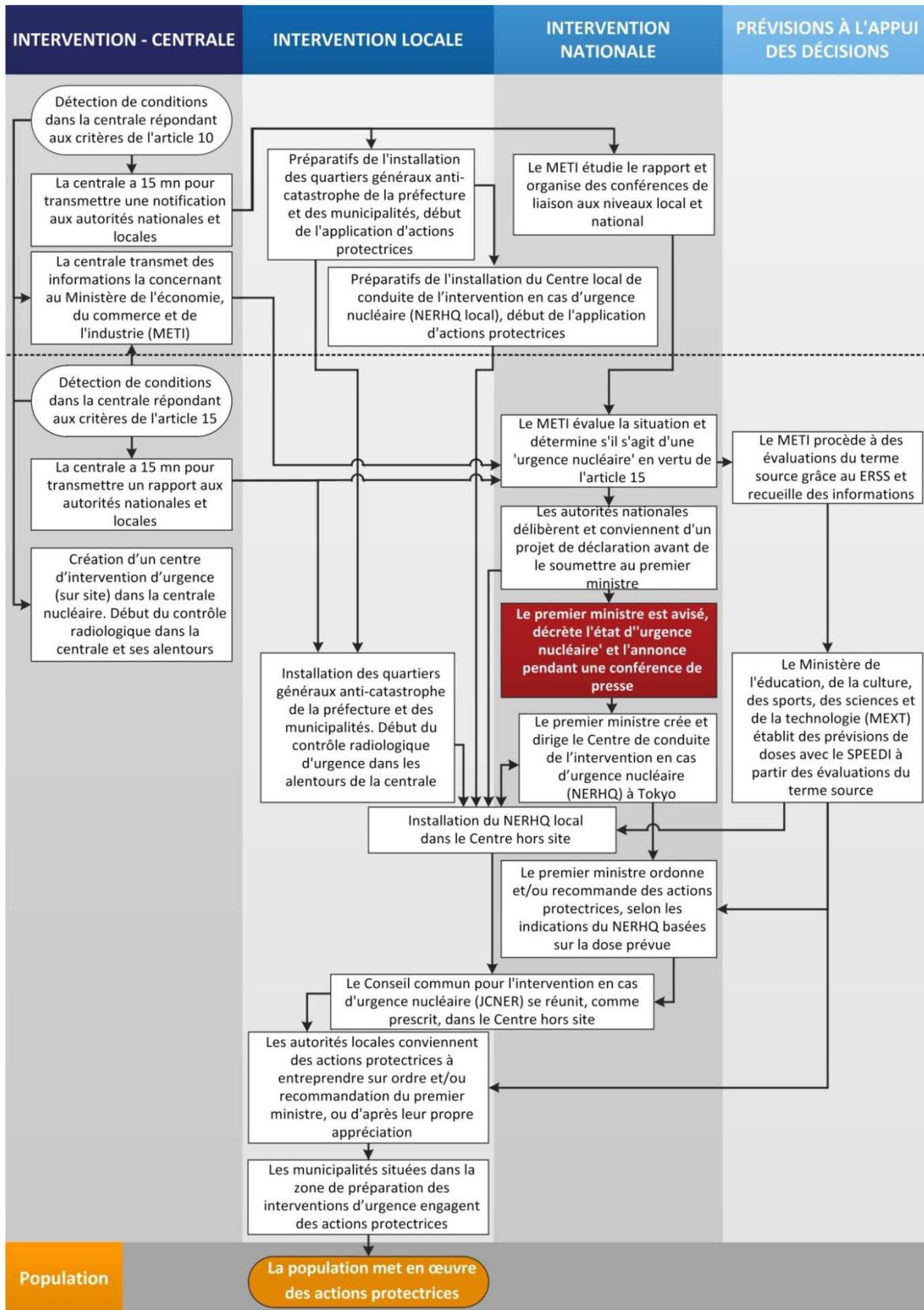


FIG. 3.1. Principales mesures à prendre en cas d'événement relevant de l'article 10 et/ou de l'article 15 de la Loi sur les situations d'urgence nucléaire, telles qu'elles étaient prévues avant l'accident (d'après les réfs. [19, 70, 73-75]).

Selon les dispositions en vigueur avant l'accident, en cas de besoin, le centre d'intervention d'urgence sur le site pouvait demander de l'aide au siège de la TEPCO, laquelle regrouperait ses capacités et les ressources d'autres organismes exploitant des installations nucléaires, dans le cadre de l'accord de coopération entre exploitants nucléaires japonais [8, 75].

À la demande de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, du personnel et du matériel supplémentaires envoyés par d'autres centrales nucléaires japonaises (non exploitées par la TEPCO) ont été mobilisés pour soutenir l'intervention d'urgence sur le site. Cependant, l'efficacité de ce soutien a été amoindrie par les dommages considérables causés aux infrastructures de transport par le séisme et le tsunami et par le manque de planification en amont. Par exemple, lorsque la demande d'équipements avait été remplie de manière approximative, il est arrivé que certains de ceux qui furent fournis soient incompatibles avec ceux de la centrale (raccords, connecteurs, etc., différents) [8].

Pour l'intervention, des membres du personnel de la TEPCO, de sous-traitants et d'autres centrales nucléaires japonaises (non exploitées par la TEPCO) ont été dépêchés sur le site pour aider à y effectuer diverses tâches, notamment rétablir le courant et remettre en service les instruments de contrôle radiologique, injecter de l'eau de refroidissement dans les réacteurs, enlever les gravats et contrôler l'intensité du rayonnement [8]. D'autres personnels provenant d'agences et organismes publics nationaux – comme les Forces japonaises d'autodéfense, la police et les sapeurs-pompiers – ont aussi été dépêchés sur le site. Ils ont participé aux travaux, en faisant notamment fonctionner les gros équipements nécessaires pour verser de l'eau ou la vaporiser sur les piscines d'entreposage du combustible usé des tranches 1, 3 et 4 et en procédant en hélicoptères à des opérations de surveillance de ces piscines [3, 6, 8].

Le séisme et le tsunami ont provoqué la perte des alimentations en CA et CC et généré une énorme quantité de gravats. Il y eut aussi des répliques et des alertes à d'éventuels nouveaux tsunamis. En raison de ces facteurs, ainsi que de l'augmentation de l'intensité de rayonnement et des explosions d'hydrogène, et aussi du manque de dispositions détaillées, il a été extrêmement difficile d'intervenir et de nombreuses actions d'atténuation n'ont pu être exécutées à temps [8]. Les travailleurs sur le site ont mené de telles opérations dans un environnement très hostile, effectuant un plus grand nombre d'heures et œuvrant dans des conditions bien plus fatigantes que ce que l'on pourrait normalement supposer [8].

Le gouvernement est intervenu dans la prise de décisions concernant les actions d'atténuation, comme l'injection d'eau de mer pour refroidir le combustible [6, 7]. Les rôles, responsabilités et pouvoirs à cet égard n'avaient pas été clairement attribués au stade de la préparation.

### **3.1.3. Gestion de la situation d'urgence**

Le système national de préparation et de conduite des interventions d'urgence en place au moment de l'accident prévoyait que les principales instances chargées de gérer la situation d'urgence nucléaire seraient le Centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire (NERHQ)<sup>67</sup> et son secrétariat<sup>68</sup>, ainsi que le Centre local de conduite de

---

<sup>67</sup> Le NERHQ devait être composé de fonctionnaires du secrétariat du Cabinet nommés par le premier ministre et des organes administratifs désignés [19]. Le premier ministre devait exercer les fonctions de directeur-général du NERHQ, qui devait opérer à partir du Bureau de son Cabinet (voir la figure 3.2).

l'intervention en cas d'urgence nucléaire (NERHQ local)<sup>69</sup>. Le NERHQ dirigerait et assurerait la coordination de l'intervention nationale, ce qui devait consister notamment à formuler et à publier des ordres et/ou des recommandations d'évacuation aux autorités locales [19].

Pour une intervention nationale au niveau local, la gestion globale de l'intervention face à une situation d'urgence nucléaire devait être coordonnée, le plus rapidement possible, par le NERHQ local opérant à partir du Centre hors site, situé à 5 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Le Centre préfectoral pour la conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire (NERHQ préfectoral) et le Conseil commun pour l'intervention en cas d'urgence nucléaire (JCNER) devaient aussi être installés dans le Centre hors site [73, 74, 78].

Pour l'intervention de la préfecture face à une situation d'urgence nucléaire, le NERHQ préfectoral et le Quartier général anti-catastrophe de la préfecture de Fukushima devaient coordonner leurs activités à l'échelle de la préfecture. Le JCNER coordonnerait l'intervention nationale au niveau local et l'intervention de la préfecture [19, 73, 74].

Des dispositions distinctes étaient en place aux niveaux national et local pour faire face, d'une part, à des situations d'urgence nucléaire et, d'autre part, à des catastrophes naturelles. Ces dispositions ne prévoyaient pas qu'il fallait pouvoir intervenir en cas de simultanéité de ces deux types d'événements [74, 78].

Les emplacements de ces principales instances impliquées dans la gestion de l'intervention en cas d'urgence nucléaire, tels qu'ils étaient prévus avant l'accident, sont indiqués dans la figure 3.2.

---

<sup>68</sup> Le secrétariat devait être composé de représentants d'organismes clés ayant à leur tête le directeur général de l'Agence de sûreté nucléaire et industrielle (NISA), qui faisait partie du Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI). Il devait être situé dans le centre d'intervention d'urgence du METI/NISA, dans le bâtiment du METI (voir la figure 3.2).

<sup>69</sup> Le NERHQ local devait être composé de membres du personnel de tous les organismes compétents, le premier vice-ministre du METI en étant le directeur général. Ses locaux devaient se situer dans le Centre hors site (voir la figure 3.2).

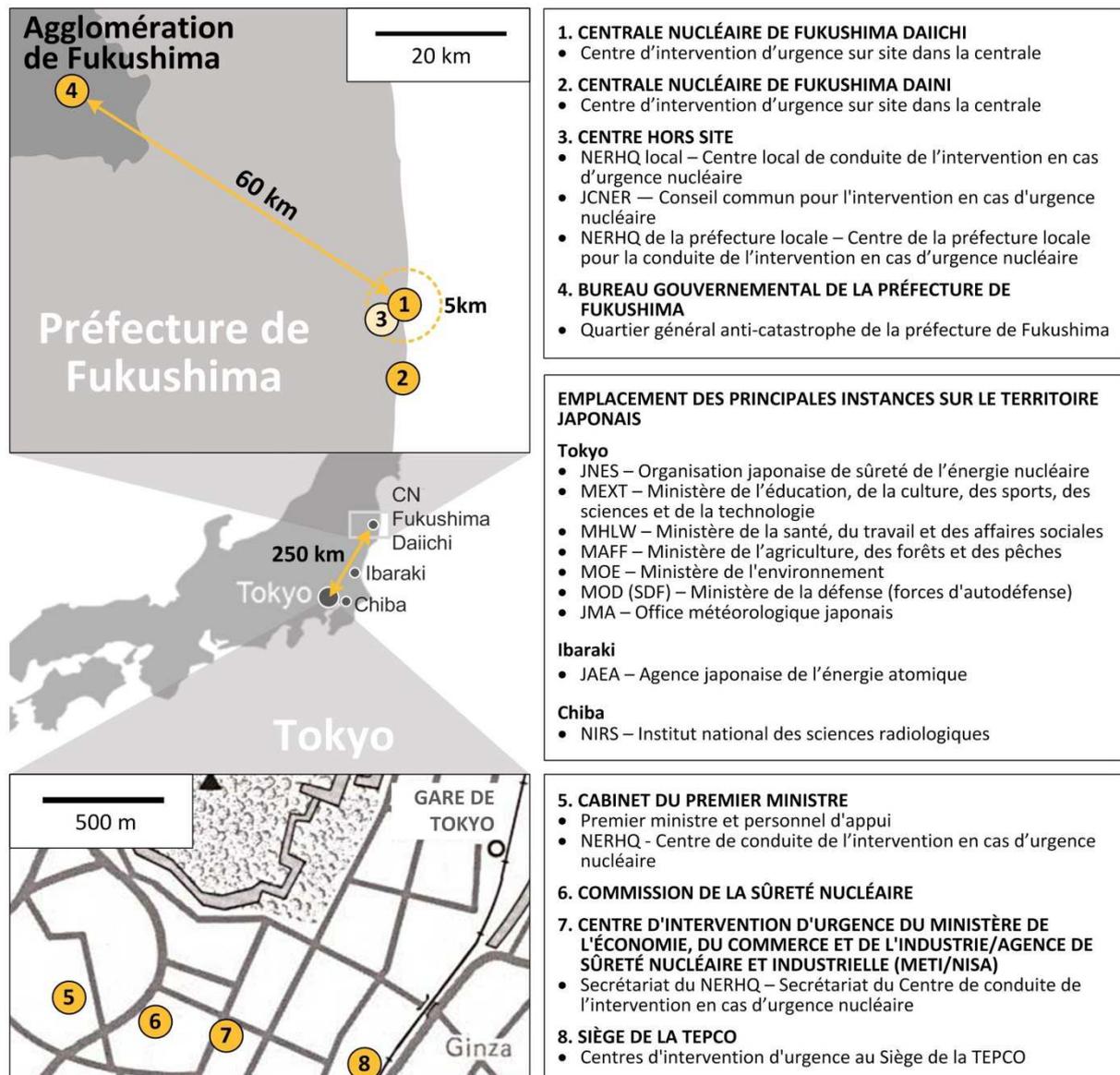


FIG. 3.2. Emplacements des principales instances impliquées dans la gestion de l'intervention en cas d'urgence nucléaire<sup>70</sup>.

À 14 h 50, le 11 mars 2011, le secrétaire général adjoint du Cabinet chargé de la gestion des crises a constitué un Bureau d'intervention d'urgence au Cabinet du premier ministre pour faire face au séisme. À 15 h 14, le gouvernement a établi le Centre d'intervention d'urgence pour les catastrophes au Cabinet du premier ministre à Tokyo, celui-ci en exerçant les fonctions de directeur général. À 16 h 36, le secrétaire général adjoint du Cabinet chargé de la gestion des crises a mis sur pied un Bureau d'intervention d'urgence pour l'accident nucléaire au Cabinet du premier ministre [6].

À 19 h 03, le 11 mars 2011, le gouvernement a créé le Centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire, au moment même où l'état d'urgence nucléaire était décrété [3].

<sup>70</sup> D'après les références [7, 8, 73, 74, 79-91].

Les conditions accidentelles évoluaient si rapidement qu'il fut impossible de tenir des discussions approfondies pendant les réunions du NERHQ. Ce sont le premier ministre et de hauts fonctionnaires réunis dans son bureau qui ont constitué le groupe au cœur de l'intervention d'urgence. Le premier ministre a donné l'ordre d'évacuation aux autorités locales sans y associer le secrétariat du NERHQ [7].

Le Bureau gouvernement-TEPCO chargé d'assurer une intervention intégrée – quartier général intégré de l'organisme exploitant et de l'organisme public d'intervention – a été constitué le 15 mars 2011 au siège de la TEPCO [6] à Tokyo et chargé de veiller à ce que des informations soient communiquées en temps voulu à l'échelon national.

Au niveau local, il a été difficile de lancer les opérations dans le Centre hors site en raison des dommages considérables causés par le séisme et le tsunami [92]. Il en est résulté que le NERHQ local et d'autres instances, qui étaient supposés opérer à partir du Centre hors site (JCNER et le NERHQ préfectoral), n'ont pu accomplir leurs tâches. Le 15 mars 2011, il est devenu nécessaire d'évacuer le Centre hors site, au vu de la détérioration des conditions radiologiques<sup>71</sup>, et de le transférer dans la salle publique de la préfecture de Fukushima, située à quelque 60 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [6, 92]. Cet emplacement n'avait pas les mêmes moyens que le Centre hors site, ce qui a notamment compliqué la mise en commun des informations en temps réel parmi les autorités concernées.

S'agissant de l'intervention de la préfecture, une nouvelle « brigade nucléaire »<sup>72</sup> a été créée au Quartier général anti-catastrophe de la préfecture de Fukushima, dans le cadre de la structure instituée pour faire face au séisme et au tsunami et coordonner les activités au niveau de la préfecture [7].

### 3.2. PROTECTION DES MEMBRES DES ÉQUIPES D'INTERVENTION

***Au moment de l'accident, la législation et les orientations nationales existant au Japon traitaient des mesures à prendre pour protéger les membres des équipes d'intervention<sup>73</sup>, mais uniquement en termes généraux sans entrer suffisamment dans les détails.***

---

<sup>71</sup> Le Centre hors site n'avait pas été conçu pour résister à l'intensité de rayonnement croissante.

<sup>72</sup> Une nouvelle brigade nucléaire a été créée car les neuf brigades opérationnelles existantes, mentionnées dans le Plan des opérations de gestion des catastrophes de la préfecture de Fukushima [74], étaient occupées à intervenir contre le séisme et le tsunami [7].

<sup>73</sup> L'AIEA emploie l'expression « membre d'une équipe d'intervention » de façon à englober ceux qui ont des attributions définies en tant que travailleur (toute personne qui travaille à plein temps, à temps partiel ou temporairement pour le compte d'un employeur et à qui sont reconnus des droits et des devoirs en matière de radioprotection professionnelle) lors d'une intervention d'urgence, notamment les travailleurs employés directement ou indirectement par des titulaires d'enregistrement et de licence ainsi que des agents des organismes d'intervention, comme les policiers, les pompiers, le personnel médical ainsi que les chauffeurs et membres de l'équipage des véhicules d'évacuation. Au Japon, l'expression « personnel affecté à la préparation des interventions d'urgence » est employée de façon à englober tous ceux qui exécutent des activités d'intervention d'urgence lors d'une situation d'urgence nucléaire comme « ... communiquer des informations publiques et des instructions aux résidents dans le voisinage, leur donner des orientations en ce qui concerne l'évacuation, le contrôle de la circulation, le contrôle radiologique, la mise en place de traitements médicaux, et prendre des mesures pour empêcher qu'une situation dans une installation nucléaire ne dégénère en catastrophe, et ceux qui effectuent des travaux en vue d'une reprise d'activité après la catastrophe comme l'enlèvement des contaminants radioactifs. » [93].

*Il a fallu faire appel à de nombreux travailleurs de différentes disciplines et de divers organismes et services publics pour appuyer l'intervention d'urgence. Cependant, il n'existait aucune disposition pour intégrer dans celle-ci ceux qui n'avaient pas été désignés avant l'accident.*

*L'application des dispositions relatives à la protection des travailleurs contre l'exposition aux rayonnements a beaucoup pâti des conditions extrêmes régnant sur le site. Afin de maintenir un niveau acceptable de protection des membres des équipes d'intervention sur le site, il a fallu mettre en œuvre diverses mesures improvisées. La limite de dose pour ceux d'entre eux qui effectuaient des tâches particulières a été temporairement relevée pour qu'il soit possible de continuer à mener les actions d'atténuation nécessaires. La prise en charge médicale des membres des équipes d'intervention a aussi été très perturbée et il a fallu faire des efforts majeurs pour répondre aux besoins de ceux qui travaillaient sur le site.*

*Des personnes du public, que l'on appellera « bénévoles », se sont portées volontaires pour participer à l'intervention d'urgence hors du site. Les autorités nationales ont publié des orientations sur le type d'activités que ces personnes pouvaient exécuter et sur les mesures à prendre pour les protéger.*

### **3.2.1. Protection du personnel de la centrale après le séisme et le tsunami**

Après l'alerte au tsunami, des initiatives ont été prises pour protéger le personnel de la centrale (environ 6 000 personnes) contre les retombées escomptées de cet événement. Des alertes au tsunami ont été diffusées par le système de haut-parleurs du site, le personnel étant invité à évacuer et à se rendre dans des emplacements désignés situés en hauteur. Dans la plupart des cas, ces initiatives ont été couronnées de succès, mais tous les membres du personnel n'ont pas entendu l'alerte au tsunami et les ordres d'évacuation [7, 8]. Deux travailleurs qui étaient en train de vérifier du matériel dans le sous-sol du bâtiment de la turbine de la tranche 4 après le séisme ont été emportés par l'inondation provoquée par le tsunami [8].

Si le personnel de la centrale a pu être protégé contre les effets du tsunami, c'est en grande partie dû aux enseignements tirés de l'expérience acquise à la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa après le tremblement de terre de Niigata-Chuetsu-oki en 2007, et aux efforts faits ultérieurement pour élaborer des procédures concernant les issues de secours [8].

Du 11 au 14 mars 2011, le personnel de la centrale jugé non indispensable – dont les femmes et la plupart des salariés des sous-traitants – a été évacué du site. Le matin du 15 mars, d'autres membres du personnel de la centrale ont été évacués en raison de l'aggravation de la situation sur le site. Quelque 50 à 70 travailleurs sont restés sur place, tandis qu'environ 650 autres se rendaient temporairement en bus ou en voitures à la centrale nucléaire de Fukushima Daini ; ils ont commencé à revenir à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi à partir de midi le même jour [8].

### 3.2.2. Mesures de protection pour les membres des équipes d'intervention

La législation et les orientations nationales existant au Japon au moment de l'accident traitaient des mesures à prendre pour protéger les membres des équipes d'intervention. Toutefois, les dispositions en vigueur, comme le plan interne au site, ne les abordaient qu'en termes généraux sans rentrer suffisamment dans les détails. Par exemple, ce plan couvrait les questions suivantes : définition des responsabilités ; attribution de tâches génériques pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence ; et établissement d'un inventaire des instruments disponibles (p. ex. détecteurs et dosimètres électroniques) [75].

Des limites de doses étaient définies pour les membres des équipes d'intervention en fonction des tâches qu'ils étaient censés effectuer, la limite supérieure étant fixée à 100 mSv en cas d'actions et d'activités destinées à sauver des vies de façon à empêcher qu'une situation ne tourne à la catastrophe, même s'il était demandé de réduire l'exposition au minimum [93, 94].

Pendant l'accident, diverses mesures improvisées ont été adoptées de sorte à maintenir un niveau de protection acceptable des membres des équipes d'intervention sur le site dans les conditions extrêmes qui y régnaient. Il y avait pénurie de dosimètres individuels, la plupart de ceux qui se trouvaient sur le site ne fonctionnant plus après le tsunami. Il a donc fallu prendre des mesures d'urgence pour suivre l'évolution des doses individuelles reçues par les membres des équipes d'intervention sur le site [8]. Par exemple, l'ordre a été donné de n'utiliser qu'un seul dosimètre personnel électronique par groupe de membres des équipes d'intervention censés travailler dans des conditions similaires. Quant à ceux qui travaillaient dans le bâtiment sismiquement isolé, on mesurait et vérifiait leurs doses en contrôlant le débit de dose dans les zones et en calculant le temps qu'ils y avaient passé. Cette situation a perduré jusqu'à la fin du mois de mars 2011, lorsque des dosimètres en nombre suffisant ont été fournis par d'autres centrales nucléaires [6, 8].

Le 14 mars 2011, la limite de dose pour les membres des équipes d'intervention effectuant des travaux d'urgence particuliers a été temporairement relevée à 250 mSv pour qu'il soit possible de poursuivre les activités nécessaires sur le site et dans un rayon de 30 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [95]. La limite pour les membres du service de lutte contre les incendies menant des actions destinées à sauver des vies est restée fixée à 100 mSv [6]. L'augmentation temporaire de la limite de dose à 250 mSv a été annulée le 1<sup>er</sup> novembre 2011 pour les membres des équipes d'intervention qui avaient commencé à travailler sur le site à partir de cette date, le 16 décembre 2011 pour la majorité des travailleurs restants et le 30 avril 2012 pour un petit groupe de travailleurs ayant des connaissances et une expérience spécialisées [96, 97].

La plupart des membres des équipes d'intervention ont reçu des doses inférieures à 250 mSv [8]. Il y a eu six cas de travailleurs ayant reçu des doses supérieures à 250 mSv, la dose la plus élevée étant de 678 mSv (dont 590 mSv dus à une contamination interne).

La contamination interne a été attribuée aux dures conditions de travail et à la mise en œuvre inadéquate de mesures de protection (p. ex. protection respiratoire et mesures de prophylaxie à l'iode mal appliquées, actions ayant provoqué par inadvertance l'ingestion de radionucléides), elle-même due essentiellement à l'absence de formation ou à l'inefficacité de cette dernière [5].

La TEPCO a aussi rencontré des difficultés à assurer le bien-être des membres des équipes d'intervention sur le site, et à leur proposer par exemple des services et un environnement convenables (pour se reposer, dormir, manger, se désinfecter, etc.) [98-101].

Pendant l'intervention, des personnes des zones touchées, ainsi que de tout le Japon, et de plusieurs organisations non gouvernementales, que l'on appellera les « bénévoles », se sont portées volontaires pour participer à des activités comme la distribution de denrées alimentaires, d'eau et de produits de première nécessité, et ultérieurement aux travaux de décontamination et de contrôle radiologique. Les autorités nationales ont publié des orientations sur le type d'activités que ces bénévoles pouvaient exécuter et sur les mesures à prendre pour les protéger [102-104].

### **3.2.3. Désignation des membres des équipes d'intervention**

Il a fallu faire appel à un grand nombre de personnes aux profils variés pour constituer les équipes d'intervention à l'appui des interventions d'urgence sur le site et hors du site. Sur le site, elles étaient composées de membres du personnel de la centrale nucléaire, soit employé directement par la TEPCO, soit par un sous-traitant, ainsi que des membres des Forces japonaises d'auto-défense, des services de sapeurs-pompiers et de police engagés dans des travaux d'urgence [8]. Hors du site, elles étaient constituées de membres du personnel de différents organismes et services (gouvernementaux et non gouvernementaux). Elles s'occupaient notamment d'évacuer les habitations et des installations spéciales, en offrant un soutien aux personnes évacuées, en proposant des soins médicaux et en exécutant des travaux de contrôle radiologique et d'échantillonnage [6, 97, 105, 106].

Les membres des équipes d'intervention n'avaient pas tous été désignés en tant que tels avant la situation d'urgence (p. ex. certains salariés de la TEPCO et des sous-traitants), et aucune disposition n'existait pour les impliquer dans l'intervention après cette affectation. En outre, nombre de ceux qui n'avaient pas été désignés au préalable n'avaient pas été formés à travailler en situation d'urgence nucléaire. Par exemple, ils n'avaient reçu aucune formation à la radioprotection, ni été informés des risques potentiels pour la santé d'une exposition aux rayonnements, ni été formés à l'utilisation d'une protection respiratoire ou à la prise en charge de patients éventuellement contaminés par des matières radioactives [107]. Ceci a un peu retardé la mise en œuvre des actions d'atténuation au début de l'intervention [6].

### **3.2.4. Prise en charge médicale des membres des équipes d'intervention**

La prestation des soins médicaux à prodiguer à ceux qui avaient de banales blessures a été difficile, plusieurs hôpitaux étant fermés à la suite de l'évacuation et de la mise à l'abri, et certains n'étant pas préparés à traiter des patients éventuellement contaminés par des matières radioactives [107, 108]. Jusqu'à ce qu'il soit possible de fournir des soins de santé primaires sur le site, ces blessés ont été transportés dans l'un des deux hôpitaux locaux pour y être traités [108].

Quelque 17 heures après le séisme, le NIRS a dépêché au NERHQ local (situé dans le Centre hors site) une équipe d'assistance médicale pour les situations d'urgence nucléaire ou radiologique, composée initialement d'un médecin, d'une infirmière et d'un physicien médical, afin qu'elle procède à des évaluations de la contamination et à la décontamination des membres des équipes d'intervention [107].

Huit jours après le début de l'accident, des médecins du travail ont commencé à prodiguer des soins primaires aux membres des équipes d'intervention travaillant sur le site dans le centre pour les interventions d'urgence situé dans le bâtiment sismiquement isolé. Deux centres de triage ont été ultérieurement créés, un sur le site et l'autre dans le 'J-Village'<sup>74</sup> [3, 8, 108]

Le 1<sup>er</sup> juillet 2011, un service de soins d'urgence a été créé dans la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, pour lequel du personnel médical formé à soigner en situation d'urgence nucléaire ou radiologique avait été recruté à travers tout le Japon [8, 108].

### 3.3. PROTECTION DU PUBLIC

*Les dispositions nationales d'urgence au moment de l'accident prévoyaient que les décisions concernant les actions protectrices seraient fondées sur les estimations de la dose au public prévue, qui seraient calculées au moment où une décision s'imposerait à l'aide d'un modèle de prévision de doses, le Système d'information pour la prévision des doses en situation d'urgence environnementale (SPEEDI). Elles ne prévoyaient pas de prendre les décisions concernant les actions protectrices urgentes en faveur de la population en fonction d'un état prédéfini de telle ou telle centrale. Toutefois, après l'accident, les premières décisions relatives aux actions protectrices furent prises en fonction de l'état de la centrale. Des évaluations du terme source n'ont pas pu être saisies dans le système SPEEDI en raison de la perte des alimentations électriques sur le site.*

*Les dispositions avant l'accident comprenaient des critères pour la mise à l'abri, l'évacuation et la prophylaxie à l'iode exprimés en tant que dose prévue, mais pas sous la forme de grandeurs mesurables. Aucun critère n'avait été établi pour le relogement.*

*Les actions protectrices engagées en faveur de la population pendant l'accident ont englobé notamment l'évacuation, la mise à l'abri, la prophylaxie à l'iode (par administration d'iode stable), les restrictions à la consommation de denrées alimentaires et d'eau de boisson, le relogement et la communication d'informations.*

*L'évacuation de la population dans les environs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a débuté le soir du 11 mars 2011, le rayon de la zone d'évacuation autour de la centrale passant progressivement de 2 à 3 km, puis à 10 km. Dans la soirée du 12 mars, il a été porté à 20 km. De même, le rayon de la zone dans laquelle la population a été priée de se mettre à l'abri est passé de 3-10 km autour de la centrale juste après l'accident à 20-30 km au 15 mars. Dans un rayon de 20-30 km autour de la centrale, la population a reçu l'ordre de se mettre à l'abri jusqu'au 25 mars, date à laquelle le gouvernement a recommandé l'évacuation volontaire. L'administration d'iode stable à des fins prophylactiques n'a pas été organisée uniformément, essentiellement en raison de l'absence de dispositions détaillées.*

*L'évacuation a été compliquée par les dommages causés par le séisme et le tsunami et les problèmes de communication et de transport qui se sont ensuivis. Il a été aussi très difficile d'évacuer les patients des hôpitaux et des centres de soins dans la zone d'évacuation de 20 km de rayon.*

---

<sup>74</sup> Le J-Village se trouve à 20 km au sud de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Avant l'accident, il servait de centre de formation de footballeurs. Après l'accident, il a été reconverti en base d'appui logistique général, p. ex. pour préparer les travailleurs aux tâches qui leur étaient confiées, procéder à leur contrôle radiologique et à leur décontamination une fois leur travail accompli, si besoin était, mener les opérations de triage, etc. [3].

*Le 22 avril, la zone d'évacuation de 20 km de rayon a été érigée en 'zone d'accès restreint' où les retours étaient contrôlés. Une 'zone d'évacuation délibérée' a aussi été instituée au-delà de la 'zone d'accès restreint' là où les critères de dose spécifiques pour le relogement pouvaient être dépassés.*

*Lorsque des radionucléides étaient détectés dans l'environnement, des dispositions ont été prises pour l'application de contre-mesures agricoles dans la zone agricole et de restrictions sur la consommation et la distribution des aliments et sur la consommation d'eau de boisson. En outre, un système de certification a été mis en place pour les aliments et autres produits destinés à l'exportation.*

*Plusieurs canaux de communication ont été utilisés pour tenir la population informée et répondre à ses préoccupations pendant la situation d'urgence, dont les services de télévision et de radio, l'Internet et des permanences téléphoniques. Les informations en retour reçues du public par le biais de ces services téléphoniques et d'accompagnement psychologique ont fait ressortir le besoin d'informations plus compréhensibles et de documentation supplémentaire.*

### 3.3.1. Actions protectrices urgentes et relogement

Avant l'accident, des zones d'application du plan d'urgence d'un rayon de 10 km, dans lesquelles la préparation de l'intervention d'urgence devait être considérablement renforcée, avaient été établies autour des sites des centrales de Fukushima Daiichi et de Fukushima Daini (fig. 3.3). Des plans de mise en œuvre d'actions protectrices y étaient en vigueur [74].

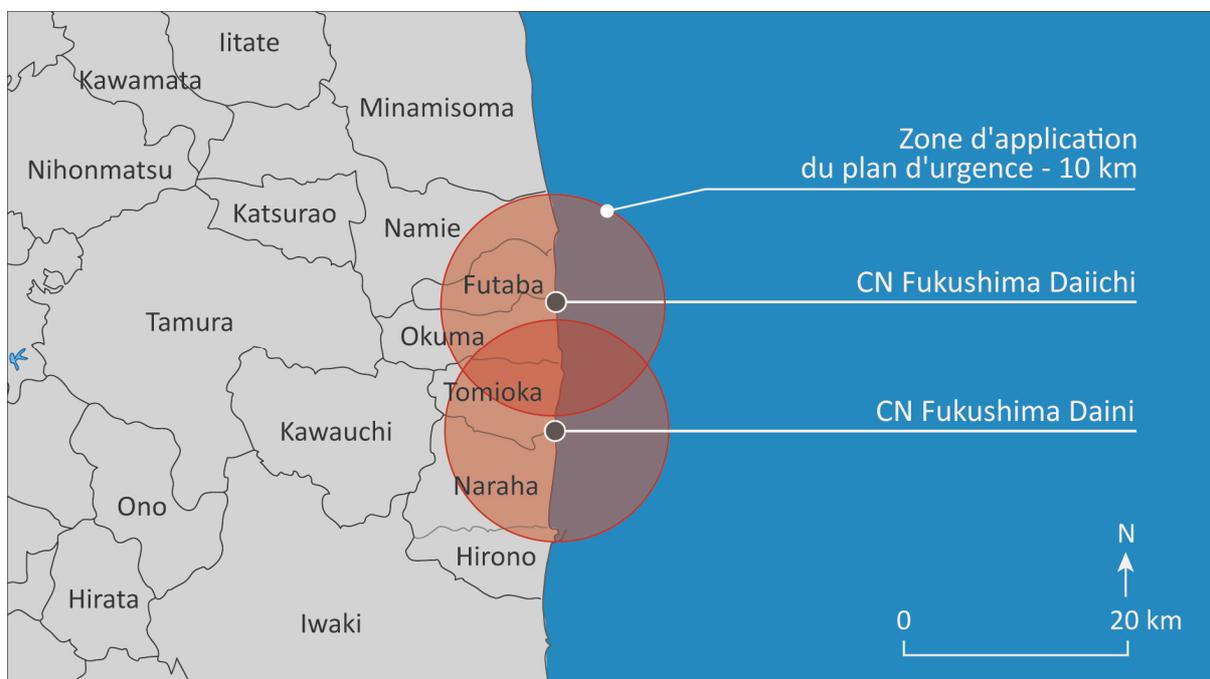


FIG. 3.3. Zones d'application du plan d'urgence autour des centrales nucléaires de Fukushima Daiichi et de Fukushima Daini établies avant l'accident (selon la réf. [74]).

Les plans d'intervention d'urgence prévoyaient que les décisions concernant les actions protectrices seraient fondées sur les prévisions de doses effectuées au moment où une

décision s'imposerait. Les doses devaient être prévues par le système SPEEDI après le début de l'accident et être comparées à des critères de dose prédéterminés, ce qui permettrait de déterminer quelles actions protectrices étaient nécessaires et où les appliquer [73, 93]. Cette approche n'était pas conforme aux normes de sûreté de l'AIEA, selon lesquelles les premières décisions concernant les actions protectrices urgentes en faveur de la population doivent être prises en fonction de l'état de la centrale [68, 69].

Des critères de dose prédéterminés existaient pour la mise à l'abri<sup>75</sup>, l'évacuation<sup>76</sup> et la prophylaxie à l'iode<sup>77</sup> exprimés en tant que dose prévue, mais pas sous la forme de grandeurs mesurables. Il n'existait aucun critère prédéterminé (c'est-à-dire générique, exprimé en tant que dose, ou opérationnel, sous la forme de grandeurs mesurables) pour le relogement<sup>78</sup> [93].

Pendant l'intervention après l'accident, les évaluations du « terme source » fournies par le Système d'appui aux interventions d'urgence (ERSS) n'ont pu être saisies dans le SPEEDI<sup>79</sup> en raison de la perte des alimentations électriques sur le site. Les décisions concernant l'évacuation et la mise à l'abri ont été prises en fonction de l'état de la centrale (perte de refroidissement du cœur) plutôt que de projections des doses comme cela était prévu [3, 7].

Les décisions des autorités nationales et locales concernant les actions protectrices n'ont pas été toujours coordonnées, essentiellement en raison de graves problèmes de communication et en partie à cause de la difficulté à activer le Centre hors site [92]. À 20 h 50, le 11 mars 2011, la préfecture de Fukushima a diffusé l'ordre d'évacuer les habitants dans un rayon de 2 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au vu des informations reçues directement de la TEPCO [3, 6, 7, 70].

À 21 h 23, le gouvernement a donné l'ordre d'évacuer une zone dans un rayon de 3 km autour de la centrale et de mettre à l'abri les habitants dans une zone d'un rayon de 3-10 km. À 5 h 44, le 12 mars 2011, il a donné l'ordre d'évacuer une zone dans un rayon de 3-10 km, et à 18 h 25, l'ordre était étendu à une zone dans un rayon de 20 km autour de la centrale<sup>80</sup> [3, 7].

Les ordres d'évacuation ont été communiqués à la population au moyen du réseau local de communication radio pour la gestion des sinistres, de camions publicitaires, de véhicules de police et par le porte-à-porte. En raison de l'état de la centrale, des problèmes de coordination

---

<sup>75</sup> Par 'mise à l'abri', on entend l'utilisation à court terme d'une structure de protection contre un panache de matières radioactives en suspension et/ou de telles matières déposées [48].

<sup>76</sup> Par 'évacuation', on entend le déplacement rapide et temporaire de personnes d'une zone pour éviter ou réduire leur exposition à court terme dans une situation d'urgence. Il peut être procédé à une évacuation en tant qu'action préventive en fonction de l'état de la centrale [48].

<sup>77</sup> Par 'prophylaxie à l'iode', on entend une action protectrice urgente à engager dans une situation d'urgence impliquant de l'iode radioactif. Elle consiste à administrer un composé de l'iode stable (habituellement de l'iodure de potassium) pour prévenir ou atténuer l'absorption d'isotopes radioactifs de l'iode par la thyroïde [48].

<sup>78</sup> Par 'relogement', on entend le déplacement non urgent de populations pour éviter une exposition à long terme (c'est-à-dire dans un délai d'un an) à des matières radioactives déposées [48].

<sup>79</sup> Certaines prévisions de doses ont été établies à partir d'autres hypothèses ; cependant, elles n'ont pas été utilisées pour les décisions à prendre concernant les actions protectrices urgentes [4, 7].

<sup>80</sup> Pour la centrale nucléaire de Fukushima Daini, l'ordre d'évacuer les habitants dans un rayon de 3 km et de mettre à l'abri la population dans un rayon de 3-10 km autour de la centrale a été donné à 7 h 45 le 12 mars 2011 [6]. Après l'explosion d'hydrogène dans la tranche 1 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (à 15 h 36 le 12 mars), il a été décidé à 17 h 39, le 12 mars, d'évacuer les habitants à titre préventif dans un rayon de 10 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daini au cas où une explosion similaire s'y produirait [6]. Comme cette zone d'évacuation de 10 km de rayon était incluse dans celle de 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, aucune autre action protectrice n'a dû être prise en ce qui concerne la centrale nucléaire de Fukushima Daini.

et d'une planification insuffisante, les ordres d'évacuation et de mise à l'abri ont été modifiés plusieurs fois en 24 heures, pour finalement aboutir à l'évacuation de 78 000 personnes dans une zone d'un rayon de 20 km [7].

L'évacuation a été difficile à exécuter en raison des dommages causés aux infrastructures et des problèmes de communication et de transport résultant du séisme et du tsunami. L'évacuation des patients des hôpitaux et des centres de soins dans la zone d'évacuation de 20 km a aussi posé de gros problèmes (mise à disposition de moyens de transport appropriés et d'abris équipés de fournitures médicales). Malgré les dommages causés aux routes et les embouteillages, la plupart des résidents n'ayant pas besoin d'aide médicale ont commencé à quitter la zone d'évacuation dans les quelques heures qui ont suivi la diffusion des ordres d'évacuation [7].

L'ordre de mettre à l'abri les habitants dans un rayon de 20-30 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a été donné le 15 mars et est resté en vigueur jusqu'au 25 mars [3, 7]. Cette mise à l'abri prolongée et l'effondrement de l'infrastructure locale ont bouleversé la vie de la population [7]. Le 25 mars 2011, le gouvernement a recommandé l'évacuation volontaire aux habitants dans la zone de 20-30 km de rayon [3, 7]. Nombre d'entre eux avaient cependant déjà quitté la zone de leur propre chef.

L'administration d'iode stable à des fins prophylactiques n'a pas été organisée uniformément, essentiellement en raison du caractère inapproprié des dispositions prévues en amont. Certaines autorités locales ont distribué des comprimés d'iode stable sans pour autant recommander leur absorption, d'autres en ont distribué et conseillé à la population de les prendre, tandis que d'autres encore attendaient des instructions des autorités nationales [6].

Certains habitants sont revenus chez eux dans les zones évacuées pour prendre des effets personnels avant l'instauration d'un contrôle intégral des accès à la fin de mars 2011 [6]. Le 22 avril, après consultation des autorités locales, la zone d'évacuation de 20 km instituée autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a été érigée en 'zone d'accès restreint', avec contrôles des retours et accès temporaire soumis à conditions. En mai 2011, un accès temporaire de courte durée a été autorisé, et des dispositions ont été prises, dont des instructions précises et un contrôle de la contamination [6, 104, 109].

Le contrôle radiologique des évacués à l'échelle locale a commencé le 12 mars 2011. Les décisions sur la nécessité d'une décontamination reposaient sur des critères opérationnels établis avant l'accident. Après plusieurs jours, ces critères ont été relevés en fonction des conditions ambiantes (basses températures, insuffisance de l'approvisionnement en eau) [5].

Le contrôle radiologique de l'environnement après l'accident a été effectué dans des conditions difficiles et dangereuses par du personnel en nombre limité et pauvrement équipé. Par exemple, le séisme et le tsunami avaient inactivé la plus grande partie du matériel de contrôle existant sur place. Le contrôle radiologique dans un rayon de 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a commencé le 12 mars pour se terminer le 14 mars, à la fin des opérations d'évacuation dans cette zone. Dans certains emplacements au-delà de la zone d'évacuation de 20 km, des débits de dose de l'ordre de quelques centaines de microsieverts par heure ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ont été mesurés à partir du 15 mars [3, 6].

Le 11 avril 2011, le gouvernement a annoncé que le critère de la dose de 20 mSv susceptible d'être reçue dans un délai d'un an après l'accident servirait à déterminer les zones au-delà de la zone d'évacuation de 20 km dont il faudrait peut-être reloger les habitants<sup>81</sup> [3]. Le 22 avril 2011, une 'zone d'évacuation délibérée' a été créée au-delà de la zone d'évacuation de 20 km pour intégrer les zones dans lesquelles ce critère de dose prévue de 20 mSv pouvait être dépassé. Le gouvernement a donné l'ordre de reloger la population de cette zone en approximativement un mois [3].

Une 'zone de préparation à l'évacuation' a aussi été créée en plus de la 'zone d'évacuation délibérée' le 22 avril 2011 (voir fig. 3.4). Il a été recommandé aux habitants de cette zone de se mettre à l'abri ou de l'évacuer par leurs propres moyens au cas où de nouveaux problèmes surgiraient dans la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. La qualification de cette zone en 'zone de préparation à l'évacuation' a été annulée le 30 septembre 2011 [6].

Grâce au contrôle radiologique effectué au-delà de la 'zone d'accès restreint' (la zone d'évacuation de 20 km) et de la 'zone d'évacuation délibérée', on a identifié certains emplacements où les doses aux résidents prévues seraient supérieures à 20 mSv l'année suivant l'accident. Le 16 juin, le gouvernement a énoncé une directive précisant que ces emplacements devaient être qualifiés de 'points particuliers où l'évacuation est recommandée'. À compter du 30 juin, il a commencé à les classer comme lieux dont les habitants devaient être relogés [6, 7].

La figure 3.4 indique les zones et emplacements pour lesquels des actions protectrices ont été ordonnées ou recommandées jusqu'au 30 septembre 2011.

Les fonctionnaires locaux ont dû aussi déterminer rapidement s'il convenait de rouvrir les écoles et dans quelles conditions le faire. Dans un premier temps, le 19 avril 2011, un critère de dose de 20 mSv/an a été établi à cette fin. Le 27 mai, en réponse aux craintes de la population, une notification fixant l'objectif de réduction de la dose à 1 mSv/an à court terme a été publiée par le gouvernement japonais [7].

---

<sup>81</sup> La plupart des documents officiels japonais décrivant l'intervention après l'accident de Fukushima Daiichi n'emploient pas le terme 'relogement', mais celui d''évacuation' pour évoquer le déplacement de la population.

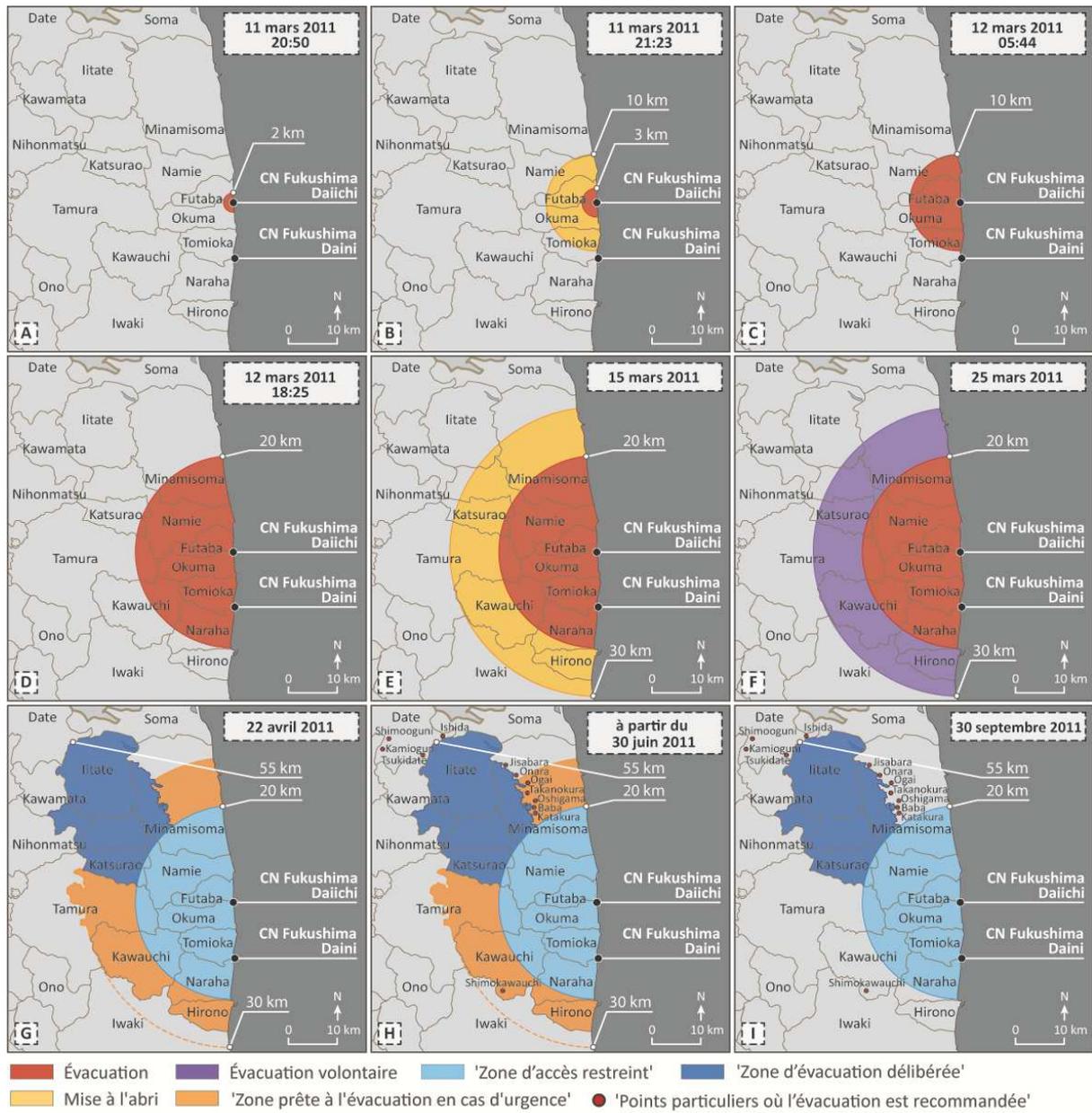


FIG. 3.4. Zones et emplacements pour lesquels des actions protectrices ont été ordonnées ou recommandées jusqu'au 30 septembre 2011 (d'après les réf. [3, 6, 7, 104]).

### 3.3.2. Actions protectrices concernant les denrées alimentaires, l'eau de boisson et l'agriculture

Les critères de concentration d'activité de certains radionucléides en situation d'urgence nucléaire pour l'application de restrictions sur les denrées alimentaires et l'eau de boisson produits au Japon avaient été élaborés avant l'accident [93]. Toutefois, ils n'avaient pas été adoptés pour être utilisés dans une situation d'urgence en tant que limites réglementaires concrètes<sup>82</sup> [6, 7]. Le 17 mars 2011, ils ont été confirmés comme valeurs réglementaires provisoires pour les niveaux de radionucléides applicables aux aliments et à l'eau de boisson en vertu de la Loi sur l'hygiène alimentaire [110].

Après que des matières radioactives eurent été détectées dans l'environnement, des dispositions ont été prises pour contrôler les aliments et l'eau de boisson. Ces dispositions portaient notamment sur : 1) les niveaux de concentration en radionucléides (radiocésium et iode radioactif) dans les aliments et l'eau de boisson confirmés comme valeurs réglementaires provisoires en vertu de la Loi sur l'hygiène alimentaire, au-dessus desquels la consommation d'aliments et d'eau de boisson devait être restreinte ; et 2) les mesures de concentrations de radionucléides dans des échantillons d'aliments et d'eau de boisson. En quelques semaines, les niveaux d'iode radioactif (<sup>131</sup>I) avaient considérablement diminué en raison de la courte période de celui-ci (environ 8 jours), et seules les concentrations en radiocésium induisaient des restrictions sur les aliments pour le moyen et le long terme [110].

Le 21 mars 2011, le gouvernement a commencé à publier des restrictions concernant la distribution de certains aliments [111] qui ont évolué avec la situation. Les restrictions concernant les aliments ont été formulées à partir des résultats du contrôle radiologique d'échantillons d'aliments qui ont permis de déterminer ceux pour lesquels les critères étaient dépassés et de circonscrire les emplacements géographiques atteints [112, 113].

Plusieurs difficultés ont surgi en ce qui concerne les actions protectrices relatives aux aliments et aux boissons à appliquer, notamment pour ce qui est de : 1) définir les critères (concentrations d'activité des radionucléides) pouvant être utilisés pour le contrôle des aliments ; 2) déterminer les aliments, dans différents emplacements géographiques, qui étaient ou pouvaient être touchés, du fait de niveaux supérieurs à ces critères constatés ; 3) faire face à l'insuffisance des infrastructures et des ressources disponibles pour l'échantillonnage et l'analyse ; et 4) répondre aux préoccupations de certaines autorités locales quant à la réalisation de ces deux dernières opérations.

Le 4 avril 2011, une politique permettant d'imposer des restrictions sur les aliments non seulement dans des zones couvrant tout le territoire d'une préfecture, mais aussi dans des zones géographiques plus petites (agglomérations, villes et villages), selon le cas, a été instituée. Elle décrivait un processus d'imposition ou de levée de restrictions sur différentes denrées alimentaires. Les préfectures pouvaient demander des modifications aux restrictions, à condition que les résultats du contrôle radiologique des aliments se révèlent inférieurs aux valeurs réglementaires provisoires pendant trois semaines de suite [7].

Le 5 avril 2011, compte tenu des concentrations mesurées en <sup>131</sup>I dans des échantillons de poisson, les valeurs réglementaires provisoires ont été ajoutées pour les concentrations d'activité de l'iode radioactif dans les produits de la pêche [114].

---

<sup>82</sup> Des critères pour les aliments importés au Japon (370 Bq/kg de radiocésium – <sup>134</sup>Cs et <sup>137</sup>Cs) avaient été établis en tant que limites réglementaires après l'accident survenu à la centrale de Tchernobyl dans l'ex-Union soviétique en 1986 [7].

Le 8 avril 2011, une politique imposant des restrictions à la culture de riz dans les terres agricoles où les niveaux de radiocésium étaient supérieurs aux critères établis a été rendue publique [6].

Le 14 avril 2011, des niveaux de concentration en radiocésium et en iode radioactif dans les aliments pour animaux ont été établis en tant que valeurs admissibles provisoires. Malgré les restrictions imposées sur ces aliments, certains échantillons de viande de bœuf ont dépassé les valeurs réglementaires provisoires (en juillet 2011). Un régime de contrôle a été mis en place pour empêcher que cette viande soit distribuée aux consommateurs [6].

Le 1<sup>er</sup> avril 2012, des limites types remplaçant les valeurs réglementaires provisoires sont entrées en vigueur. Elles précisaient les concentrations d'activité des radionucléides présents dans les aliments et l'eau de boisson sur la base d'une dose efficace de 1 mSv/an (alors que le critère de 5 mSv/an avait été employé comme base pour les valeurs réglementaires provisoires) et incorporent les contributions à la dose de divers radionucléides relâchés pendant l'accident. Par conséquent, ces valeurs étaient bien inférieures aux valeurs réglementaires provisoires qu'elles remplaçaient [115].

### **3.3.3. Information du public**

Des dispositions pour l'information du public existaient avant l'accident. Au niveau national, elles reconnaissent qu'il était nécessaire que les organismes d'intervention concernés coordonnent la communication d'informations au public, notamment en ce qui concernait le contenu des annonces, leur parution et la méthode à employer [73]. Le Plan des opérations de gestion des catastrophes de la préfecture de Fukushima contenait aussi des dispositions pour l'information du public [74].

L'organisme de réglementation, la NISA, a diffusé son premier message relatif à l'impact du séisme sur les installations nucléaires via son service « Mobile NISA » à 15 h 16 le 11 mars 2011, 30 minutes après le séisme. L'état d'urgence nucléaire a été décrété par le premier ministre à 19 h 03 et annoncé à 19 h 45 lors d'une conférence de presse. Une conférence de presse du gouvernement sur les ordres d'évacuation a suivi à 21 h 52 [6, 7].

Le gouvernement, la NISA, les organismes locaux d'intervention d'urgence, les autorités locales et la TEPCO ont tenu des conférences de presse indépendantes jusqu'au 25 avril. Le secrétaire général du Cabinet a tenu des conférences de presse deux fois par jour ainsi qu'au coup par coup pour donner des informations sur l'accident au public et exprimer les vues du gouvernement. Plus de 150 communiqués de presse ont été publiés et 182 conférences de presse ont été tenues par la NISA entre le 11 mars et le 31 mai 2011 [3]. Les résultats du contrôle radiologique de l'environnement ont été présentés lors de conférences de presse et de points de presse du MEXT.

La Commission de la sûreté nucléaire (NSC) a tenu des conférences de presse quotidiennes du 25 mars au 24 avril 2011, et huit autres entre le 25 avril et le 19 mai 2011 [3].

Des conférences de presse ont été tenues conjointement par divers organismes participant à l'intervention à partir du 25 avril 2011. Ceci a contribué à la cohérence des informations communiquées [6]. Le NERHQ local a publié des lettres d'information et les a distribuées sur les sites d'évacuation à partir d'avril 2011. Des informations pertinentes ont aussi été diffusées périodiquement par les stations de radio locales [3].

Des permanences téléphoniques ont été créées pour répondre aux questions du public. Par exemple, la NISA, qui avait institué le 11 mars 2011 une permanence téléphonique pour répondre aux questions relatives à l'évolution de la situation d'urgence et de la sûreté radiologique, a reçu quelque 15 000 appels entre le 17 mars et le 31 mai 2011 [3] ; le 13 mars, le NIRS a créé la sienne et au 11 avril avait répondu à environ 6 500 appels [116] ; le 17 mars 2011, le MEXT et la JAEA en ont créé une autre, qui a totalisé 17 500 appels jusqu'au 18 mai 2011 [3]. La préfecture de Fukushima a mis en place des services d'accompagnement psychologique chargés de répondre aux questions posées par les habitants sur divers aspects concernant les rayonnements. Les informations en retour reçues du public par le biais de ces services téléphoniques et d'accompagnement psychologique ont fait ressortir le besoin d'informations plus compréhensibles et de documentation supplémentaire [3].

À compter du 12 mars 2011, le gouvernement a publié des informations en anglais, en chinois et en coréen sur les sites web des ministères et agences concernés [117]. Des informations ont été communiquées au corps diplomatique à Tokyo dans le cadre de réunions d'information, tenues quotidiennement par le gouvernement du 13 mars au 18 mai 2011, puis trois fois par semaine à compter du 19 mai [6]. Une voie de notification par fax et courriel a aussi été instaurée à son intention. Les missions diplomatiques au Japon ont transmis à leur pays des informations, qui ont été publiées sur des sites web en 29 langues différentes au total [3].

À partir du 13 mars 2011, des conférences de presse conjointes ont été tenues, pratiquement tous les jours, à l'intention des médias étrangers par les ministères et les organismes gouvernementaux concernés [6].

Les difficultés rencontrées dans la communication d'informations à la communauté internationale concernaient surtout les besoins en ressources humaines pour traduire la documentation et répondre aux demandes d'information par téléphone [117].

Des rangs de classement des événements selon la méthodologie de l'Échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques (INES) ont été notifiés par le Japon après l'accident de Fukushima Daiichi. Il y en a eu pour chaque tranche sur un même site, le classement étant révisé à la hausse plusieurs fois en un mois. Ces révisions ont suscité de vives préoccupations parmi la population et les médias.

#### **3.3.4. Commerce international**

De nombreuses activités et mesures ont été entreprises pour : 1) rassurer le public, le secteur industriel et les États à propos de la sûreté des produits japonais ; 2) faciliter le commerce international de ces derniers et empêcher les retards dans leur distribution ; 3) donner des avis et des orientations aux entreprises et aux industries, en particulier dans la préfecture de Fukushima [98, 99, 118, 119].

La plupart des États importateurs ont institué des mesures de contrôle sur les marchandises japonaises ; un grand nombre ont intensifié les contrôles à l'importation ou demandé un certificat du gouvernement japonais, et certains ont interdit l'importation de marchandises (essentiellement des produits agricoles) en provenance du Japon ou de certaines de ses régions pendant un certain temps. En juin 2011, le Japon a institué un système de certification des denrées alimentaires destinées à l'exportation, qui a permis de donner aux populations et autres parties intéressées l'assurance que des contrôles étaient effectués. Ce système a été

étendu en septembre 2011 aux conteneurs d'expédition et à quelques produits industriels destinés à l'exportation [120].

### **3.3.5. Gestion des déchets en phase d'urgence**

Les dispositions relatives à la gestion des déchets radioactifs qui existaient au Japon avant l'accident couvraient les déchets produits dans des installations comme les centrales nucléaires, mais pas les déchets radioactifs produits dans les lieux publics [121]. Des stratégies, lignes directrices et instructions détaillées ont été élaborées dans ce domaine après l'accident.

La NSC a publié le 3 juin 2011 la « Stratégie à court terme destinée à pourvoir à la sûreté du traitement et du stockage des déchets contaminés autour du site de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi » [122]. Ce document énonçait des critères dosimétriques pour : les matériaux recyclés ; la protection des travailleurs traitant ces matériaux ; la protection de la population au voisinage des installations de traitement ; et enfin la protection de la population aux alentours d'un site de stockage définitif. La NSC a proposé de stocker en bonne et due forme les matériaux touchés par l'accident – débris, boues de stations de traitement de l'eau et d'épuration, cendres d'incinération, arbres, plantes et sols issus des activités de décontamination – et d'envisager d'en recycler certains. Les produits fabriqués à partir de ces derniers seraient soumis à un dépistage de la contamination et gérés de manière appropriée avant d'être mis sur le marché. Grâce à des mesures de protection appropriées, les expositions aux rayonnements des travailleurs et de la population seraient maintenues à un niveau aussi bas que raisonnablement possible [122].

Le 26 août 2011, le NERHQ a institué la « Stratégie-cadre pour l'intervention d'urgence concernant les travaux de décontamination » [123] en tant que stratégie intermédiaire jusqu'à ce que la « Loi sur les mesures spéciales concernant le traitement de la pollution de l'environnement par des matières radioactives rejetées pendant l'accident de la centrale nucléaire associée au district du Tohoku en marge du séisme survenu le 11 mars 2011 dans l'océan Pacifique » entre pleinement en vigueur. Cette loi adoptée le 26 août 2011 a été promulguée le 30 août 2011 – certaines de ses dispositions prenant effet le jour même – et est entrée pleinement en vigueur en janvier 2012 [124]. Elle trace les grandes lignes de la gestion des zones contaminées et assigne des responsabilités aux autorités nationales et locales, à l'exploitant et à la population. Elle a facilité le passage d'une situation d'exposition d'urgence à une situation d'exposition existante. Elle a aussi défini formellement la gestion à long terme du contrôle radiologique de l'environnement, les mesures de décontamination, ainsi que la qualification, le traitement, l'entreposage et le stockage définitif des sols et déchets contaminés par des matières radioactives.

### 3.4. PASSAGE DE LA PHASE D'URGENCE À LA PHASE DE RELÈVEMENT ET ANALYSES DE L'INTERVENTION

*Des stratégies, lignes directrices, critères et dispositions spécifiques pour le passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement n'ont été élaborés qu'après l'accident de Fukushima Daiichi. À cet effet, les autorités japonaises ont appliqué les dernières recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).*

*Des analyses de l'accident et de l'intervention d'urgence ont été effectuées et présentées sous forme de rapports, y compris ceux publiés par le gouvernement japonais, l'organisme exploitant (TEPCO) et deux comités d'enquête respectivement créés par le gouvernement et le parlement<sup>83</sup>.*

*Après l'accident, les dispositions nationales en matière de préparation et de conduite des interventions d'urgence au Japon ont été révisées dans de nombreux cas pour tenir compte des résultats de ces analyses et des normes de sûreté de l'AIEA dans ce domaine.*

#### 3.4.1 Passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement

Lors de l'élaboration des dispositions pour le passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement après l'accident, les autorités japonaises ont décidé d'appliquer les toutes dernières recommandations de la CIPR [127-129]. Les stratégies, lignes directrices et critères spécifiques ainsi que des dispositions générales pour assurer ce passage ont été élaborés après l'accident [130]. Cela a consisté notamment à ajuster les actions protectrices engagées rapidement pendant l'intervention d'urgence et à tenir compte des informations disponibles sur la situation dans les zones touchées (obtenues essentiellement grâce à un contrôle radiologique complet) [131, 132]. On a aussi pris en considération les nécessaires opérations de relèvement à long terme.

Ces mesures et dispositions répondaient surtout aux besoins immédiats pendant le passage. Les dispositions concernant la protection des travailleurs ont été progressivement modifiées, en fonction des travaux en cours [6, 96].

Le 17 avril 2011, la TEPCO a publié une « feuille de route » qui exposait les grandes lignes des étapes vers le relèvement du site (stratégie de base, buts et mesures immédiates concernant le refroidissement, l'atténuation des conséquences, le contrôle radiologique et la décontamination) [24].

Le 17 mai 2011, le METI a publié une « feuille de route pour les mesures immédiates d'assistance aux victimes de l'accident nucléaire » [130]. Cette liste énumérait neuf groupes d'actions scindées en étapes devant se dérouler à différentes périodes en relation avec la feuille de route de la TEPCO. L'étape 1 avait un but à atteindre d'ici la mi-juillet, l'étape 2 en avait un autre à atteindre trois à six mois après l'achèvement de la précédente, et l'étape 3 correspondait à la période à moyen terme. Cette feuille de route était destinée à faciliter les communications et les préparatifs du passage vers les opérations de relèvement à long terme et la reprise d'activités socio-économiques normales. Elle répartissait les responsabilités et

---

<sup>83</sup> Des rapports d'universitaires et du secteur privé ont aussi été publiés (p. ex. de la Société de l'énergie atomique du Japon et de la Fondation pour l'initiative en faveur de la reconstruction au Japon) [130, 131].

précisait d'autres aspects organisationnels du processus de transition ainsi que les objectifs et conditions d'achèvement de la phase d'urgence.

### **3.4.2. Analyses de l'intervention**

Diverses instances ont entrepris des analyses de l'accident et de l'intervention d'urgence afin d'en tirer des leçons et de consolider, entre autres aspects, les dispositions en matière de préparation et de conduite des interventions d'urgence au Japon, qui en conséquence ont fait l'objet de plusieurs améliorations.

Par exemple, le rapport du gouvernement japonais à la Conférence ministérielle de l'AIEA en juin 2011 [3] a présenté les enseignements tirés dans les domaines suivants qui sont importants pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence : 1) combinaison d'une catastrophe naturelle et d'une situation d'urgence nucléaire ; 2) contrôle radiologique de l'environnement ; 3) répartition des rôles entre les organismes centraux et locaux ; 4) communication dans une situation d'urgence ; 5) suite donnée à l'assistance d'autres États et communication avec la communauté internationale ; 6) modélisation du rejet de matières radioactives ; et 7) critères pour des principes directeurs en matière d'évacuation et de radioprotection dans une situation d'urgence nucléaire<sup>84</sup>.

Le Comité d'enquête sur l'accident survenu aux centrales nucléaires de Fukushima de la Compagnie d'électricité de Tokyo, créé par le gouvernement, a constaté que le Japon devait prendre en considération les enseignements de la communauté internationale et incorporer des normes internationales, comme celles élaborées par l'AIEA, dans ses principes directeurs nationaux [5].

Le rapport d'analyse des accidents nucléaires survenus à Fukushima de la TEPCO [8] a mis en avant les problèmes diagnostiqués pendant l'intervention d'urgence, notamment : l'organisation de l'intervention d'urgence, la communication des informations, le transport de matériaux et d'équipements, et la radioprotection.

Le rapport de la Commission d'enquête indépendante sur l'accident nucléaire de Fukushima, créée par la Diète nationale du Japon, a recommandé notamment de réformer le système national de préparation et de conduite des interventions d'urgence, en clarifiant notamment les rôles et responsabilités du gouvernement, des autorités locales et des exploitants en cas d'urgence [7].

Des mesures correctives ont été prises à partir de ces analyses et des enseignements tirés pour consolider les dispositions relatives à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence [133, 134]. Une Commission de préparation aux situations d'urgence nucléaire a été créée au sein du Cabinet pour que les stratégies d'intervention dans une telle situation puissent être mises en œuvre et promues par le gouvernement [134]. La NRA a élaboré des principes directeurs pour l'intervention dans une situation d'urgence nucléaire<sup>85</sup> [136], en tenant compte aussi des normes de sûreté de l'AIEA relatives à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence.

---

<sup>84</sup> Un autre rapport a été soumis à l'AIEA en septembre 2011 [4]. Il donnait des informations sur l'évolution de la situation et sur les progrès faits pour donner suite aux enseignements répertoriés dans le premier rapport publié en juin 2011.

<sup>85</sup> Les principes directeurs pour l'intervention dans une situation d'urgence nucléaire ont été élaborés sur la base du rapport provisoire consacré à la révision du Guide réglementaire pour la préparation des installations nucléaires à une situation d'urgence [93], publié en 2012 [135].

### 3.5. L'INTERVENTION DANS LE CONTEXTE DU CADRE INTERNATIONAL POUR LA PRÉPARATION ET LA CONDUITE DES INTERVENTIONS D'URGENCE

*Au moment de l'accident, il existait un solide cadre international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence, comprenant des instruments juridiques internationaux, des normes de sûreté de l'AIEA et des dispositions opérationnelles<sup>86</sup>.*

*Au moment de l'accident, l'AIEA avait quatre tâches à accomplir face à une situation d'urgence nucléaire ou radiologique : 1) la notification et l'échange d'informations officielles par l'intermédiaire de points de contact officiels ; 2) la communication d'informations à jour, claires et compréhensibles ; 3) la fourniture et la facilitation d'une assistance internationale sur demande ; et 4) la coordination des interventions interorganisations.*

*De nombreux pays et plusieurs organisations internationales ont participé à l'intervention internationale après l'accident.*

*L'AIEA a assuré la liaison avec le point de contact officiel au Japon, a communiqué des informations sur la situation d'urgence au fur et à mesure de son évolution et tenu informés les États, les organisations internationales pertinentes et le public. La communication avec le point de contact officiel au Japon dans les premiers temps de l'intervention d'urgence a été difficile. La visite au Japon du Directeur général de l'AIEA et l'installation ultérieure d'agents de liaison à Tokyo ont amélioré la communication entre l'AIEA et le point de contact. L'AIEA a aussi envoyé des missions d'experts au Japon et coordonné l'intervention interorganisations.*

*Divers États<sup>87</sup> ont entrepris ou recommandé différentes actions protectrices en faveur de leurs ressortissants au Japon pour faire face à l'accident. Ces différences n'ont en général pas été bien expliquées au public, suscitant occasionnellement une certaine confusion et des inquiétudes.*

*Les organisations concernées participant au Comité interorganisations des situations d'urgence nucléaire et radiologique ont régulièrement échangé des informations. Des communiqués de presse conjoints ont aussi été publiés.*

L'AIEA, s'appuyant sur ses dispositions d'urgence, a contacté directement la NISA, point de contact officiel au Japon [143]. Le Japon a communiqué des informations conformément aux dispositions de l'article 3 de la Convention sur la notification rapide.

---

<sup>86</sup> Les principaux instruments juridiques internationaux sont la Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire et la Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique. Les normes internationales de sûreté applicables à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence au moment de l'accident étaient le n° GS-R-2 [69] et le n° GS-G-2.1 [68] de la collection Normes de sûreté de l'AIEA. Le n° 115 de la collection Sécurité de l'AIEA [137] comprenait aussi des parties traitant de la préparation et de la conduite des interventions d'urgence. Parmi les dispositions opérationnelles internationales figuraient le Manuel des opérations techniques de notification et d'assistance en cas d'urgence (ENATOM), le Réseau d'intervention et d'assistance (RANET) de l'AIEA et le Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales (JPLAN).

<sup>87</sup> La responsabilité de la préparation et de l'intervention dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique incombe en premier lieu à l'État, tout comme celle de la protection de la vie humaine, de la santé, des biens et de l'environnement.

Le Secrétariat de l'AIEA a partagé des informations sur la situation d'urgence au fur et à mesure de son évolution et tenu informés les États, les organisations internationales pertinentes et le public [143].

Il n'entrait pas dans les attributions de l'AIEA à l'époque de prévoir l'évolution potentielle d'un accident ou d'en évaluer les possibles conséquences. Son rôle face à une situation d'urgence dans une centrale nucléaire a été étendu par l'adoption du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire [144]. Il lui est désormais demandé de communiquer aux États Membres, aux organisations internationales et au public des informations à jour, claires, objectives, rapportant des faits exacts et facilement compréhensibles sur les conséquences possibles d'une telle situation, y compris des analyses des informations disponibles et des prévisions de scénarios possibles basés sur des preuves, les connaissances scientifiques et les capacités des États Membres.

***Encadré 3.4. Cadre international pour la préparation et la conduite des interventions en cas d'urgence nucléaire ou radiologique au moment de l'accident***

La responsabilité de la préparation et de l'intervention d'urgence dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique incombe en premier lieu à l'État, tout comme celle de la protection de la vie humaine, de la santé, des biens et de l'environnement. L'État est chargé de veiller à ce que des dispositions en la matière soient en vigueur aux niveaux national, régional, local et aux niveaux des organismes/installations. Le cas échéant, il est aussi chargé de veiller à la coordination des dispositions nationales en matière de préparation et de conduite des interventions d'urgence avec les arrangements internationaux pertinents auxquels il a adhéré ou est partie d'une autre manière (p. ex. dans le cadre d'accords bilatéraux et/ou multilatéraux).

Au moment de l'accident, le cadre international comprenait des instruments juridiques internationaux, des normes de sûreté de l'AIEA et des dispositions opérationnelles.

La Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire et la Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique, ci-après dénommées Convention sur la notification rapide et Convention sur l'assistance, assignent des fonctions et des responsabilités précises en matière d'intervention à l'AIEA et aux parties. Diverses organisations internationales assument – en vertu de leurs fonctions statutaires ou d'instruments juridiques connexes – des fonctions et des responsabilités qui s'appliquent à des éléments de la préparation et de la conduite des interventions d'urgence [138, 139].

Les normes de sûreté de l'AIEA applicables à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence au moment de l'accident étaient le n° GS-R-2 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA (coparrainé par sept organisations internationales) et le n° GS-G-2.1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA (coparrainé par six organisations internationales) [68, 69]. Les Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements (n° 115 de la collection Sécurité de l'AIEA) comprenaient aussi des parties traitant de la préparation et de la conduite des interventions d'urgence [137].

Parmi les dispositions internationales en vigueur figuraient le Manuel des opérations techniques de notification et d'assistance en cas d'urgence (ENATOM), le Réseau d'intervention et d'assistance (RANET) de l'AIEA et le Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales (JPLAN) [140-142].

L'ENATOM facilitait l'application des articles à caractère opérationnel de la Convention sur la notification rapide et de la Convention sur l'assistance, comme les dispositions pour la notification et l'échange d'informations et les protocoles de communication (par fax, téléphone, courriers électroniques et via un site web sécurisé et protégé opérationnel à toute heure) pour les points de contact désignés au titre de ces deux conventions. Ces mesures faisaient l'objet d'exercices de complexité variable régulièrement organisés au titre des conventions (ConvEx).

Le RANET a été créé pour faciliter la fourniture d'une assistance internationale, sur demande, conformément à la Convention sur l'assistance. Il constitue un mécanisme opérationnel d'octroi d'une assistance dans différents domaines techniques, grâce aux capacités nationales qui y sont enregistrées.

***Encadré 3.4 (suite) Cadre international pour la préparation et la conduite des interventions en cas d'urgence nucléaire ou radiologique au moment de l'accident***

Le Plan commun présente une interprétation commune de ce que chaque organisation fait au cours d'une intervention et pendant la phase de préparation de l'intervention en cas d'urgence nucléaire ou radiologique. Il prévoit un mécanisme de coordination et clarifie les rôles et les capacités des organisations internationales participantes. Il est géré par le Comité interorganisations des situations d'urgence nucléaire et radiologique (IACRNE), dont l'AIEA assure le secrétariat. Au moment de l'accident, l'IACRNE comprenait 15 organisations intergouvernementales internationales.

La communication avec le point de contact officiel au Japon dans les premiers temps de l'intervention d'urgence a été difficile. La visite au Japon du Directeur général de l'AIEA, du 17 au 19 mars 2011, et l'installation ultérieure d'agents de liaison à Tokyo ont amélioré la communication entre l'AIEA et le point de contact [143].

Certains États ont donné des conseils ou des consignes particulières pour la protection de leurs ressortissants au Japon. Quelques-uns ont conseillé à ces derniers de suivre les ordres et recommandations publiés par les autorités japonaises à la suite de la situation d'urgence, tandis que d'autres leur ont donné des conseils différents de ceux prodigués par les autorités japonaises et d'autres États [145]. La disparité des recommandations entre États était due à divers facteurs, dont un manque d'informations sur l'évolution de la situation. Ces différences n'ont en général pas été bien expliquées au public, suscitant occasionnellement une certaine confusion et des inquiétudes.

L'AIEA a envoyé des missions d'experts au Japon et coordonné la communication des offres d'assistance d'États Membres à ce pays. La Convention sur l'assistance n'a pas été invoquée et le RANET<sup>88</sup> n'a pas été utilisé. Des États ont fourni une assistance directement au Japon. Ce soutien a aidé le gouvernement japonais à gérer la situation d'urgence nucléaire qui, conjuguée aux retombées du séisme et du tsunami, a mis à l'épreuve les capacités nationales d'intervention. Un des obstacles à l'acceptation de l'assistance internationale au début de l'intervention nationale a été l'absence de dispositions nationales pour la réception d'une telle assistance [5, 143].

Conformément à ses responsabilités, le Secrétariat de l'AIEA a rapidement activé le JPLAN et entrepris de coordonner l'intervention interorganisations. Les membres de l'IACRNE ont échangé des informations, en s'efforçant plus particulièrement de parvenir à une compréhension commune des retombées de l'accident et en coordonnant leurs efforts pour tenir le public informé. Des vidéoconférences ont été régulièrement organisées jusqu'en juillet 2011. Des communiqués de presse conjoints ont aussi été publiés.

Dans le cadre des accords bilatéraux entre secrétariats, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) ont envoyé des agents de liaison à l'AIEA pour assurer une coordination efficace des activités internationales d'intervention.

---

<sup>88</sup> Le Secrétariat de l'AIEA continue, en collaboration avec les États Membres enregistrés dans le RANET, à renforcer ce dernier en tenant compte de l'expérience acquise pendant l'accident de Fukushima Daiichi.

### 3.6. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS

Plusieurs observations et enseignements ont été compilés à l'issue de l'évaluation de la préparation et de la conduite de l'intervention d'urgence après l'accident. L'intervention après l'accident a remis sur le devant de la scène les enseignements tirés de situations d'urgence passées et confirmé l'importance d'être bien préparé à une intervention d'urgence.

- **Lors de la préparation de l'intervention face à une éventuelle situation d'urgence nucléaire, il est nécessaire d'envisager des situations susceptibles de causer de graves dommages au combustible nucléaire dans le cœur d'un réacteur ou au combustible usé sur le site, y compris celles qui impliquent plusieurs tranches d'une même centrale et pouvant survenir en même temps qu'une catastrophe naturelle.**

Il faut envisager l'éventualité d'un accident nucléaire grave, quelle qu'en soit la cause, susceptible d'affecter plusieurs tranches sur un même site et survenant en même temps qu'une catastrophe naturelle, qui pourrait provoquer des perturbations sur le site et au niveau de l'infrastructure locale. Les systèmes, les lignes de communication et le matériel de contrôle radiologique indispensables à la fourniture d'informations essentielles pour les interventions sur le site et hors du site doivent pouvoir fonctionner en pareilles circonstances.

Les installations à partir desquelles l'intervention sera gérée (p. ex. centres d'intervention d'urgence sur site et hors site) doivent être sélectionnées ou conçues pour pouvoir opérer dans tout un éventail de situations d'urgence (conditions radiologiques, de travail et environnementales) et être convenablement situées et/ou protégées pour pouvoir fonctionner et être habitables en pareilles circonstances.

- **Le système de gestion des situations d'urgence intervenant en cas d'urgence nucléaire doit clairement définir les rôles et responsabilités de l'organisme exploitant et des autorités locales et nationales. Le système, y compris les interactions entre l'organisme exploitant et les autorités, doit être testé régulièrement au cours d'exercices.**

Il faut prévoir des dispositions prenant en compte à la fois l'intervention en cas d'urgence nucléaire et l'intervention en cas de catastrophe d'origine naturelle ou humaine (p. ex. séismes, inondations et incendies).

L'intervention sur le site doit être gérée par le personnel se trouvant sur le site qui connaît la centrale et la situation. Les interventions sur le site et hors site doivent être coordonnées selon les dispositions prévues en amont.

- **Il faut désigner les membres des équipes d'intervention en leur confiant des tâches bien spécifiées, quel que soit l'organisme qui les emploie, leur dispenser une formation appropriée et leur assurer une bonne protection pendant une situation d'urgence. Il faut adopter des dispositions pour intégrer dans l'intervention d'urgence d'autres personnes que celles qui auront été désignées au préalable ainsi que les bénévoles qui se porteront volontaires pour prêter assistance.**

Les dispositions pratiques relatives à la protection des membres des équipes d'intervention doivent être traitées de manière cohérente et suffisamment détaillée dans les plans et procédures. Il faut tenir compte de ceux qui peuvent ne pas avoir été désignés comme membres des équipes d'intervention au stade de la préparation. Des critères de dose doivent être établis au préalable pour les membres des équipes d'intervention et appliqués de manière cohérente pour les tâches qui leur seront confiées en pareille circonstance. Il faut adopter des dispositions pour assurer le bien-être des membres des équipes d'intervention (notamment pour qu'ils puissent contacter leur famille).

En outre, il faut prévoir au préalable des dispositions pour intégrer dans l'organisation de l'intervention d'urgence les membres de la population qui se porteront volontaires pour prêter assistance (les 'bénévoles') et leur offrir un niveau approprié de radioprotection.

- **Il faut adopter des dispositions pour permettre de prendre des décisions concernant la mise en œuvre d'actions protectrices urgentes prédéterminées en faveur de la population à partir d'états d'une centrale prédéfinis.**

Ces dispositions sont nécessaires, car en situation d'urgence, les systèmes d'appui à la décision, y compris ceux qui recourent à des modèles informatiques, peuvent ne pas être en mesure de prédire le volume et l'apparition d'un rejet de matières radioactives (le 'terme source'), le déplacement des panaches, les niveaux de dépôt ou les doses en résultant suffisamment rapidement ou précisément pour être la seule base des décisions concernant les premières actions protectrices urgentes à engager.

Au stade de la préparation, il faut mettre au point un système de classement des situations d'urgence à partir de conditions observables et de critères mesurables (niveaux d'action urgente). Ce système permet de décréter une situation d'urgence peu de temps après la constatation dans une centrale de conditions qui indiquent un endommagement effectif ou prévu du combustible et d'engager des actions protectrices urgentes prédéterminées en faveur de la population (dans les zones prédéfinies) peu après le classement de la situation d'urgence par l'exploitant. Il doit couvrir tout un ensemble de conditions anormales dans une centrale.

- **Il faut adopter des dispositions permettant d'étendre les actions protectrices urgentes ou de les modifier en fonction de l'évolution de l'état de la centrale ou des résultats du contrôle radiologique. Il en faut aussi pour permettre d'engager rapidement des actions protectrices à partir des résultats du contrôle radiologique.**

Au stade de la préparation, il faut élaborer entre autres choses des dispositions permettant notamment : 1) de définir les zones et lieux d'application du plan d'urgence ; 2) d'établir des critères de dose et des critères opérationnels (niveaux de grandeurs mesurables) pour pouvoir engager des actions protectrices urgentes et autres mesures d'intervention, notamment à l'intention de certains groupes de population dans les zones d'urgence (p. ex. patients hospitalisés) ; 3) d'engager des actions protectrices urgentes avant ou peu après un rejet de matières radioactives ; 4) d'instaurer rapidement des contrôles de l'accès aux zones où de telles actions sont mises en œuvre ; 5) d'engager des actions protectrices au-delà des zones et lieux d'application du plan d'urgence établis, si besoin est ; 6) d'établir des critères de dose

et des critères opérationnels pour la mise en œuvre rapide d'actions protectrices et autres mesures d'intervention (p. ex. relogement et restrictions concernant les denrées alimentaires), qui sont justifiées et optimisées, à partir d'un ensemble de facteurs comme les conséquences radiologiques et autres, y compris les conséquences économiques, sociales et psychologiques ; et 7) de réviser les critères opérationnels pour pouvoir engager rapidement des actions protectrices en fonction des conditions ambiantes.

- **Il faut adopter des dispositions pour faire en sorte que les actions protectrices et autres mesures d'intervention dans une situation d'urgence nucléaire fassent plus de bien que de mal. Les décisions à prendre doivent être envisagées sous un angle global pour que cet équilibre soit atteint.**

Il faut élaborer ces dispositions en ayant bien compris tous les dangers que peuvent présenter pour la santé une situation d'urgence nucléaire et les éventuelles conséquences radiologiques et autres de toute action protectrice.

Il faut mettre en œuvre les actions protectrices en temps voulu et de manière sûre, en tenant compte de possibles conditions défavorables (p. ex. conditions météorologiques extrêmes ou endommagement des infrastructures). Il faut se préparer à l'avance à assurer l'évacuation sûre d'installations spéciales, comme les hôpitaux et les centres de soins et à donner à ceux qui en ont besoin des soins ou un encadrement constants.

- **Il faut adopter des dispositions pour aider les décideurs, la population et d'autres personnes (p. ex. le personnel médical) à comprendre les dangers radiologiques que présente pour la santé une situation d'urgence nucléaire afin que les décisions concernant les actions protectrices soient prises en connaissance de cause. Il faut aussi en adopter pour répondre aux préoccupations des populations à l'échelle locale, nationale et internationale.**

En situation d'urgence nucléaire, il faut répondre efficacement aux préoccupations de la population. Cela consiste notamment à associer des grandeurs mesurables (les débits de dose) et les doses de rayonnement prévues aux dangers radiologiques pour la santé, de sorte que les décideurs (et la population) puissent prendre des décisions concernant les actions protectrices en connaissance de cause. Le fait de tenter de répondre aux préoccupations de la population contribue à atténuer les conséquences radiologiques et autres d'une situation d'urgence.

Il serait possible de répondre en partie aux préoccupations de la communauté internationale en mettant en place des systèmes de certification pour démontrer que les marchandises commercialisables sont conformes aux normes internationales et rassurer les États importateurs et les populations.

- **Il faut élaborer des dispositions au stade de la préparation permettant de mettre fin aux actions protectrices et autres mesures d'intervention et de passer à la phase de relèvement.**

Au stade de la préparation, il faut planifier le passage de la phase d'urgence à la phase de relèvement à long terme ainsi que la reprise d'activités socio-économiques normales. Les dispositions doivent : 1) établir des processus formels de décision pour la cessation des actions protectrices et autres mesures d'intervention ; 2) assigner clairement les responsabilités ; 3) établir des critères pour la cessation des actions protectrices et autres mesures d'intervention ; et 4) prévoir une stratégie et un processus de consultation de la population.

- **L'analyse en temps utile d'une situation d'urgence et de l'intervention en pareil cas, consistant à tirer des enseignements et à déterminer de possibles améliorations, consolide les dispositions d'urgence.**

Cette analyse doit consister à réexaminer toutes les dispositions pertinentes, dont la législation et la réglementation nationales, la répartition des pouvoirs et des responsabilités, les plans et procédures de l'intervention d'urgence, les installations, le matériel, les formations et les exercices. Elle constitue la base d'une révision des dispositions, le cas échéant. L'adéquation des dispositions d'urgence révisées doit être démontrée par des exercices.

- **La mise en œuvre des arrangements internationaux relatifs à la notification et à l'assistance doit être renforcée.**

Il faut que soient mieux connus les arrangements internationaux relatifs à la notification et à l'assistance dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique, ainsi que les mécanismes opérationnels en vigueur, y compris les mécanismes et procédures de notification et d'échange d'informations, de demande et de fourniture d'une assistance internationale, etc. Il faut intensifier la formation et les exercices sur les aspects opérationnels de la Convention sur la notification rapide et de la Convention sur l'assistance.

Il faut que la participation aux mécanismes existants pour la fourniture d'une assistance internationale au titre de la Convention sur l'assistance fasse partie intégrante des mesures nationales de préparation des interventions d'urgence. Il faut adopter des dispositions au stade de la préparation pour la demande et la réception d'une assistance (dans le cadre d'accords bilatéraux ou au titre de la Convention sur l'assistance) dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique.

Les listes des points de contact officiellement désignés au titre de la Convention sur la notification rapide et de la Convention sur l'assistance doivent être constamment à jour pour répondre aux demandes d'information urgentes de l'AIEA.

L'application des normes de sûreté de l'AIEA à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence au niveau national améliorerait ces dernières, faciliterait la communication dans une situation d'urgence et favoriserait l'harmonisation des critères nationaux pour les actions protectrices et autres mesures d'intervention.

— **Il faut améliorer les processus de consultation et de partage des informations sur les actions protectrices et autres mesures d'intervention entre États.**

La consultation et le partage des informations sur les actions protectrices et autres mesures d'intervention entre États dans une situation d'urgence contribuent à la cohérence des mesures prises. En outre, il est vital de donner des explications claires et compréhensibles sur les fondements techniques des décisions concernant les actions protectrices et autres mesures d'intervention pour faire mieux comprendre et accepter ces dernières par le public à l'échelle nationale et internationale.

## 4. CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES

La section 4 examine les conséquences radiologiques de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi pour les populations et l'environnement. Les conséquences radiologiques de l'accident ont été étudiées par divers organismes et organisations internationaux. L'OMS a publié une estimation préliminaire des doses [146] de rayonnements puis évalué le risque attribué à cet accident [147]. Plus récemment, l'UNSCEAR a estimé les niveaux et les effets des rayonnements [148]. Les enseignements tirés en ce qui concerne la radioprotection ont été compilés par la CIPR [149, 150]. D'autres organisations internationales, notamment la FAO et l'OMM, ont aussi fourni des informations pertinentes. Certaines de ces activités internationales sont décrites dans l'encadré 4.1.

### **Encadré 4.1. Activités internationales ayant trait aux conséquences radiologiques de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi**

Outre l'AIEA, d'autres organismes internationaux ont travaillé activement sur les conséquences radiologiques de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi :

- L'Organisation mondiale de la Santé (OMS), une institution spécialisée de l'ONU intervenant dans le domaine de la santé publique, a publié une estimation préliminaire des doses de rayonnements reçues en raison de l'accident [146] puis une évaluation du risque sanitaire [147].
- Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), qui fait rapport à l'Assemblée générale des Nations Unies, a publié ses estimations des niveaux et des effets de l'exposition aux rayonnements attribuable à l'accident, y compris un important volume de données sur la radioactivité dans l'environnement et les doses de rayonnements [148].
- La Commission internationale de protection radiologique (CIPR), un organisme non gouvernemental international d'experts qui publie des recommandations sur la radioprotection largement utilisées, a publié un examen des questions de radioprotection pendant et après l'accident, visant à améliorer le système international de radioprotection [149, 150].
- L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), une institution spécialisée des Nations Unies œuvrant pour l'amélioration des pratiques dans les domaines de l'agriculture, de la foresterie et de la pêche en vue d'une bonne nutrition et de la sécurité alimentaire pour tous, a travaillé en partenariat avec l'AIEA, par le biais du Comité interorganisations des situations d'urgence nucléaire et radiologique (IACRNE), à la préparation et à la conduite des interventions d'urgence nucléaire ou radiologique touchant l'alimentation, l'agriculture, la foresterie et les pêches, et compilé une importante base de données sur les concentrations de radionucléides dans les aliments dues à cet accident [151].
- L'Organisation météorologique mondiale (OMM), une institution spécialisée des Nations Unies intervenant dans les domaines de la météorologie, de l'hydrologie opérationnelle et des sciences géophysiques connexes, a publié une évaluation des analyses météorologiques de la dispersion et du dépôt de radionucléides imputables à l'accident [152].
- L'Agence de l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE/AEN) a rendu compte des interventions dans le domaine de la sûreté nucléaire et des enseignements tirés de l'accident [153].
- Ces organismes et d'autres, comme le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'Organisation internationale du Travail (OIT), l'Organisation panaméricaine de la Santé (OPS) et la Commission européenne (CE), ont coparrainé les *normes de sûreté* internationales qui ont été publiées sous les auspices de l'AIEA. L'OMS établit les *Directives de qualité pour l'eau de boisson* à utiliser dans les situations d'exposition existantes, et qui présentent des paramètres pour la radioactivité de l'eau de boisson [154]. La Commission du Codex Alimentarius de la FAO et de l'OMS établit le *Codex Alimentarius*, une collection de normes alimentaires harmonisées au plan international pour protéger la santé des consommateurs et veiller à ce que les pratiques du commerce international des aliments soient équitables, et qui contient des normes sur la présence de radionucléides dans les aliments [155].

Dans de nombreux pays, et notamment au Japon, des organismes officiels ont effectué de nombreuses évaluations des conséquences radiologiques de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (par exemple référence [5]). Des associations professionnelles de radioprotection, tant au Japon qu'ailleurs, ont déterminé d'importants enseignements pour la radioprotection (par exemple référence [156]). La préfecture de Fukushima a lancé l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima [157] en juin 2011 [163]. Cette enquête, qui est présentée dans l'encadré 4.2, a fait l'objet de discussions au colloque international d'experts de Fukushima [159, 160].

**Encadré 4.2. Enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima**

L'enquête sur la gestion de la santé à Fukushima est une étude et une investigation générales de la situation sanitaire des populations de la préfecture de Fukushima [157]. Basée sur une série de questionnaires, elle a pour objectifs : « 1) d'évaluer les doses de rayonnements des résidents, et 2) de surveiller les conditions sanitaires des résidents en vue de la prévention, de la détection précoce et du traitement médical rapide des maladies, et ainsi 3) de préserver et de promouvoir leur santé future » [161].

À la suite des réponses, les doses efficaces dues aux expositions externes au cours des quatre mois qui ont suivi l'accident nucléaire ont été estimées par l'Institut national des sciences radiologiques (NIRS) sur la base des mouvements enregistrés des personnes ayant répondu, en combinaison avec une connaissance des niveaux de rayonnements pertinents. Il y a en outre eu des études détaillées comprenant : 1) des échographies de la thyroïde effectuées sur environ 370 000 résidents âgés de 0 à 18 ans au moment de l'accident (l'examen initial a été effectué au cours des trois premières années qui ont suivi l'accident, et a été suivi d'examens complets de la thyroïde à partir de 2014, puis d'un contrôle effectué régulièrement ensuite) ; 2) un examen médical complet en vue de la détection et du traitement précoces des maladies, ainsi que de la prévention des maladies liées au mode de vie, avec comme cible principale 210 000 anciens résidents des zones d'évacuation dont le mode de vie a radicalement changé après l'accident (des tests supplémentaires tels que la numération leucocytaire différentielle sont en train d'être effectués en plus des examens ordinaires inclus dans les examens médicaux généraux réalisés sur le lieu de travail ou par le gouvernement local) ; 3) une enquête sur la santé mentale et le mode de vie en vue de la fourniture de soins adéquats, principalement aux personnes évacuées les plus exposées aux risques de problèmes de santé mentale comme le stress et la dépression post-traumatiques ; et 4) une étude sur les grossesses et les naissances en vue de la fourniture de soins médicaux et d'un appui appropriés aux mères auxquelles a été donné un manuel de santé maternelle et infantile entre le 1<sup>er</sup> août 2010 et le 31 juillet 2011, ainsi qu'à leurs enfants. (Cette enquête est actualisée chaque année pour tenir compte des nouvelles données, en particulier en ce qui concerne les grossesses et les naissances [162].)

L'Université de médecine de Fukushima a reçu de la préfecture de Fukushima un mandat pour conduire une enquête sanitaire et créé le centre de médecine radiologique pour l'enquête sur la gestion de la santé à Fukushima pour effectuer une enquête de base sur les estimations de doses externes et quatre enquêtes détaillées. L'enquête et ses résultats sont évalués périodiquement par la réunion du comité préfectoral de contrôle pour l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima.

La présente section s'appuie sur ces données, évaluations et estimations internationales et nationales en faisant usage de nouvelles informations, en particulier celles fournies par les autorités japonaises à l'AIEA en vue du présent rapport. Il conviendrait de noter que les estimations des divers rapports internationaux et nationaux ont été déterminées à différents moments et avec différents niveaux d'information. Par conséquent, alors qu'on peut établir certaines comparaisons directes entre les divers résultats, les différences entre les données, la méthodologie et les dates rendent toute comparaison détaillée difficile.

## Grandeurs et unités

Des *grandeurs*<sup>89</sup> et des *unités*<sup>90</sup> [163, 164] internationales spécialisées ont été utilisées pour surveiller les données radiologiques de l'accident et en rendre compte. Les grandeurs et les unités fondamentales internationales de radioprotection qui ont été utilisées dans le présent rapport sont décrites brièvement dans l'encadré 4.3.

### **Encadré 4.3. Grandeurs et unités fondamentales de radioprotection utilisées dans le présent rapport**

La grandeur utilisée pour décrire la radioactivité est appelée l'*activité* et son unité de mesure est appelée le *becquerel* (Bq). Un becquerel représente un niveau d'activité extrêmement faible. Par exemple, le corps humain contient environ 5 000 Bq de potassium radioactif naturel (pour une personne pesant 70 kg, ayant 140 g de potassium dans le corps). En conséquence, pour mesurer les rejets importants de radionucléides de l'accident, on utilise un préfixe approprié tel que le peta (P) dans le présent rapport. 1 petabecquerel (PBq) est égal à  $10^{15}$  Bq.

Le rejet de matières radioactives a entraîné l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants ; on parle d'*exposition externe* lorsque l'activité est à l'extérieur de l'organisme, et d'*exposition interne* lorsque les radionucléides sont incorporés dans l'organisme (par exemple par ingestion ou inhalation, ou à travers la peau). La grandeur décrivant l'exposition moyenne des organes et des tissus aux rayonnements est appelée la *dose absorbée*, son unité de mesure, le joule par kilogramme, est appelée le *gray* (Gy), et elle est souvent exprimée en millièmes de Gy ou *milligrays* (mGy).

Aux fins de la radioprotection, la dose absorbée doit être pondérée car différents types de rayonnements ont différents niveaux de nocivité, et différents organes et tissus ont différents niveaux de sensibilité à l'exposition aux rayonnements. La grandeur obtenue par application des *facteurs de pondération radiologique* à la dose absorbée dans les organes et tissus est appelée la *dose équivalente*, son unité est appelée le *sievert* (Sv) et elle est exprimée en millièmes de Sv ou *millisieverts* (mSv). On a aussi utilisé le millième de mSv ou *microsievert* ( $\mu$ Sv) dans le présent rapport. La grandeur obtenue par application de *facteurs de pondération tissulaire* est appelée *dose efficace* et est aussi mesurée en mSv. Il y a certes des différences entre les individus en ce qui concerne l'effet d'une exposition donnée aux rayonnements mais, aux fins de la radioprotection, les doses sont estimées comme si elles étaient fournies à un individu de référence idéal, car il est impossible de tenir compte des particularités individuelles.

La *dose absorbée* et la *dose équivalente* sont utilisées pour désigner les doses reçues par les tissus et les organes. Compte tenu du type de rayonnement concerné, dans toutes les expositions aux rayonnements dues à l'accident (excepté les expositions négligeables aux neutrons), les doses absorbées données étaient numériquement égales aux doses équivalentes correspondantes et inversement. La *dose efficace* est utilisée pour évaluer les conséquences pour l'organisme entier. Une exposition interne continuera tant que les substances radioactives inhalées ou ingérées resteront dans l'organisme. La *dose engagée* résultant de cette exposition continue est calculée comme la dose attendue au cours de la durée de vie de la personne exposée.

Les estimations suivantes de doses efficaces communément reçues sont fournies comme références [165] :

- Le rayonnement global de fond naturel fournit une dose efficace annuelle moyenne de 2,4 mSv, la fourchette étant habituellement de 1 à 13 mSv, même si des groupes de population non négligeables reçoivent jusqu'à 10-20 mSv et dans les cas extrêmes jusqu'à 100 mSv.
- La dose efficace annuelle moyenne fournie par les radiodiagnostic en médecine calculée à l'échelle mondiale est de 0,6 mSv, et un examen de tomographie informatisée peut fournir une dose efficace d'environ 10 mSv. (Il conviendrait de noter qu'une exposition médicale est habituellement localisée à une partie du corps, c'est-à-dire qu'elle n'est pas uniformément répartie dans le corps.)

Les autres grandeurs utilisées dans la pratique sont déduites des grandeurs fondamentales de radioprotection. L'encadré 4.4 présente certaines de ces grandeurs dérivées et un certain

<sup>89</sup> Le terme *grandeur* est utilisé dans le présent rapport dans son sens scientifique de *propriété* mesurable, dans le cas présent, de phénomènes tels que la radioactivité ou les rayonnements.

<sup>90</sup> L'*unité* d'une *grandeur* est une quantité définie de cette grandeur, qui est utilisée comme norme pour la mesure.

nombre de questions connexes. Les nombreuses grandeurs et unités n'étaient pas faciles à comprendre pour le public au lendemain de l'accident. La CIPR, dans son évaluation des questions de radioprotection déterminées pendant et après l'accident, a conclu qu'il fallait prendre des mesures à l'avenir au plan international pour « résoudre toute confusion en ce qui concerne les grandeurs et les unités liées à la radioprotection » [154, 155].

#### **Encadré 4.4. Grandeurs de mesures et expressions opérationnelles**

Les grandeurs de radioprotection de *dose équivalente* et de *dose efficace* ne sont pas directement mesurables. En conséquence, les instruments de mesure de l'exposition externe reçue par une personne ou présente dans l'environnement (ou le milieu ambiant) sont étalonnés avec des grandeurs opérationnelles appelées *équivalent de dose individuel* et *équivalent de dose ambiant* respectivement. Ce sont des *mesures indirectes* des grandeurs de radioprotection, c'est-à-dire des grandeurs dont on déduit celles recherchées. Elles sont aussi exprimées en mSv. Ces grandeurs opérationnelles ont servi à surveiller la situation après l'accident et sont utilisées dans le présent rapport lorsqu'on parle des valeurs relevées.

Selon le type de situation d'exposition, des termes particuliers sont utilisés pour expliquer plus facilement le concept de contrôle de l'exposition, comme suit :

- Dans les *situations d'exposition planifiée*<sup>1</sup>, on utilise la *dose supplémentaire* à laquelle on s'attend du fait d'une opération prévue. Pour ces situations, les restrictions aux doses individuelles pertinentes sont appelées *limites de doses*. Les limites de doses sont les valeurs des doses efficaces supplémentaires ou des doses équivalentes supplémentaires aux individus auxquelles on s'attend du fait d'une situation d'exposition planifiée et qui ne doivent pas être dépassées. Elles s'appliquent aux doses individuelles supplémentaires dues aux expositions externes au cours d'une période de temps donnée, auxquelles s'ajoutent les doses engagées individuelles supplémentaires dues aux incorporations de radionucléides au cours de cette période.
- Trois concepts de dose sont utilisés dans les *situations d'exposition d'urgence*<sup>2</sup>, à savoir : 1) la *dose prévue* (dose qu'il faudrait s'attendre à recevoir en l'absence de toute mesure de protection), 2) la *dose évitable* (dose qui pourrait être évitée si des mesures de protection sont prises), et 3) la *dose résiduelle* (dose qui resterait et qu'il faudrait s'attendre à recevoir dans des *situations d'exposition existante*<sup>3</sup> quand on mettra fin aux mesures de protection). Des *niveaux de référence* sont appliqués aux doses résiduelles comme niveaux indicatifs pour optimiser la protection. Ils représentent les niveaux de doses « au-dessus desquels il est jugé inapproprié de prévoir d'autoriser des expositions et au-dessous desquels la protection devrait être optimisée » [129].

Ce sont aussi des grandeurs déduites de l'*activité*, telles que celles liées à la présence de radioactivité dans l'environnement exprimant, par exemple, l'activité sur terre ou dans les produits de consommation publique. Les grandeurs pertinentes déduites sont la *densité de dépôt*, qui exprime l'*activité par unité de surface*, habituellement exprimée en Bq/m<sup>2</sup>, l'*activité spécifique*, qui exprime l'*activité par unité de masse* ou de poids, habituellement exprimée en Bq/kg, et la *concentration d'activité*, qui exprime l'*activité par unité de volume*, habituellement exprimée en Bq/l. Ces grandeurs sont souvent appelées la *contamination*, terme officiellement défini dans les normes internationales comme suit : 1) *présence* fortuite ou indésirable de radionucléides sur des surfaces, ou dans des solides, des liquides ou des gaz (y compris dans l'organisme humain), ou 2) *processus* à l'origine de cette présence ; dans un cas comme dans l'autre, il n'y a aucune indication de l'ampleur du danger encouru. Toutefois, le terme *contamination* a une connotation d'impureté ou de danger qui n'est pas prévue dans sa définition officielle de présence ou de processus.

<sup>1</sup> Les *situations d'exposition planifiée* résultent de l'utilisation planifiée de sources de rayonnements (par exemple l'exploitation normale de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi) ou d'opérations planifiées qui entraînent des expositions à partir de sources. Étant donné que des dispositions de protection et de sûreté peuvent être prises à l'avance, les expositions peuvent être limitées dès le départ. Dans les situations d'exposition planifiée, on s'attend à un certain niveau d'exposition.

<sup>2</sup> Les *situations d'exposition d'urgence* comprennent les situations d'exposition qui surviennent à la suite d'un accident et nécessitent une action rapide pour éviter ou réduire ses conséquences néfastes.

<sup>3</sup> Les *situations d'exposition existante* sont des situations d'exposition qui existent déjà lorsqu'une décision doit être prise sur la nécessité de mesures de contrôle ; elles comprennent les expositions dues aux matières radioactives résiduelles provenant d'une urgence nucléaire ou radiologique après que la fin d'une situation d'exposition d'urgence a été déclarée.

### *Incertitudes*

Les estimations des conséquences radiologiques de l'accident sont sujettes à un certain nombre d'incertitudes et sont souvent exprimées comme fourchettes des valeurs probables des grandeurs pertinentes. Certaines de ces incertitudes ont été prises en compte après l'analyse statistique des variables concernées, par exemple dans les estimations des doses de rayonnements individuelles dues aux expositions externes, mais elles n'ont pas été toutes résolues. Même si on comprend mieux les risques liés à l'exposition aux rayonnements que ceux liés à l'exposition à d'autres agents, il importe d'étudier les incertitudes pertinentes et de les faire connaître de manière appropriée [166, 167].

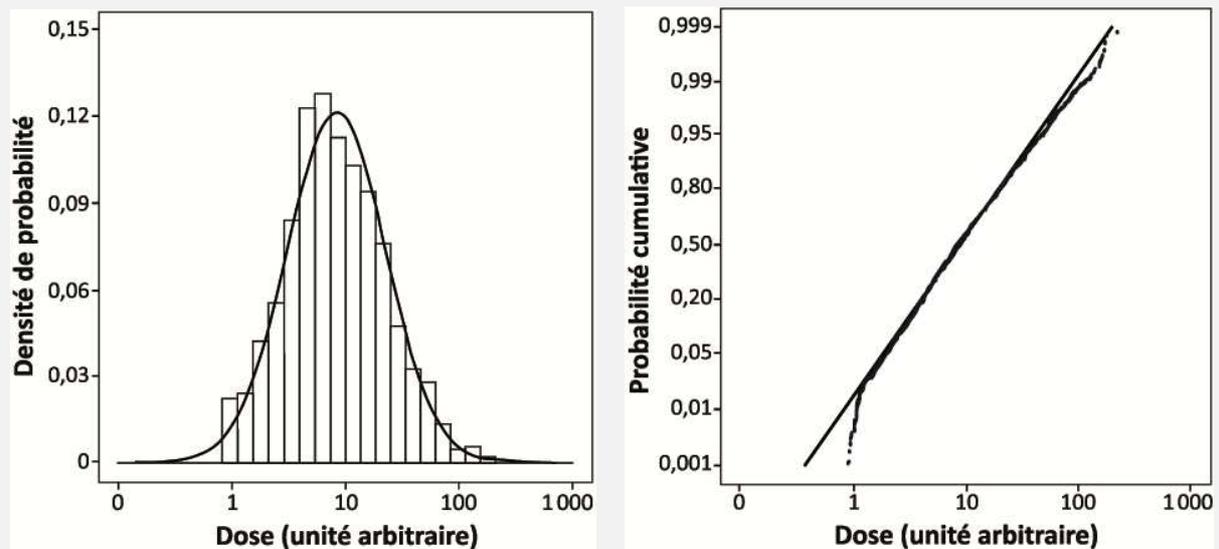
### *Analyses statistiques*

Des analyses statistiques de certaines variables pertinentes ont été effectuées pour tenir compte des incertitudes. Ces variables comprennent l'activité spécifique dans les aliments et, en particulier, les doses de rayonnements individuelles. Les analyses des doses de rayonnements portent sur des estimations basées sur l'utilisation de questionnaires et des données de rayonnements dans le milieu ambiant ou l'environnement, et celles basées sur le contrôle radiologique individuel effectué grâce à des dosimètres individuels et au comptage corps entier de la radioactivité incorporée. La base des analyses statistiques est présentée de manière succincte dans l'encadré 4.5 qui décrit les distributions de probabilités des données, en particulier la *distribution de probabilités log-normale* qui a été spécifiquement utilisée dans les analyses. Il existe de nombreuses situations dans lesquelles on s'attend à ce que les données de mesures multiples, y compris les mesures de grandeurs environnementales, soient statistiquement réparties suivant une distribution de probabilités log-normale approchée. Il y a un important volume d'informations sur la distribution statistique des doses reçues par les populations exposées mettant en évidence ce type de distribution. Des éléments de preuve pertinents sont fournis par les estimations des doses d'exposition professionnelle de l'UNSCEAR [168] et par l'analyse des doses reçues par le public par suite de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986 [169]. Toutefois, un certain nombre de questions ont été présentées dans les analyses des données soumises qui suivent des distributions log-normales et certaines d'entre elles sont résumées dans l'encadré 4.6.

#### Encadré 4.5. Analyse statistique des données estimées et mesurées

Certaines données pertinentes utilisées dans le présent rapport - notamment en ce qui concerne les doses individuelles et aussi l'activité dans les aliments - ont fait l'objet d'une analyse statistique. Les valeurs de la grandeur variable (par exemple les valeurs de l'activité ou de la dose) ont été classées en fonction de leur distribution de fréquences. Pour ce faire, l'ensemble des données a été *compartimenté*, c'est-à-dire divisé en *compartiments*, ou séries de faibles intervalles de valeurs numériques, en lesquels les données ont été classées pour analyse. Les données de chaque compartiment ont été affichées côte à côte en un *histogramme*, c'est-à-dire un diagramme constitué de rectangles représentant les compartiments, dont les positions représentent les valeurs de la grandeur, et la dimension le nombre de données de chaque compartiment. L'histogramme est ensuite normalisé en multipliant les valeurs des rectangles par un facteur tel que la surface totale des rectangles est égale à 1. Lorsque des données suffisantes sont disponibles et que les intervalles deviennent très petits, l'histogramme tend vers une courbe lisse appelée *fonction de densité de probabilité* qui décrit la probabilité relative que la grandeur (par exemple l'activité dans l'aliment ou la dose reçue par les personnes) ait une valeur donnée.

Alors que la distribution la plus fréquente est la distribution *normale* (ou distribution de Gauss), représentée par une fonction de densité de probabilité en cloche symétrique par rapport à la probabilité maximum, la distribution la plus pertinente aux fins du présent rapport est la *distribution logarithmique normale* ou *log-normale*. La distribution log-normale est une distribution des probabilités d'une grandeur, telle que l'activité ou la dose, dont le logarithme est caractérisé par une distribution normale. Ainsi, la fonction de densité log-normale n'est symétrique par rapport au maximum que lorsqu'elle est tracée en fonction du logarithme de la grandeur (par exemple le logarithme de l'activité ou le logarithme de la dose) et non en fonction de la grandeur. Un exemple d'une telle distribution des probabilités log-normale, montrant un histogramme idéal et sa fonction densité de probabilité, est illustré à gauche de la figure ci-dessous.



La fonction de densité de probabilité peut être *intégrée*, c'est-à-dire que les valeurs des compartiments de l'histogramme normalisé peuvent être additionnées, des valeurs les plus faibles aux plus élevées de la grandeur. Une telle sommation en tant que fonction de la grandeur est appelée *fonction de probabilité cumulative* et donne la probabilité qu'une grandeur ayant une distribution des probabilités donnée ait une valeur inférieure ou égale à la valeur.

On pourrait tracer la *fonction de probabilité cumulative log-normale* comme une ligne droite dans un système de coordonnées avec en abscisse la grandeur (par exemple la dose) comme logarithme et en ordonnée la probabilité cumulative comme *fonction* normale. Un exemple d'une telle représentation figure à droite de la figure ci-dessus, où les intégrales des données expérimentales effectives des compartiments de la figure de gauche sont représentées par rapport à la ligne droite.

#### **Encadré 4.6. Questions liées à la distribution log-normale des données**

Alors que le compartimentage des séries de données se traduit habituellement par une distribution relativement lisse des niveaux des compartiments, il n'en a pas été ainsi pour certaines séries de données des informations soumises. Pour ces séries de données, les distributions des compartiments semblaient difformes en raison de l'accumulation d'une grande quantité de données dans un compartiment particulier. Par exemple, dans certaines séries, toutes les valeurs proches de la limite de détection s'étaient accumulées dans un compartiment (initial) sans discrimination alors que les valeurs les plus élevées étaient correctement séparées. Dans les analyses statistiques, il a été décidé de distribuer ces données agglutinées de manière trompeuse en fonction d'une distribution de densité de probabilités déduite des données réelles (à l'aide de ses valeurs statistiques pertinentes, telles que la moyenne et l'écart type) et, sur cette base, de construire une distribution hypothétique, aléatoire comprenant un grand nombre de compartiments. Le résultat est un histogramme conceptuel adapté aux valeurs statistiques des données réelles auquel on peut faire correspondre une courbe lisse de densité de probabilité. Cette fonction densité de probabilité, qui montre comment la distribution devrait se présenter dans une situation idéale si les données étaient suffisamment détaillées et dispersées, est présentée avec la fonction de probabilité cumulative dans les figures pertinentes du rapport. Dans l'une des figures, la distribution réelle des compartiments est aussi présentée pour comparaison.

Certes, il se peut qu'on observe que l'ensemble des données ne suit pas exactement une distribution log-normale, mais on peut habituellement élaborer des explications des écarts, en particulier les écarts par rapport à la ligne droite de la probabilité cumulative, et ces explications constituent une partie importante de l'analyse. Une cause d'écart est l'incertitude due à la fois aux mesures elles-mêmes et à la nature statistique du processus d'échantillonnage. Un problème particulier de l'analyse des doses reçues, qui est typique des situations accidentelles, était que les groupes de personnes exposées étaient probablement hétérogènes par nature. D'autres causes comprennent la distribution restreinte des données ; par exemple, aux fortes doses, la probabilité cumulative pourrait être plus élevée qu'attendu (à savoir que moins de gens qu'attendu reçoivent des doses élevées), l'explication la plus probable étant que les restrictions de doses ont été appliquées avec succès. S'il y a plus de gens qu'attendu dans la fourchette des faibles doses (c'est-à-dire que plus de gens reçoivent de faibles doses), une explication plausible est qu'une dose égale à la limite de détection a été attribuée à tous ceux qui reçoivent des doses inférieures à ces niveaux, ce qui peut être source d'erreur ; à l'inverse, s'il y en a moins qu'attendu, cela pourrait signifier qu'une dose nulle a été attribuée à tous ceux qui reçoivent des doses inférieures à la limite de détection, ce qui peut aussi être source d'erreur. Parfois, les écarts par rapport à la ligne droite étaient devenus apparents en raison du niveau élevé d'hétérogénéité des données locales. Par exemple, lorsque deux groupes différents de population sont mélangés, comme les personnes évacuées et les résidents restés sur place, une preuve de ce changement peut apparaître dans la pente de la distribution de probabilité cumulative, chaque secteur reflétant les doses reçues dans chaque zone. Parfois, la collecte d'informations a traîné en longueur, ce qui déforme les données, par exemple en raison de la décroissance radioactive au cours du temps. Les écarts par rapport à la linéarité d'une courbe de probabilité cumulative log-normale pourraient être utilisés pour tirer des conclusions plausibles sur les données de base.

#### **4.1. RADIOACTIVITÉ DANS L'ENVIRONNEMENT**

***L'accident a entraîné des rejets de radionucléides dans l'environnement. Des évaluations de ces rejets ont été effectuées par de nombreuses organisations avec différents modèles. La plupart des rejets dans l'atmosphère ont été emportés vers l'est par les vents dominants, et se sont déposés et dispersés dans l'océan Pacifique Nord. Il a été difficile de lever les incertitudes dans les estimations de la quantité et de la composition des substances radioactives, notamment parce qu'il n'y avait pas de données de suivi sur le dépôt, à la surface de l'océan, des substances rejetées dans l'atmosphère.***

***La direction du vent étant variable, une partie relativement faible de ces substances s'est déposée sur le sol, essentiellement dans une direction nord-ouest depuis la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. La présence et l'activité des radionucléides déposés dans l'environnement terrestre ont été contrôlées et caractérisées. L'activité des radionucléides***

*mesurée diminue au cours du temps en raison des processus de décroissance physique et de transport dans l'environnement ainsi que des opérations d'assainissement.*

*En plus des radionucléides qui ont pénétré dans l'océan à partir de l'atmosphère, des rejets et des effluents liquides émanant de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi se sont déversés directement dans la mer devant le site. Le mouvement précis des radionucléides dans l'océan est difficile à évaluer par des mesures uniquement, mais un certain nombre de modèles de transport océanique ont été utilisés pour l'estimation de leur dispersion dans l'océan.*

*Des radionucléides tels que l'iode 131, le césium 134 et le césium 137 ont été rejetés et retrouvés dans l'eau de boisson, les aliments et certains produits non comestibles. Des restrictions destinées à empêcher la consommation de ces denrées ont été établies par les autorités japonaises après l'accident.*

#### **4.1.1. Rejets**

De nombreuses évaluations des rejets de radionucléides de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ont été effectuées avec des modèles mathématiques et des méthodes bien établis ainsi que les codes informatiques connexes (voir les références [170-177]).

Au début de l'accident, les gaz rares krypton 85 et xénon 133, dont les demi-vies sont de 10,76 ans et de 5,25 jours respectivement, ont contribué à l'exposition externe à partir du panache des rejets dans l'atmosphère. L'iode 131, qui a une courte période avec une demi-vie de 8,02 jours, a contribué aux doses équivalentes à la glande thyroïde, s'il est ingéré ou inhalé. Le césium 134 et le césium 137, dont les périodes sont plus longues, et les demi-vies de 2,06 ans et de 30,17 ans respectivement, ont tous deux contribué aux doses équivalentes et aux doses efficaces à travers l'exposition externe et interne. Même s'il décroît assez rapidement, l'iode 131 peut être à l'origine de doses équivalentes relativement élevées dans la glande thyroïde. Dans certaines régions, le  $^{137}\text{Cs}$  pourrait rester présent dans l'environnement et, sans remédiation, continuer à contribuer aux doses efficaces aux personnes.

Diverses quantités des radionucléides strontium et ruthénium et de certains actinides (par exemple le plutonium) ont été rejetées. Comme indiqué à la section 2.1, des neutrons ont été détectés le 13 mars entre 5 h 30 et 10 h 50 près de l'entrée principale de la centrale (soit à environ 1 km des tranches 1 à 3). On a estimé qu'ils provenaient de la fission nucléaire spontanée des radionucléides qui auraient été rejetés à la suite des dommages subis par le cœur des réacteurs. Un tel phénomène était prévisible et la présence de ces radionucléides à des niveaux relativement faibles a été signalée.

##### *Rejets dans l'atmosphère*

Les gaz rares constituaient une partie importante des premiers rejets de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. On estime que quelque 6 000 à 12 000 PBq de  $^{133}\text{Xe}$  avaient été rejetés (ou 500 à 15 000 PBq, si l'on tient compte des premières estimations dans l'évaluation). L'activité moyenne totale de  $^{131}\text{I}$  rejeté était d'environ 100 à 400 PBq, et celle du  $^{137}\text{Cs}$  d'environ 7 à 20 PBq (ou 90-700 PBq et 7-50 PBq si l'on tient compte des premières estimations). On estime que les rejets de l'accident représentent environ un dixième de ceux de l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986 [169, 178, 179]. La plupart des rejets s'étaient dispersés au-dessus de l'océan Pacifique Nord et, en conséquence, il était

impossible de confirmer la quantité et la composition isotopique des matières rejetées (le ‘terme source’) par des mesures des dépôts de radionucléides dans l’environnement [177].

### *Rejets dans la mer*

La plupart des substances rejetées dans l’atmosphère qui se sont dispersées au-dessus de l’océan Pacifique Nord sont tombées dans la couche supérieure des eaux océaniques. Il y a eu des rejets directs ainsi que des rejets d’effluents dans la mer sur le site, et l’eau hautement radioactive provenait principalement d’un fossé à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Le pic des rejets radioactifs a été observé au début d’avril 2011. On a estimé que les rejets et les déversements directs de  $^{131}\text{I}$  dans la mer étaient de 10 à 20 PBq. Ceux de  $^{137}\text{Cs}$  étaient estimés à 1 à 6 PBq par la plupart des analyses, mais certaines évaluations les ont estimés à 2,3-26,9 PBq [175].

#### **4.1.2. Dispersion**

De nombreux modèles théoriques ont été utilisés pour estimer les modes de dispersion. Des mesures étendues de la concentration d’activité de  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  dans l’environnement, y compris dans l’air, l’eau de mer, les sédiments et le biote, ont été effectuées et utilisées pour estimer la dispersion des rejets.

#### *Dispersion atmosphérique*

Les matières radioactives rejetées dans l’atmosphère étaient essentiellement transportées vers l’est et le nord du Japon suivant la direction des vents dominants, puis autour du monde. La figure 4.1 présente un exemple des nombreux modèles de transport atmosphérique qui ont été utilisés pour estimer le transport des divers radionucléides atmosphériques et leurs modes de dépôt, ce qui décrit les résultats de la modélisation de la dispersion mondiale du  $^{137}\text{Cs}$  [180]. Elle illustre la concentration d’activité dans l’air à l’aide du code des couleurs initial de référence, où de petits changements de l’intensité de la couleur correspondent au changement d’un ordre de grandeur dans la concentration d’activité. Cette illustration vise à appuyer la conclusion selon laquelle la concentration d’activité dans l’atmosphère diminuait sensiblement avec la distance par rapport à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

Des réseaux hautement sensibles de contrôle radiologique ont détecté des niveaux extrêmement bas de radioactivité attribuables à l’accident aussi loin qu’en Europe et en Amérique du Nord. Toutefois, les effets de ces rejets sur le niveau de la radioactivité du rayonnement de fond dans l’environnement mondial étaient négligeables.

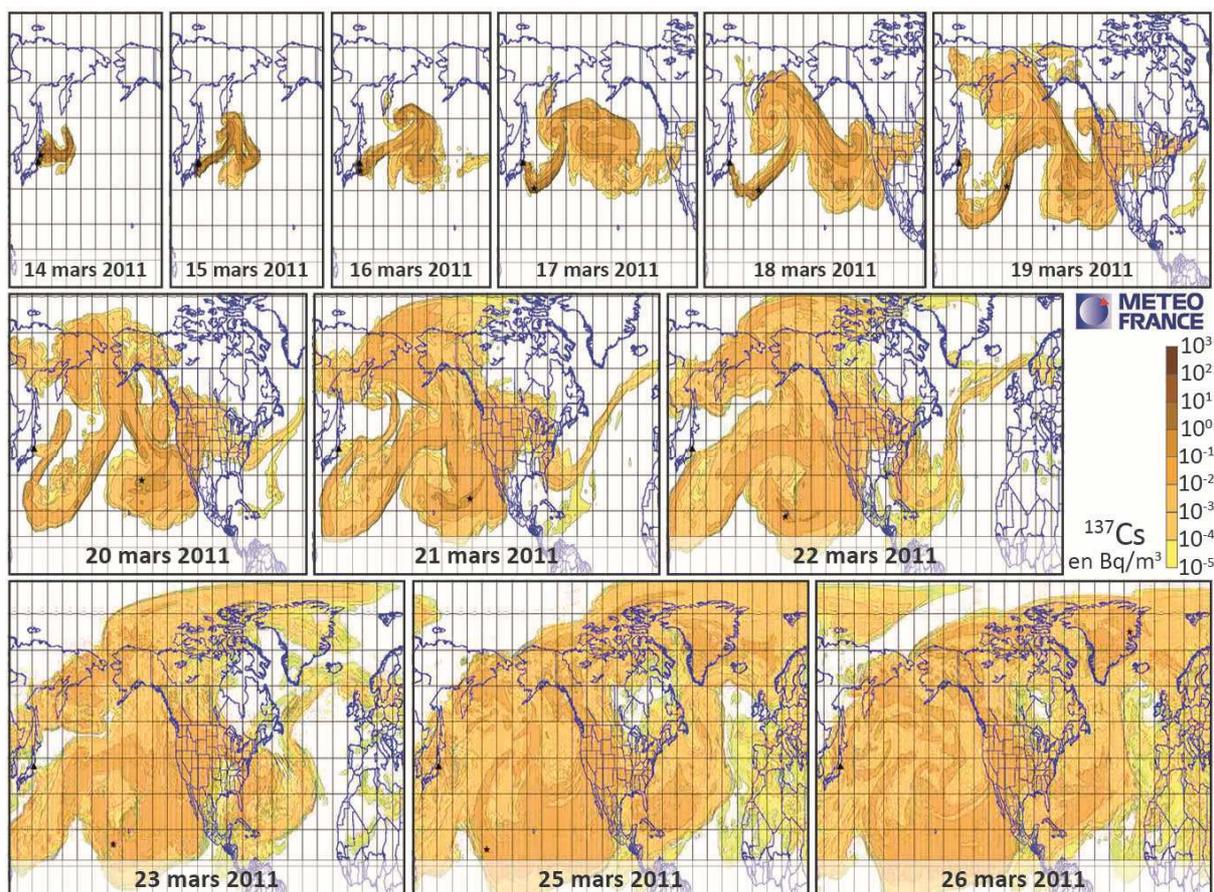


FIG. 4.1. Résultats de l'un des modèles mondiaux de dispersion atmosphérique du  $^{137}\text{Cs}$  présentés dans son code des couleurs initial (voir la référence [180] pour plus de détails). (Source : Météo France).

#### *Dispersion dans l'océan des rejets et des déversements directs dans la mer sur le site*

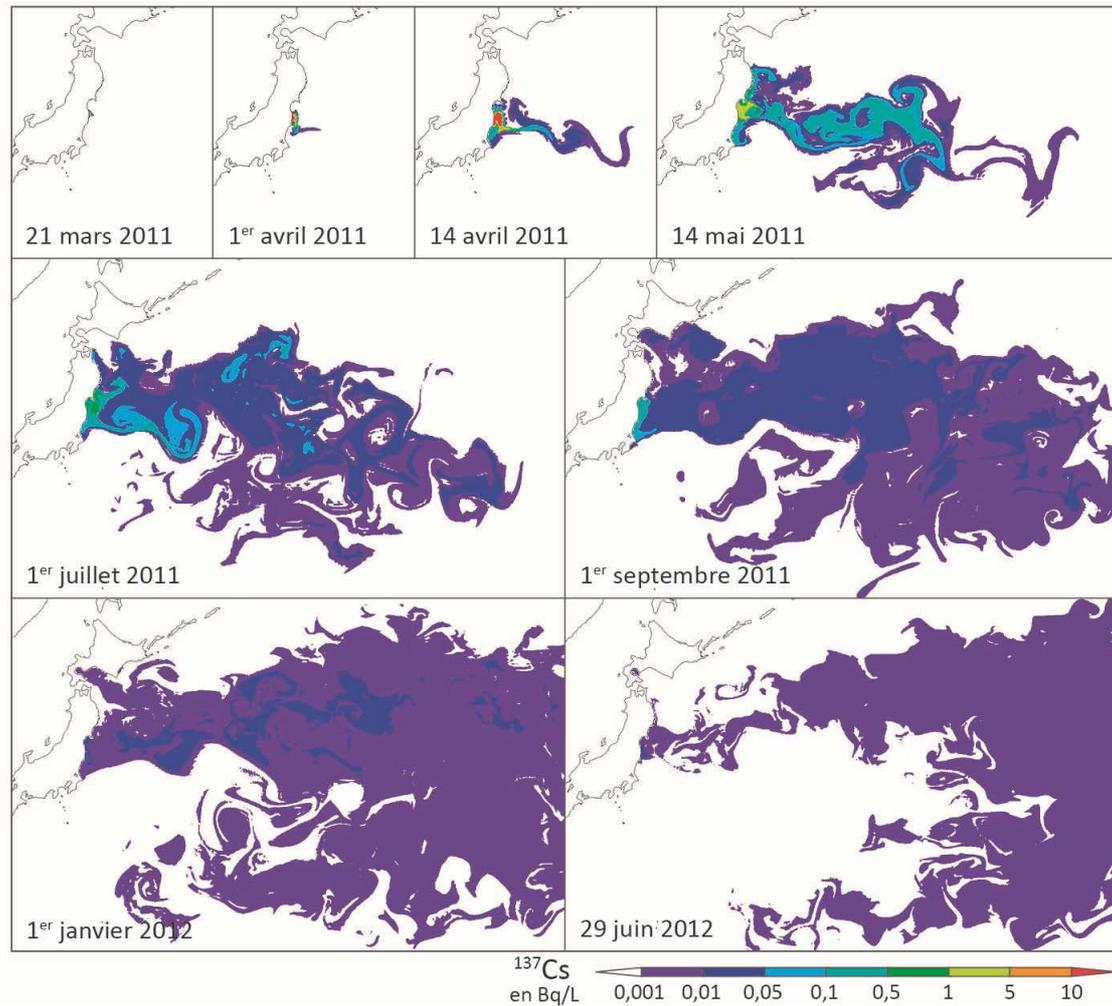
L'essentiel des radionucléides rejetés et déversés dans l'océan sur le site qui ont été transportés vers l'est par le courant de Kuroshio<sup>91</sup> ont été charriés sur de grandes distances par le gyre de l'océan Pacifique Nord<sup>92</sup> et étaient très dilués dans l'eau de mer [181]. La radioactivité s'est dispersée sur de longues distances dans l'océan et a été détectée en quantités extrêmement faibles loin du site de l'accident, parfois par des voies passant par la biote océanique, comme le thon bleu [182].

Le mouvement précis des radionucléides dans l'océan étant difficile à évaluer par les seules mesures, un certain nombre de modèles de transport océanique ont été utilisés pour estimer leurs modes de dispersion. La figure 4.2 illustre des exemples de ces modèles décrivant la dispersion du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'océan Pacifique Nord. Elle est basée sur le code des couleurs initial utilisé dans chaque référence particulière. Comme dans le cas de la dispersion atmosphérique, de petits changements de l'intensité ou du ton des couleurs correspondent au changement

<sup>91</sup> Le courant de Kuroshio est un courant océanique de direction nord de l'ouest de l'océan Pacifique Nord, qui passe au large de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

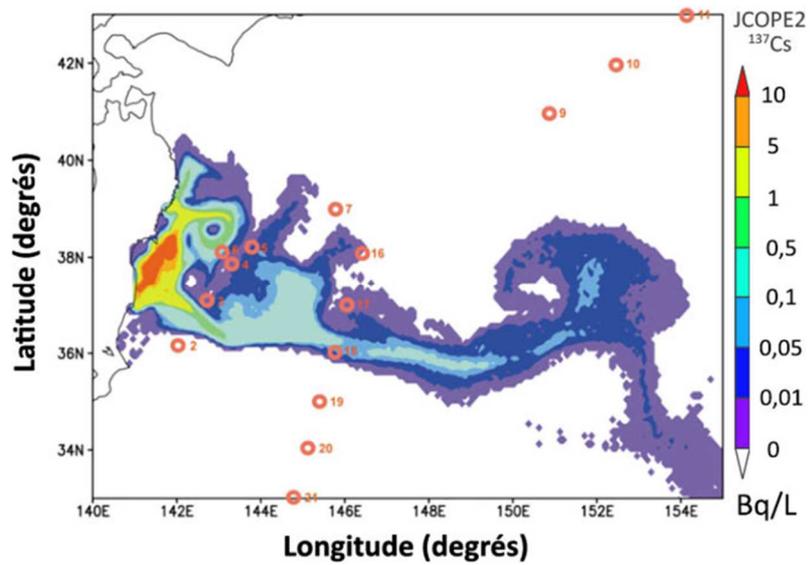
<sup>92</sup> Le gyre de l'océan Pacifique Nord, l'un des cinq principaux gyres océaniques, couvre la plus grande partie de l'océan Pacifique Nord. Il a une trajectoire circulaire suivant le sens des aiguilles d'une montre et est formé du courant de l'océan Pacifique Nord au nord, du courant de la Californie à l'est, du courant nord-équatorial au sud et du courant de Kuroshio à l'ouest.

d'un ordre de grandeur dans la concentration d'activité. Cette illustration vise à appuyer la conclusion selon laquelle l'activité dans l'océan diminuait sensiblement avec la distance par rapport à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Tous les modèles montrent que l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'océan était très faible.

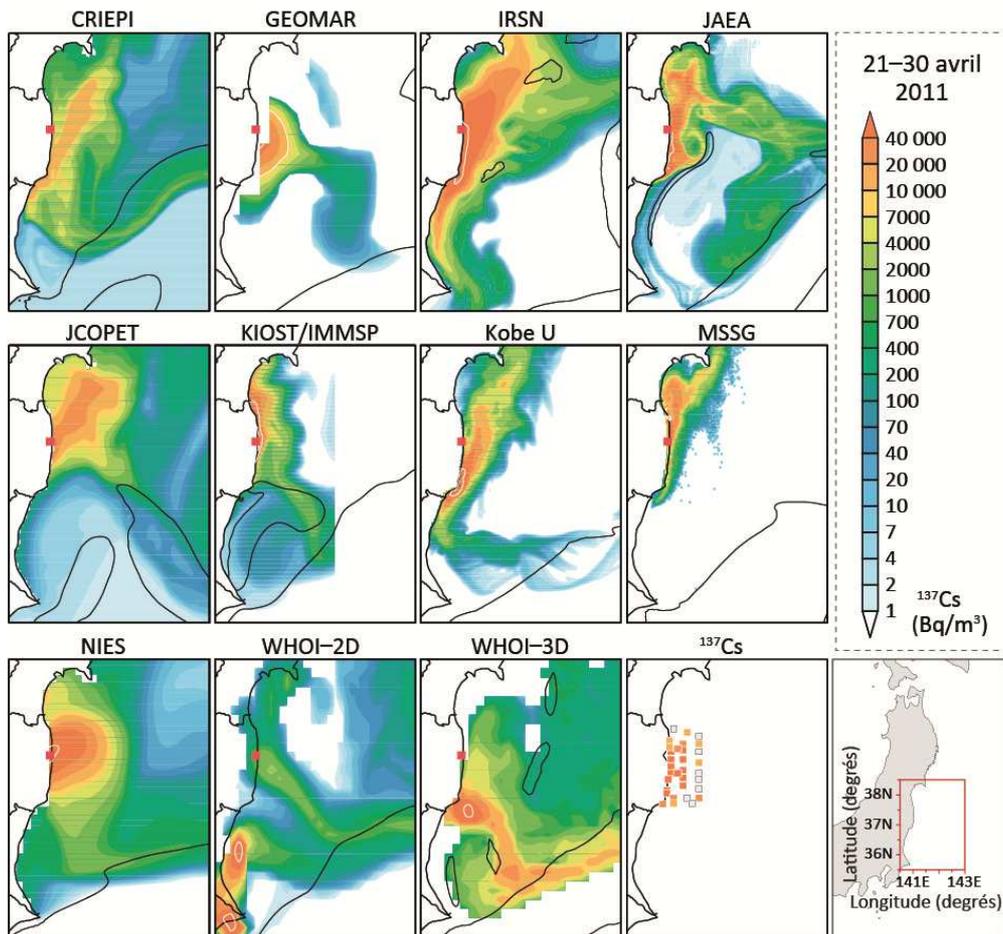


a)

FIG. 4.2. Divers modèles océaniques ont été utilisés pour estimer la concentration d'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'eau de mer (le code de couleurs et les unités sont ceux utilisés dans les références). a) Exemple de modélisation des eaux contaminées du 21 mars 2011 au 29 juin 2012 [183, 184].



b)



c)

FIG. 4.3. (suite) Divers modèles océaniques ont été utilisés pour estimer la concentration d'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'eau de mer (le code de couleurs et les unités sont ceux utilisés dans les références). b) distribution horizontale simulée du  $^{137}\text{Cs}$  dans les eaux de surface entre le 14 et le 26 avril 2011 [185] ; c) distribution horizontale des concentrations moyennes de  $^{137}\text{Cs}$  calculées pour la période de dix jours allant du 21 au 30 avril 2011, le nom du modèle étant indiqué au-dessus de chaque panneau [175].

### 4.1.3. Dépôt

L'activité déposée sur la surface de la Terre est quantifiée comme la densité de dépôt et mesurée en activité par unité de surface, habituellement exprimée en  $\text{Bq/m}^2$ . Dans le cas d'un dépôt terrestre, on parle généralement de « contamination » des sols.

#### *Dépôt océanique*

Le dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  dans l'océan a été étudié à l'aide de différents modèles (voir fig. 4.3).

Il est difficile de modéliser une estimation exacte de la quantité de  $^{137}\text{Cs}$  rejetée dans l'atmosphère qui s'est déposée à la surface de l'océan [186]. À titre de référence, on estime que le dépôt mondial de  $^{137}\text{Cs}$  avant l'accident à partir de 1970 est de  $290 \pm 30 \text{ PBq}$  et que le niveau habituel (du rayonnement de fond) de  $^{137}\text{Cs}$  dans l'océan Pacifique Nord est d'environ  $69 \text{ PBq}$  [187-188].

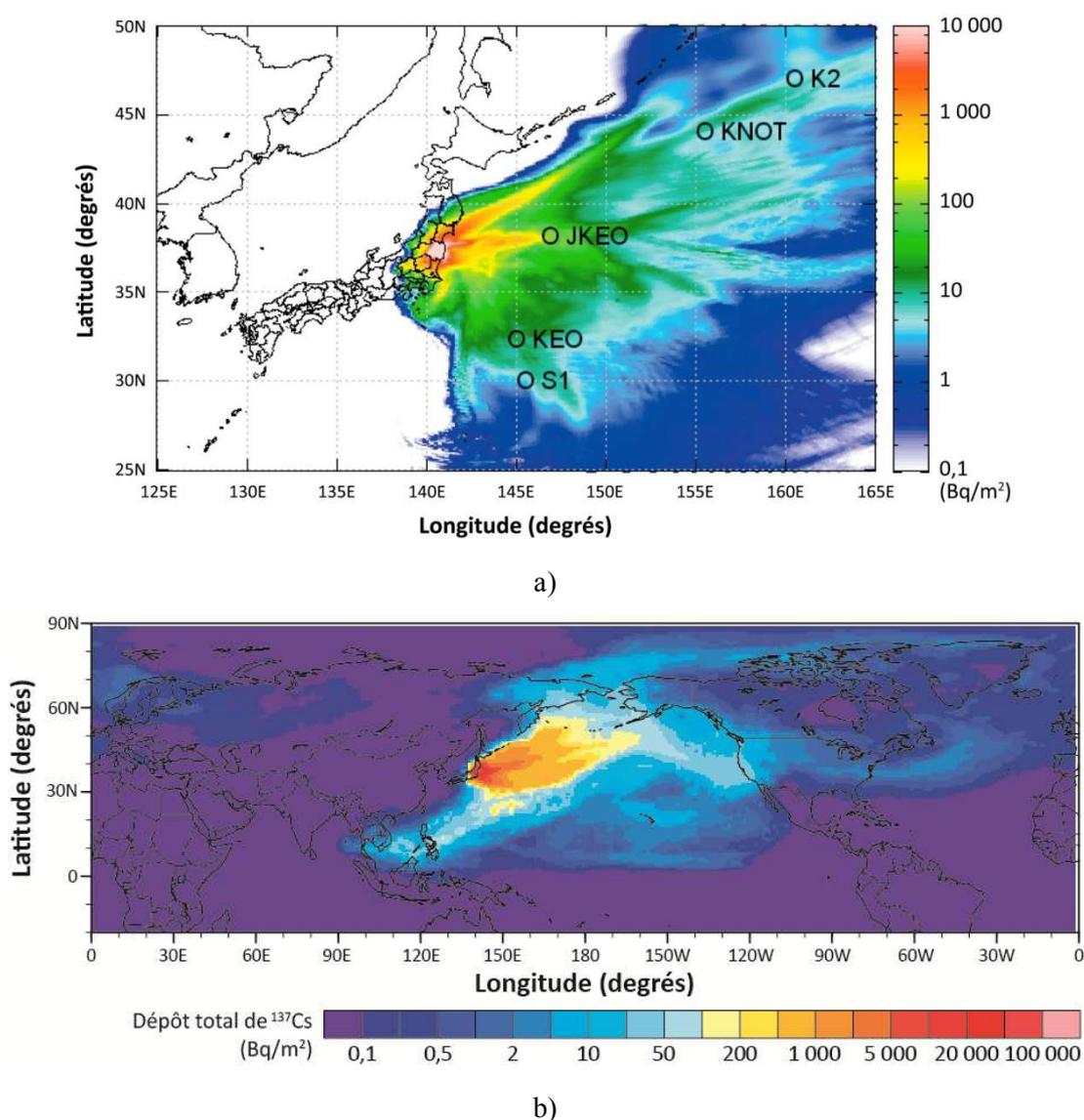


FIG. 4.4. Divers modèles ont été utilisés pour estimer la densité du dépôt océanique de  $^{137}\text{Cs}$  (l'unité employée est le  $\text{Bq/m}^2$ ). a) Modélisation de l'apport éolien cumulatif jusqu'au 1<sup>er</sup> avril 2011 [185] ; et b) exemple de moyenne d'ensemble du dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  (11 au 31 mars 2011) [175].

## Dépôt terrestre

Alors que la plupart des rejets dans l'atmosphère s'étaient dispersés vers l'est, le vent avait transporté ceux des 12, 14 et 15 mars au-dessus des terres, et les radionucléides pertinents, notamment le  $^{131}\text{I}$ , le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ , s'étaient déposés sur les sols. Les modes de dépôt étaient très variables, et fortement influencés par la pluie, les chutes de neige et d'autres conditions locales ou régionales, comme la topographie et l'utilisation des terres. Les différentes caractéristiques physiques et chimiques de l'iode et du césium sont un autre facteur qui influencé le mode de dépôt dans l'environnement terrestre.

Les plus importants dépôts de  $^{137}\text{Cs}$ , qui a une longue période, ont été observés au nord-ouest de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, où leur volume total sur le territoire japonais a été estimé à environ 2 à 3 PBq [188]. La densité de dépôt se réduit avec le temps par la décroissance physique et environnementale. Le césium peut se déplacer assez facilement dans l'environnement en raison de la solubilité de ses composés. Les effets des phénomènes météorologiques, comme le vent et la pluie, et d'autres phénomènes environnementaux, peuvent réduire sa présence dans l'environnement. Tous ces effets réduisent la présence de  $^{137}\text{Cs}$  plus vite que sa période. Dans de nombreuses régions touchées, la présence de  $^{137}\text{Cs}$  a été encore réduite par les activités d'assainissement et d'autres activités de remédiation.

La figure 4.4 présente des cartes détaillées des mesures de l'équivalent de dose ambiant dans l'air au nord-ouest du site de l'accident, et sa variation au cours du temps (voir aussi la figure 4.2 c)).

La présence de  $^{137}\text{Cs}$  provenant de l'accident dans l'environnement terrestre peut entraîner des expositions prolongées chez les personnes, en plus de celles auxquelles elles sont normalement soumises en raison des niveaux du rayonnement de fond naturel. Il y a un niveau mondial de rayonnement de fond de la densité de dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  attribuable principalement aux retombées des essais nucléaires passés. L'UNSCEAR a estimé que les niveaux mondiaux de rayonnement de fond avaient atteint environ 4 000 Bq/m<sup>2</sup> au milieu des années 1960 à 40°-50° de latitude dans l'hémisphère Nord. On estime que les valeurs mondiales les plus faibles tournaient à l'époque autour de quelques centaines de Bq/m<sup>2</sup> à 60°-70° de latitude dans l'hémisphère Sud [190]. Un certain nombre d'études ont analysé l'influence des conditions locales et conclu que le dépôt de rayonnement de fond accumulé pourrait avoir été d'environ 10 000 Bq/m<sup>2</sup> voire plus (voir par exemple la référence [187]). Les niveaux mondiaux de dépôt ont décliné depuis les années 1960. Pour l'année 2000, l'UNSCEAR a estimé que la valeur la plus élevée était d'environ 2 000 Bq/m<sup>2</sup> [195].

Des niveaux sensiblement plus élevés de densité de dépôt de  $^{137}\text{Cs}$  ont été mesurés dans des zones au nord-ouest de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Présentés par ordre de grandeur, les niveaux dans les zones les plus touchées atteignaient 10 000 000 Bq/m<sup>2</sup> et de nombreuses zones présentaient des niveaux d'environ 1 000 000 Bq/m<sup>2</sup>. La distribution des dépôts pour l'ensemble de la zone de la préfecture de Fukushima touchée est hétérogène, et les niveaux immédiatement à l'extérieur des régions les plus touchées de cette préfecture étaient d'environ 10 000 Bq/m<sup>2</sup>. Les niveaux de dépôt sont certes élevés dans certaines autres régions du Japon, mais ceux attribuables à l'accident dans la plupart du pays étaient généralement inférieurs à environ 1 000 Bq/m<sup>2</sup> [191, 192].

Les niveaux les plus élevés de  $^{131}\text{I}$  déposés ont dépassé 3 000 000 Bq/m<sup>2</sup> immédiatement après l'accident mais, en raison de la courte période de  $^{131}\text{I}$ , ils ont baissé rapidement et ne sont plus mesurables.

#### 4.1.4. Produits de consommation

Dans les régions touchées, des radionucléides tels que le  $^{131}\text{I}$ , le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  ont été détectés dans des produits de consommation et d'autres produits utilisés quotidiennement par les gens et les ménages, comme les aliments, l'eau de boisson et certains produits non comestibles.

Des restrictions ont été mises en place après l'accident, le 21 mars, par les autorités japonaises pour empêcher la consommation d'eau de boisson et d'aliments contenant des niveaux de radionucléides supérieurs aux valeurs établies dans la réglementation provisoire (voir la section 3).

Les valeurs indicatives de l'OMS pour les niveaux admissibles de radionucléides dans l'eau de boisson sont établies pour les conditions normales (voir l'encadré 4.1). Après avril 2012, les niveaux de ces radionucléides dans l'eau de boisson étaient inférieurs à ces valeurs dans tout le Japon [193].

À de rares exceptions près, les niveaux de radionucléides dans les aliments disponibles sur les marchés n'excédaient pas ceux établis dans le Codex Alimentarius, et qui sont en vigueur pour le commerce international (voir l'encadré 4.1). Des niveaux de radionucléides plus élevés ont été parfois détectés dans des produits alimentaires non cultivés comme la viande de sanglier, les champignons sauvages et les plantes sauvages, y compris les fougères [194]. Les produits alimentaires non cultivés sont rarement consommés au Japon. Les plantes sauvages sont surtout consommées pendant une période de temps limitée, au printemps, par un nombre limité de gens. Il est très rare que les champignons et les plantes sauvages soient vendus directement par les agriculteurs. Les champignons cultivés sont disponibles sur les marchés si les niveaux de concentration d'activité sont inférieurs aux valeurs réglementaires.

Des exemples de concentration d'activité dans l'eau de boisson et d'activité spécifique dans les aliments sont présentés à la figure 4.5. L'évolution au cours du temps de la concentration d'activité de l'iode 131 dans l'eau de boisson est illustrée pour diverses localités de la préfecture de Fukushima par rapport aux niveaux établis dans la réglementation provisoire publiée par les autorités japonaises [195]. La distribution de la densité de probabilité log-normale et celle de la probabilité cumulative ont été évaluées pour l'activité spécifique de l'iode 131 dans le lait au cours du premier mois qui a suivi l'accident et dans les légumes feuillus au cours des trois mois qui l'ont suivi. Pour l'activité spécifique de césium 134 et de césium 137 dans les champignons (y compris les champignons cultivés principalement en plein air), les évaluations ont porté sur les 12 mois qui ont suivi l'accident. Ces évaluations, qui sont basées sur l'analyse statistique de données collectées par la FAO [151], montrent que la probabilité que les valeurs soient inférieures au niveau de 1 000 Bq/kg du Codex Alimentarius (le niveau établi par les autorités japonaises était initialement de 500 Bq/kg puis a été réduit à 100 Bq/kg [193]) était d'environ 90 %. Cette approche prudente a engendré des difficultés pour les producteurs et les consommateurs.

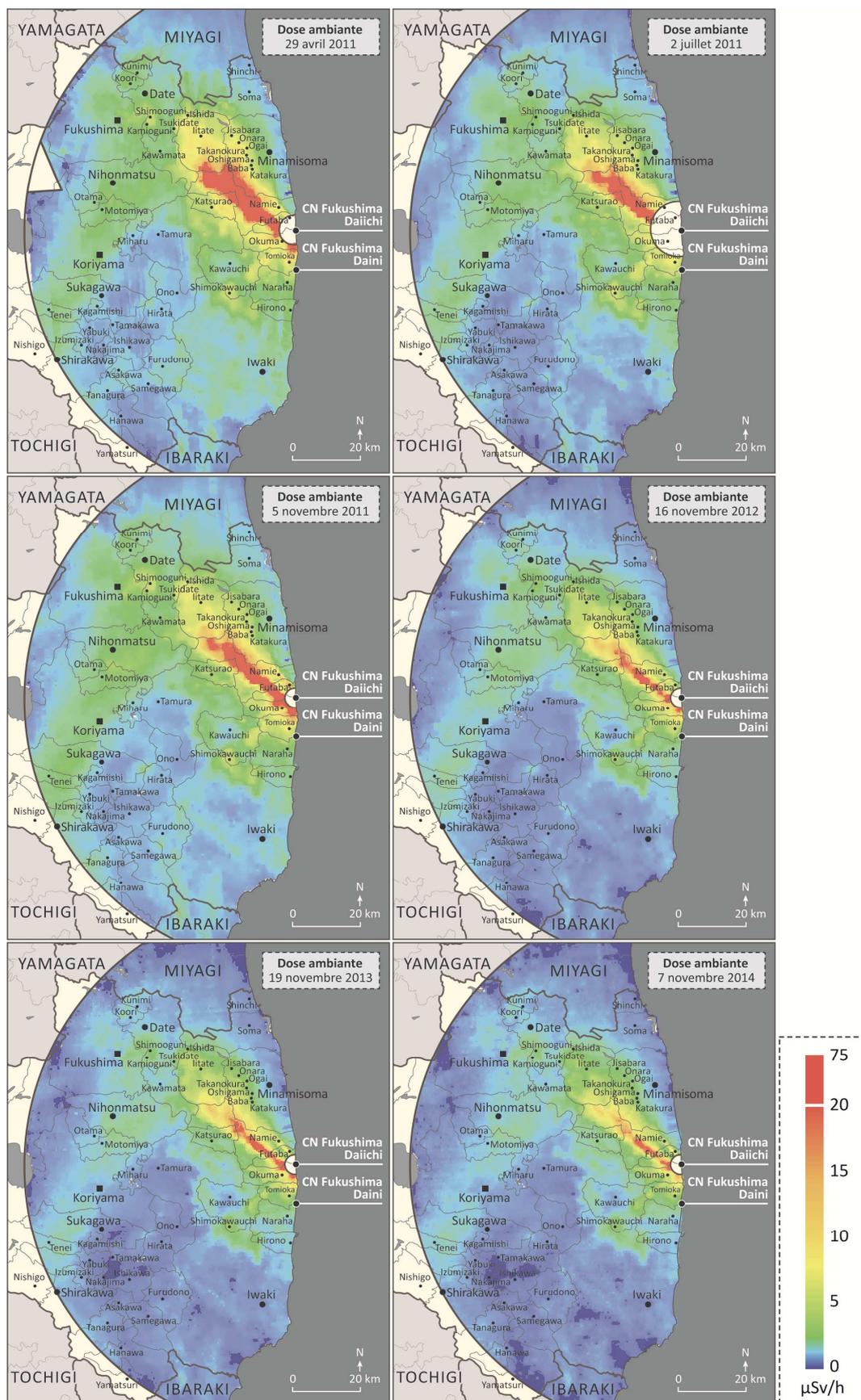
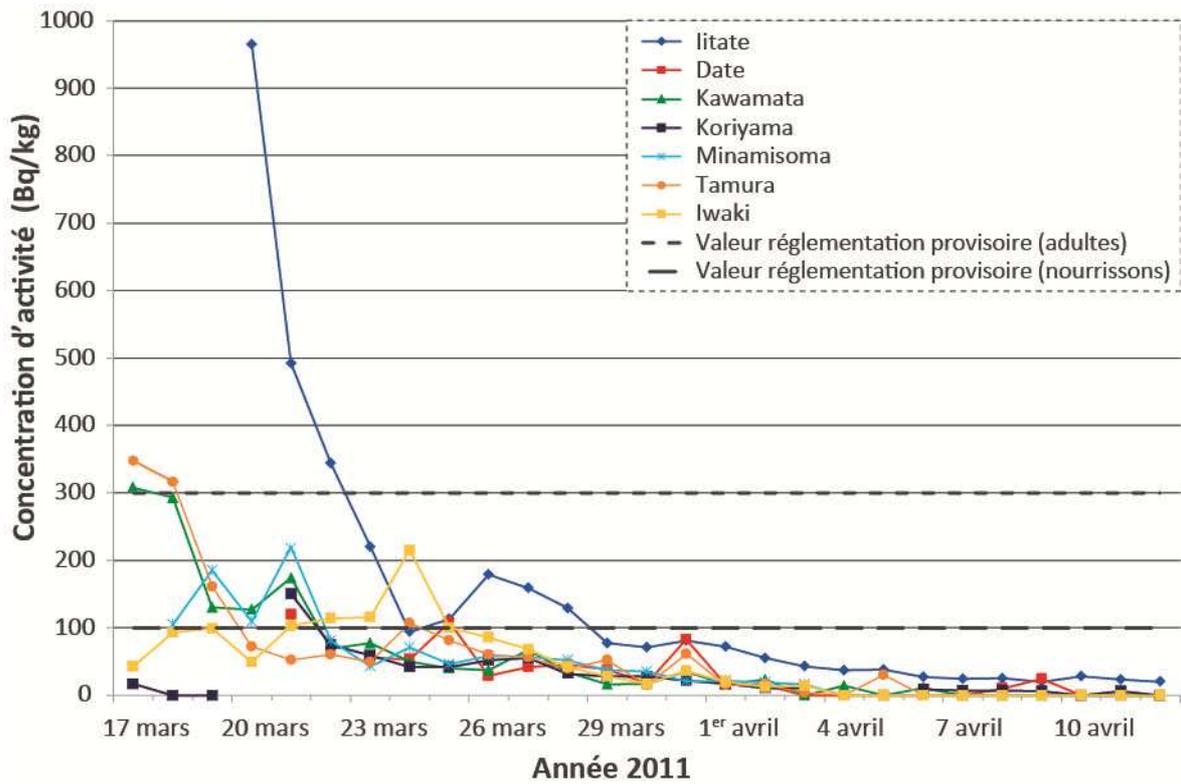
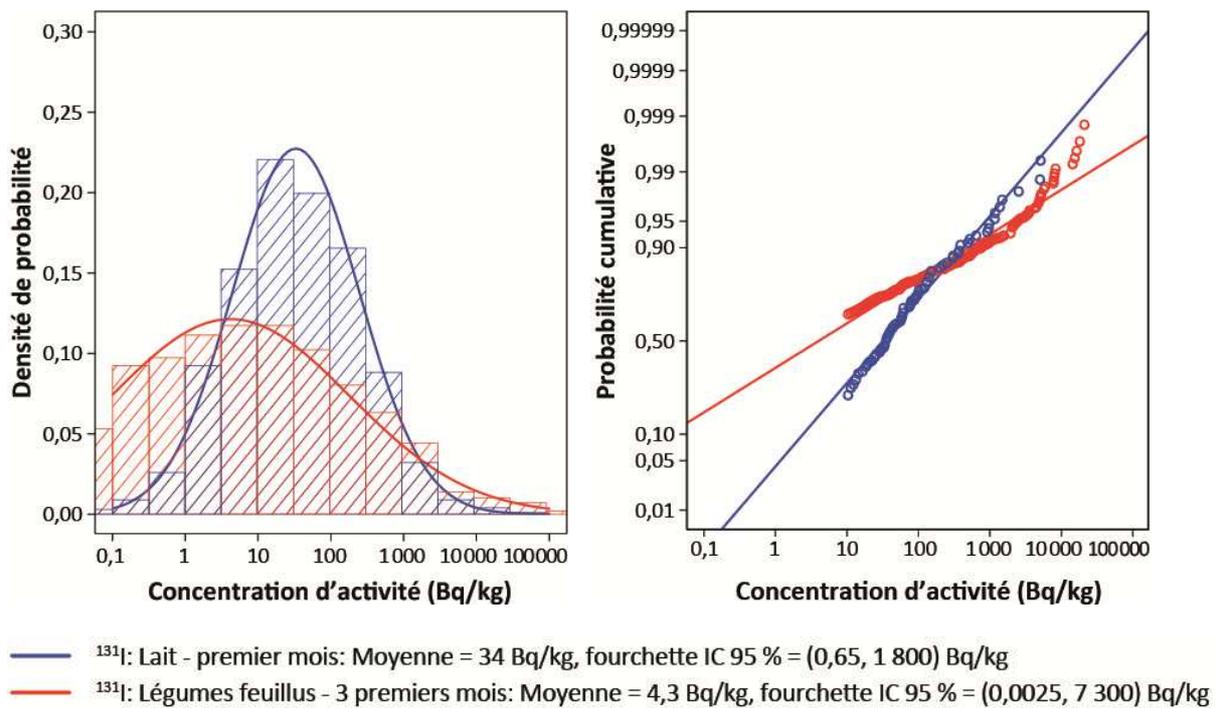


FIG. 4.5. Débit d'équivalent de dose ambiante mesuré dans l'air (en  $\mu\text{Sv/h}$ ) dû aux rejets qui se sont dispersés dans les régions au nord-ouest de la centrale [189].

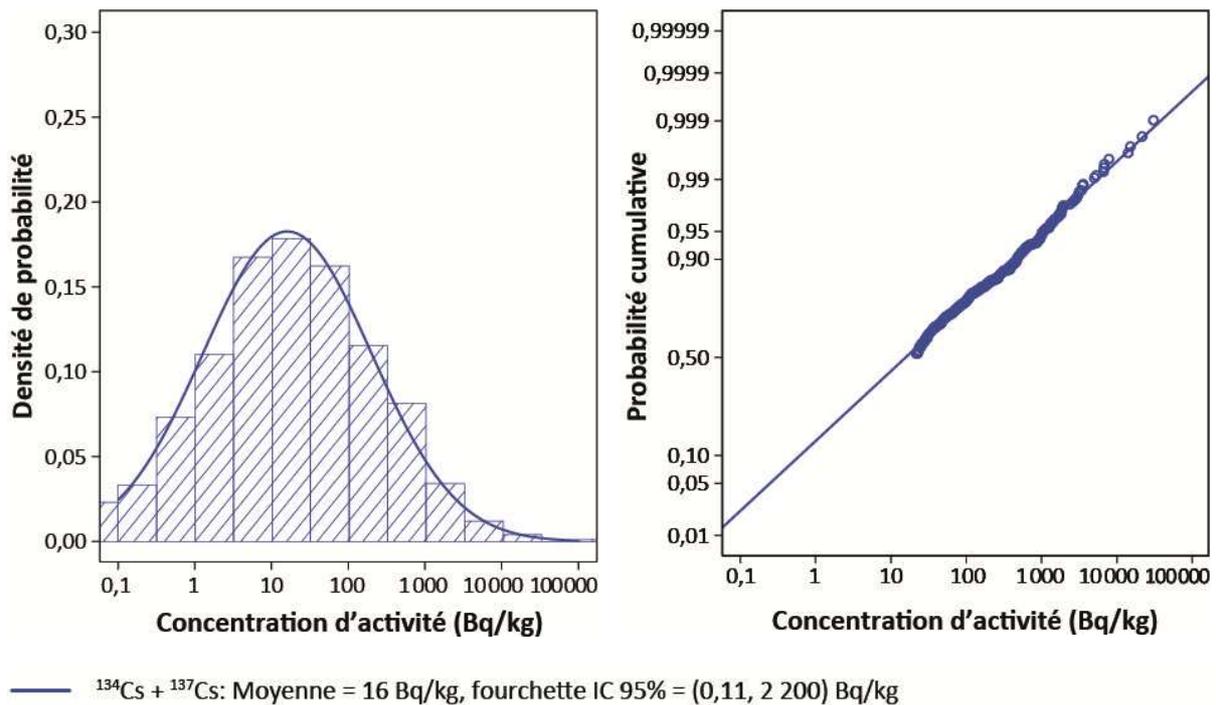


a)



b)

FIG. 4.6. Quelques exemples de radioactivité dans l'eau de boisson et les aliments. a) Évolution au cours du temps de la concentration d'activité de  $^{131}\text{I}$  mesurée dans l'eau de boisson dans diverses localités de la préfecture de Fukushima [195]. b) Distribution de probabilité log-normale de la concentration d'activité de  $^{131}\text{I}$  dans le lait au cours du premier mois après l'accident et dans les légumes feuillus au cours des trois premiers qui ont suivi l'accident.



c)

FIG. 4.7. (suite) Quelques exemples de radioactivité dans l'eau de boisson et les aliments. c) Distribution de probabilité log-normale de la concentration d'activité de  $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$  dans les champignons au cours des 12 mois qui ont suivi l'accident [151]. (Les figures 4.5 b) et 4.5 c) présentent la distribution de la densité de probabilité théorique normalisée (voir l'encadré 4.6) et la distribution de probabilité cumulative ; une limite de détection nominale de 10 Bq/kg a été utilisée pour la concentration d'activité dans les aliments.)

## 4.2. PROTECTION DES PERSONNES CONTRE LA RADIOEXPOSITION

*Après l'accident, les autorités japonaises ont appliqué des niveaux de référence de dose prudents figurant dans les recommandations récentes de la CIPR<sup>93</sup>. L'application de certaines mesures et actions protectrices s'est révélée difficile pour les autorités qui en étaient responsables et très éprouvante pour les populations touchées.*

*Il y avait des différences entre les critères et les principes directeurs nationaux et internationaux de contrôle de l'eau de boisson, des aliments et des produits de consommation non comestibles à plus long terme après l'accident, une fois passée la phase d'urgence.*

<sup>93</sup> Des recommandations internationales sur la radioprotection sont publiées par la CIPR. Elles sont prises en compte dans l'établissement des normes internationales de sûreté, y compris les normes de radioprotection (Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements (Normes fondamentales internationales ou NFI)), qui ont été élaborées et établies par plusieurs organisations internationales sous les auspices de l'AIEA. Les NFI sont utilisées dans le monde entier pour l'élaboration des réglementations nationales de protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs potentiels des rayonnements ionisants. Les recommandations de la CIPR de 2007 fournissent un cadre révisé pour la radioprotection. Elles comprennent l'introduction de niveaux de référence pour les stratégies de protection. Au moment de l'accident, les NFI étaient en cours de révision, entre autres pour tenir compte de ces recommandations.

Les gens ont été exposés à des rayonnements attribuables à l'accident par diverses voies appelées voies d'exposition. Celles-ci sont examinées dans l'encadré 4.7. Les doses de rayonnements reçues par les gens sont estimées par modélisation et/ou des mesures environnementales et individuelles à travers diverses voies d'exposition. Ces estimations et ces mesures ont ensuite été utilisées pour limiter l'exposition et assurer la protection des gens.

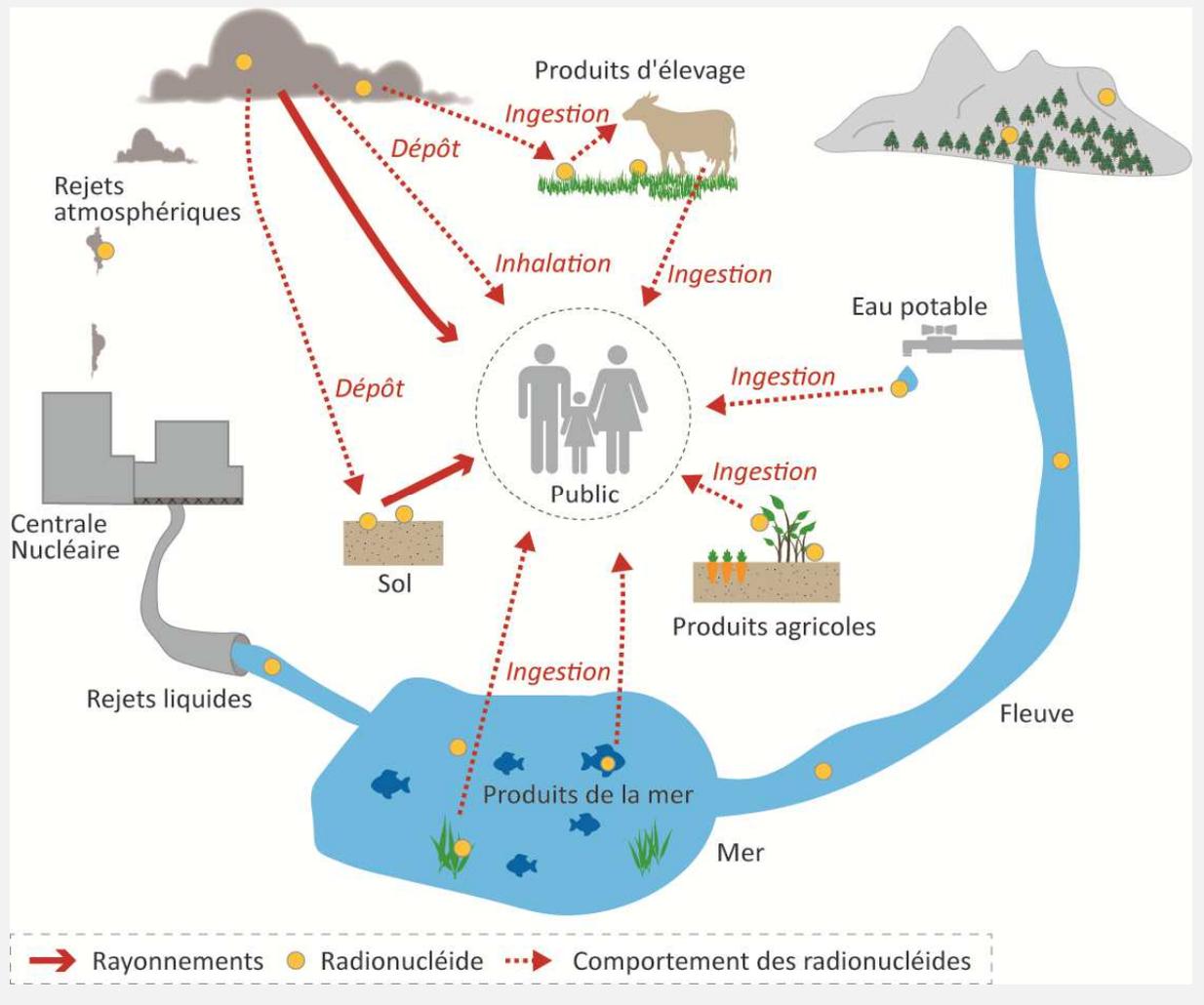
#### **4.2.1 Limitation de l'exposition du public**

La version des Normes fondamentales internationales (NFI) applicable au moment de l'accident avait été publiée en 1996 [137] et était basée sur les recommandations de la CIPR datant de 1990 [196]. Elle comprenait des prescriptions concernant les *niveaux d'intervention* en cas d'accident, compte tenu des *doses prévues* et des réductions potentielles des *doses évitables*. Au moment de l'accident, les NFI de 1996 étaient en cours de révision pour tenir compte des recommandations de la CIPR publiées en 2007 [129] (voir l'encadré 4.8). Ces recommandations préconisaient une approche différente de gestion des situations d'urgence, en particulier l'examen du concept de niveaux d'intervention, qui avait été conçu comme critère pour les mesures de protection individuelle, et l'introduction du concept de niveaux de référence à utiliser pour décider des stratégies de protection (étant entendu que des critères génériques seraient introduits dans les normes de sûreté pour les mesures de protection individuelle).

Les recommandations de la CIPR de 2007 ont fourni un cadre pour les niveaux de référence avec des exemples pour toutes les situations d'exposition, y compris les situations d'urgence. Comme exemple pour la dose résiduelle prévue la plus forte dans une situation d'urgence radiologique, elles préconisaient des niveaux de référence qui pourraient être supérieurs à 20 mSv, qu'il s'agisse de dose aiguë ou annuelle, mais sans dépasser 100 mSv. Elles prescrivaient également d'envisager de réduire les doses, de redoubler d'efforts pour les diminuer lorsqu'elles approchent les 100 mSv, d'informer les individus des risques des rayonnements et des mesures de réduction des doses, et d'évaluer les doses individuelles. L'organisme de réglementation du Japon, la NISA, a choisi d'appliquer le niveau de référence plus faible de 20 mSv/an pour la protection du public.

#### Encadré 4.7. Voies d'exposition

Les voies d'exposition sont des cheminements, des séquences de changements ou d'événements qui constituent la progression permettant aux substances radioactives de passer à travers l'environnement pour ultérieurement rendre les gens vulnérables aux doses de rayonnements reçues. Elles sont caractérisées par de nombreux aspects, y compris le processus permettant aux substances d'arriver dans l'environnement, les moyens par lesquels elles quittent la source, le point d'exposition où les gens sont touchés par les rayonnements, les itinéraires d'exposition montrant comment ils sont exposés aux rayonnements externes, comment les substances radioactives pourraient entrer dans l'organisme (par exemple à travers la nourriture, les boissons, par la peau) ainsi que les populations qui pourraient être potentiellement exposées. La figure ci-dessous donne une description simplifiée des voies d'exposition après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.



#### Protection des enfants

La protection des enfants préoccupait spécialement les parents dans les zones touchées par l'accident. Aux fins de la protection, les recommandations actuelles de la CIPR utilisent un coefficient de risque ajusté au détriment pour l'ensemble de la population, y compris les enfants, qui est plus élevé (d'environ 30 %) que pour une population adulte. La différence est reflétée dans les recommandations et les normes internationales de radioprotection.

### *Impact des mesures et des actions de protection du public*

Une infrastructure appropriée pour les installations publiques est essentielle pour appuyer les mesures destinées à limiter l'exposition du public après une urgence nucléaire ou radiologique [199]. Il a fallu gérer les conséquences du séisme, du tsunami et de l'accident en même temps que l'effondrement de l'infrastructure locale. Le séisme et le tsunami ont détruit ou endommagé de nombreuses infrastructures publiques, habitations et entreprises, et l'accès au téléphone et à internet, la fourniture d'électricité, de gaz, d'eau de boisson, les transports publics, et la distribution de produits alimentaires, de carburant et de fuel domestique ont été gravement perturbés. La température extérieure était basse, il pleuvait et il neigeait, et le chauffage était inadéquat. De nombreux résidents ne pouvaient donc rester longtemps dans les abris sans vêtements chauds ni manteaux.

Ces conditions difficiles ont entravé la mise en œuvre des mesures protectrices requises pour protéger les gens contre l'exposition aux rayonnements. Par exemple, les gens abrités ne pouvaient pas se décontaminer en se lavant car l'eau était rationnée dans la plupart des abris et était réservée pour la boisson.

#### ***Encadré 4.8. Révision des Normes fondamentales internationales en vigueur au moment de l'accident : les niveaux de référence***

Les normes fondamentales internationales de radioprotection en vigueur au moment de l'accident étaient les Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements de 1996, ou NFI de 1996 [137]. Elles stipulaient que la dose efficace supplémentaire que les individus pourraient recevoir de pratiques planifiées et réglementées devait être limitée à 1 mSv par an (dans des circonstances spéciales, cette dose pourrait aller jusqu'à 5 mSv à condition que sa moyenne sur cinq années consécutives ne dépasse pas 1 mSv par an). Les NFI de 1996 soulignaient que ces limites n'étaient pas pertinentes pour les décisions concernant l'opportunité et la manière d'intervenir en cas d'accident, où il fallait tenir compte des doses prévues et des réductions potentielles des doses évitables ainsi que des doses résiduelles ultimes. Les prescriptions des NFI de 1996 concernant spécifiquement les situations d'urgence prévoyaient des niveaux d'intervention génériques où l'intervention devrait être effectuée d'urgence, comme la mise à l'abri, l'évacuation et le blocage de la thyroïde, ainsi que des niveaux d'action génériques.

En outre, l'AIEA a publié en 2002 des normes de sûreté contenant des prescriptions spécifiques sur la préparation et la conduite des interventions dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique [69], y compris des critères de dose pour la mise en œuvre de mesures protectrices comme la mise à l'abri, l'évacuation et la prophylaxie à l'iode. Ces normes ont établi des prescriptions pour un niveau adéquat de préparation et de conduite des interventions dans une situation d'urgence nucléaire ou radiologique dans le but de réduire au minimum les conséquences d'une urgence si elle devait se produire (voir la section 3 pour de plus amples informations).

Au moment de l'accident, les NFI de 1996 étaient en cours de révision, notamment à la lumière des nouvelles recommandations générales de la CIPR publiées en 2007 [129]. Juste avant l'accident, la CIPR avait publié des recommandations spécifiques sur l'application de ces nouvelles recommandations à la protection des personnes dans les situations d'exposition d'urgence [127] et de celles vivant dans des régions contaminées pour longtemps après un accident nucléaire ou une urgence radiologique [197].

**Encadré 4.8. (suite) Révision des Normes fondamentales internationales en vigueur au moment de l'accident : les niveaux de référence**

Les recommandations de la CIPR de 2007 avaient révisé l'approche de gestion des situations d'exposition d'urgence, y compris le concept de niveau de référence à utiliser pour les stratégies de protection. Le niveau de référence recommandé était une dose efficace (aiguë ou annuelle) qui pourrait être supérieure à 20 mSv mais sans dépasser 100 mSv. Il devait être utilisé pour les critères génériques dans le cadre d'actions protectrices individuelles dans des situations inhabituelles, et souvent extrêmes, où les mesures de réduction des expositions engendreraient des perturbations, étant entendu qu'une dose efficace approchant 100 mSv justifierait presque toujours des actions protectrices. Pour les stades de réhabilitation post-accidentelle, le niveau de référence pourrait être supérieur à 1 mSv, mais sans dépasser 20 mSv. Les nouvelles recommandations ont en outre souligné que la valeur retenue pour un niveau de référence dépendrait des circonstances prévalant en ce qui concerne l'exposition considérée.

La nouvelle approche a été introduite dans les NFI révisées, qui ont été publiées en 2014 en tant que n° GSR Part 3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA sous le titre « Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards » [198].

Certaines actions protectrices étaient très difficiles pour les autorités et extrêmement éprouvantes pour les personnes et les communautés touchées [200, 201]. La mise à l'abri et l'évacuation avaient engendré de graves perturbations pour quelque 160 000 personnes, qui étaient isolées et n'avaient accès qu'à des ressources limitées pour répondre à leurs besoins quotidiens (fig. 4.6 a)). Les gens avaient été finalement transférés, mais leurs conditions de vie normales étaient sérieusement perturbées (fig. 4.6 b)). L'emploi et la participation aux activités de la communauté étaient limités. Les perspectives étaient incertaines et la planification pour l'avenir très difficile.



a)



b)

FIG. 4.8. Les abris étaient surpeuplés après l'évacuation initiale. a) Un haut responsable de la TEPCO présente des excuses aux déplacés dans un centre d'évacuation le 22 mars 2011 (photo : Koichi Nakamura/AP Images/picturedesk.com) ; b) Les conditions de vie normales des déplacés ont été gravement perturbées (photo : Dr Yujiro Kuroda/Université de médecine de Fukushima).

Des gens qui avaient déjà souffert des conséquences du séisme et du tsunami étaient soumis à un stress physique et psychologique supplémentaire dû à leur mise à l'abri, à leur évacuation et à leur relogement. Les restrictions de produits de consommation publique étaient importantes et nécessaires, mais avaient causé des dommages aux producteurs locaux en termes économiques, sociaux ou de réputation.

#### 4.2.2 Limitation de l'exposition professionnelle, y compris l'exposition des membres des équipes d'intervention

Le Japon est Partie à la Convention sur la protection contre les radiations, 1960 (n° 115), adoptée sous les auspices de l'OIT [164]. Sa réglementation en matière d'exposition professionnelle était conforme aux recommandations et aux normes relatives à la radioprotection professionnelle. Elle a établi pour l'exposition professionnelle une dose limite qui est une dose efficace de 20 mSv par an, dont la moyenne est calculée sur cinq ans, et de 50 mSv en une seule année [137]. En ce qui concerne les membres des équipes d'urgence, des « travailleurs qui peuvent être exposés au-delà de la limite de dose pour l'exposition professionnelle lors de la mise en œuvre d'actions visant à atténuer les conséquences d'une situation d'urgence sur la santé et la sûreté des personnes, la qualité de vie, les biens et l'environnement » [48], un critère de limite de dose efficace de 100 mSv avait été établi. Les autorités japonaises avaient dû porter temporairement ce critère à 250 mSv pour ces travailleurs qui évoluaient dans un rayon de 30 km de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi jusqu'au 16 décembre 2011 (voir la section 3.2).

La limite de dose pour l'exposition professionnelle dans des « circonstances spéciales » établie par les normes internationales (NFI de 1996) en vigueur au moment de l'accident était de 100 mSv [137]. La limite supérieure des niveaux de référence recommandés au plan international par la CIPR était de 100 mSv [129], même si les recommandations indiquaient que, dans des situations exceptionnelles, des travailleurs volontaires informés pourraient recevoir des doses supérieures à ce niveau pour sauver des vies, prévenir les effets sanitaires radio-induits graves, ou empêcher l'avènement de situations catastrophiques. En fixant la valeur de 250 mSv, les autorités japonaises ont tenu compte des précédentes recommandations de la CIPR [196, 202] et des prescriptions des normes de sûreté de l'AIEA, qui suggéraient une valeur indicative de 500 mSv pour les personnes engagées dans des activités de secours d'urgence, ou des opérations d'urgence visant à prévenir l'aggravation d'un accident nucléaire. La dose limite révisée pour les membres des équipes de secours a été mise en vigueur dans l'ordonnance d'exemption du Ministère de la santé, du travail et des affaires sociales (MHLW) trois jours après la déclaration de l'état d'urgence par les autorités (14 mars 2011). Cette ordonnance a été abrogée le 16 décembre 2011 [203].

#### 4.3. RADIOEXPOSITION

*À court terme, les principaux facteurs d'exposition du public étaient : 1) l'exposition externe due aux radionucléides présents dans le panache et qui se sont déposés sur le sol ; et 2) l'exposition interne de la glande thyroïde due à l'incorporation d'iode 131, et l'exposition externe d'autres organes et tissus due essentiellement à l'incorporation de  $^{134}\text{Cs}$  et de  $^{137}\text{Cs}$ . À long terme, le principal facteur d'exposition du public sera l'exposition externe due au dépôt de  $^{137}\text{Cs}$ .*

*Les premières évaluations des doses de rayonnements étaient basées sur des modèles de contrôle radiologique de l'environnement et d'estimation des doses, et ont abouti à des surestimations. Pour les estimations figurant dans le présent rapport, les données de contrôle radiologique individuel communiquées par les autorités locales ont aussi été prises en compte pour fournir des informations plus fiables sur les doses individuelles effectivement reçues et leur distribution. Selon ces estimations, les doses efficaces reçues par les personnes du public étaient faibles, et généralement comparables à la fourchette des doses efficaces reçues du fait des niveaux mondiaux du rayonnement de fond naturel.*

*Après un accident nucléaire mettant en jeu le rejet d'iode 131 et l'incorporation de celui-ci par les enfants, l'absorption et les doses ultérieures au niveau de leurs glandes thyroïdes constituent un sérieux sujet de préoccupation. Au lendemain de l'accident de Fukushima Daiichi, les doses équivalentes enregistrées chez les enfants étaient faibles parce que leur incorporation d'iode 131 était limitée, en partie en raison des restrictions imposées sur l'eau de boisson et les aliments, y compris les légumes feuillus et le lait frais. Il y a des incertitudes en ce qui concerne l'incorporation d'iode immédiatement après l'accident en raison du manque de données de contrôle radiologique individuel fiables pour cette période.*

*En décembre 2011, environ 23 000 membres des équipes d'intervention avaient participé aux opérations d'urgence. Les doses efficaces reçues par la plupart d'entre eux étaient inférieures aux limites de doses pour l'exposition professionnelle au Japon. Sur ce nombre, 174 personnes ont dépassé le critère établi initialement pour les membres de ces équipes et six ont dépassé le critère de dose efficace, temporairement révisé, établi pour une situation d'urgence par les autorités japonaises. Il y a eu des défaillances dans la mise en œuvre des prescriptions relatives à la radioprotection professionnelle, y compris pendant les premiers contrôles radiologiques et l'enregistrement des doses de rayonnements reçues par les membres des équipes d'intervention, mais aussi en ce qui concerne la disponibilité et l'utilisation de certains équipements de protection, et la formation connexe.*

Les estimations de dose figurant dans le présent rapport sont basées sur les estimations internationales de dose de l'OMS et de l'UNSCEAR résumées dans l'encadré 4.9. Le présent rapport a pu aussi tenir compte de données supplémentaires disponibles, en particulier les données issues de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima et celles relatives aux mesures directes des doses sur les personnes et les rayonnements dans l'environnement. Ces données, qui ont été fournies par des experts, des établissements, les autorités locales et le gouvernement japonais, ainsi que par la TEPCO, ont été soumises à une analyse statistique.

Les diverses estimations différaient car elles avaient été calculées à différents moments et avec différentes méthodologies. Celles de l'OMS étaient généralement plus élevées que celles de l'UNSCEAR, mais cela était essentiellement dû au fait qu'il s'agissait de projections de doses faites juste après l'accident et basées sur des données très limitées. Les estimations de doses de l'OMS et de l'UNSCEAR pour les membres du public avaient souffert de la disponibilité limitée de mesures directes des doses individuelles reçues par les gens et avaient été essentiellement établies à partir de modèles d'évaluation de la dose basés sur les conditions environnementales. Bien que ces différences rendent une comparaison détaillée difficile, les estimations faites dans le présent rapport et celles de l'OMS et de l'UNSCEAR s'accordent largement pour montrer que les doses étaient généralement inférieures aux niveaux de référence établis dans les recommandations et les normes internationales.

#### **Encadré 4.9. Estimations de doses effectuées par l'OMS en 2012 [146] et l'UNSCEAR en 2014 [148]**

En 2012, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a publié une évaluation préliminaire de l'exposition aux rayonnements due à l'accident, qui donne une estimation initiale des doses de rayonnements à des membres caractéristiques du public, en utilisant des techniques de modélisation appliquées à des informations mises publiquement à disposition par les établissements publics et collectées jusqu'en septembre 2011. À l'époque, les données nécessaires pour une évaluation complète n'étaient pas disponibles ou suffisantes. Un certain nombre d'hypothèses prudentes avaient été utilisées et pourraient avoir conduit à surestimer les doses. Par exemple, des hypothèses prudentes avaient été utilisées pour réduire au minimum la possibilité de sous-estimer les risques sanitaires ultérieurs en ce qui concerne les actions protectrices et la consommation des aliments. Néanmoins, l'évaluation a montré que la dose efficace individuelle totale reçue par les membres du public dans deux localités de la préfecture de Fukushima où l'exposition était relativement élevée au cours de la première année qui a suivi l'accident se situait dans une fourchette de doses efficaces de 10 à 50 mSv. Dans la plupart des localités touchées, l'exposition externe était le principal facteur contribuant à la dose efficace. Les estimations de la dose efficace se situaient dans une fourchette de doses efficaces de 1 à 10 mSv dans le reste de la préfecture de Fukushima. Cette fourchette était de 0,1 à 1 mSv dans la plus grande partie du Japon, tandis que dans le reste du monde, elle était partout inférieure à 0,01 mSv et souvent largement en deçà de ce niveau.

En 2014, le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a publié un rapport sur l'accident contenant des doses évaluées aux travailleurs et aux membres du public. Les estimations des doses efficaces externes aux membres du public étaient basées sur les informations disponibles sur la densité de dépôt du <sup>137</sup>Cs dans différentes régions en fonction du temps, ainsi que les caractéristiques estimées des localités et du mouvement de la population. Il ressort des estimations de l'UNSCEAR que dans les zones évacuées ayant les estimations moyennes les plus élevées, la dose efficace qui aura été reçue par les adultes avant et pendant l'évacuation était en moyenne inférieure à 10 mSv, et d'environ la moitié de ce niveau pour ceux qui ont été évacués tôt. En ce qui concerne les adultes vivant dans la ville de Fukushima, la dose efficace moyenne reçue était estimée à environ 4 mSv au cours de l'année qui a suivi l'accident, contre approximativement le double pour les nourrissons d'un an.

S'agissant de ceux vivant dans d'autres régions de la préfecture de Fukushima et dans les préfectures voisines, les doses efficaces estimées étaient comparables ou plus faibles et celles reçues ailleurs au Japon étaient plus faibles encore. L'UNSCEAR a estimé que ceux qui continuaient de vivre dans la préfecture de Fukushima pourraient recevoir sur la vie entière des doses efficaces attribuables à l'accident légèrement supérieures à 10 mSv. La radioexposition due à l'accident dans les États voisins et dans le reste du monde était très inférieure à celle enregistrée au Japon, avec des doses efficaces inférieures à 0,01 mSv. L'UNSCEAR a toutefois souligné qu'il y avait des variations considérables entre individus autour de cette valeur, en fonction de la localité et des aliments qu'ils consommaient.

*Note : Comme indiqué dans l'encadré 4.3, les doses du rayonnement de fond naturel dans le monde enregistrées par l'UNSCEAR sont en moyenne de 2,4 mSv par an (soit une dose accumulée totale d'environ 170 mSv sur une vie entière), avec habituellement une fourchette de 1 à 13 mSv, alors que des tranches non négligeables de la population reçoivent de 10 à 20 mSv.*

### **4.3.1 Exposition du public**

#### *Exposition externe*

L'approche initiale pour l'estimation des doses efficaces reçues par les membres du public en raison d'une exposition externe était essentiellement basée sur les données des mesures environnementales des débits d'équivalent de dose ambiant et sur des calculs et des enquêtes ayant trait aux diverses localités et au comportement individuel. Les données utilisées comprenaient de vastes mesures d'équivalent de dose ambiant, dont certaines sont faites avec des instruments embarqués à bord de véhicules au sol.

Le NIRS a estimé les doses efficaces dues aux expositions externes reçues par les personnes ayant répondu aux questionnaires de cette enquête dans les quatre mois qui ont suivi

l'accident nucléaire [204]. Ces estimations étaient basées sur les mouvements déclarés des personnes et les niveaux de rayonnements pertinents dans les environnements locaux.

Un certain nombre d'estimations des doses efficaces individuelles dues à l'exposition externe au cours des quatre premiers mois ont été publiées [205-208]. Ainsi, dans la région de Soso<sup>94</sup>, qui comprend la 'zone d'évacuation' et la 'zone d'évacuation délibérée', les doses étaient inférieures à 5 mSv pour 98,7 % des résidents (avec une dose efficace maximum de 15 à 25 mSv). Dans l'ensemble de la préfecture de Fukushima, y compris la zone d'évacuation et la zone d'évacuation délibérée, les doses étaient inférieures à 3 mSv pour 99,4 % des résidents interrogés [208].

Une analyse statistique a été effectuée dans le présent rapport sur les doses efficaces individuelles dues aux rayonnements externes dans diverses villes de la préfecture de Fukushima qui avaient été estimées par le NIRS à partir des données de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima pour la période allant du 11 mars au 11 juillet 2011 (la dose efficace due à l'exposition externe au fond naturel de rayonnement a été exclue). Les résultats de cette analyse sont présentés à la figure 4.7 pour les villes situées dans un rayon de 20 km à l'intérieur de la zone et celles en dehors de cette zone. Cette figure montre aussi que, pendant les quatre premiers mois, les doses externes étaient en moyenne inférieures parmi les populations vivant dans un rayon de 20 km à celles des populations vivant à l'extérieur de cette zone, en conséquence de l'évacuation rapide de cette zone. Les résultats enregistrés dans ce rayon de 20 km tendent à montrer une plus grande répartition que dans les localités à l'extérieur de cette zone. La situation s'explique par l'évacuation de membres de la même communauté à divers endroits et, souvent, par d'autres mouvements entraînant des doses reçues différentes. Cette situation complexe a été modélisée par le NIRS au moyen de 18 scénarios d'évacuation.

Il y a des incertitudes liées au recours à des entrevues avec les résidents, à des modèles de mesures environnementales et à des modèles d'estimation des doses pour évaluer les doses reçues par le public. Le contrôle radiologique individuel des membres du public est donc essentiel pour une reconstruction fiable des doses de rayonnements.

La plus importante confirmation des doses individuelles dues à l'exposition externe a été fournie par les données de contrôle radiologique individuel recueillies à l'aide de dosimètres individuels. Lorsque les données relatives au contrôle radiologique individuel ont été disponibles, elles ont permis de comparer les résultats entre les deux approches, au moyen d'hypothèses quant aux habitudes et modèles des populations, pour estimer la *dose efficace* reçue et le contrôle de l'*équivalent de dose individuel* effectivement reçu<sup>95</sup>.

Les résultats indiquent que les doses effectivement reçues, telles que mesurées par les moniteurs individuels, étaient généralement inférieures à celles estimées à partir des questionnaires et de la modélisation. Un exemple de cette comparaison qui a été effectuée par un gouvernement local est présenté à la figure 4.8. Il montre que les doses obtenues par modélisation sont généralement surestimées par rapport aux doses effectivement reçues (cela

---

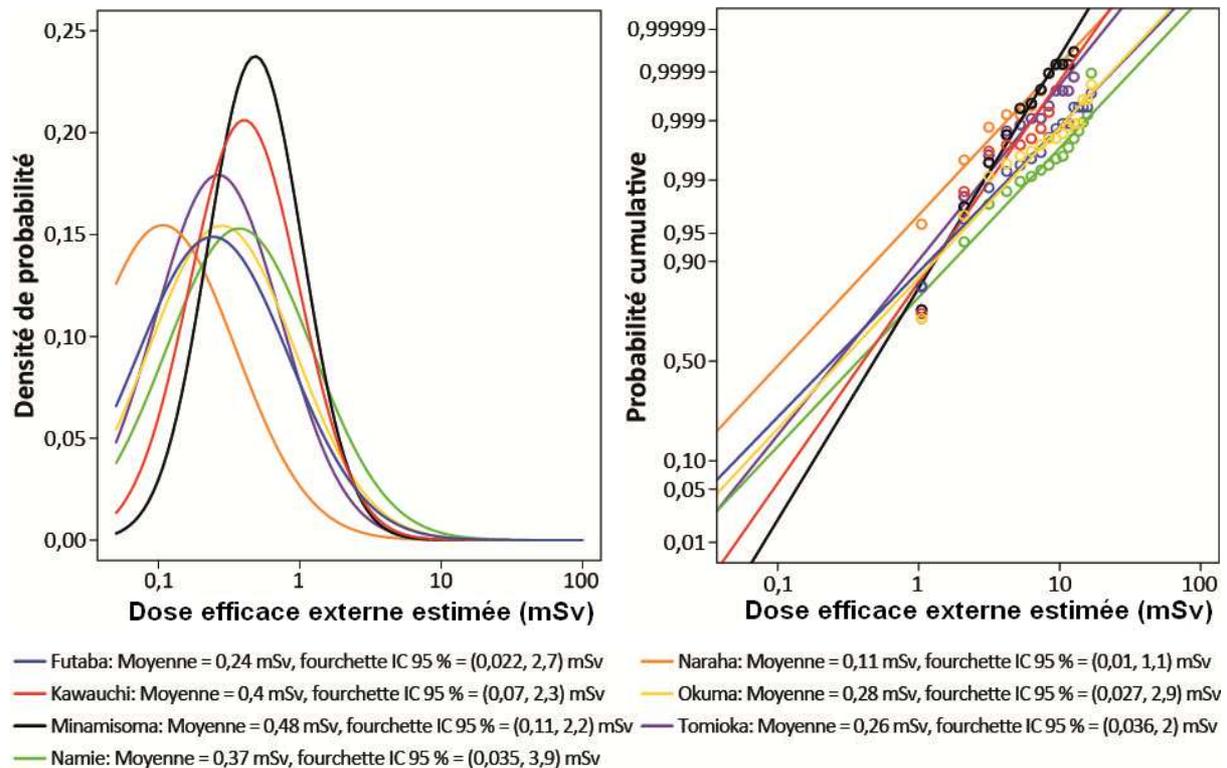
<sup>94</sup> Zone située dans la partie orientale de la préfecture de Fukushima, comprenant les villes de Soma, Minamisoma, Hirono, Naraha, Tomioka, Okuma, Futaba, Namie et Shinti, et les villages de Kawauchi, Kazurao et Iitate, dont beaucoup se trouvaient dans la 'zone d'évacuation' ou la 'zone d'évacuation délibérée'.

<sup>95</sup> La quantité utilisée pour le contrôle radiologique individuel, l'*équivalent de dose individuel*, est un indicateur de la quantité de *dose efficace*.

avait aussi été observé au cours des évaluations de doses après l'accident de Tchernobyl [169]).

Le grand volume d'informations fourni par le Japon à l'AIEA comprend des données sur les équivalents de dose individuels et les résultats des mesures de comptage corps entier.

Ces informations avaient été enregistrées à différents moments et à différentes périodes avec différentes techniques de mesure, et les mesures avaient été effectuées dans de nombreuses régions touchées, mais pas toutes. Le point commun entre ces données est que tous les équivalents de dose individuels sont bas (les doses efficaces engagées estimées à partir du comptage corps entier étaient négligeables ; voir ci-dessous), ce qui s'est traduit par des niveaux de dose efficace comparables aux niveaux habituels de dose efficace du rayonnement de fond.



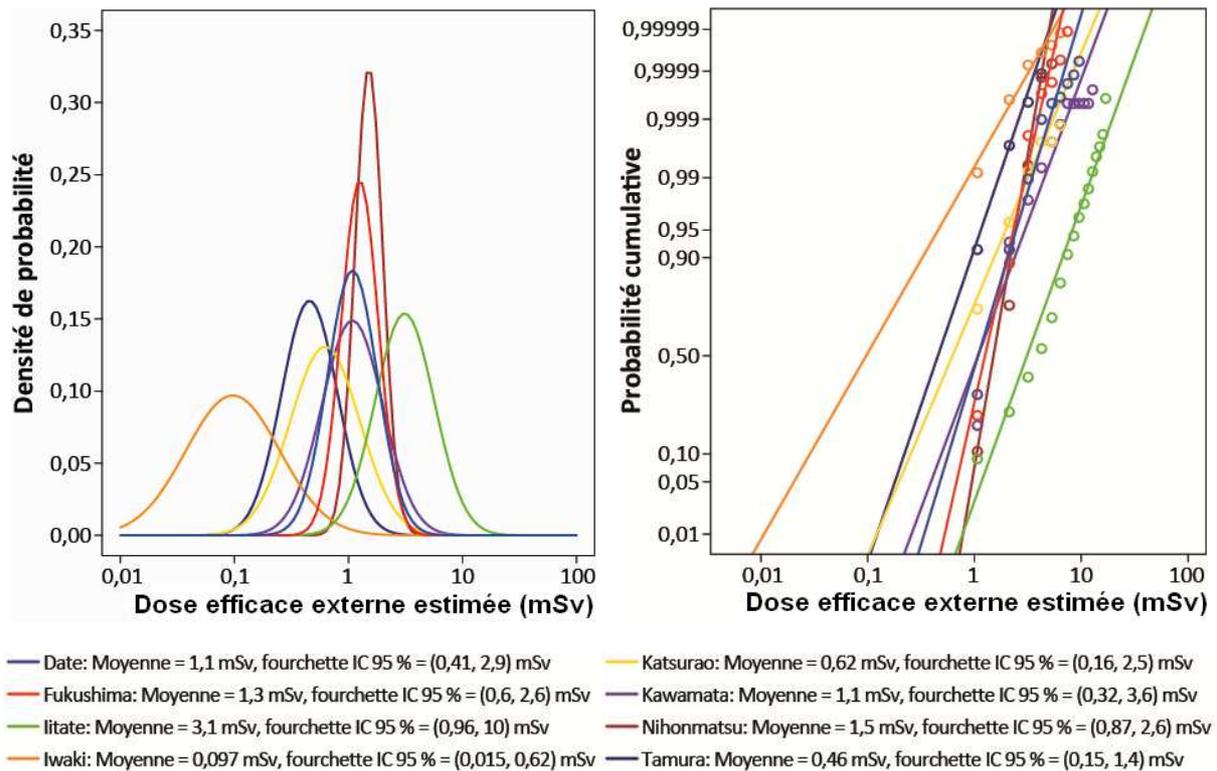


FIG. 4.9. Distributions de la densité de probabilité log-normale théorique normalisée et de la probabilité cumulative des doses efficaces externes estimées dans différents villages et villes de la préfecture de Fukushima pour les quatre mois ayant suivi l'accident sur la base des données de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima. La partie supérieure de la figure présente l'analyse pour les emplacements situés dans un rayon de 20 km (voir la section 3) et la partie inférieure l'analyse pour les emplacements en dehors de cette zone. La légende sous les graphiques montre les doses moyennes et l'intervalle de confiance à 95 % pour ces emplacements. Dans les données initiales, toutes les doses inférieures à 1 mSv ont été regroupées dans le compartiment de 1 mSv.

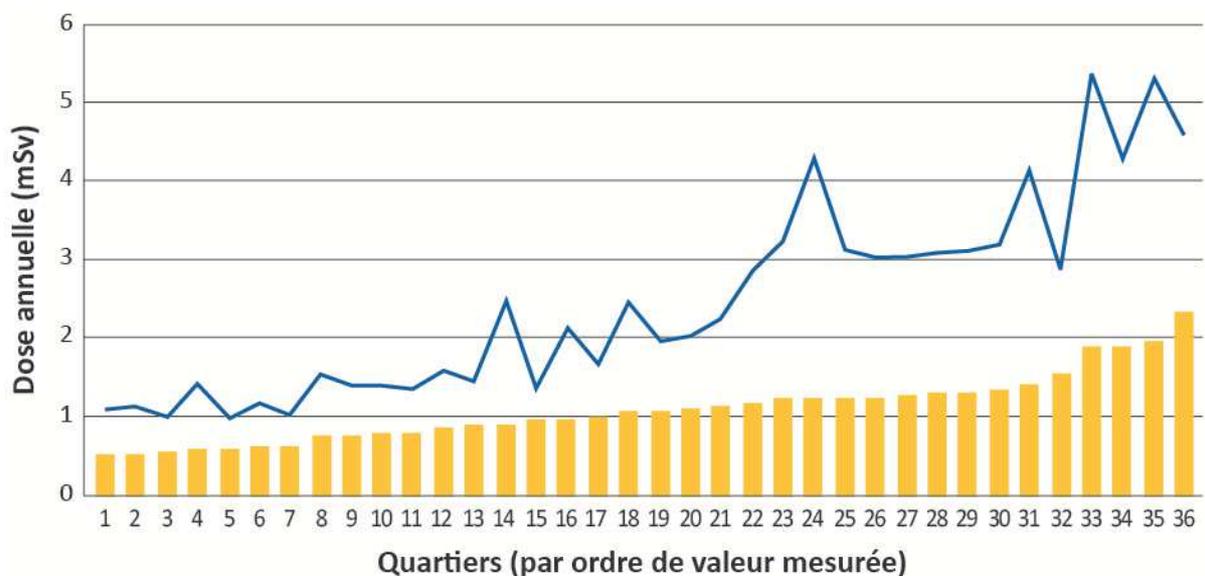


FIG. 4.10. Comparaison des estimations des doses individuelles externes aux mesures pour une ville touchée représentative entre juillet 2012 et juin 2013. Les doses efficaces sont déterminées par une estimation (ligne brisée), en supposant que les sujets restent à l'intérieur et à l'abri pendant 16 heures et à l'extérieur pendant huit heures, et par contrôle radiologique individuel (barres) de l'équivalent de dose individuel, dans divers quartiers de la ville (numérotés) [209].

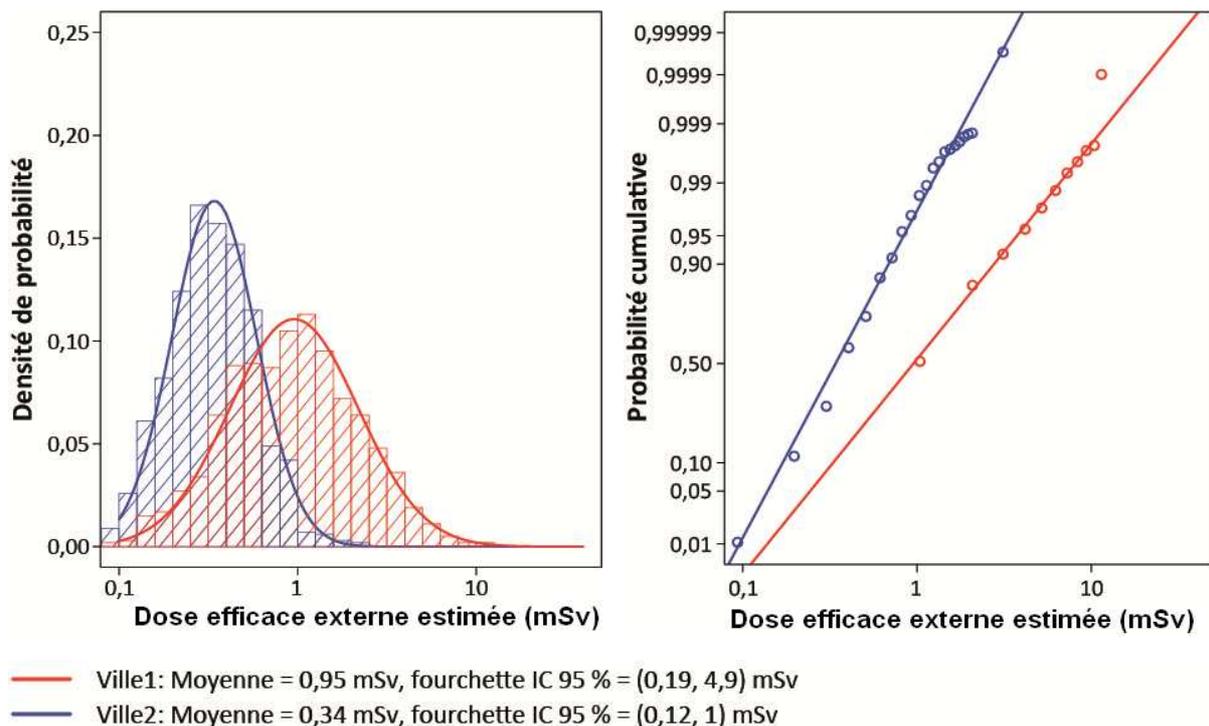


FIG. 4.11. Distribution de probabilité des équivalents de dose individuels contrôlés des membres du public en 2011 fournis par le gouvernement japonais pour deux villes de la zone touchée pour lesquelles il y avait des données annualisées. La distribution de la densité de probabilité théorique normalisée est illustrée pour la ville n° 1 (couleur rouge), la densité de probabilité théorique normalisée est illustrée pour la ville n° 2 (couleur bleue) et la distribution de probabilité cumulative est illustrée pour les deux municipalités (voir l'encadré 4.6). La distribution montre que les équivalents de dose individuels sont faibles, avec des moyennes inférieures à 1 mSv par an et un niveau de confiance de 95 % que les doses efficaces individuelles reçues dans ces municipalités étaient inférieures à 5 mSv.

La figure 4.9 illustre cette analyse pour deux municipalités des zones touchées pour lesquelles il y avait des données annualisées. L'analyse confirme une fois de plus que les équivalents de dose individuels annuels sont faibles, avec des doses efficaces moyennes inférieures à 1 mSv par an et un niveau de confiance de 95 % que les doses efficaces reçues par les gens étaient inférieures à 5 mSv.

### Exposition interne

Les mesures de l'incorporation de radionucléides par comptage corps entier ont été effectuées par le NIRS, la JAEA et d'autres organismes au Japon.

Après l'accident, un contrôle radiologique a été effectué sur plus de 200 000 résidents dans diverses localités de la préfecture de Fukushima. Les niveaux étaient généralement inférieurs aux très basses limites de détection des compteurs corps entier, ce qui indique que l'incorporation de radionucléides dans le corps était faible ou nulle. Il n'était donc ni possible ni nécessaire d'effectuer une analyse statistique détaillée de ces données.

Lorsqu'on pouvait convertir les incorporations mesurées en doses efficaces, en posant des hypothèses sur le moment et la nature de l'incorporation, la très grande majorité des estimations de la dose efficace engagée était inférieure à 1 mSv [210]. Il a été signalé que la

dose efficace engagée estimée à partir des mesures par comptage corps entier de  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  était inférieure à environ 1 mSv chez 99 % des résidents [206].

De nombreuses mesures par comptage corps entier ont été effectuées plusieurs mois après l'accident [211, 212] et ne sont donc souvent applicables qu'au  $^{134}\text{Cs}$  et au  $^{137}\text{Cs}$  en raison de la courte période de l'iode 131. Compte tenu de l'importance des incorporations d'iode 131, tant par inhalation que par ingestion, au cours du premier mois ayant suivi l'accident, les jugements sur l'exposition interne étaient difficiles. Toutefois, on a pu détecter de l'iode 131 dans des mesures effectuées par l'Université de Nagasaki sur des évacués et des visiteurs de courte durée de la préfecture de Fukushima [213]. La dose absorbée estimée la plus élevée à la thyroïde était de 20 mGy (c'est-à-dire une dose équivalente de 20 mSv), avec une dose efficace correspondante de 1 mSv.

Les doses internes reçues au cours de la période initiale variaient selon que les gens consommaient des aliments produits sur place ou ailleurs, ou buvaient l'eau du robinet, au cours des tout premiers jours, avant que les restrictions ne soient pleinement mises en place. Il ressort des études panier du marché que les expositions dues à la consommation de lait, d'aliments et d'eau étaient très faibles, car le lait et les aliments produits sur place n'étaient pas distribués dans les abris, et seule l'eau en bouteille était utilisée pour la boisson et la préparation des *aliments pour nourrisson*.

L'exposition due à la consommation de légumes était faible dans la mesure où les légumes produits localement en plein air étaient très peu, ou n'étaient pas du tout, consommés ; c'était le début du printemps, avant la saison de culture. De fait, les seuls légumes produits sur place consommés étaient ceux cultivés dans les serres, et qui n'étaient pas contaminés.

#### *Doses à la glande thyroïde chez les enfants*

Après un accident nucléaire mettant en jeu des rejets importants d'iode 131, les doses à la glande thyroïde chez les enfants sont un sérieux problème de santé publique. La principale voie potentielle en ce qui concerne les doses au niveau de la thyroïde est généralement l'ingestion de lait contenant de l'iode 131.

Toutefois, l'incorporation habituelle de  $^{131}\text{I}$  à travers le lait de vache était très faible après l'accident en raison d'un certain nombre de facteurs. Les pratiques de production laitière au Japon, comme le fait que les bovins sont généralement gardés dans des abris, ont empêché l'ingestion d'iode 131 par les vaches laitières. L'incorporation d'iode 131 à travers le lait était aussi limitée par la part relativement faible de lait dans l'alimentation des nourrissons et par les restrictions strictes à la consommation de lait imposées par les autorités après l'accident. Il y avait certes d'autres voies d'ingestion d'iode 131, comme la consommation de légumes feuillus et d'eau de boisson, en particulier tout juste après le rejet, mais les restrictions rapides à la consommation d'eau de boisson et d'aliments ont limité l'ingestion par ces voies.

Compte tenu de ces facteurs, l'incorporation d'iode 131 par les enfants est probablement faible et principalement attribuable à l'inhalation. Toutefois, il y a eu des incertitudes en ce qui concerne les estimations de l'incorporation d'iode 131 et des doses équivalentes à la thyroïde chez les enfants au cours des premiers jours qui ont suivi l'accident.

Ces doses ont été estimées en contrôlant les niveaux de rayonnement externe dus à l'activité de  $^{131}\text{I}$  dans la glande. Les mesures ont été effectuées sur la peau, près de la thyroïde, chez

des enfants de régions où on prévoyait des doses élevées à la thyroïde. Un nombre limité de ces mesures directes a été signalé pour les semaines qui ont suivi l'accident. Les résultats d'une étude au cours de laquelle 1 080 mesures ont été effectuées du 26 au 30 mars sur des enfants âgés de 1 à 15 ans dans les villes d'Iwaki et de Kawamata et le village d'Iitate sont résumés dans la figure 4.10 [214].

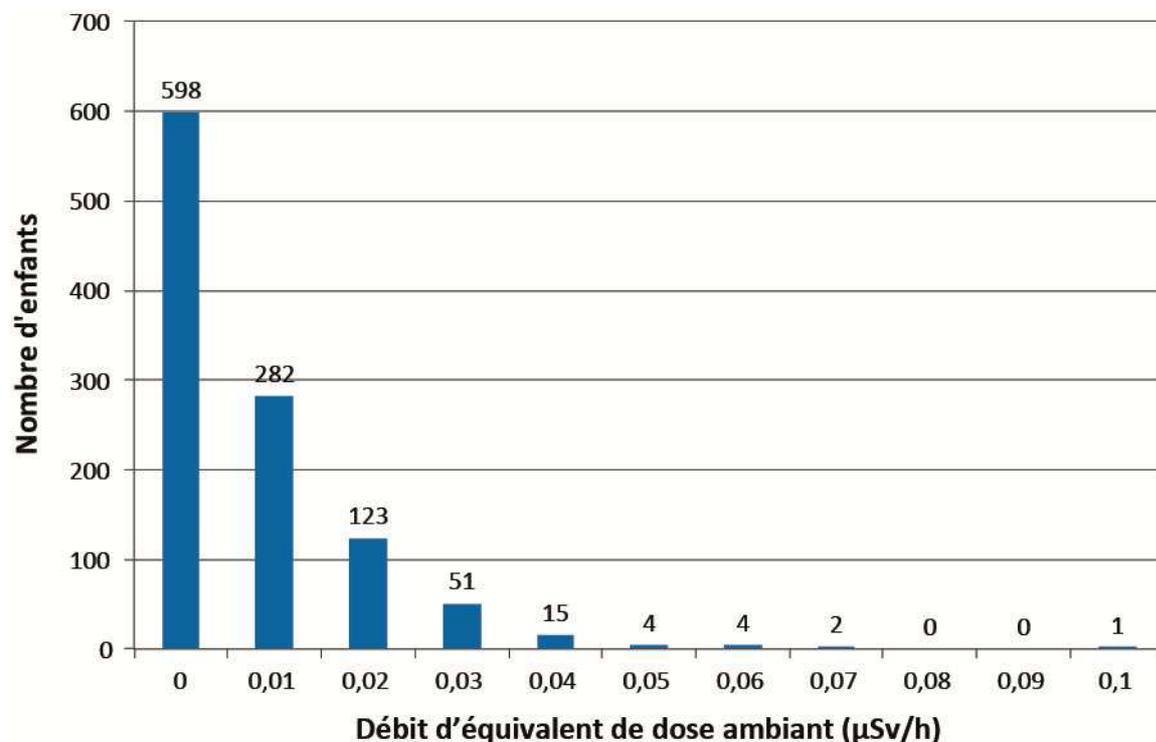


FIG. 4.12. Distribution de la valeur nette du débit de dose mesurée dans la glande thyroïde estimée en soustrayant la valeur du rayonnement de fond de la valeur de lecture [219], ou débits nets d'équivalent de dose ambiant dans la glande thyroïde, chez 1 080 enfants de 0 à 15 ans. Pour 99 % des enfants testés, le débit d'équivalent de dose ambiant mesuré près de la thyroïde était de 0,000 04 mSv par heure ou moins, ce qui correspond à une dose équivalente à la thyroïde d'environ 20 mSv ou moins.

Le débit d'équivalent de dose le plus élevé mesuré près de la thyroïde chez des enfants d'un an était de 0,0001 mSv par heure, ce qui correspond à une dose absorbée à la thyroïde d'environ 50 mGy (une dose équivalente à la thyroïde de 50 mSv). Il a été signalé que les doses équivalentes à la thyroïde, déterminées en mars 2011 à l'aide d'un compteur à scintillation au NaI (TI) chez des enfants dans la zone d'évacuation et les 'zones d'évacuation délibérée', étaient inférieures à environ 10 mSv chez 95,7 % des enfants (avec un maximum de 43 mSv) [214]. Il est probable que toutes les doses étaient inférieures à la valeur d'intervention optimisée générique pour la prophylaxie à l'iode de 100 mGy de dose absorbée engagée évitable à la thyroïde du fait du radio-iode établie dans les NFI de 1996 [137]. Elles étaient aussi inférieures à la dose prévue de 50 mSv au cours des sept premiers jours pour la prophylaxie à l'iode établie dans les NFI révisées [198] comme critère générique pour les actions protectrices et d'autres mesures d'intervention dans les situations d'exposition d'urgence en vue de réduire le risque d'effets stochastiques. En comparaison, les doses absorbées à la thyroïde chez les enfants après l'accident de Tchernobyl ont atteint des milliers de mGy [169, 178], soit des niveaux presque 100 à 1 000 fois plus élevés.

### 4.3.2 Expositions professionnelles

Après l'accident, les membres des équipes d'intervention sur site avaient travaillé dans des conditions extrêmement difficiles et les niveaux de rayonnement étaient très élevés pendant qu'ils cherchaient à stabiliser les réacteurs. Au cours de la période allant de mars 2011 à mars 2012, sur un total de quelque 23 000 travailleurs présents sur le site, 174 avaient dépassé le critère de dose efficace initiale en situation d'urgence de 100 mSv, dont six avaient dépassé le critère de dose efficace (temporairement révisé) en situation d'urgence de 250 mSv. Aucun travailleur ne dépassait une dose efficace de 100 mSv au cours des années suivantes. Un travailleur<sup>96</sup> dépassait la limite de dose efficace d'exposition professionnelle de 50 mSv au cours de la période allant d'avril 2012 à avril 2013 [203]. La figure 4.11 présente la comparaison des doses efficaces reçues par les membres des équipes d'intervention d'urgence à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi entre mars 2011 et octobre 2014.

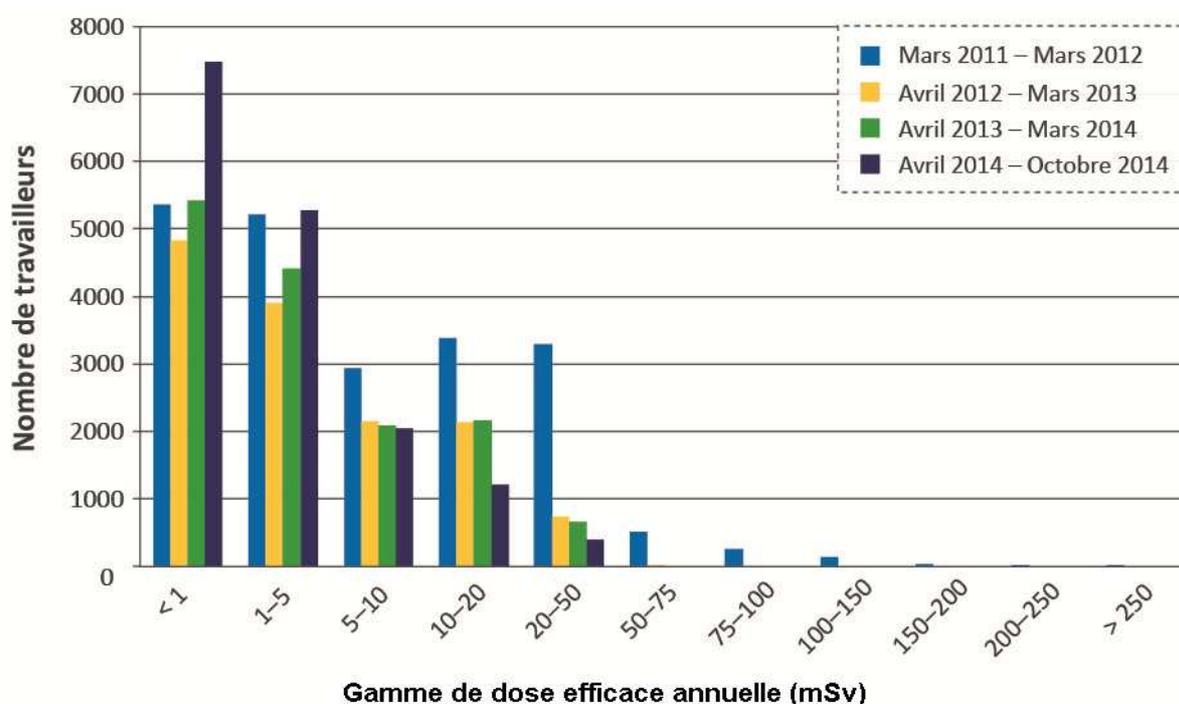


FIG. 4.13. Comparaison des doses efficaces des membres des équipes d'intervention à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi entre mars 2011 et octobre 2014 (employés de la TEPCO et sous-traitants). Doses efficaces élevées reçues au cours de l'année ayant suivi l'accident. En 2012, les doses efficaces reçues par les travailleurs étaient faibles et comparables à celles reçues dans les conditions normales d'exploitation [215].

<sup>96</sup> Ce travailleur a été classé comme ayant reçu la dose limite en situation d'urgence de 100 mSv au lieu de la dose limite d'exposition professionnelle de 50 mSv par an.

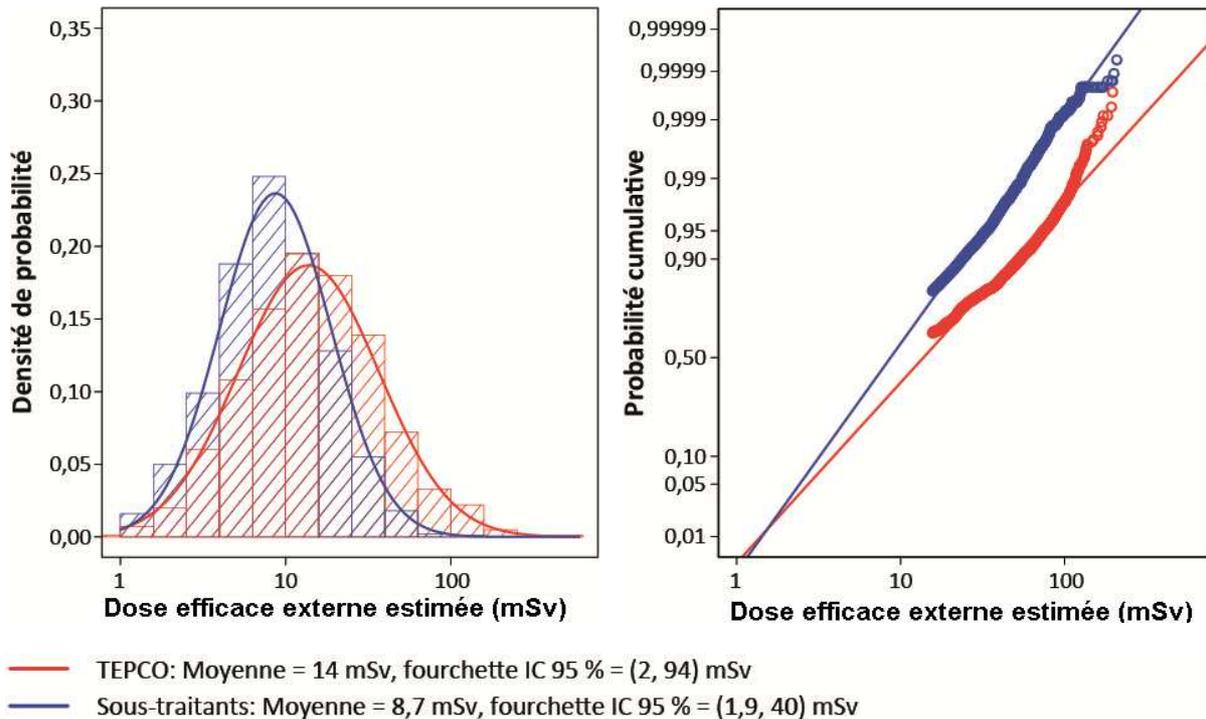


FIG. 4.14. Distribution de la densité de probabilité théorique normalisée et distribution de probabilité cumulative (voir l'encadré 4.6) de l'équivalent de dose individuel pour les travailleurs de la TEPCO et les sous-traitants pour l'année 2011. Les doses reçues par les travailleurs de la TEPCO étaient généralement plus élevées que celles reçues par les sous-traitants parce que les employés de la TEPCO travaillaient dans des zones où les doses étaient plus élevées [215].

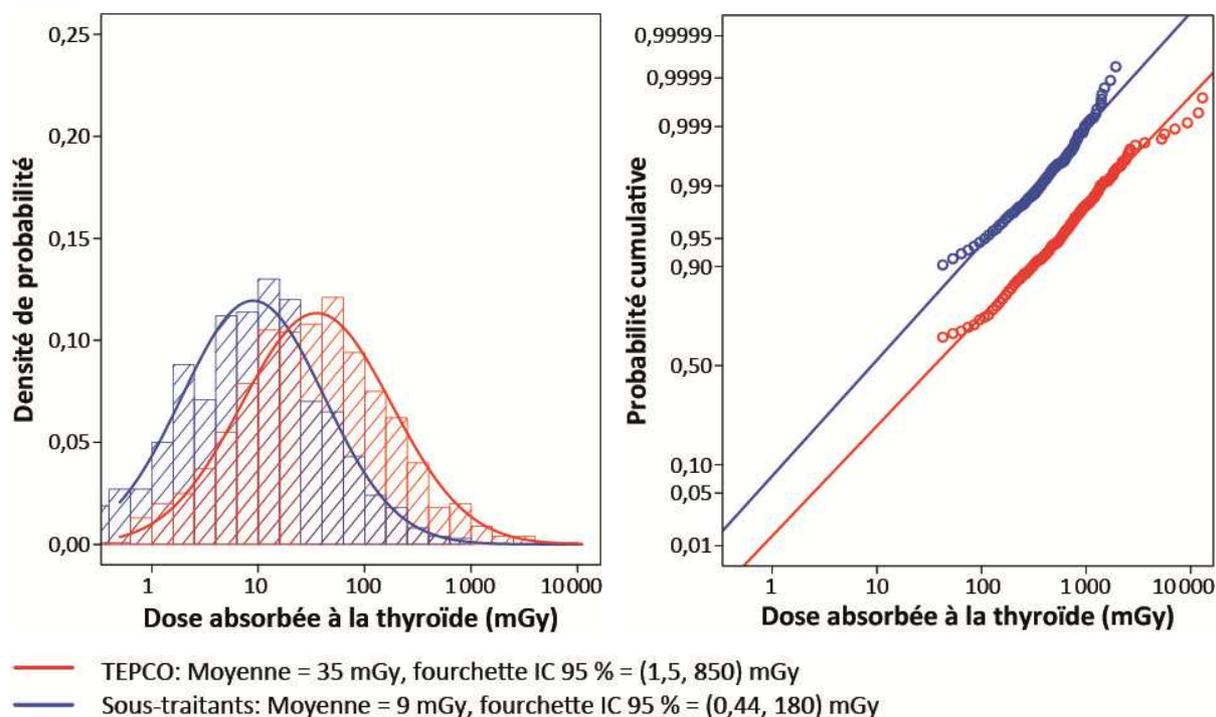
Les valeurs des équivalents de dose individuels des travailleurs de la TEPCO et des sous-traitants ont été communiquées par celle-ci et soumises à une analyse statistique. Les résultats sont présentés à la figure 4.12.

Au début, le principal facteur qui a contribué aux doses efficaces, en particulier aux doses reçues par les six membres d'équipes d'intervention d'urgence qui avaient dépassé le critère de dose temporairement révisé pour les membres de ces équipes, était l'exposition interne due à l'incorporation de radionucléides. Cela était imputable aux problèmes liés aux conditions de travail difficiles, à l'utilisation inappropriée des respirateurs et à une formation insuffisante.

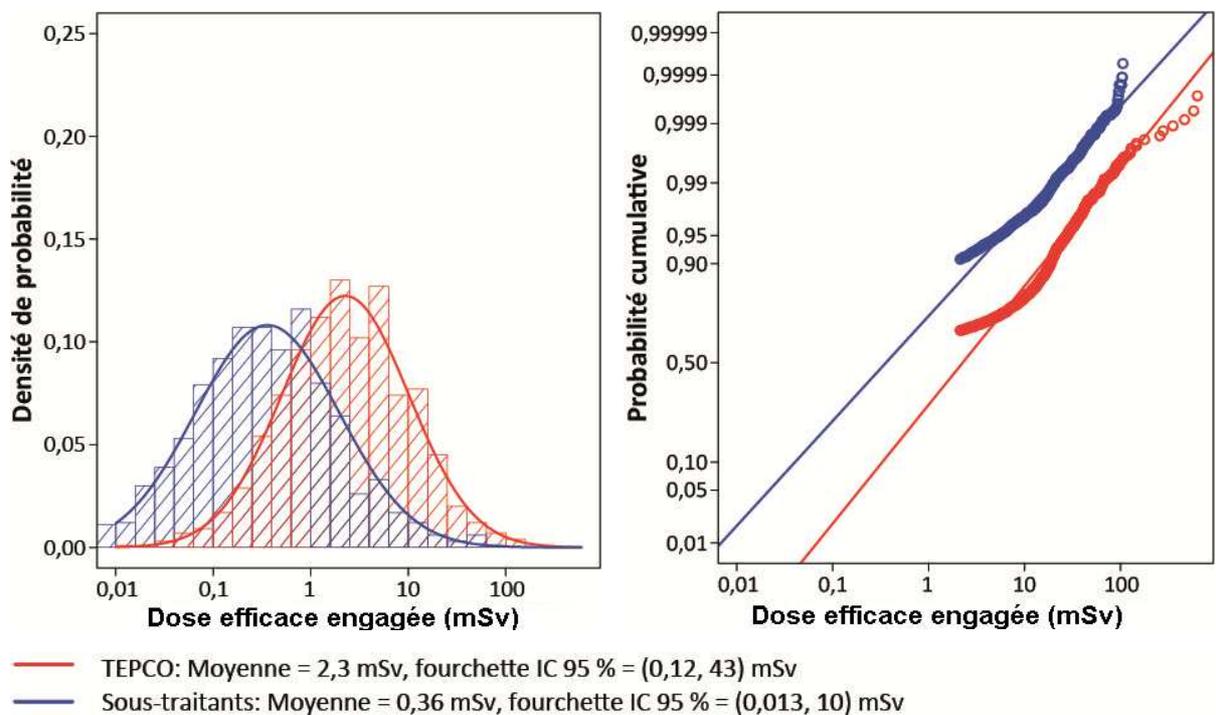
Les doses internes étaient principalement des doses équivalentes à la thyroïde due à l'inhalation d'iode 131. Certes, la majorité des gens qui travaillaient à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi avaient reçu des doses équivalentes à la thyroïde inférieures à 100 mSv, mais 1 757 d'entre eux avaient reçu des doses plus élevées, et pour 17 et deux d'entre eux, celles-ci étaient supérieures à 2 000 mSv et à 12 000 mSv respectivement [216].

Il y a plusieurs incertitudes en ce qui concerne les estimations des doses de rayonnements aux travailleurs dues à l'exposition interne, en particulier les doses équivalentes à la thyroïde. Par exemple, le scénario hypothétique d'incorporation de radionucléides dans l'organisme (par exemple le moment choisi) est crucial pour l'estimation de la dose interne. Il s'est aussi écoulé du temps avant la réalisation de mesures à la thyroïde en raison des opérations de secours et de la situation. Le Ministère de la santé, du travail et des affaires sociales a conduit une réévaluation de la dose efficace engagée des membres des équipes d'intervention. Il a encouragé la normalisation des méthodologies d'évaluations prudentes de la dose interne pour éviter de sous-estimer les doses autant que raisonnablement possible [217].

L'analyse statistique de la distribution des doses absorbées à la thyroïde et des doses efficaces engagées estimées dues à l'exposition interne est présentée à la figure 4.13.



a)



b)

FIG. 4.15. Distribution de la densité de probabilité théorique normalisée et distribution de la probabilité cumulative des doses internes (voir l'encadré 4.6). a) Dose absorbée à la thyroïde, et b) dose efficace engagée résultante. La distribution

*plus grande que prévu dans les doses plus faibles pourrait vouloir dire que des doses équivalant au niveau de détection étaient attribuées à tous ceux chez qui la radioactivité était indétectable [215].*

Les expositions professionnelles des travailleurs sur site sont conformes aux constatations de l'UNSCEAR. Les réévaluations des doses reçues par les travailleurs de la TEPCO et les sous-traitants, qui étaient devenues disponibles après la publication du rapport de l'UNSCEAR, ont été utilisées dans l'analyse statistique des doses dans le présent rapport, réduisant les incertitudes. Il reste certaines incertitudes en ce qui concerne les doses dues aux radionucléides à courte période, l'influence du fort rayonnement de fond dans les premières mesures de comptage corps entier, les délais des mesures thyroïdiennes et le caractère suffisant des informations relatives au dosage biologique. Des organisations sur place au Japon œuvrent pour réduire encore les incertitudes dans l'évaluation de la dose d'exposition professionnelle, en particulier les évaluations de l'exposition interne (par exemple référence [218]).

Les pompiers, les policiers et le personnel des forces d'auto-défense japonaises ont aussi participé à une série d'activités d'urgence sur site (voir la section 3). Aucun membre de ce groupe n'a reçu de dose efficace supérieure à 100 mSv, et la majorité a reçu moins de 10 mSv. Sur plus de 8 000 personnes qui ont travaillé sur le site, pour lesquelles des informations dosimétriques étaient disponibles, cinq ont reçu des doses efficaces supérieures à 10 mSv mais inférieures à 20 mSv. La dose efficace maximum enregistrée pour les officiers de police travaillant hors site était d'environ 5 mSv.

Du personnel venu d'autres pays a participé aux opérations d'urgence. Il ressort des données disponibles que chez les gens venus des États-Unis d'Amérique qui ont aidé ou ont effectué des activités de contrôle radiologique de l'environnement dans la région de Fukushima, la dose efficace reçue était de 0,12 mSv pour le personnel militaire et de 0,68 mSv pour le personnel du Ministère de l'énergie [219], toutes des valeurs inférieures aux limites réglementaires. Au sein du personnel de l'AIEA qui a participé au contrôle radiologique de l'environnement et fourni des conseils en matière de protection et de sûreté, la dose efficace moyenne était d'environ 0,5 mSv, et une personne avait reçu une dose efficace d'environ 2,5 mSv due à des expositions externes.

#### 4.4. EFFETS SUR LA SANTÉ

***Aucun effet sanitaire précoce dû aux rayonnements et pouvant être attribué à l'accident n'a été observé parmi les travailleurs ou la population.***

***La période de latence avant l'apparition d'effets sanitaires tardifs dus aux rayonnements pouvant être de plusieurs décennies, il est impossible de sous-estimer la possibilité que de tels effets apparaissent dans une population exposée, en se basant sur des observations faites quelques années après l'exposition. Toutefois, vu les faibles niveaux de doses constatés parmi la population, les conclusions du présent rapport sont conformes à celles du rapport présenté par l'UNSCEAR à l'Assemblée générale des Nations Unies. Selon ce rapport, « on ne s'attend pas à une augmentation observable des effets sanitaires radio-induits chez les personnes du public exposées et leurs descendants » (constat fait dans le contexte des conséquences sur la santé liées aux « niveaux et effets de l'exposition aux rayonnements due à l'accident nucléaire consécutif au séisme et au tsunami majeurs qui ont frappé l'est du Japon en 2011 ») [148]. L'UNSCEAR a conclu pour le groupe des travailleurs ayant reçu des doses efficaces de 100 mSv ou plus qu'« une augmentation du risque de cancer à l'avenir est probable. Cependant, aucune augmentation observable de***

*l'incidence du cancer dans ce groupe n'est attendue, car il est difficile de confirmer une augmentation aussi faible de l'incidence par rapport aux fluctuations statistiques normales de l'incidence du cancer » [148].*

*L'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima a été mise en place pour contrôler la santé de la population affectée de la préfecture de Fukushima. Elle vise à détecter et traiter les maladies à un stade précoce, mais aussi à prévenir les maladies liées au mode de vie. Au moment de l'établissement du présent rapport, un dépistage intensif de maladies liées à la thyroïde chez les enfants était en cours dans le cadre de cette enquête. On a recours à du matériel très sensible, qui détecte des anomalies thyroïdiennes asymptomatiques parmi un grand nombre d'enfants examinés (détection qui aurait été impossible par des moyens cliniques). Il est peu probable que les anomalies répertoriées dans l'enquête soient associées à une exposition à des rayonnements consécutive à l'accident ; elles dénotent plus vraisemblablement de l'existence à l'état naturel d'anomalies thyroïdiennes chez les enfants de cet âge. L'incidence du cancer de la thyroïde chez les enfants est l'effet sanitaire le plus probable après un accident mettant en jeu des rejets importants d'iode radioactif. Les doses à la thyroïde attribuables à l'accident étant généralement faibles, une augmentation des cas de cancer de la thyroïde attribuables à cet accident est improbable. Toutefois, des incertitudes persistaient quant aux doses équivalentes à la thyroïde reçues par les enfants immédiatement après l'accident.*

*On n'a pas observé d'effets des rayonnements dus à une exposition prénatale et on ne devrait pas en observer car les doses enregistrées sont bien inférieures au seuil à partir duquel ces effets pourraient avoir lieu. Aucun cas d'interruption non volontaire de grossesse attribuable à la situation radiologique n'a été signalé. En ce qui concerne les effets héréditaires possibles sur leurs descendants de l'exposition à laquelle les parents auraient été confrontés, l'UNSCEAR a conclu qu'en général, « bien qu'ayant été démontrée dans les études animales, aucune augmentation de l'incidence des effets héréditaires chez l'homme ne peut actuellement être imputée à l'exposition aux rayonnements » [167].*

*Des troubles psychologiques ont été signalés dans la population touchée par l'accident nucléaire. Certaines de ces personnes ayant souffert des effets combinés d'un séisme majeur, d'un tsunami dévastateur et de l'accident, il est difficile d'évaluer dans quelle mesure ces effets pouvaient être attribués exclusivement à l'accident nucléaire. L'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima, qui a notamment porté sur la santé mentale et le mode de vie, révèle des problèmes psychologiques associés, tels qu'une hausse de l'anxiété et de l'état de stress post-traumatique, dans certains groupes vulnérables de la population. L'UNSCEAR a estimé que l'effet sanitaire le plus important, qui affecte le bien-être psychologique et social, est lié à l'impact considérable du séisme, du tsunami et de l'accident nucléaire, ainsi qu'à la peur et à la déconsidération associées au risque perçu d'exposition aux rayonnements ionisants [148].*

Un examen médical complet de la population affectée est effectué dans le cadre de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima, ainsi qu'il est décrit dans l'encadré 4.2. Le programme vise à détecter et traiter les maladies à un stade précoce, mais aussi à prévenir les maladies liées au mode de vie. Des tests supplémentaires tels que la numération leucocytaire différentielle sont réalisés en plus des examens médicaux généraux pris en charge sur le lieu de travail ou par le gouvernement local [220].

#### 4.4.1 Effets sanitaires précoces induits par les rayonnements

L'exposition aux rayonnements peut induire des effets sanitaires en raison de cellules tuées. La sévérité des effets est fonction de la dose et peut aller de maladies cutanées à l'affaiblissement de tissus vitaux. Ces effets apparaissent pour la plupart rapidement après une exposition à une dose supérieure aux seuils connus pour les différents effets possibles. Les informations disponibles montrent que personne n'a reçu de dose d'un niveau égal ou supérieur à celui susceptible de provoquer un syndrome d'irradiation aiguë à la suite de l'accident. Deux travailleurs ont eu les jambes exposées à de l'eau contaminée provenant du bâtiment des turbines. Selon les relevés, les doses équivalentes à la peau de ces travailleurs étaient inférieures au seuil estimé des effets déterministes<sup>97</sup> [81] et aux limites internationales applicables<sup>98</sup> [222].

L'UNSCEAR avait déjà observé qu'« aucun décès ou syndrome aigu lié à une exposition aux rayonnements ionisants n'a été enregistré parmi les travailleurs et les personnes du public exposés du fait de l'accident » [223].

#### 4.4.2 Effets sanitaires tardifs possibles induits par les rayonnements

Dans les circonstances et les conditions sévères de l'accident, parmi les travailleurs impliqués dans les opérations d'urgence, soit environ 23 000 personnes, 174 présentaient une dose supérieure à 100 mSv. L'UNSCEAR a conclu que ces travailleurs « devraient présenter un risque accru de cancer à l'avenir. Cependant, aucune augmentation perceptible de l'incidence des cancers au sein de ce groupe n'est attendue, car il est difficile de distinguer une incidence aussi faible des fluctuations statistiques normales de l'incidence des cancers » [223].

En ce qui concerne les effets tardifs possibles pour la population, des estimations internationales ont été publiées avant le présent rapport (voir l'encadré 4.1). L'OMS a fait part d'une estimation hypothétique<sup>99</sup> des risques vie entière additionnels dans la zone aux doses les plus élevées, par rapport aux taux de référence pour la leucémie, le cancer du sein, le cancer de la thyroïde et l'ensemble des cancers solides, sur la base de ses estimations de dose préliminaires<sup>100</sup> [146, 147].

---

<sup>97</sup> Selon les estimations de la CIPR pour l'exposition de la peau, une réaction rapide telle qu'un érythème transitoire précoce est constatée quelques heures après une exposition à des doses supérieures à 2 000 mGy si la zone exposée est relativement importante. Selon les mêmes estimations, les doses de seuil approximatives sont les suivantes : érythème transitoire précoce 2 000 mGy, réaction érythémateuse principale 6 000 mGy, épilation temporaire 3 000 mGy, épilation permanente 7 000 mGy, desquamation sèche 14 000 mGy, desquamation humide 18 000 mGy, ulcération secondaire 24 000 mGy, érythème tardif 15 000 mGy, nécrose ischémique du derme 18 000 mGy, atrophie dermique (premier stade) 10 000 mGy, télangiectasie 10 000 mGy et nécrose dermique (stade avancé) >15 000 mGy [221].

<sup>98</sup> La limite de dose recommandée pour la peau en milieu professionnel dans des situations d'exposition planifiée est une dose équivalente de 500 mSv par an (dose moyenne sur 1 cm<sup>2</sup> de peau quelle que soit la zone exposée) (voir le tableau 6 de la référence [129] et l'appendice III de la référence [198]). En ce qui concerne la peau, le critère générique établi pour les doses aiguës auxquelles des actions protectrices et autres mesures seraient normalement mises en œuvre en toutes circonstances pour éviter ou réduire le plus possible les effets déterministes graves est de 10 000 mGy sur 100 cm<sup>2</sup> de derme (structures de la peau à une profondeur de 40 mg/cm<sup>2</sup> (ou 0,4 mm) sous la surface) (voir le tableau IV.1 de la référence [198]).

<sup>99</sup> Vu le peu d'informations disponibles à ce moment, l'évaluation a reposé sur un certain nombre d'hypothèses prudentes. L'OMS a indiqué que toutes les mesures étaient prises pour éviter toute sous-estimation des doses et que certaines surestimations de doses avaient pu se produire [146].

<sup>100</sup> L'Évaluation des risques pour la santé de l'OMS estimait que « dans les deux zones les plus touchées de la préfecture de Fukushima, les doses efficaces de rayonnement s'échelonnent, d'après les estimations préliminaires, de 12 à 25 mSv » et que « dans la zone aux doses les plus élevées, les risques vie entière additionnels qui ont été estimés par rapport aux taux de

L'UNSCEAR, suivant la mise à jour de son estimation de dose, a indiqué ce qui suit :

« S'agissant des personnes du public, tant les doses reçues au cours de la première année que celles estimées pour la vie entière sont généralement faibles, voire très faibles. Aucune augmentation perceptible de l'incidence des effets liés aux rayonnements ionisants sur la santé de ces personnes et de leurs descendants n'est attendue » [223].

Avant d'établir un rapport sur l'accident, l'UNSCEAR avait informé l'Assemblée générale des Nations Unies que « les augmentations de l'incidence des effets sur la santé humaine ne peuvent pas être attribuées de manière fiable à une exposition chronique à des niveaux correspondant aux niveaux moyens de rayonnement ambiant observés dans le monde » [167]. Selon les informations disponibles, les membres du public ont reçu des doses annuelles qui n'étaient pas supérieures à celles des niveaux normaux de rayonnement de fond. Ceci indique qu'aucune augmentation perceptible de l'incidence des effets liés aux rayonnements ionisants sur la santé de ces personnes et de leurs descendants n'est attendue, conformément aux estimations de l'UNSCEAR.

De manière générale, cette estimation vaut aussi pour le cas particulier du cancer de la thyroïde chez les adultes. Chez les adultes, le risque est bien plus faible que celui qui touche les enfants exposés à des rayonnements (voir le passage ci-après consacré aux effets sur la thyroïde chez les enfants). Compte tenu des doses équivalentes à la thyroïde qui ont été enregistrées, une augmentation perceptible des cas de cancer de la thyroïde parmi la population adulte est peu probable.

On pourrait estimer que les quelques travailleurs qui ont reçu des doses équivalentes élevées (voir la section 4.3.2) présentent un risque accru de troubles de la thyroïde. Ces niveaux de dose équivalente peuvent limiter le fonctionnement de cette glande de manière telle à provoquer une hypothyroïdie. On ne se s'attend pas à des cas d'hyperthyroïdie car les doses équivalentes enregistrées sont inférieures au niveau au-dessus duquel (15 000 mSv environ) de tels effets pourraient apparaître. Il est difficile de quantifier les effets pour les doses équivalentes faibles et moyennes dans la thyroïde, qui sont les doses que reçoivent en général les membres des équipes d'intervention, mais aussi de déterminer le risque de survenance et la magnitude de ces effets.

#### **4.4.3 Effets des rayonnements chez les enfants**

Le risque de survenance d'effets liés aux rayonnements chez les enfants est une question particulièrement préoccupante. Les recommandations et normes internationales en matière de radioprotection tiennent compte des enfants dans une population exposée. À des fins de radioprotection, elles partent du postulat que le risque radiologique nominal potentiel pour

---

référence pour la leucémie, le cancer du sein, le cancer de la thyroïde et l'ensemble des cancers solides, devraient correspondre à la limite supérieure du risque car les options méthodologiques utilisées ont été délibérément choisies de sorte à éviter toute sous-estimation des risques. Pour la leucémie, concernant le sujet de sexe masculin exposé au stade de nourrisson, les risques vie entière devraient augmenter de 7 % environ au maximum par rapport aux taux de référence ; pour le cancer du sein, concernant le sujet de sexe féminin exposé au stade de nourrisson, les risques vie entière estimés augmentent de 6 % environ au maximum par rapport aux taux de référence ; pour l'ensemble des cancers solides, concernant le sujet de sexe féminin exposé au stade de nourrisson, les risques vie entière estimés augmentent de 4 % environ par rapport aux taux de référence ; et, pour le cancer de la thyroïde, concernant le sujet féminin exposé au stade de nourrisson, le risque vie entière estimé augmente de 70 % environ au maximum par rapport aux taux de référence. Ces pourcentages représentent des augmentations relatives estimées par rapport aux taux de référence et non des risques absolus de développer de tels cancers ». [147]

toute une population, c'est-à-dire une population comprenant des enfants<sup>101</sup>, est supérieur d'environ 30 % à celui d'une population adulte (les risques nominaux de ce type ont été estimés en fonction d'études épidémiologiques de populations exposées à des doses de rayonnements élevées) [129, 224].

### *Effets sur la thyroïde chez les enfants*

S'agissant du cancer de la thyroïde, les enfants sont plus radiosensibles que les adultes. Pour une absorption d'iode radioactif donnée, la dose à la thyroïde est huit ou neuf fois plus élevée chez les nourrissons que chez les adultes. La présence importante de <sup>131</sup>I dans l'environnement peut conduire à un cancer de la thyroïde chez les enfants. L'incidence normale de certains types de cancer de la thyroïde chez les enfants est faible et la sensibilité de la glande thyroïde des enfants aux rayonnements est élevée. En raison de cette sensibilité plus élevée, il était important, après l'accident, d'assurer un suivi en termes de dépistage afin de détecter rapidement toute augmentation potentielle de l'incidence de ce type de cancer [225].

Les résultats d'échographies de la thyroïde effectuées pendant trois ans ont été enregistrés dans le cadre de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima [226]. Le programme de dépistage a concerné environ 370 000 enfants âgés de 0 à 18 ans au moment de l'accident. Depuis 2014, ce dépistage initial est suivi d'un examen complet de la thyroïde, et les résidents seront réexaminés régulièrement par la suite.

Les examens s'effectuent au moyen d'un matériel d'échographie très sensible. Le dépistage a permis de détecter des anomalies asymptomatiques<sup>102</sup> de la thyroïde, comme des nodules, des kystes et des cancers, qui n'auraient pu l'être si les enfants asymptomatiques avaient été examinés au moyen de matériel standard. Des résultats similaires ont été obtenus lorsque le même dépistage a été effectué sur des enfants résidant loin des zones touchées par l'accident [227]. La période de latence du cancer de la thyroïde radio-induit est plus longue que les quatre années qui s'étaient écoulées depuis l'accident au moment de l'établissement du présent rapport. Un cancer de la thyroïde a dans de nombreux cas été décelé chez de grands adolescents, mais jamais parmi le groupe le plus vulnérable des enfants qui avaient moins de 5 ans le 11 mars 2011. La proportion de cas suspects ou malins était pratiquement identique dans toutes les régions de la préfecture de Fukushima lors du dépistage initial effectué en 2011-2013 [228]. Ces éléments font penser que les anomalies thyroïdiennes détectées dans l'enquête ne sont probablement pas associées à une exposition aux rayonnements consécutive à l'accident.

Sur la base des données disponibles à propos de mesures indirectes de l'équivalent de dose externe en raison d'une activité à la thyroïde (figure 4.10), les doses équivalentes de la thyroïde chez les enfants semblent avoir été faibles. Pour les niveaux de doses enregistrés, une augmentation des cas de cancer de la thyroïde chez les enfants ne serait pas attribuable à une exposition aux rayonnements.

---

<sup>101</sup> Le terme « enfants » recouvre les nourrissons, les enfants et les adolescents exposés.

<sup>102</sup> Les effets asymptomatiques sont ceux qui ne provoquent aucun symptôme ; autrement dit, rien n'indique de manière visible la présence d'une maladie pour les enfants, leurs parents, voire les médecins.

#### 4.4.4 Effets sanitaires prénataux induits par les rayonnements

L'effet d'une exposition prénatale (ou « anténatale ») est l'expression utilisée pour faire référence aux effets qu'ont les rayonnements sur l'embryon et le fœtus. À doses absorbées inférieures à 100 mGy, les conséquences létales d'une irradiation pendant la période préimplantatoire du développement embryonnaire sont considérées comme très peu fréquentes, et il existe un seuil de dose absorbée d'environ 100 mGy pour l'induction d'autres effets [229-231]. Les doses absorbées à l'embryon et au fœtus pouvant être attribuées à l'accident étaient bien inférieures au seuil de dose absorbée auquel ces effets se manifestent.

Le volet de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima (voir l'encadré 4.2) consacré à la grossesse a permis d'apporter des soins médicaux et un soutien appropriés aux jeunes mères, qui ont reçu un manuel sur la santé de la mère et de l'enfant entre le 1<sup>er</sup> août 2010 et le 31 juillet 2011, et à leurs enfants. Cette enquête est actualisée chaque année pour tenir compte des nouvelles données, en particulier en ce qui concerne les grossesses et les naissances [162]. L'objectif consistait à recueillir des données susceptibles d'améliorer les soins obstétricaux et prénataux et à apporter un appui aux femmes qui étaient enceintes ou avaient accouché dans la préfecture de Fukushima après l'accident. Les résultats de l'enquête n'ont pas fait apparaître d'effets négatifs significatifs, et les incidences d'enfants mort-nés, de naissances prématurées, d'insuffisances pondérales à la naissance et d'anomalies congénitales ont été jugées similaires aux autres cas ailleurs au Japon [232].

Dans un rapport adressé à l'Assemblée générale des Nations Unies, l'UNSCEAR a indiqué que « bien qu'ayant été démontrée dans les études animales, aucune augmentation de l'incidence des effets héréditaires chez l'homme ne peut actuellement être imputée à l'exposition aux rayonnements » [167]. Le rapport considère dès lors qu'aucun effet héréditaire ne sera attribuable à l'accident.

À la suite d'accidents impliquant un risque de radioexposition important, certaines femmes enceintes consultent le corps médical afin de savoir s'il convient de mettre un terme à leur grossesse. Dans le cas de l'accident de Fukushima Daiichi, une étude menée par le département d'obstétrique et de gynécologie de l'Université de médecine de Fukushima a montré qu'aucune interruption de grossesse dite de convenance n'avait été effectuée après l'accident [232, 233].

#### 4.4.5 Conséquences psychologiques

Même si elles ne sont pas directement attribuables à la radioexposition, les conséquences psychologiques ont été prises en considération dans le présent rapport. L'UNSCEAR a estimé que :

« ... l'effet sanitaire le plus important, qui affecte le bien-être psychologique et social, est lié à l'impact considérable du séisme, du tsunami et de l'accident nucléaire, ainsi qu'à la peur et à la déconsidération associées au risque perçu d'exposition aux rayonnements ionisants. Des effets tels que des dépressions et des symptômes de stress post-traumatique ont déjà été signalés ». [148]

Un certain nombre d'études sur les troubles psychologiques à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi ont été menées. Elles ont porté dans une large mesure sur les femmes enceintes et les jeunes mères, les secouristes et les travailleurs affectés aux opérations

d'assainissement, ainsi que les personnes évacuées. Certaines conséquences psychologiques ont été relevées dans la population affectée [234-244]<sup>103</sup>. Selon ces études, la communication et la diffusion d'informations précises à l'intention du public dès les premiers moments de l'accident et lors des suites de celui-ci ont permis d'atténuer les réactions psychologiques non désirées [150].

L'étude la plus importante est celle menée dans le cadre de l'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima [248], et consacrée à la santé mentale et au mode de vie, qui vise à fournir des soins adaptés, principalement aux personnes évacuées qui présentent un risque plus élevé de développement de problèmes de santé mentale tels qu'un état de stress post-traumatique, de l'anxiété et du stress. Les questionnaires utilisés contenaient des mesures standard de symptômes liés à un état de stress post-traumatique et de détresse psychologique (anxiété), ainsi que des questions portant sur des préoccupations à propos de la radioexposition et des répercussions négatives du séisme et du tsunami (perte de membres de la famille ou d'autres parents, dégâts aux habitations, perte d'emploi ou de revenus, déménagement dans la préfecture de Fukushima ou hors de celle-ci, etc.).

Les résultats de l'enquête sur la santé mentale et le mode de vie ont été publiés [236]. Ils confirment que la population affectée a fait face à un sentiment de détresse important et à de nombreux symptômes de stress post-traumatique. Ils montrent que, selon les données socio-démographiques, de nombreux ménages évacués ont été séparés après la catastrophe et ont dû déménager plusieurs fois, ce qui pourrait avoir provoqué des troubles psychologiques.

Deux autres méthodes ont été utilisées pour évaluer la santé mentale des adultes évacués [249, 250], et une autre enquête a porté sur l'évaluation de l'alcoolisme [251]. Ces enquêtes ont montré que les symptômes liés à la santé mentale étaient largement supérieurs à ce qu'on aurait pu attendre d'enquêtes de la population dans son ensemble [237]. L'état de santé mentale des enfants a été évalué au moyen d'un autre questionnaire [252, 253], faisant apparaître certaines difficultés psychologiques parmi les enfants examinés, avec une amélioration relative d'une année à l'autre.

Des enquêtes ont aussi été effectuées auprès des travailleurs affectés. Une enquête comparative menée auprès de personnes travaillant aux centrales de Fukushima Daiichi et de Fukushima Daini entre avril et juin 2011 a montré que les symptômes de détresse psychologique générale et de réactions de stress post-traumatique étaient beaucoup plus fréquents parmi les travailleurs de Daiichi (voir la figure 4.14). Dans les deux groupes de travailleurs, on retrouvait aussi des associations statistiquement significatives entre le sentiment de discrimination et les troubles et symptômes liés à une détresse psychologique générale et à un stress post-traumatique.

---

<sup>103</sup> Des conséquences psychologiques ont été relevées dans d'autres situations traumatiques et peuvent notamment s'exprimer sous la forme de dépression, de stress post-traumatique, d'anxiété chronique, de troubles du sommeil, de maux de tête sévères et d'une consommation accrue de tabac et d'alcool, ainsi que de troubles du comportement tels que colère intense, désespoir, anxiété extrême par rapport à la santé et sentiments de stigmatisation et de discrimination. Comme il a été démontré à la suite d'accidents comme celui de Tchernobyl, la majorité des personnes touchées résistent généralement bien au niveau psychologique, mais des exceptions ont été relevées dans un certain nombre d'études [169, 245-247].

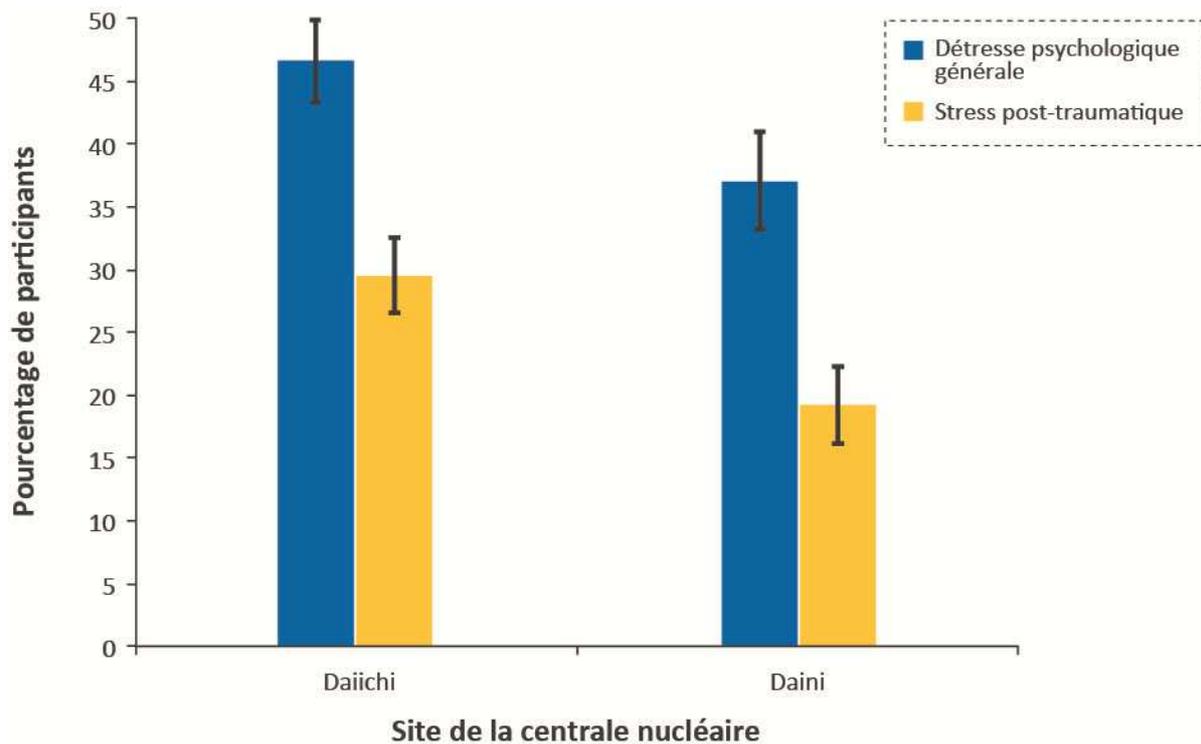


FIG. 4.16. Pourcentage de travailleurs des centrales nucléaires de Fukushima Daiichi et de Fukushima Daini ayant fait part d'un état de détresse psychologique - avril 2011 [242]

#### 4.5. CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES POUR LES ORGANISMES AUTRES QUE LES HUMAINS

*Aucun effet radio-induit direct n'a été observé au niveau des plantes et des animaux, même si des études d'observation limitées ont été menées immédiatement après l'accident. Les méthodes d'évaluation des conséquences radiologiques disponibles sont certes incomplètes, mais sur la base des données d'expérience préalables et des niveaux de radionucléides présents dans l'environnement, il est improbable que l'accident ait pu avoir des conséquences radiologiques majeures sur les populations du biote ou les écosystèmes.*

La protection de l'environnement<sup>104</sup> englobe « la protection et la conservation : des espèces non humaines, tant animales que végétales, et de leur diversité biologique ; des biens et services environnementaux ». Elle comprend aussi « la production d'aliments pour la consommation humaine et animale ; des ressources utilisées pour l'agriculture, la foresterie, la pêche et le tourisme ; des éléments utilisés dans les activités spirituelles, culturelles et récréatives ; de milieux tels que le sol, l'eau et l'air ; et des processus naturels comme les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau » [198]. Le séisme et le tsunami ont occasionné un stress environnemental important aux environnements terrestre et marin le long de la côte nord-est de Honshu [254, 255]<sup>105</sup>.

<sup>104</sup> Dans le présent rapport, le terme 'environnement' désigne « les conditions dans lesquelles les êtres humains, les animaux et les plantes vivent ou se développent et qui sont indispensables à toute vie et à tout développement ; plus spécialement, ces conditions telles qu'elles sont affectées par les activités humaines » [198].

<sup>105</sup> On trouvera d'autres rapports traitant des effets du tsunami sur les écosystèmes dans la réf. [256].

Après l'accident, la priorité immédiate a été la protection des populations plutôt que celle des espèces de l'environnement, pour lesquelles il n'est pas simple de contrôler les expositions. Bien que les personnes résidant dans un rayon de 20 km de la centrale aient été évacuées pour réduire l'exposition aux rayonnements, des organismes non humains ont inévitablement été exposés dans cette zone. Les méthodes utilisées dans le présent rapport pour évaluer l'impact radiologique potentiel de l'accident sur ces organismes non humains sont celles recommandées par la CIPR [224, 257]. Les expositions estimées ont ensuite été comparées aux informations relatives à l'impact d'expositions de ce type sur différentes espèces végétales et animales, sur la base des publications disponibles (voir les réf. [258, 259]).

Les incertitudes générales liées aux types de modèles appliqués lors de l'évaluation sont nombreuses, surtout en cas d'hypothèses portant sur les transferts dans l'environnement [260]. Ces méthodologies d'évaluation ont tendance à reposer sur des hypothèses simples, les incertitudes étant généralement prises en considération par un recours à des hypothèses prudentes. Les références utilisées pour mettre en rapport les doses calculées à des effets des rayonnements sont essentiellement liées à des expositions chroniques plutôt qu'aiguës et à un nombre limité d'organismes plutôt qu'à des populations ou à des écosystèmes. Les méthodologies actuelles ne tiennent pas compte d'interactions entre des composantes d'écosystèmes ni de l'effet combiné des rayonnements et d'autres facteurs de stress liés à l'environnement. Il est nécessaire d'améliorer à la fois les méthodologies d'évaluation et la compréhension des effets radio-induits sur les écosystèmes.

Les doses absorbées estimées étaient les plus élevées pour les plantes au cours des premières semaines après l'accident, mais elles sont restées inférieures aux niveaux auxquels on aurait pu attendre des effets aigus. Les niveaux de référence pertinents ont été dépassés pour certains organismes de référence pour l'environnement terrestre (comme le pin, l'herbe, le cerf et le rat) au cours de la première phase après l'accident. Toutefois, on n'a observé aucun impact global sur les populations de ces organismes ou sur les écosystèmes.

Des publications précédentes de l'UNSCEAR [261, 262] ont montré que des effets nocifs mineurs étaient possibles pour les conifères à des doses inférieures à 1,2 Gy et que des effets nocifs plus sérieux, pouvant entraîner la mort, l'étaient à des doses de l'ordre de 10-20 Gy. On peut déduire des doses estimées qu'un quelconque effet létal direct est improbable sur l'herbe sauvage, qui est plus radorésistante. En ce qui concerne les animaux terrestres, les débits de dose estimés au cours de la première phase ont montré que l'apparition de troubles reproductifs était peu probable.

Bien que les débits de dose aient dépassé certaines valeurs de référence au cours des premières phases de l'accident, aucun impact n'est attendu sur les populations animales et végétales ni sur les écosystèmes. On ne prévoit pas non plus d'effets à long terme car les doses estimées à court terme étaient en général bien inférieures aux niveaux susceptibles de causer des effets aigus très négatifs et les débits de dose ont baissé rapidement après l'accident.

#### 4.6. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS

Plusieurs observations et enseignements ont été compilés à l'issue de l'évaluation des conséquences radiologiques de l'accident.

- **Dans le cas d'un rejet accidentel de substances radioactives dans l'environnement, il est nécessaire de quantifier et de caractériser rapidement le nombre de substances rejetées et leur composition. En cas de rejets importants, un programme complet et coordonné de contrôle radiologique de l'environnement à long terme est requis pour déterminer la nature et l'étendue de l'impact radiologique sur l'environnement aux niveaux local, régional et mondial.**

La quantification et la caractérisation du terme source de l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi se sont révélées difficiles. Un contrôle radiologique rapide de l'environnement donne une confirmation des niveaux de radionucléides et constitue le point de départ en vue de la protection de la population. Les résultats peuvent servir à informer le public et à élaborer des stratégies concernant les activités d'intervention et de relèvement. Par ailleurs, il est important de maintenir un contrôle radiologique de l'environnement pour vérifier qu'il n'y a plus d'autres rejets importants de radionucléides et pour informer les décideurs et d'autres parties prenantes des retombées possibles de radionucléides dans l'environnement au fil du temps.

- **Les organismes internationaux pertinents doivent expliquer les principes et les critères de radioprotection d'une manière compréhensible pour les non-initiés, afin que les décideurs et le public en comprennent mieux l'application. Certaines mesures de protection de longue durée ayant déstabilisé les populations touchées, il est nécessaire d'élaborer une meilleure stratégie de communication pour justifier ces mesures et actions auprès de toutes les parties prenantes, y compris la population.**

Il est reconnu que des explications simples sont requises concernant un certain nombre de questions de radioprotection, parmi lesquelles :

- Les différences, avec justification, entre les concepts de limite de dose et de niveau de référence ;
- Les critères de justification de mesures et d'actions protectrices pour éviter les doses de rayonnements à long terme, en particulier lorsqu'elles perturbent de manière importante la vie normale ;
- Les situations particulières liées à la radioprotection des travailleurs en situation d'urgence.

Les principes de radioprotection ne reposent pas seulement sur la science, mais aussi sur des jugements de valeur inspirés de principes éthiques. Dans certaines circonstances, les mesures et les actions protectrices engendrent des perturbations sociales sur une longue période. L'avantage potentiel que présente la non-exposition à des doses de rayonnements doit alors l'emporter sur le détriment individuel et social causé par les mesures et les actions protectrices. Il importe d'expliquer aux parties prenantes pourquoi des mesures et des actions de radioprotection à long terme sont justifiées.

- **La prise de décisions prudentes en rapport avec l'activité spécifique et les concentrations d'activité dans les produits de consommation et l'activité des dépôts a entraîné des restrictions prolongées avec les difficultés qui en découlent. Dans une situation d'exposition prolongée, il est utile de veiller à la cohérence interne des normes internationales d'une part et à la cohérence entre les normes internationales et nationales d'autre part, particulièrement celles qui sont afférentes à l'eau de boisson, à l'alimentation, aux produits de consommation non comestibles et à l'activité des dépôts sur le sol.**

Les autorités japonaises ont établi pour contrôler la présence de substances radioactives dans les produits de consommation des mesures qui étaient généralement plus contraignantes que les orientations internationales disponibles. À l'heure actuelle, le système international de contrôle de la radioactivité dans les produits de consommation repose sur des orientations distinctes, à savoir celles du Codex Alimentarius pour le commerce international des aliments (y compris l'eau en bouteille), les normes de sûreté de l'AIEA pour l'utilisation de l'alimentation et de l'eau potable en cas de situation d'urgence, les principes directeurs de l'OMS pour l'eau potable dans des situations d'exposition existantes et les normes de sûreté de l'AIEA pour les produits non comestibles à des fins d'exemption. Il est nécessaire d'établir une cohérence entre les normes internationales en ce qui concerne les niveaux de radioactivité acceptables dans les produits de consommation destinés au public, de sorte que ces normes puissent être appliquées plus facilement par les organismes de réglementation et comprises plus aisément par le public. Les normes nationales doivent être conformes aux normes internationales, autant que faire se peut. De plus, il convient d'élaborer des critères traitant de la présence prolongée de radionucléides sur les terres.

- **Le contrôle radiologique individuel de groupes représentatifs de membres du public fournit des informations précieuses en vue d'une estimation fiable des doses de rayonnements, et il doit être combiné avec des mesures de l'environnement et des modèles d'estimation de dose appropriés pour l'évaluation des doses au public.**

La première estimation des doses a été faite sur la base de mesures et de la modélisation de l'environnement, ce qui a débouché sur des hypothèses prudentes concernant les doses reçues et prévues.

Un contrôle radiologique individuel de  $^{131}\text{I}$  présent dans la thyroïde des enfants doit être entrepris dès que possible après un rejet d'iode radioactif dans l'environnement, en raison de la courte période de ce radionucléide. Un contrôle individuel des rayonnements externes et de la présence interne de radionucléides à plus longue période (par exemple le  $^{137}\text{Cs}$ ) doit avoir lieu dès que possible et se poursuivre ensuite selon que de besoin.

En l'absence de mesures individuelles des rayonnements, il peut être nécessaire de modéliser les données dans le milieu ambiant et l'environnement afin d'estimer les doses de rayonnements reçues par les personnes. Dans ces cas, les incertitudes liées aux hypothèses retenues dans les modèles doivent être expliquées clairement, en particulier si les résultats servent à informer les décideurs en vue de la prise de mesures et d'actions protectrices ou à estimer le risque d'effets sanitaires induits par les rayonnements.

- **Bien que les produits laitiers n'aient pas été la principale voie d'ingestion d'iode radioactif au Japon, il est clair que la méthode la plus importante afin de limiter les doses à la thyroïde, particulièrement chez les enfants, consiste à restreindre la consommation de lait frais provenant de vaches en pâturage.**

Les doses à la thyroïde estimées chez les enfants après l'accident étaient faibles. Cette situation résultait de plusieurs facteurs, notamment la période de l'année (avant la saison de culture), les pratiques agricoles au Japon, la faible consommation de lait de vache par les nourrissons et les contrôles sur la consommation de lait mis en place immédiatement. Ces facteurs ont contribué à un faible niveau d'incorporation d'iode 131.

- **Un système robuste est nécessaire pour le contrôle radiologique et l'enregistrement des doses d'exposition professionnelle, par toutes les voies pertinentes, en particulier celles qui sont dues à l'exposition interne éventuelle des travailleurs pendant des activités de gestion des accidents graves. Il est indispensable qu'un équipement de protection individuel conforme et suffisant soit mis à disposition pour limiter l'exposition des travailleurs pendant les activités d'intervention d'urgence, et que les travailleurs soient suffisamment formés à l'utilisation de cet équipement.**

La prise de mesures rapides et, par la suite, de mesures directes de l'exposition aux rayonnements et des niveaux de radionucléides parmi les membres des équipes d'intervention est la méthode la plus probante de récolte d'informations en vue d'une estimation des risques radiologiques et des effets sanitaires possibles et de l'optimisation de la protection. Il est nécessaire de procéder au contrôle radiologique et à l'enregistrement des doses d'exposition professionnelle par un système robuste de mesures et de dosimètres individuels. Il convient d'assurer dès que possible un contrôle radiologique de  $^{131}\text{I}$  dans la thyroïde.

Immédiatement après l'accident de Fukushima Daiichi, la fourniture d'un équipement de protection individuel visant à restreindre l'exposition des travailleurs et à assurer un contrôle radiologique a été difficile.

- **Les risques liés à l'exposition aux rayonnements et l'attribution d'effets sanitaires aux rayonnements doivent être présentés clairement aux parties prenantes, indiquant sans ambiguïté qu'une quelconque augmentation des effets sur la santé humaine n'est pas attribuable à une exposition à des rayonnements si les niveaux de l'exposition sont similaires aux niveaux moyens de rayonnement ambiant.**

Dans le cas de l'accident de Fukushima Daiichi, les doses aux membres du public étaient faibles et comparables à celles des niveaux moyens globaux de rayonnement de fond. Il est nécessaire d'expliquer clairement au public, et en particulier aux populations affectées, qu'aucune augmentation perceptible de l'incidence des effets liés aux rayonnements ionisants sur la santé des personnes du public exposées et de leurs descendants n'est attendue à la suite de l'accident.

Il est important de faire comprendre les rayonnements et leurs effets possibles sur la santé à toutes les personnes impliquées dans une situation d'urgence, en particulier les médecins, les infirmiers, les techniciens en radiologie et les premiers intervenants médicaux. Il est nécessaire à cette fin de veiller à une formation théorique et pratique appropriée des professionnels de la santé à la radioactivité, aux rayonnements et aux effets sanitaires liés à une exposition aux rayonnements.

- **Après un accident nucléaire, les enquêtes relatives à la santé sont très importantes et utiles, mais elles ne devraient pas être interprétées comme des études épidémiologiques. Leurs résultats ont pour but de fournir des informations à l'appui de l'assistance médicale apportée aux populations affectées.**

L'enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima fournit des informations précieuses pour la communauté locale, contribuant à la détection rapide de tout effet sur la santé et à la prise d'actions appropriées pour assurer la protection de la santé de la population. Les résultats globaux des enquêtes sanitaires peuvent certes fournir des

informations importantes, mais ils ne devraient pas être interprétés erronément comme étant ceux d'une évaluation épidémiologique.

- **Des orientations sont nécessaires en matière de radioprotection pour prendre en considération les conséquences psychologiques auxquelles sont confrontées les populations affectées à la suite d'accidents radiologiques. Un groupe de travail de la CIPR a recommandé la recherche de stratégies visant à atténuer les conséquences psychologiques graves découlant d'accidents radiologiques [149].**

Les troubles psychologiques ont été répertoriés comme une conséquence de l'accident. La question s'est posée de manière répétée à la suite d'accidents mettant en jeu une exposition aux rayonnements. Malgré leur importance, ces troubles n'ont pas été reconnus dans les recommandations et normes internationales en matière de radioprotection.

- **Il convient de transmettre de manière compréhensible et en temps voulu des informations factuelles sur les effets des rayonnements aux populations dans les zones touchées afin de leur permettre de mieux comprendre les stratégies de protection, d'apaiser leurs craintes et de soutenir les initiatives de protection qu'elles ont prises.**

Des dispositions doivent être prises aux niveaux national et local afin de communiquer des informations compréhensibles au public susceptible d'être affecté par des accidents ayant des conséquences radiologiques. Elles doivent permettre un dialogue de personne à personne, de sorte que chacun puisse obtenir des éclaircissements et exprimer ses préoccupations. Les dispositions devront être appuyées de manière concertée par les autorités, les experts et les professionnels concernés pour soutenir et conseiller les personnes et les communautés touchées. Le partage d'informations est important lors de la communication de décisions visant à protéger ces personnes, y compris le soutien des initiatives qu'elles ont prises.

- **Pendant une phase d'urgence, quelle qu'elle soit, la priorité doit être la protection des personnes. Les doses au biote ne peuvent pas être contrôlées et pourraient éventuellement être importantes pour certains organismes. Il faut consolider les connaissances sur les impacts de l'exposition aux rayonnements sur le biote non humain grâce à une meilleure méthode d'évaluation des effets radio-induits sur les populations du biote et les écosystèmes, et une meilleure compréhension de ces effets. À la suite d'un rejet important de radionucléides dans l'environnement, il faut adopter une perspective intégrée pour assurer la durabilité de l'agriculture, de la foresterie, de la pêche et du tourisme, mais aussi de l'utilisation des ressources naturelles.**

Il peut être difficile de réduire sensiblement les doses aux organismes non humains en raison de l'impossibilité pratique de mettre en place des contre-mesures. Les évaluations de l'impact d'accidents comme celui de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi sur les plantes et les animaux demandent de tenir compte de nombreux facteurs de stress potentiels, l'exposition aux rayonnements en faisant partie. Il convient de prendre en considération l'accumulation possible de radionucléides à longue période dans l'environnement et les effets éventuels sur les plantes et les animaux pendant de multiples générations.

## 5. RELÈVEMENT APRÈS L'ACCIDENT

Immédiatement après l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, la priorité a été de stabiliser l'état de la centrale et de protéger la population au moyen de mesures comprenant la mise à l'abri et l'évacuation des habitants des zones touchées et l'imposition de restrictions sur les denrées alimentaires<sup>106</sup> et l'eau de boisson. À mesure que les travaux progressaient et que les conditions sur le site se stabilisaient, on a davantage mis l'accent sur les opérations de relèvement, y compris la revitalisation des collectivités et des infrastructures.

La présente section examine les progrès accomplis dans le relèvement après l'accident jusqu'en mars 2015 et les plans pour l'avenir. Elle examine essentiellement la situation d'exposition qui existait après la phase d'urgence.

### 5.1. REMÉDIATION DES ZONES HORS SITE TOUCHÉES PAR L'ACCIDENT

*L'objectif à long terme du relèvement après l'accident<sup>107</sup> est de rétablir une situation acceptable pour que la société puisse pleinement fonctionner dans les zones touchées. Il faut tenir compte des opérations de remédiation<sup>108</sup> menées dans les zones touchées par l'accident pour réduire les doses de rayonnements, conformément aux niveaux de référence adoptés. En préparant le retour des évacués, il faut prendre en considération des facteurs comme la réhabilitation des infrastructures ainsi que la viabilité de la collectivité et son activité économique sur la durée.*

*Avant l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi, il n'existait au Japon aucune politique ni stratégie pour la remédiation après un accident et il est devenu nécessaire d'en élaborer après coup. La politique de remédiation a été promulguée en août 2011 par le gouvernement japonais<sup>109</sup>. Elle a assigné des responsabilités aux autorités nationales et locales, à l'exploitant et à la population et a mis en place les arrangements institutionnels nécessaires à l'exécution d'un programme de travail coordonné.*

*Une stratégie de remédiation a été élaborée et sa mise en œuvre a commencé. Elle précise que les zones prioritaires pour la remédiation sont les zones d'habitation, y compris les bâtiments et les jardins, les terres agricoles, les routes et les infrastructures, l'accent étant mis sur la réduction des expositions externes.*

---

<sup>106</sup> Y compris des restrictions sur la distribution et la vente d'aliments, l'utilisation des terres agricoles et la cueillette de certains produits sauvages (voir la section 3.3).

<sup>107</sup> Le relèvement après l'accident comprend : la remédiation des zones touchées par l'accident ; la stabilisation des installations endommagées sur le site et les préparatifs en vue du déclassement ; la gestion des matières contaminées et des déchets radioactifs résultant de ces activités ; et la revitalisation des collectivités et l'engagement des parties prenantes.

<sup>108</sup> Par remédiation, on entend toutes les mesures qui peuvent être mises en œuvre pour réduire l'exposition à des rayonnements due à une contamination existante de terres en agissant sur la contamination elle-même (la source) ou sur les voies d'exposition des êtres humains.

<sup>109</sup> 'Loi sur les mesures spéciales concernant le traitement de la pollution de l'environnement par des matières radioactives rejetées pendant l'accident de la centrale nucléaire associée au district du Tohoku en marge du séisme survenu le 11 mars 2011 dans l'océan Pacifique', Loi n° 110, 2011.

*La principale voie d'exposition est la dose externe due aux radionucléides déposés sur le sol et autres surfaces. La stratégie de remédiation se concentre donc sur les activités de décontamination destinées à réduire les niveaux de radiocésium observés dans les zones prioritaires, afin de réduire ainsi la possibilité de telles expositions. Les doses internes continuent d'être contrôlées au moyen de restrictions sur les aliments et d'activités de remédiation menées sur les terres agricoles.*

*Après l'accident, les autorités japonaises ont adopté un 'niveau de référence' comme niveau de dose à atteindre pour l'ensemble de la stratégie de remédiation. Ce niveau était conforme aux valeurs seuils spécifiées dans des orientations internationales. L'application d'un niveau de référence bas a pour effet d'accroître le volume des matières contaminées générées par les activités de remédiation, ce qui augmente les coûts et met davantage à contribution des ressources limitées. L'expérience acquise au Japon pourrait servir à élaborer des orientations pratiques sur l'application des normes internationales de sûreté dans des situations de relèvement après un accident.*

*Deux catégories de zones contaminées ont été définies à partir des doses annuelles supplémentaires estimées à l'automne 2011. Le gouvernement a été chargé de formuler et d'exécuter des plans de remédiation dans la première zone (la 'zone de décontamination spéciale') – dans un rayon de 20 km autour du site de Fukushima Daiichi et dans des emplacements où des doses annuelles supplémentaires provenant de la contamination des sols devaient dépasser 20 mSv dans l'année suivant l'accident. C'est aux municipalités qu'il incombait d'exécuter les activités de remédiation dans l'autre zone (la 'zone d'étude intensive de la contamination'), où, selon les prévisions, les doses annuelles supplémentaires dépasseraient 1 mSv tout en restant inférieures à 20 mSv. Des objectifs précis de réduction des doses ont été fixés, dont un objectif à long terme de dose annuelle supplémentaire inférieure ou égale à 1 mSv.*

### **5.1.1. Mise en place d'un cadre juridique et réglementaire pour la remédiation**

Après l'accident, le gouvernement japonais a mis en place une politique de relèvement et de remédiation grâce à l'adoption, en août 2011, de la 'Loi sur les mesures spéciales concernant le traitement de la pollution de l'environnement par des matières radioactives rejetées pendant l'accident de la centrale nucléaire associée au district du Tohoku en marge du séisme survenu le 11 mars 2011 dans l'océan Pacifique' [124]. Cette loi contient des dispositions permettant d'instaurer un ordre de priorité parmi les sites à remédier, d'allouer des ressources pour l'exécution des travaux de remédiation et d'inclure des parties prenantes dans l'ensemble du processus.

Les premières étapes de l'élaboration d'un programme de remédiation consistent à définir des niveaux de référence appropriés et à élaborer une stratégie de remédiation pour obtenir la réduction voulue de l'exposition aux rayonnements des personnes du public. Les orientations internationales recommandent de choisir un niveau de référence entre 1 et 20 mSv/an pour les doses supplémentaires, selon les conditions ambiantes (encadré 5.1) [129, 198, 263]<sup>110</sup>.

Il est important de fixer des niveaux de référence dans cette fourchette qui ne soient ni trop élevés, car ils pourraient compromettre la réalisation de l'objectif de sûreté recherché, ni trop

---

<sup>110</sup> Une version préliminaire de l'édition provisoire des Normes fondamentales internationales était disponible au moment de l'accident [263]. Le n° GSR Part 3 [198] de la collection Normes de sûreté de l'AIEA a été publié ultérieurement, en 2014.

bas, l'utilisation des ressources limitées étant alors loin d'être optimale. Dans les premiers temps de la remédiation au Japon en 2011, le gouvernement a fixé des niveaux de référence qui étaient intentionnellement bas [264, 265] et un objectif à long terme pour les habitants, après remédiation, d'une dose supplémentaire ne dépassant pas 1 mSv/an [266]. Il s'agit de la valeur la plus faible de la fourchette spécifiée dans des orientations internationales (encadré 5.1).

Une évaluation de l'UNSCEAR donnait une idée de l'approche très prudente adoptée pour estimer les doses aux personnes [148]. Les doses estimées sont basées sur l'activité de  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  par unité de surface, compte tenu de la diminution de l'activité sous l'effet de la décroissance, de la perte d'activité due à l'altération des surfaces et du facteur de protection habituel pour les habitations en bois. Les calculs réalisés aux fins du présent rapport, avec la même méthodologie que l'UNSCEAR [148, 267], montraient que les doses de rayonnements supplémentaires moyennes en 2012 dans de vastes parties de la zone d'étude intensive de la contamination (voir la section 5.1.2) auraient été bien inférieures à 1 mSv/an.

#### ***Encadré 5.1. Niveau de référence pour la remédiation***

Le 'niveau de référence' est la dose cible pour l'ensemble de la stratégie de remédiation, mais ce n'est pas une limite de dose. Les orientations internationales [134, 269] recommandent de fixer des niveaux de référence entre 1 et 20 mSv/an pour l'exposition supplémentaire d'une personne du public dans des 'situations d'exposition existantes', selon les conditions ambiantes.

Les niveaux de référence sont établis par le gouvernement, l'organisme de réglementation ou une autre autorité compétente, selon les dispositions du cadre réglementaire national. De tels niveaux sont appliqués dans des situations post-accidentelles pour déterminer les meilleures stratégies de remédiation. Grâce à ces stratégies, les ressources humaines, techniques et financières disponibles seront utilisées de manière rationnelle pour les travaux de remédiation destinés à protéger au mieux les communautés touchées.

Les mesures particulières appliquées pour réduire la contamination de l'environnement et les doses de rayonnements aux personnes sont généralement guidées par des 'niveaux d'actions de remédiation' calculés. Habituellement, ceux-ci sont exprimés sous forme de grandeurs facilement mesurables, comme les débits de dose gamma ambiants ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ou l'activité du dépôt par unité de surface ( $\text{Bq/m}^2$ ), et sont calculés à partir des niveaux de référence au moyen de modèles et d'hypothèses sur les habitudes de vie de la population et le comportement des radionucléides dans l'environnement.

### **5.1.2. Stratégie de remédiation adoptée**

La stratégie de remédiation a été influencée par le fait que les doses internes après l'accident ont été largement évitées grâce à l'application de restrictions sur les aliments et l'eau de boisson. Par conséquent, les mesures de remédiation décrites ci-après concernaient surtout les travaux de décontamination visant à réduire les niveaux de doses externes.

La stratégie de remédiation du gouvernement japonais fixait la conduite à suivre pour réduire rapidement la dose de rayonnement, en privilégiant la remédiation des zones d'habitation, des terres agricoles et des forêts aux alentours de celles-ci [124, 266]. À cette fin, en août 2011, il a classé les terres à remédier comme suit :

- **Zone de décontamination spéciale** (fig. 5.1, à droite). Cette zone recoupe les anciennes ‘zones d’accès restreint’ (la zone d’évacuation dans un rayon de 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi et l’ancienne ‘zone d’évacuation délibérée’ située au-delà de la précédente, où la dose annuelle supplémentaire aux personnes pouvait atteindre 20 mSv dans l’année suivant l’accident). Dans la zone de décontamination spéciale, le gouvernement est chargé de formuler des plans de remédiation et de les mettre en œuvre.
- **Zone d’étude intensive de la contamination** (fig. 5.1, à droite). Cette zone couvre les municipalités dans lesquelles la dose de rayonnement supplémentaire la première année était estimée entre 1 et 20 mSv pour les personnes se trouvant dans certains de leurs secteurs<sup>111</sup>. Les municipalités effectuent des relevés radiologiques pour déterminer les zones à décontaminer et y engager des activités de remédiation, le gouvernement fournissant un appui financier et technique.

---

<sup>111</sup> Un débit de dose ambiant de 0,23  $\mu$ Sv/h a servi de critère radiologique pour cette zone. Il correspond à une dose efficace supplémentaire estimée prudemment à 1 mSv par an.

En 2012 et 2013, les zones concernées par les ordres d'évacuation ont été à nouveau subdivisées en trois catégories sur la base de la dose totale annuelle estimée aux habitants dans ces zones, si tant est qu'il y en eût (fig. 5.1, à gauche) [268, 269], comme suit :

- **Zone 1 (en vert).** Zones où l'ordre d'évacuation était prêt à être annulé. La dose annuelle estimée était censée y être équivalente ou inférieure à 20 mSv.
- **Zone 2 (en orange).** Zones encore interdites aux habitants. La dose annuelle estimée était censée y être supérieure à 20 mSv.
- **Zone 3 (en rouge).** Zones dans lesquelles les habitants ne devraient pas pouvoir revenir avant longtemps. La dose annuelle estimée y était supérieure à 50 mSv, et la dose annuelle moyenne dans un délai de six ans après l'accident était censée y être supérieure à 20 mSv.

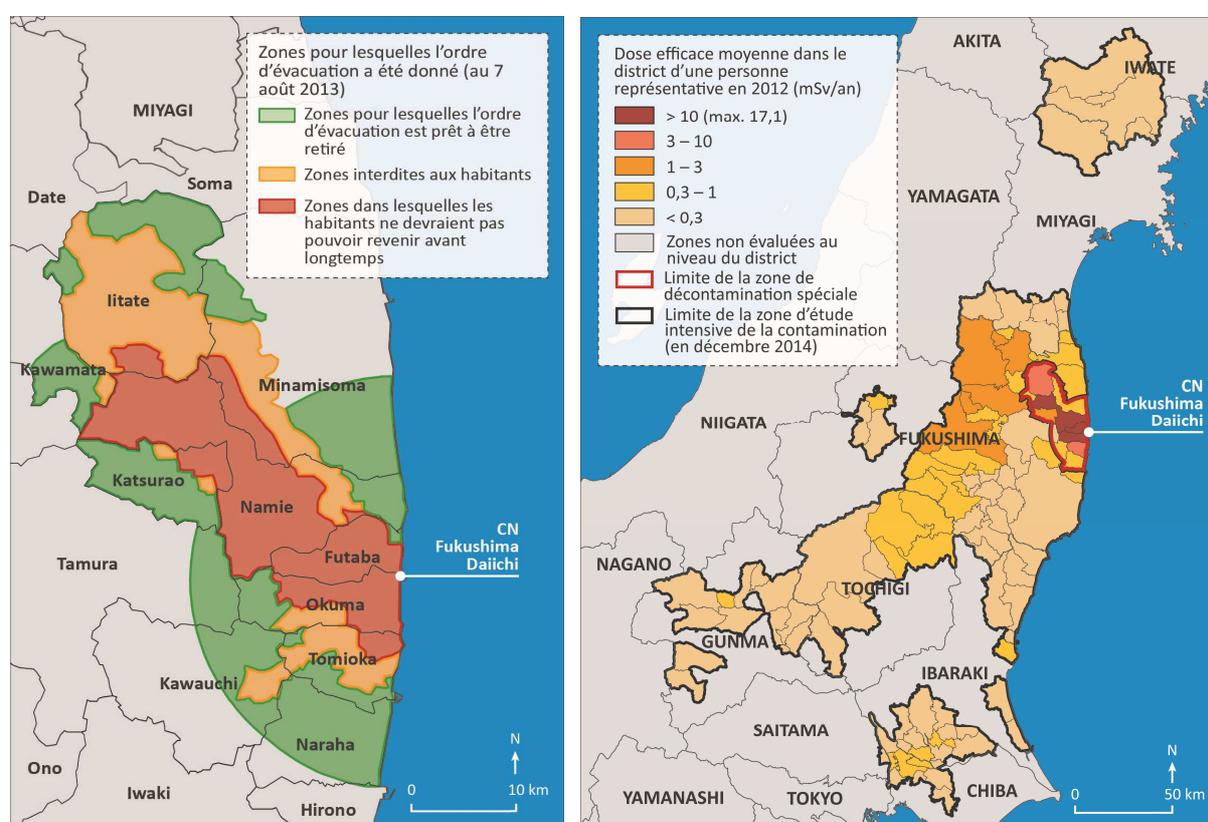


FIG. 5.1. La carte à gauche montre la subdivision de la zone d'évacuation au 7 août 2013 [270]. Celle à droite montre la 'zone de décontamination spéciale' et la 'zone d'étude intensive de la contamination' (en décembre 2014) et indique les doses de rayonnements supplémentaires estimées pour 100 personnes représentatives en 2012.

### 5.1.3. État d'avancement de la remédiation

Plusieurs projets pilotes ont été entrepris en 2011. La JAEA a effectué initialement plusieurs études à petite échelle sur deux sites en dehors des zones évacuées pour évaluer dans quelle mesure la décontamination permettrait efficacement de réduire le débit de dose sur divers types de surfaces (p. ex. rues, toits, murs et pelouses) [271]. Des études ultérieures ont pris en compte la possibilité de décontaminer des superficies plus étendues dans les zones évacuées, ont évalué dans quelle mesure ces opérations permettraient de réduire les débits de dose

gamma ambiants et ont analysé les conséquences pour la sûreté des travailleurs et la gestion des déchets.

Ces études pilotes ont joué un rôle important dans la planification et la mise en œuvre des stratégies de remédiation. Elles ont fourni des informations sur l'efficacité et l'applicabilité des techniques de décontamination et facilité l'établissement de procédures pour la radioprotection des travailleurs [272].

Les mesures de remédiation couramment appliquées après l'accident de Fukushima Daiichi sont énumérées dans le tableau 5.1. L'enlèvement de la terre végétale, qui génère une grande quantité de déchets, est une méthode qui a été largement appliquée les premières années de la remédiation.

TABLEAU 5.1. MESURES DE REMÉDIATION COURAMMENT APPLIQUÉES

Cibles	Mesures de remédiation
Habitations et bâtiments	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Enlèvement de dépôts sur les toits, plate-formes et gouttières</li> <li>— Essuyage des toits et murs</li> <li>— Sablage sous vide</li> <li>— Lavage sous haute pression</li> </ul>
Cours d'écoles, jardins et parcs	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Enlèvement de la terre végétale</li> <li>— Enlèvement des mauvaises herbes/de l'herbe des prairies naturelles et des pâturages</li> </ul>
Routes	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Enlèvement des dépôts dans les fossés</li> <li>— Lavage sous haute pression</li> </ul>
Jardins et arbres	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Fauchage</li> <li>— Enlèvement des feuilles tombées</li> <li>— Enlèvement de la terre végétale</li> <li>— Lavage sous haute pression</li> <li>— Écorçage des arbres</li> </ul>
Terres agricoles	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Retournement des sols labourés</li> <li>— Enlèvement de la terre végétale</li> <li>— Traitement des sols (p. ex. épandage renforcé d'engrais)</li> <li>— Durcissement des sols et enlèvement de la terre</li> <li>— Enlèvement des mauvaises herbes/de l'herbe des prairies naturelles et des pâturages</li> </ul>
Production animale	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Contrôle des niveaux de radiocésium dans les aliments pour animaux</li> </ul>
Forêts et bois	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Enlèvement des feuilles tombées et des brindilles basses</li> <li>— Taille</li> </ul>

Des stratégies de remédiation ont été mises en œuvre ultérieurement dans la zone d'étude intensive de la contamination et la zone de décontamination spéciale, et des progrès importants ont été faits. À la fin de 2014, la décontamination de la plupart des parties de la zone d'étude intensive de la contamination en dehors de la préfecture de Fukushima était pratiquement achevée (dans environ 80 % des municipalités). Dans la zone d'étude intensive de la contamination sur le territoire de la préfecture de Fukushima, environ 90 % des établissements publics, 60 % des habitations et 50 % des routes avaient été décontaminés [273].

Dans la zone de décontamination spéciale, des plans de décontamination avaient été menés à terme dans quatre municipalités (Tamura, Kawauchi, Naraha et Okuma) en mars 2015. La

décontamination des zones d'habitation avait aussi été achevée dans deux autres municipalités (Katsurao et Kawamata) et l'avait pratiquement été à Iitate [273]. La plupart des plans de décontamination dans les zones 1 et 2 sur le territoire de la préfecture de Fukushima devaient être menés à bien avant la fin du mois de mars 2016, même si certains devaient se poursuivre jusqu'en 2017 (fig. 5.2).

Les enquêtes menées dans les zones d'habitation des municipalités de Tamura et Naraha ont montré que les débits de dose gamma ambiants avaient diminué en moyenne de 36 % et 46 %, respectivement. Les débits de dose gamma (voir l'encadré 5.1) ont été déterminés grâce à des mesures des débits de dose ambiants effectuées à 1 m des surfaces décontaminées, aussi bien avant qu'après les mesures de remédiation. Dans les deux municipalités, la diminution du débit de dose moyen après les actions correctives engagées sur les terres agricoles, dans les forêts et sur les routes variait entre 21 % et 44 % [273].

D'après les données, la réduction des débits de dose gamma ambiants est plus importante dans les zones où les débits de dose étaient initialement les plus élevés. Après la remédiation, les débits de dose gamma continuent de baisser en raison des processus naturels d'altération et de la décroissance radioactive.

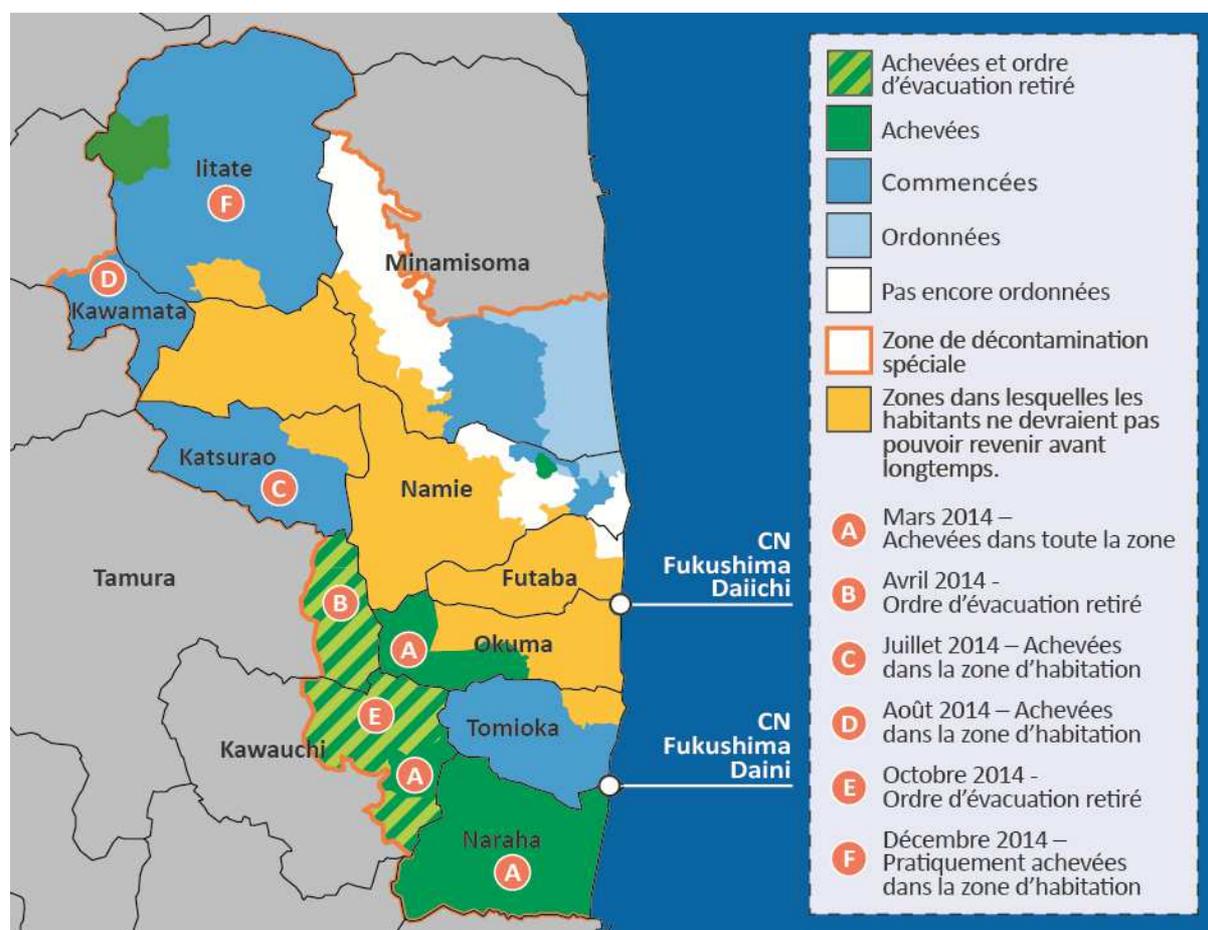


FIG. 5.2. État d'avancement des opérations de remédiation dans les zones de décontamination spéciale jusqu'en décembre 2014 [273].

Des exemples de remédiation sont donnés dans la figure 5.3.

Les coûts unitaires de la décontamination dans les zones de décontamination spéciale directement contrôlées par le gouvernement variaient entre environ 1 100 yens/m<sup>2</sup> (forêts) et approximativement 5 500 yens/m<sup>2</sup> (parcs) [274].

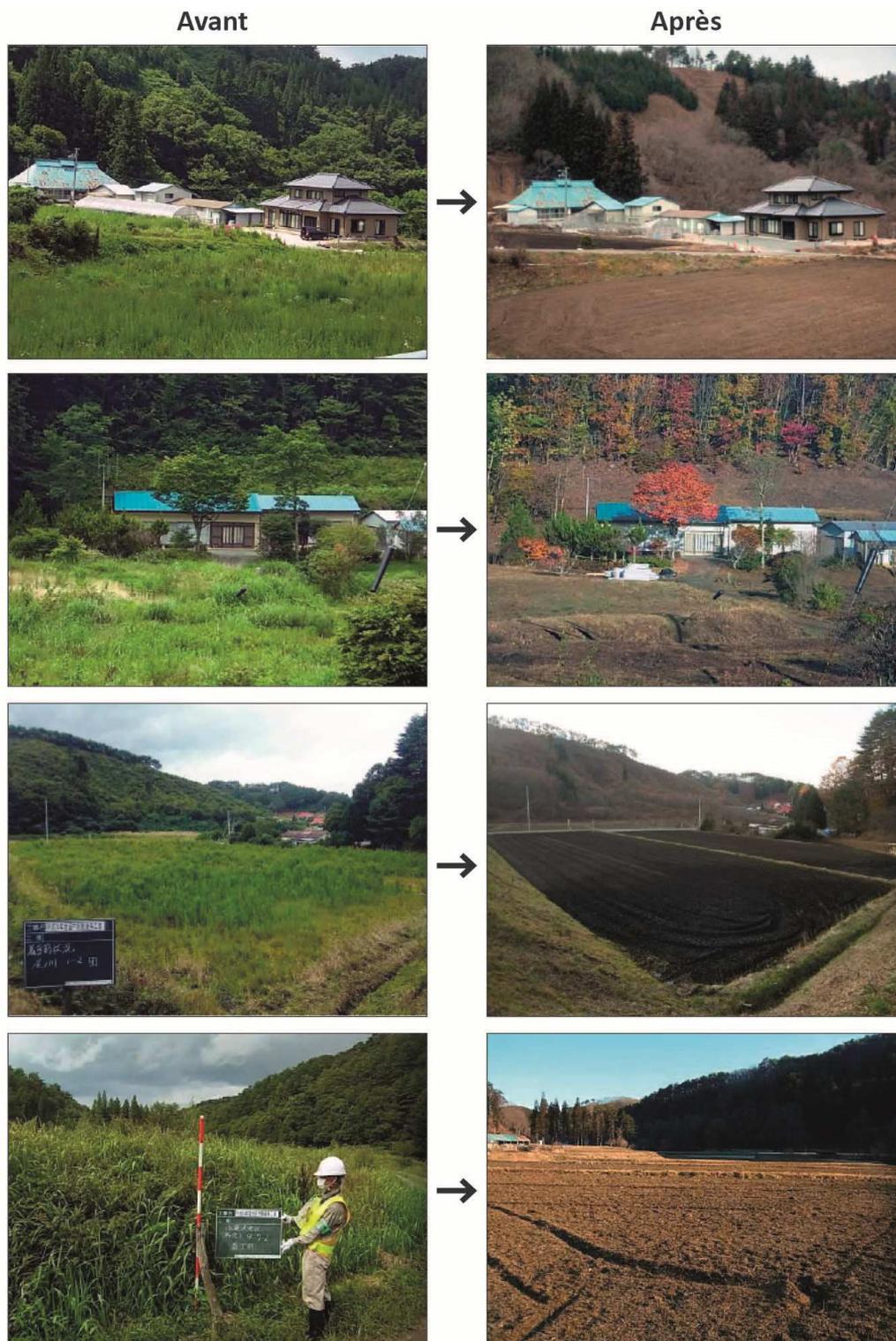


FIG. 5.3. Photos de paysages avant et après la remédiation dans la ville de Tamura (publiées avec l'aimable autorisation du Ministère japonais de l'environnement).

## 5.2. STABILISATION SUR LE SITE ET PRÉPARATIFS EN VUE DU DÉCLASSEMENT

*Un plan stratégique complet de haut niveau a été élaboré conjointement par la TEPCO et les instances gouvernementales japonaises compétentes en vue de la stabilisation et du déclasserement de la centrale nucléaire endommagée. Il a d'abord été publié en décembre 2011, puis révisé à deux reprises pour tenir compte de l'expérience acquise et d'une meilleure compréhension de l'état de la centrale nucléaire endommagée, ainsi que de l'ampleur des futurs enjeux. Il prend en considération la nature complexe des travaux à mener sur le site et répertorie l'approche adoptée pour pourvoir à la sûreté, les mesures en vue du déclasserement, les systèmes et conditions propres à faciliter les travaux et les besoins en recherche-développement.*

*Au moment de la rédaction du présent rapport, des fonctions de sûreté avaient été rétablies et des structures, systèmes et composants étaient en place pour maintenir de manière fiable des conditions stables. Toutefois, il était toujours nécessaire de contrôler les infiltrations d'eaux souterraines dans les bâtiments des réacteurs endommagés et contaminés. L'eau ainsi contaminée subissait un traitement destiné à en extraire les radionucléides dans la mesure du possible et était entreposée dans plus de 800 citernes. Il faut étudier des solutions plus durables, en envisageant toutes les options, y compris la reprise éventuelle des rejets contrôlés en mer. L'adoption d'une décision finale nécessitera la participation des parties prenantes concernées et la prise en compte de la situation socio-économique dans le processus de consultation, ainsi que l'application d'un programme détaillé de contrôle radiologique.*

*Des plans ont été élaborés pour la gestion du combustible usé et des débris de combustible, et le combustible usé présent dans les piscines d'entreposage a commencé à en être retiré<sup>112</sup>. Un modèle conceptuel pour les futures activités d'enlèvement des débris de combustible, tenant compte des nombreuses étapes préliminaires nécessaires, y compris une confirmation visuelle de la configuration et de la composition de ces débris, a en outre été élaboré. En raison des niveaux de doses de rayonnements élevés dans les réacteurs endommagés, une telle confirmation n'avait pas pu être donnée au moment de la rédaction du présent rapport.*

*Les autorités japonaises ont estimé que les activités de déclasserement prendront probablement entre 30 et 40 ans avant d'être achevées. Les décisions concernant l'état final de la centrale et du site feront l'objet d'autres analyses et discussions.*

---

<sup>112</sup> L'enlèvement du combustible usé de la piscine d'entreposage de la tranche 4 a été achevé en décembre 2014.

### **Encadré 5.2. Stabilisation et déclasserment après l'accident**

Le terme 'déclasserment' englobe les mesures administratives et techniques prises pour permettre la levée d'une partie ou de la totalité des contrôles réglementaires sur une installation.

Dans la pratique, il consiste à enlever progressivement les structures, systèmes et composants de l'installation. Dans des circonstances normales, le déclasserment d'une centrale nucléaire est une activité planifiée qui est entreprise après que la décision d'en cesser l'exploitation a été prise. Le déclasserment après un accident présente d'autres types de problèmes : l'état des installations, du combustible et des équipements de la centrale doit d'abord être déterminé puis une marche à suivre décidée. Il peut être nécessaire de mettre au point de nouvelles technologies et méthodologies.

Si la mise à l'arrêt d'un réacteur est la conséquence d'un accident, l'installation doit être mise dans un état sûr (stabilisation) en attendant la mise en application d'un plan final de déclasserment approuvé. La stabilisation englobe les mesures requises pour que les structures de la centrale (comme les bâtiments qui abritent les réacteurs endommagés), les systèmes (comme les alimentations électriques) et les composants (comme les pompes ou les moteurs) soient mis dans un état stable et puissent fonctionner aussi longtemps que cela sera nécessaire.

#### **5.2.1. Plan stratégique**

Après la phase d'urgence, la TEPCO et les organes gouvernementaux compétents ont établi un plan stratégique – la 'feuille de route à moyen et long termes pour le déclasserment des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi' – aux fins des activités de stabilisation et de déclasserment [275]. Le plan a d'abord été publié en décembre 2011, puis révisé à deux reprises pour tenir compte des données d'expérience et des connaissances plus approfondies obtenues sur l'état du site [276]<sup>113</sup>. Il constitue un plan stratégique très complet de haut niveau destiné à ceux qui supervisent les opérations de relèvement. Selon les estimations des autorités japonaises, le déclasserment prendra entre 30 et 40 ans avant d'être achevé.

Le plan décrit la stratégie à suivre dans des domaines d'activité en ce qui concerne :

- **L'approche adoptée pour pourvoir à la sûreté**, qui retient des objectifs stratégiques de réduction des risques et d'optimisation de l'enlèvement du combustible et des débris de combustible.
- **Les mesures à moyen et à long terme en vue du déclasserment**, qui incluent des plans pour l'enlèvement du combustible et des débris de combustible dans chaque tranche. Ces plans sont suffisamment souples pour pouvoir traiter l'ensemble possible des conditions que l'on pourra découvrir à mesure que l'on acquerra plus d'informations pendant l'enlèvement du combustible et des débris de combustible.
- **Les systèmes et conditions propres à faciliter les travaux**, pour lesquels la TEPCO a créé un organisme chargé de centraliser le suivi de la santé et de l'exposition des travailleurs aux rayonnements. Les efforts faits pour améliorer la radioprotection des travailleurs se sont poursuivis, et des plans ont été mis en place pour gérer un personnel formé et s'assurer de sa disponibilité tout au long du déclasserment.

<sup>113</sup> La feuille de route devrait faire l'objet de nouvelles révisions à mesure que les plans seront adaptés pour tenir compte de l'évolution de la situation et des informations nouvelles. La troisième révision de la feuille de route a été publiée pendant l'élaboration du présent rapport final (juin 2015). Elle a modifié le calendrier et l'approche de l'enlèvement du combustible et des débris et a affiné les approches de la réduction des risques, de la communication avec les parties prenantes locales, de la réduction des expositions des travailleurs et de la gestion de la recherche-développement [277].

- **La recherche-développement**, qui est nécessaire car la plupart des travaux à accomplir à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi seront les premiers de la sorte et nécessiteront des équipements et des technologies qui n'ont pas encore vu le jour ou n'ont pas encore été utilisés à grande échelle. L'Institut international de recherche pour le déclassé des centrales nucléaires, nouvellement créé, a été chargé de mettre au point des technologies pour le déclassé nucléaire, de promouvoir la coopération dans ce domaine avec des organismes internationaux et nationaux et de former des ressources humaines pour la recherche-développement.

### 5.2.2. Préparatifs en vue du déclassé

Peu après sa création [278], la NRA a élaboré un nouveau cadre réglementaire pour les installations dites 'installations ayant souffert de la catastrophe' qui ont besoin de mesures spéciales pour prévenir d'autres accidents et assurer la sécurité nucléaire. Le 7 novembre 2012, la NRA a classé la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi parmi les 'installations de réacteurs spécifiées', qui sont des installations où un accident nucléaire s'est produit et où des règlements spéciaux proportionnés aux conditions y régnant sont prévus.

Ce classement a permis à la NRA de demander à la TEPCO d'élaborer un plan pour mettre en application les mesures présentées dans le plan stratégique [275]. Le plan de mise en œuvre de la TEPCO a été soumis en décembre 2012 [279] et approuvé ultérieurement. La TEPCO assure la mise à exécution des mesures qui y sont énoncées, laquelle est ensuite analysée par la NRA.

En outre, la NRA a élaboré en février 2014 une disposition réglementaire pour la gestion de la dose efficace supplémentaire à la limite du site et a défini en février 2015 des mesures pour la réduction du risque à moyen terme à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO [280].

La TEPCO a instauré des conditions stables sur le site pour maintenir la protection et la sûreté et permettre d'avancer sur la voie du déclassé [275]. Des fonctions auxiliaires importantes, comme les alimentations électriques normales et de secours, ont été rétablies et améliorées. Des fonctions de sûreté fondamentales ont également été rétablies. Les dispositions prises pour pérenniser les conditions stables sont notamment les suivantes :

- Surveillance de l'état de la centrale ;
- Refroidissement du combustible et des débris de combustible ;
- Maintien de l'état sous-critique ;
- Contrôle des niveaux d'hydrogène ;
- Maintien de la stabilité structurelle des bâtiments des réacteurs ;
- Contrôle des infiltrations d'eau dans les bâtiments des réacteurs et prévention des fuites dans l'environnement ;
- Maintien des alimentations électriques essentielles ;
- Moyens d'assurer les fonctions de sûreté fondamentales sur le long terme.

Des fonctions de sûreté importantes ont été rétablies et améliorées grâce, par exemple, à l'installation de plusieurs dispositifs de secours et au remplacement et/ou à la mise à niveau de systèmes mobiles et temporaires destinés à compléter les systèmes permanents. La situation sur le site demeure complexe, et une surveillance et un contrôle rigoureux sont nécessaires pour continuer à assurer des conditions stables.

### 5.2.3. Gestion de l'eau contaminée

L'eau qui pénètre dans les bâtiments des réacteurs endommagés devient contaminée, ce qui pose un problème particulièrement ardu à résoudre étant donné les volumes considérables qui sont en jeu. Au moment de l'établissement du présent rapport, l'eau continuait de pénétrer dans les bâtiments des réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de deux façons : l'injection d'eau dans les cœurs des réacteurs en vue de les refroidir et l'infiltration d'eau souterraine. La caractérisation et la gestion de cette eau continuaient d'être nécessaires (fig. 5.4).

Avant l'accident, l'eau souterraine en provenance des montagnes à l'arrière de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi était pompée à raison de  $850 \text{ m}^3/\text{j}$  dans les conduites de drainage profond situées autour des bâtiments des tranches 1 à 4, de façon à ce que le niveau de la nappe phréatique reste sous contrôle. En raison de l'accident, ces conduites et les pompes qui auparavant empêchaient les pressions hydrostatiques et la pénétration d'eau dans les bâtiments ont cessé de fonctionner [281].

Après l'accident, quelque  $400 \text{ m}^3/\text{j}$  d'eau souterraine non contaminée se sont déversés dans les bâtiments. On fait circuler environ  $400 \text{ m}^3/\text{j}$  d'eau à travers les réacteurs des tranches 1 à 3 pour les refroidir. L'eau souterraine qui pénètre dans les bâtiments se mélangeant à l'eau qui sert à refroidir les réacteurs, il faut donc gérer un volume total d'environ  $800 \text{ m}^3/\text{j}$  d'eau contaminée. Quelque  $400 \text{ m}^3/\text{j}$  de cette eau sont réinjectés dans les réacteurs pour refroidir le combustible et les débris de combustible, tandis que les  $400 \text{ m}^3/\text{j}$  restants sont entreposés dans les citernes d'entreposage de l'eau contaminée [276].

L'eau est traitée, le but de l'opération étant d'en extraire les radionucléides, à l'exception du tritium, pour lequel c'est impossible [282]. L'eau traitée était stockée sur le site dans 826 citernes (au 12 février 2015) [283].

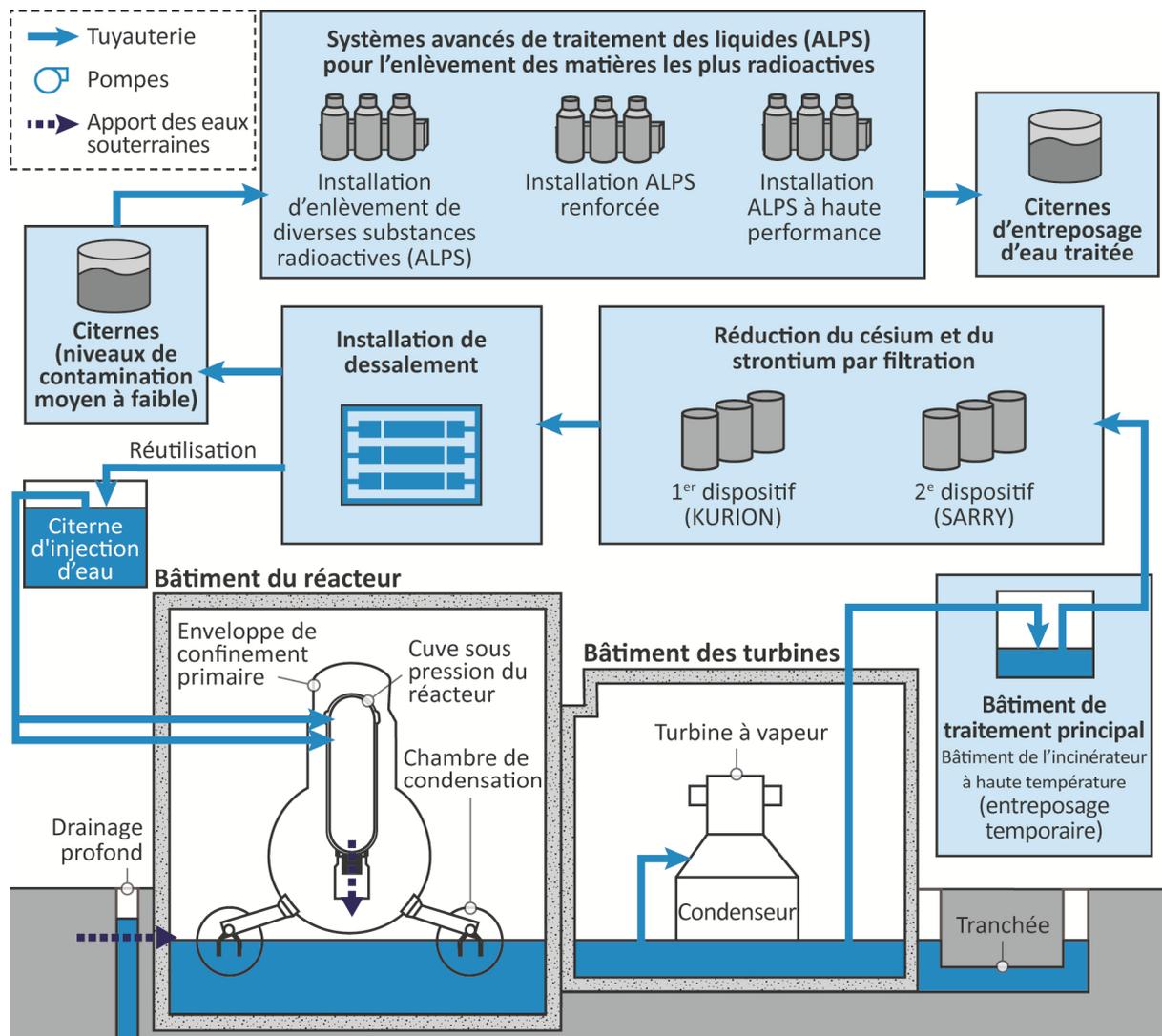


FIG. 5.4. Gestion de l'eau contaminée sur le site [284].

Diverses techniques de gestion de l'eau ont été mises en place, ou sont en passe de l'être, notamment l'amélioration et l'installation de systèmes de traitement et de citernes d'entreposage supplémentaires, la remise en état des conduites de drainage profond et l'érection de murs étanches côté mer. Les eaux souterraines non contaminées qui coulent des montagnes vers les installations endommagées sont détournées de façon à contourner les installations et à se déverser dans l'océan (fig. 5.5) [285]. En outre, une barrière cryogénique était en construction en amont des bâtiments des réacteurs de façon à empêcher toute nouvelle infiltration d'eau. Une autre était prévue côté mer.

Avec l'approbation de la NRA et l'aval des parties prenantes concernées, dont la préfecture de Fukushima et l'industrie de la pêche, la TEPCO a commencé en mai 2014 à déverser les eaux souterraines non contaminées contournées directement dans la mer [285]. Cette mesure a permis de réduire le volume d'eau nécessitant un traitement.

Le volume important d'eau contaminée sur le site présente divers risques. On a constaté des fuites d'eau radioactive dues au fonctionnement défaillant de composants (citerne, canalisations et vannes) ou en période de fortes pluies. Parfois, ces fuites ont conduit au rejet

de radionucléides dans la mer. Après leur découverte, les contrôles radiologiques ont été intensifiés sur le site ainsi que dans le milieu marin [287]. Bien que des mesures soient prises pour stopper ces fuites ou les atténuer, il faut étudier des solutions plus durables, en envisageant toutes les options, y compris la reprise éventuelle des rejets contrôlés en mer. À la suite des missions d'examen de l'AIEA [288, 289], il a été conseillé à la TEPCO de procéder à une évaluation de l'impact radiologique potentiel du rejet en mer d'eau contenant du tritium et d'autres radionucléides résiduels éventuels. Il a aussi été reconnu que l'adoption d'une décision finale nécessiterait la participation de toutes les parties prenantes, y compris la TEPCO, la NRA, le gouvernement, les autorités de la préfecture de Fukushima, les communautés locales et d'autres, et qu'il fallait prendre en compte la situation socio-économique dans le processus de consultation et appliquer un programme détaillé de contrôle radiologique pour s'assurer de l'absence d'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement [288, 289]. Dans ce contexte, il serait utile d'avoir davantage d'orientations sur l'application des orientations internationales concernant les rejets dans des situations post-accidentelles.

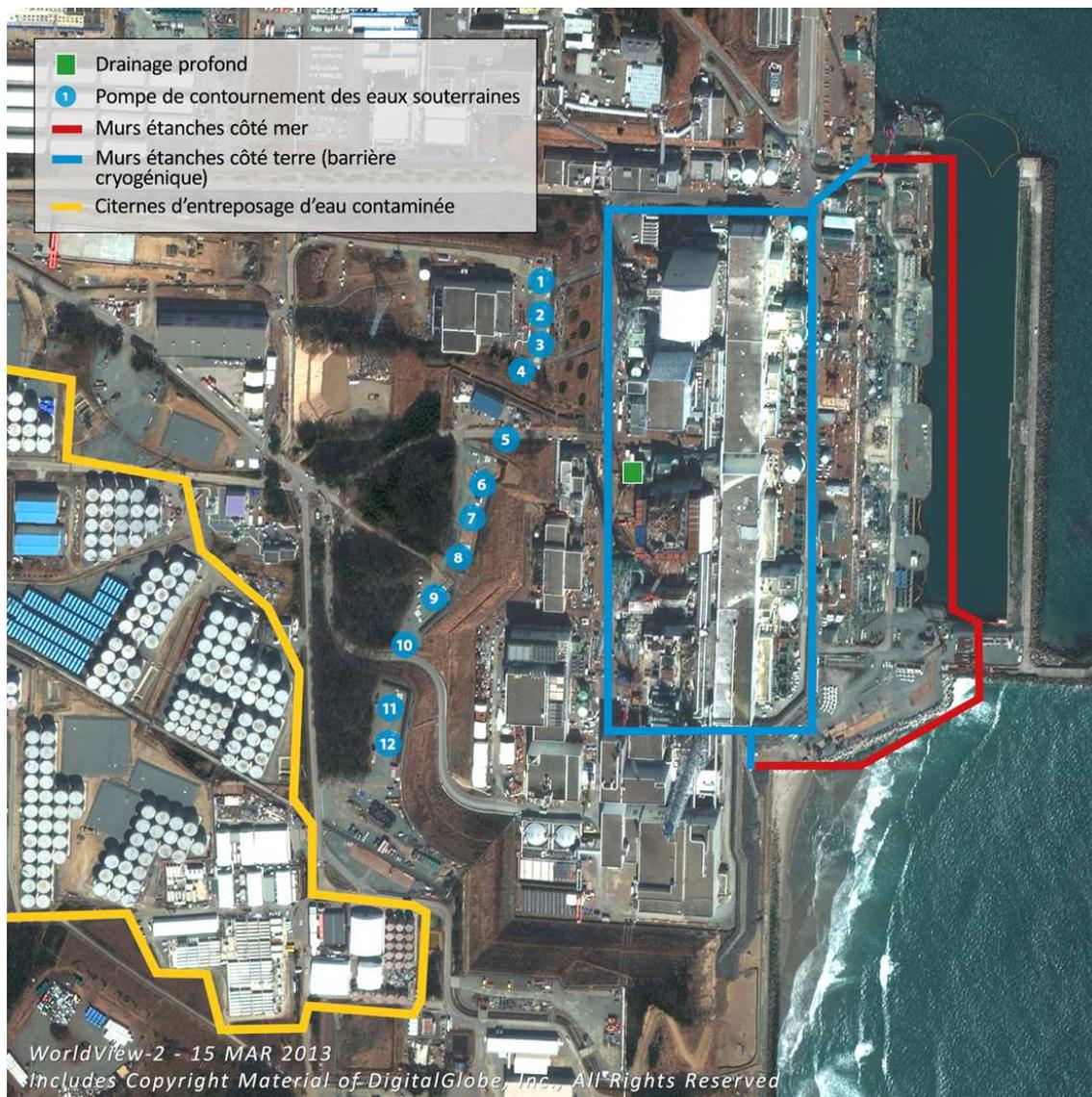


FIG. 5.5. Illustration des activités de gestion de l'eau. Les citernes d'entreposage de l'eau contaminée sont à gauche [286].

#### 5.2.4. Enlèvement du combustible usé et des débris de combustible

Les préparatifs en vue du déclassement des installations endommagées par l'accident consistent à enlever les assemblages de combustible usé et de combustible neuf des piscines d'entreposage à l'intérieur des bâtiments des réacteurs endommagés. La TEPCO a commencé à déplacer le combustible de la piscine d'entreposage située dans le bâtiment de la tranche 4 vers la piscine d'entreposage commune en novembre 2013. L'opération s'est achevée en décembre 2014 [290].

L'enlèvement des assemblages de combustible usé et de combustible neuf des piscines d'entreposage situées dans les tranches 1 à 3 prendra plusieurs années. On ne pourra établir une estimation plus précise du temps nécessaire que lorsque l'enlèvement des débris résultant des explosions, la préparation de la structure supérieure des tranches 1 à 3 pour faciliter l'accès, l'installation d'étais pour soutenir l'équipement et les structures d'enlèvement et d'autres mesures auront progressé. Le combustible usé sera placé dans une piscine commune pour un entreposage temporaire.

L'enlèvement et la gestion des débris de combustible fondu dans le cœur des réacteurs sont des tâches bien plus complexes. Une confirmation visuelle de la configuration et de la composition du combustible endommagé (les 'débris de combustible') à la suite de l'accident n'a pas été possible, en raison des niveaux de doses de rayonnements élevés dans les réacteurs endommagés. Selon les analyses disponibles, la majeure partie du combustible dans la tranche 1 a fondu et une partie est passée du fond de la cuve sous pression du réacteur dans l'enveloppe de confinement primaire, alors que dans les tranches 2 et 3 le combustible a également fondu, mais une proportion plus importante est demeurée dans la cuve sous pression des réacteurs [9].

Au moment de la rédaction du présent rapport, le gouvernement japonais parrainait des études de fond portant notamment sur les moyens d'avoir accès aux débris de combustible et de les enlever [276, 291]. Un modèle théorique, qui tient compte des nombreuses étapes préliminaires nécessaires, a été élaboré pour les futures activités d'enlèvement des débris de combustible, notamment les suivantes :

- 1) **Réduction de l'intensité de rayonnement dans les bâtiments des réacteurs.** Il est difficile pour les travailleurs d'accéder aux espaces dans les bâtiments des réacteurs en raison des débits de dose élevés et des gravats et de la poussière contaminés qui s'y sont accumulés un peu partout. Dans bien des cas, il faudra procéder à une décontamination à l'aide de dispositifs télécommandés pour pouvoir y accéder.
- 2) **Réparation des enveloppes de confinement primaire contenant de l'eau.** Une étude sera menée et les équipements nécessaires permettant de stopper les fuites d'eau à partir des enveloppes de confinement seront mis au point, après quoi les niveaux d'eau seront contrôlés et maintenus selon les besoins pour les opérations ultérieures.
- 3) **Caractérisation des conditions dans les enveloppes de confinement primaire.** L'enlèvement des débris de combustible nécessite de déterminer les emplacements exacts où ils se sont disséminés. Des équipements seront mis au point pour étudier les conditions dans les enveloppes de confinement, et les informations nécessaires sur, notamment, les emplacements, la répartition et la forme des débris seront obtenues.

- 4) **Caractérisation des conditions dans les cuves sous pression des réacteurs.** Elle portera sur la répartition des débris de combustible, les niveaux de radioactivité et la configuration physique des cuves sous pression endommagées.
- 5) **Mise au point de technologies pour l'enlèvement des débris de combustible.** Les conditions préalables à l'enlèvement des débris de combustible seront déterminées, après quoi il faudra mettre au point des technologies et des équipements pour ouvrir les réacteurs et enlever les obstacles structurels à l'intérieur de la cuve sous pression des réacteurs et les débris de combustible.
- 6) **Gestion de l'eau.** Outre le refroidissement et le contrôle du bore, il faudra assurer une gestion rigoureuse de l'eau au fur et à mesure que progressera l'enlèvement des débris de combustible. Il faudra par exemple des moyens supplémentaires pour enlever les matières sous forme de particules qui restent en suspension dans l'eau à la suite des opérations d'enlèvement.
- 7) **Emballage, transfert et entreposage des débris de combustible.** À mesure que les débris seront enlevés des cuves sous pression des réacteurs et des enveloppes de confinement primaire, ils devront être placés dans des conteneurs blindés. Ces conteneurs devront être retirés des bâtiments des réacteurs et temporairement entreposés sur le site de Fukushima Daiichi jusqu'à ce qu'une décision définitive quant à leur évacuation ait été prise.
- 8) **Prévention de la criticité des débris de combustible.** Des évaluations seront menées et des techniques de contrôle radiologique mises en place pour éviter tout risque de criticité dans les débris.
- 9) **Comptabilité et contrôle des matières nucléaires dans les débris de combustible.** Il est obligatoire de rendre compte des matières fissiles, conformément à l'accord de garanties conclu entre le Japon et l'AIEA et au droit interne japonais. Les méthodes habituelles ne pouvant pas être appliquées aux débris de combustible, des mesures spéciales seront mises au point à cet effet avant que ceux-ci soient retirés des réacteurs.

Les débris de combustible seront retirés tout en restant submergés dans l'eau de manière à fournir une protection et à réduire au minimum les rejets de matières radioactives dans l'air. En raison des niveaux élevés de rayonnement et de contamination et des inconnues quant à la répartition et aux propriétés des débris de combustible, la majeure partie des travaux devront être effectués à l'aide d'équipements télécommandés. Les stratégies pour l'enlèvement de ces débris devront être adaptées en fonction des données sur l'état du combustible et des débris de combustible qui deviendront disponibles, tout comme devront l'être les plans concernant la conception, l'ingénierie et la construction des équipements appropriés.

#### **5.2.5. Stade final du déclasséement du site**

Dans des circonstances normales (non accidentelles), l'état final d'une centrale nucléaire est défini et décrit dans la demande d'autorisation et les pièces justificatives ultérieures. Il existe en général deux stratégies pour parvenir à cet état : le démantèlement immédiat et le démantèlement différé, parfois appelé entreposage sûr. Dans des circonstances exceptionnelles, par exemple après un accident nucléaire, la mise sous massif de protection peut aussi être envisagée [292].

Un accident nucléaire peut invalider les plans de déclasserement établis antérieurement en raison, par exemple, de la nécessité de stabiliser les structures, systèmes et composants avant qu'un nouveau plan de déclasserement puisse être élaboré. Les plans de déclasserement, l'enlèvement des débris de combustible et les options existant pour l'état final du site dépendent de la nature de l'accident et prendront en considération l'état des résidus nucléaires, des particules et des matières radioactives demeurant dans les installations, du combustible usé et des débris de combustible entreposés et enfin des déchets radioactifs solides et de l'eau traitée entreposés [293]. Les intérêts des parties prenantes connus, par exemple, grâce à un processus de consultation de la population approprié, auront aussi une influence sur la planification et l'exécution du déclasserement.

Il est actuellement impossible de prévoir l'état final de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [291]. Il convient de noter qu'aucune des trois autres centrales dans le monde à avoir encouru les plus graves dommages au combustible au cours d'accidents précédents n'a encore atteint le stade final de déclasserement complet [293] (encadré 5.3).

**Encadré 5.3. État du déclasserement d'installations nucléaires endommagées**

Les trois autres centrales à avoir encouru ailleurs les plus graves dommages au combustible au cours d'accidents précédents sont Windscale (Royaume-Uni), Three Mile Island (États-Unis d'Amérique) et Tchernobyl (ex-Union soviétique). Au moment de la rédaction du présent rapport, leur situation était la suivante :

Le réacteur de Windscale, endommagé lors d'un accident en 1957, était en mode entretien et maintenance et devait être placé en entreposage sûr au cours des quelques prochaines années, son déclasserement final devant intervenir aux environs de 2050.

La tranche de la centrale nucléaire de Three Mile Island endommagée en 1979 était en entreposage sûr, son démantèlement complet et la remédiation du site étant prévus dans les 20 prochaines années.

La tranche 4 de la centrale de Tchernobyl, gravement endommagée lors de l'accident survenu en 1986, était en voie d'être placée en entreposage sûr, son déclasserement final étant prévu aux alentours de 2050.

Pour prendre une décision définitive quant à l'état final du site de Fukushima Daiichi, il faudra envisager de nombreux facteurs, dont l'utilisation future des terres, les possibles doses de rayonnements aux travailleurs affectés au déclasserement, le volume des déchets qui seraient produits et les options existant pour leur conditionnement et stockage définitif.

### 5.3. GESTION DES MATIÈRES CONTAMINÉES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

*Les opérations de stabilisation d'une centrale nucléaire endommagée et de décontamination sur le site et les activités de remédiation menées dans ses environs génèrent un volume important de matières contaminées et de déchets radioactifs. Sur le site, de grandes quantités de matières solides et liquides contaminées ont été générées à la suite des diverses activités de relèvement<sup>114</sup>. La gestion de ces matières – compte tenu de leurs caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques différentes – est complexe et requiert des efforts considérables.*

*À la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, il avait été difficile de trouver des emplacements pour entreposer les grandes quantités de matières contaminées dues aux*

<sup>114</sup> La distinction entre matières contaminées et déchets radioactifs dépend des radionucléides et des concentrations d'activité associés aux matières.

*activités de remédiation hors site. Plusieurs centaines d'installations d'entreposage temporaire avaient été implantées dans des localités avoisinantes. Les efforts faits pour construire une installation d'entreposage provisoire se poursuivaient.*

### **5.3.1. Gestion des déchets**

Le séisme et le tsunami ont laissé derrière eux une grande quantité de déchets (les 'déchets de la catastrophe'), dont certains ont été contaminés (essentiellement par du  $^{134}\text{Cs}$  et du  $^{137}\text{Cs}$ ) par les rejets en provenance de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Les activités de stabilisation sur le site ont accru la quantité de matières contaminées et de déchets radioactifs solides et liquides devant être gérés, tandis que les activités de remédiation hors du site ont contribué à l'augmentation des matières contaminées.

#### ***Encadré 5.4. Déchets radioactifs***

Les déchets radioactifs sont des matières pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue et qui contiennent des radionucléides dont la composition ou la concentration sont supérieures à un niveau spécifié. Le stockage définitif est le stade ultime de leur gestion qui est internationalement reconnu. Toutefois, il est souvent nécessaire d'en entreposer certains pendant des dizaines d'années en attendant la construction d'installations de stockage définitif. Certains types de déchets radioactifs (ceux de faible activité) peuvent être stockés définitivement dans de telles installations construites 'en surface ou à faible profondeur'.

La gestion (prétraitement, traitement et conditionnement, transport, entreposage et stockage définitif ultérieurement) de grandes quantités de déchets ayant des propriétés physiques, chimiques et radiologiques différentes pose un défi. Il a fallu mettre au point des équipements, des activités et des installations et/ou les modifier en fonction des circonstances, rendues encore plus complexes par le fait que l'infrastructure avait été détruite par le séisme et le tsunami et que l'intensité de rayonnement était élevée. Il a fallu aussi modifier la législation et la stratégie nationale de gestion des déchets [124, 266, 278, 294].

### **5.3.2. Activités hors site**

Les actions de remédiation engagées hors du site avaient pour objectif de réduire les expositions externes. Elles comprenaient l'enlèvement de terre végétale et de végétation ainsi que la décontamination de zones publiques et de zones d'habitation. La superficie de la zone à remédier a été déterminée en fonction des critères radiologiques et des niveaux d'action adoptés, qui ont eu aussi des répercussions sur le volume des matières contaminées devant être gérées.

De manière générale, un niveau de référence bas a pour effet d'accroître le volume des matières contaminées. Selon des estimations, la quantité de sol et d'autres matières contaminées accumulée du fait des activités de remédiation menées après l'accident variera entre 16 et 22 millions de  $\text{m}^3$  après l'incinération des plantes et arbres qui permettra d'en réduire le volume [273].

Les étapes du processus de gestion des déchets adopté dans la préfecture de Fukushima sont décrites dans la figure 5.6. La gestion des déchets générés par les activités de remédiation consiste à les rassembler dans des installations d'entreposage temporaire près des lieux de décontamination. Plusieurs centaines de telles installations ont été construites. Ces déchets seront ultérieurement transportés dans l'installation d'entreposage provisoire. Certaines

matières ont des niveaux de contamination suffisamment bas pour qu'il soit possible d'utiliser l'infrastructure locale de stockage des déchets municipaux solides (incinérateurs et sites de décharge municipaux). Cependant, l'accord des municipalités en vue de l'utilisation des incinérateurs classiques pour réduire le volume des matières contaminées en dehors du site a été difficile à obtenir.

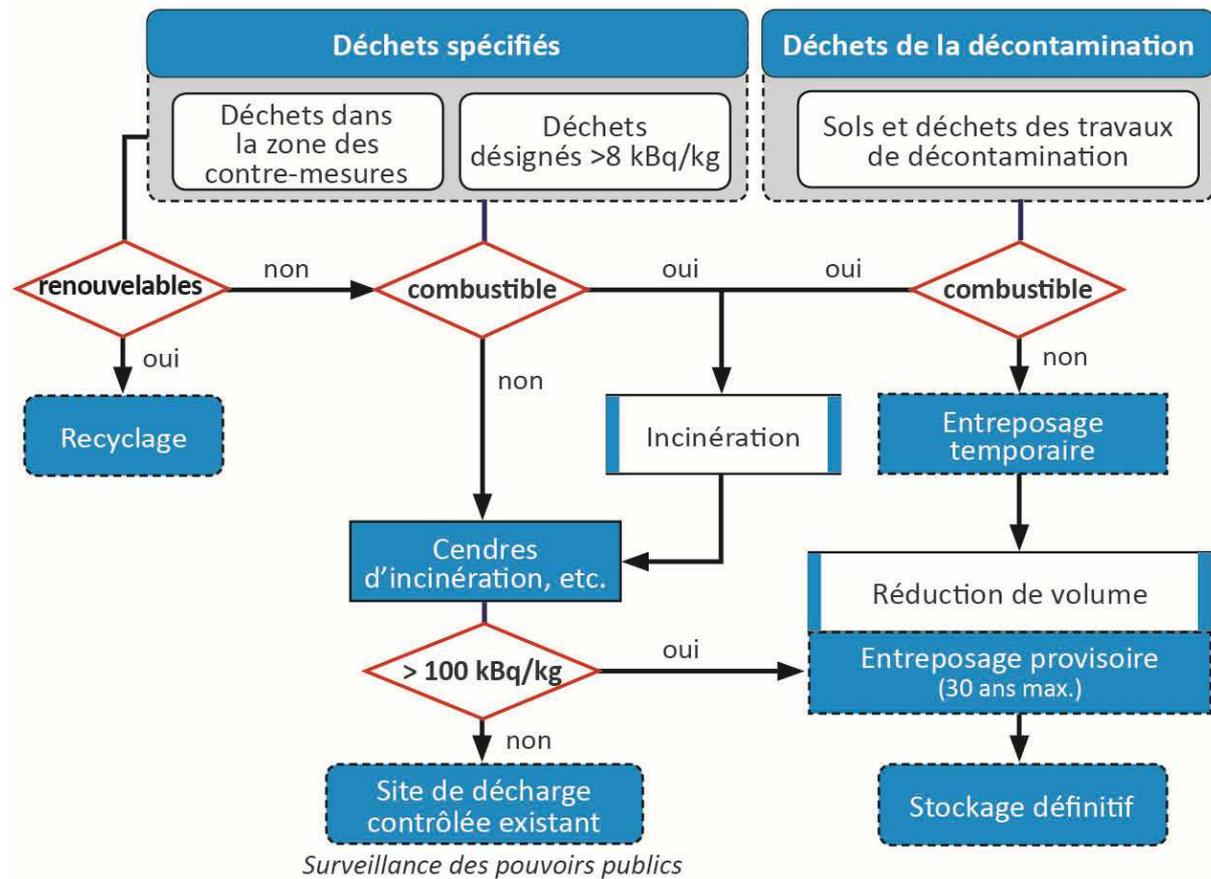


FIG. 5.6. Organigramme de la gestion des déchets spécifiés et des déchets issus de la décontamination dans la préfecture de Fukushima [295].

La sélection de sites pour les installations d'entreposage temporaire et provisoire a pris du retard. Un facteur qui a contribué à ces retards a résidé dans la recherche de l'agrément de la population locale. Toutefois, après des discussions entre les autorités nationales et locales d'une part et les résidents et propriétaires terriens du cru d'autre part, le plan de construction d'une installation d'entreposage provisoire a été accepté à Okuma en décembre 2014 et à Futuba en janvier 2015. En janvier 2015, le Ministère de l'environnement a confirmé les plans et dispositions pour le transport à l'échelle pilote de sols contaminés vers l'installation d'entreposage provisoire à partir de mars 2015 [273] ; ces opérations de transport ont commencé le 13 mars 2015 à titre d'essai.



### 5.3.3. Activités sur le site

À la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, les diverses activités de relèvement ont généré de grandes quantités de matières solides et liquides contaminées ainsi que de déchets radioactifs. Par exemple, au 30 novembre 2014, 131 900 m<sup>3</sup> de débris et 79 700 m<sup>3</sup> d'arbres étaient entreposés sur le site [296, 297]. La production de matières contaminées et de déchets radioactifs en si grande quantité a nécessité la mise au point de stratégies efficaces de gestion des déchets. Il a fallu en particulier construire des installations pour le traitement et l'entreposage de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes d'eau contaminée et traitée ainsi que pour les déchets solides résultant des processus de traitement et de défrichage de vastes étendues de terres. La figure 5.7 montre un extrait de la stratégie de gestion des déchets sur le site, y compris les installations pour le traitement et l'entreposage de l'eau.

Des capacités d'entreposage continuent d'être nécessaires pour résorber les divers types de flux de déchets solides et liquides (fig. 5.8). En conséquence, la réduction de leur volume par divers moyens, par exemple en limitant leur production, en construisant des incinérateurs, en réutilisant et en recyclant des matières, est devenue une composante importante de la gestion des déchets sur le site. Le déclassement de la centrale nucléaire devrait générer d'autres déchets [298]. Leurs types et leur volume dépendront de l'approche adoptée.



FIG. 5.8. Vue aérienne de la zone du site montrant les citernes d'entreposage de l'eau [301].

On s'est efforcé de placer les déchets radioactifs à l'écart du site pour limiter les débits de dose sur son pourtour de sorte qu'ils y soient inférieurs à 1 mSv/an. Ces activités n'ont aucun impact sur l'exposition de la population, la périphérie du site étant désertée [299].

La gestion des déchets sur le site pose de nombreux problèmes complexes et nécessite des travaux de recherche-développement plus approfondis. Comme de nouvelles capacités se libèrent, il faudra envisager une stratégie de stockage définitif des déchets présents sur le site, ce qui suppose des décisions pour le court et le long terme [300].

#### 5.4. REVITALISATION DES COLLECTIVITÉS ET ENGAGEMENT DES PARTIES PRENANTES

*L'accident nucléaire et les mesures de radioprotection prises pendant les phases d'urgence et de relèvement après l'accident ont eu des répercussions considérables sur le mode de vie de la population touchée. Les mesures d'évacuation et de relogement ainsi que l'imposition de restrictions sur les denrées alimentaires ont durement éprouvé les personnes concernées. Les projets de revitalisation et de reconstruction mis sur pied dans la préfecture de Fukushima ont pris en compte les conséquences socio-économiques de l'accident. Ils portent sur des questions telles que la reconstruction des infrastructures, la revitalisation des collectivités, le soutien à leur apporter et leur indemnisation.*

*La communication avec le public à propos des activités de relèvement est essentielle pour instaurer la confiance. Pour communiquer efficacement, il faut que les experts comprennent les besoins d'information de la population touchée et qu'ils lui fournissent des informations compréhensibles par les moyens appropriés. La communication s'est améliorée après l'accident et la population touchée a participé de plus en plus à la prise de décisions et aux mesures de remédiation.*

L'accident et les actions protectrices engagées pendant les phases d'urgence et de relèvement ont eu des répercussions sur le mode de vie des populations touchées. Au 30 janvier 2015, il y avait à peu près 119 000 personnes évacuées, contre environ 164 000 au maximum en juin 2012. Les épreuves subies du fait de l'évacuation, du relogement et des restrictions concernant les aliments sont de taille [268, 269].

Le séisme, le tsunami et l'accident ont détruit, dégradé ou mis hors service les infrastructures (y compris les écoles, hôpitaux et entreprises commerciales), ont eu un impact sur les affaires et le commerce, et ont entraîné des changements démographiques du fait de l'évacuation d'un grand nombre de personnes. Il a été indiqué que les familles jeunes resteraient probablement évacuées alors que les personnes plus âgées auraient tendance à regagner leur foyer [302]. Les plans de relèvement et de revitalisation aux niveaux national et local reconnaissent l'importance de la reconstruction matérielle et socio-économique et traitent des aspects comme la reconstruction des infrastructures, le soutien aux collectivités et leur indemnisation [269].

Les personnes vivant dans des logements temporaires sont confrontées à des problèmes particuliers comme ceux ayant trait au bien-être général physique et mental du fait des niveaux élevés de chômage et des difficultés associées à cet hébergement provisoire [239]. Le nombre total de personnes évacuées vivant dans des logements temporaires à la suite du séisme, du tsunami et de l'accident nucléaire n'est pas connu précisément, mais, en juin 2013, 16 800 hébergements provisoires avaient été construits et près de 24 000 familles vivaient dans des logements loués par les autorités préfectorales [269]. De plus, il était prévu de construire, pour 2015, 2 586 logements sociaux permanents pour les victimes du séisme et du tsunami. Quant à celles qui ont été évacuées après l'accident, il était prévu de construire 4 890 logements sociaux permanents à leur intention [283].

### 5.4.1. Conséquences socio-économiques

Des exploitations agricoles et des entreprises ont été abandonnées en raison de l'évacuation. La pêche a été interrompue dans un rayon de 30 km autour du site (ramené à 20 km à la fin de septembre 2011). Il n'y a plus d'activités agricoles ni d'autres activités commerciales sur une superficie de 700 km<sup>2</sup> autour de la zone de décontamination spéciale [269, 303, 304].

Les conséquences socio-économiques sur le secteur agricole et d'autres entreprises sont aussi visibles en dehors de la zone de décontamination spéciale et de la zone d'étude intensive de la contamination. Non seulement les victimes ont perdu leurs emplois et leurs moyens d'existence, mais les restrictions sur les aliments, les pertes à l'exportation de denrées alimentaires et de biens de consommation, les coûts du contrôle radiologique destiné à démontrer le respect des critères radiologiques et le versement d'une indemnisation à ces victimes ont aussi eu un impact. La perte de confiance des consommateurs non seulement dans les denrées alimentaires mais aussi dans les marchandises provenant des zones touchées et dans les entreprises y travaillant est une des conséquences socio-économiques indirectes [269, 303, 305].

La combinaison du séisme, du tsunami et de l'accident nucléaire a eu un impact direct sur l'économie japonaise. Les exportations ont chuté de 2,4 % en avril 2011 par rapport à leur niveau d'avril 2010. Dans le même temps, les importations ont augmenté, notamment celles de carburants et combustibles, de produits chimiques et de denrées alimentaires, provoquant un déficit de la balance commerciale en avril et mai 2011 [303]. Les importations de combustibles fossiles demeuraient à un niveau élevé au moment de la rédaction du présent rapport [306].

Au moment de l'accident, le Japon n'était partie à aucune des conventions sur la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires (il a adhéré à la Convention sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires (CRC) le 15 janvier 2015), mais la législation adoptée en 1961 était conforme aux principes fondamentaux de la responsabilité nucléaire inscrits dans ces conventions. En vertu de cette législation, la TEPCO était exclusivement responsable des dommages nucléaires causés par l'accident de Fukushima Daiichi [307]. En outre, sa responsabilité était illimitée en termes de montant. Après l'accident, aucune exonération de responsabilité ne lui a été accordée ni par le gouvernement ni par le parlement, partant du principe que la clause d'exemption relative à un cataclysme naturel de la Loi sur les conventions d'indemnisation relatives à la réparation des dommages nucléaires était inapplicable dans ce cas. Différents moyens ont été mis en place pour permettre à la TEPCO de remplir ses obligations vis-à-vis des victimes de l'accident, dont le versement d'indemnités provisoires en tant que mesure d'urgence, la fourniture à son intention d'une aide financière par l'Organisme chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclassement (NDF) et la prise de participation majoritaire de ce dernier dans la TEPCO. En outre, la création du Comité de règlement des différends pour la réparation des dommages nucléaires et la publication de lignes directrices non juridiquement contraignantes ont été de bons moyens d'accélérer les règlements à l'amiable en matière de réparation des dommages nucléaires.

La politique de réparation en vigueur s'applique à ceux qui avaient été obligés d'évacuer, et couvre aussi les conséquences sur les moyens d'existence et le mode de vie, le manque à gagner dû aux restrictions et à la perte de confiance des consommateurs, et la modification des infrastructures pour les personnes restant sur place. Elle contient également des dispositions particulières pour les parents de jeunes enfants et les femmes enceintes [308].

Conformément aux lignes directrices établies en décembre 2011, l'indemnisation des personnes évacuées a été de l'ordre de 100 000 yens par personne et par mois. Toute personne revenant vivre dans les zones touchées dans un délai d'un an après le retrait de l'ordre d'évacuation recevra en outre quelque 900 000 yens d'indemnités supplémentaires [309].

#### **5.4.2. Revitalisation**

Plusieurs initiatives destinées à stimuler la revitalisation de la préfecture de Fukushima ont été mises en œuvre avec l'aide des autorités nationales et locales. Elles portent notamment sur la reconstruction des infrastructures, des habitations et des voies de transport. Certaines actions visent plus particulièrement à regagner la confiance des consommateurs dans les produits, tout en ravivant la fierté des gens du cru et en défendant le tourisme local. D'autres se concentrent sur la reconstruction des entreprises et la création de nouvelles opportunités commerciales, car la présence de travail et d'emplois constitue aussi une incitation majeure au retour des résidents (ou à l'installation de nouveaux habitants).

Les initiatives de revitalisation et les activités de reconstruction liées au relèvement vont de celles menées par les pouvoirs publics au niveau national à des initiatives d'organisations non gouvernementales et de collectivités locales. Le gouvernement japonais a créé une Agence pour la reconstruction, la préfecture de Fukushima a pris diverses initiatives, dont la fondation du Centre pour la création environnementale [234, 269], tandis que la TEPCO a établi en 2013 le Centre pour la revitalisation de Fukushima. Tous ces projets visent à concilier les mesures de radioprotection avec des aspects sociétaux plus larges, comme la revitalisation des infrastructures et l'engagement et – dans le cas du Centre pour la revitalisation – l'indemnisation de la population [310].

Les mesures prises dans la préfecture sont inégales, selon l'engagement des responsables locaux et les différents problèmes qui se posent dans la région. On peut citer comme exemples d'initiatives de revitalisation réussies la coopération instaurée entre les producteurs et distributeurs de pêches et l'industrie alimentaire pour restaurer la confiance du public dans les aliments produits dans la préfecture de Fukushima [269, 311].

#### **5.4.3. Engagement des parties prenantes et communication avec celles-ci**

Les parties prenantes s'engagent de plus en plus, et les stratégies de consultation et de participation se sont améliorées à mesure que les actions de remédiation et de relèvement progressaient. L'intervention après l'accident a fourni de nombreux exemples qui illustrent l'intérêt de faire participer les populations touchées aux activités de relèvement, qu'il s'agisse de consultations et d'échanges ou d'actions de remédiation ('activités d'entraide').

Une communication ouverte et efficace avec le public est au cœur de la revitalisation. Un pôle local d'échange d'informations sur la décontamination a ouvert ses portes en janvier 2012 dans la ville de Fukushima en tant que projet conjoint de la préfecture de Fukushima et du Ministère de l'environnement [312].

D'autres activités locales de communication englobent des échanges entre experts et public et la fourniture de conseils spécifiques pour les activités d'entraide. Ces activités ont aidé à rétablir la communication avec les résidents de Fukushima et à restaurer la confiance.

La figure 5.9 montre sous forme d'organigramme le processus de mise en œuvre de la remédiation et les interactions connexes avec les parties prenantes. Celles-ci ont participé et ont été consultées à toutes les étapes de l'élaboration des plans et de leur exécution. Quand il s'agit de procéder à la remédiation de terres privées, il faut obtenir l'accord de leurs propriétaires avant d'y entreprendre une quelconque activité.

Pendant un accident nucléaire, les médias, qu'ils soient traditionnels ou nouveaux, jouent un rôle déterminant dans la communication avec le public. L'accident de Fukushima Daiichi a fait l'objet d'une couverture médiatique intense sur l'internet, les réseaux sociaux et, dans la phase initiale, de la part des chaînes de télévision et de radio diffusant des informations en continu. Cette couverture médiatique a duré plusieurs mois, pendant lesquels ont été surtout mis en avant les problèmes liés au lieu de l'accident, mais aussi les actions protectrices prises par les autorités japonaises. Les réseaux sociaux ont amplifié la diffusion d'informations sur l'événement et des réactions de personnes et d'organisations non gouvernementales. Si des informations étaient disponibles en grande quantité, leur qualité et leur crédibilité étaient inégales [310].

Les spécialistes de la sûreté radiologique devaient en savoir plus sur le type d'informations que réclamait le public et le lui fournir sous une forme compréhensible. Les questions d'une importance cruciale posées par les collectivités touchées et par les médias portaient surtout sur ce que l'on entend par niveaux de rayonnements 'sûrs' [314].

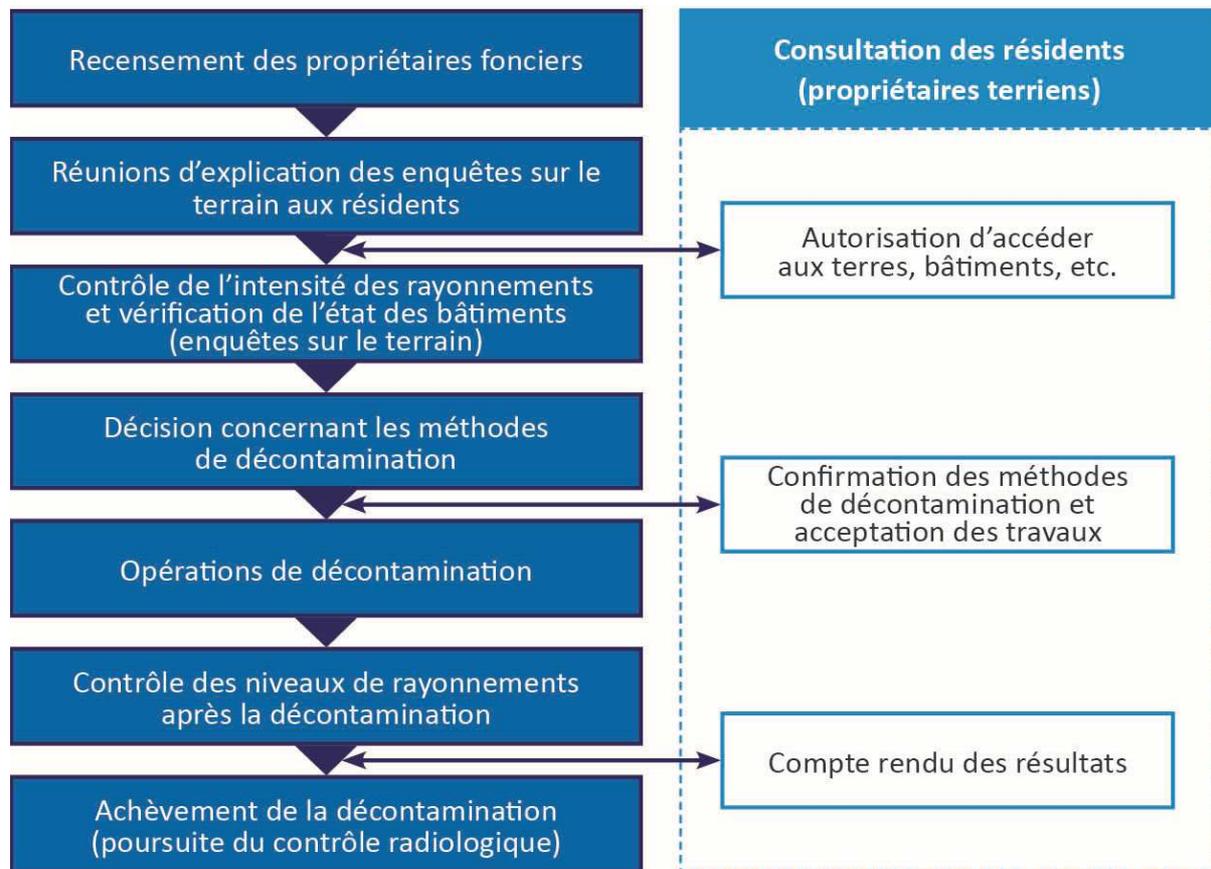


FIG. 5.9. Organigramme du processus de remédiation et de consultation des résidents [313].

## 5.5. OBSERVATIONS ET ENSEIGNEMENTS

Plusieurs observations et enseignements ont été compilés à l'issue de l'évaluation des activités menées après l'accident.

- **Une planification en amont des activités de relèvement après un accident est nécessaire pour améliorer la prise de décisions dans la situation de stress qui suit immédiatement un tel événement. Il faut avoir élaboré à l'avance des stratégies et mesures nationales pour le relèvement afin de pouvoir mettre en place un programme de relèvement global efficace et approprié en cas d'accident nucléaire. Ces stratégies et mesures doivent inclure l'établissement d'un cadre législatif et réglementaire ; des stratégies génériques de remédiation et des critères pour les doses résiduelles de rayonnement et les niveaux de contamination ; un plan de stabilisation et de déclassement des installations nucléaires endommagées ; et une stratégie générique de gestion des grandes quantités de matières contaminées et de déchets radioactifs.**

Ces stratégies et mesures doivent prévoir :

- l'établissement d'un cadre juridique et réglementaire qui précise les rôles et responsabilités des divers établissements qui seront concernés. Ce cadre doit englober la remédiation hors site, la stabilisation sur le site et les préparatifs en vue du déclassement, la gestion des matières contaminées et des déchets radioactifs, la revitalisation des collectivités et l'engagement des parties prenantes.
  - des stratégies et critères génériques de remédiation (niveaux de référence et niveaux d'actions calculés) pour les doses de rayonnements et niveaux de contamination résiduels.
  - un plan pour la stabilisation des conditions sur le site d'une installation nucléaire endommagée et les préparatifs en vue de son déclassement.
  - l'élaboration d'une stratégie générique pour la gestion d'un gros volume de matières contaminées et de déchets radioactifs, basée sur des évaluations génériques de la sûreté des installations d'entreposage et de stockage définitif.
  - une marge de manœuvre suffisante pour que la gestion des conditions post-accidentelles puisse être adaptée en fonction de l'évolution de la situation et des informations et données d'expérience obtenues.
- **Les stratégies de remédiation doivent prendre en considération l'efficacité et l'applicabilité de chaque mesure ainsi que le volume des matières contaminées que générera le processus de remédiation.**

Après avoir établi des niveaux de référence pour les doses de rayonnements et les niveaux de contamination résiduels, il est essentiel de contrôler de près le volume de matières contaminées que génère la mise en œuvre de la stratégie de remédiation pour réduire au minimum la quantité de déchets à gérer. En raison de l'impréparation à un relèvement après un accident nucléaire au Japon, des quantités importantes de déchets potentiellement contaminés ont été produites dans un premier temps. À mesure que le temps passait et que la planification prenait forme, les actions de remédiation ont été optimisées, ce qui a permis de mieux contrôler le volume des déchets à gérer.

Des projets pilotes ont permis de déterminer d'une part l'efficacité de techniques de remédiation particulières et d'autre part la quantité de déchets engendrés par certaines techniques. Ils ont aussi contribué à l'établissement de procédures de radioprotection pour les travailleurs.

- **Dans le cadre de la stratégie de remédiation, l'exécution de tests et de contrôles rigoureux des denrées alimentaires est nécessaire pour prévenir ou réduire au minimum les doses par ingestion.**

L'exécution systématique de tests et de contrôles rigoureux des denrées alimentaires après un accident a démontré que les doses par ingestion peuvent être maintenues à des niveaux faibles.

Pour établir la confiance dans les aliments produits localement, on a établi des points de contrôle radiologique locaux pour que la population des zones touchées puisse venir y faire mesurer des aliments. Ce contrôle des doses par ingestion a simplifié les opérations de relèvement, car la remédiation a pu se concentrer sur les techniques permettant de réduire les doses externes.

- **De nouvelles orientations internationales sur la mise en application des normes de sûreté en radioprotection dans une situation de relèvement post-accidentelle sont nécessaires.**

De nouvelles orientations pratiques sur l'application des normes de sûreté de l'AIEA dans des situations d'exposition existantes sont nécessaires. Les niveaux de référence adoptés pour les premières années après l'accident doivent être revus et modifiés périodiquement, si besoin est, en fonction de l'évolution des conditions radiologiques. Les orientations doivent inclure une méthodologie pour la sélection de niveaux de référence propres à certains cas et sites, exprimés sous forme de grandeurs de dose et de grandeurs calculées, ainsi que des mécanismes pour intégrer des avis techniques et scientifiques à d'autres facteurs socialement pertinents pour la mise en place d'un processus de prise de décisions cohérent, transparent et accepté par tous.

- **Après un accident, il est essentiel pour le relèvement du site d'établir un plan stratégique afin de maintenir des conditions stables sur le long terme et de déclasser les installations endommagées par l'accident. Ce plan doit être adaptable et facile à modifier en fonction de l'évolution de la situation et des nouvelles informations.**

La première étape des préparatifs en vue du déclassement d'une installation endommagée par un accident serait la stabilisation de sorte que les structures, systèmes et composants soient à même de maintenir des conditions stables sur le long terme jusqu'à ce qu'ils ne soient plus indispensables. Ces préparatifs s'étalent sur des dizaines d'années. Il faut prendre des dispositions pour maintenir le savoir-faire et les effectifs nécessaires pendant toute cette période.

Les décisions à prendre sur les étapes intermédiaires du déclassement et sur l'état final du site et des réacteurs endommagés doivent être prises en concertation avec les parties prenantes. Celles concernant le déclassement dépendent de l'état des réacteurs endommagés, du combustible et des débris, qu'il est impossible de déterminer

immédiatement après un accident. Les facteurs à prendre en compte à cet effet sont notamment les niveaux de dose aux travailleurs pendant le déclassement, le volume des déchets produits et leurs types, et les travaux de traitement des déchets nécessaires. S'il est irréaliste de prévoir l'état final du site de la centrale au premier stade des travaux d'assainissement, il faut néanmoins tenir compte dans la prise de décisions des perspectives d'avenir et des plans concernant les terres.

- **Il est nécessaire de trouver des solutions adaptées en fonction de l'accident pour le retrait du combustible endommagé ainsi que pour la caractérisation et l'enlèvement des débris de combustible, et il faudra peut-être élaborer des méthodes et outils spéciaux.**

Un accident dans un réacteur endommageant le combustible nucléaire met le réacteur dans une situation particulière et inédite. L'enlèvement et la gestion des éléments combustibles endommagés et des débris de combustible fondu sont des tâches complexes. Il faut caractériser les débris, les enlever, les emballer et les entreposer en attendant leur stockage définitif et ce dans des conditions difficiles, largement dues à l'intensité de rayonnement élevée.

- **Il faut que les stratégies et les mesures nationales de relèvement après un accident englobent l'élaboration d'une stratégie générique pour la gestion des matières liquides et solides contaminées et des déchets radioactifs, fondée sur des évaluations génériques de la sûreté des rejets, de l'entreposage et du stockage définitif.**

Une stratégie de gestion des déchets est nécessaire pour les opérations de gestion avant stockage définitif (p. ex. la manutention, le traitement, le conditionnement et l'entreposage) des matières contaminées et des déchets radioactifs générés par un accident. Elle doit aussi définir des solutions appropriées pour le stockage définitif des matières. Les stratégies de gestion des déchets peuvent envisager le recours à des installations de transformation, d'entreposage et de stockage définitif existantes, comme des incinérateurs ou des décharges contrôlées de lixiviats. Toutefois, d'autres approches peuvent être nécessaires, selon les quantités et les caractéristiques des déchets concernés. L'élaboration d'un argumentaire de sûreté générique pourrait faciliter la mise au point de ces stratégies.

Des stratégies sont aussi nécessaires pour la gestion post-accidentelle de grandes quantités d'eau contaminée, tenant compte notamment de son rejet contrôlé dans l'environnement. S'il existe des orientations internationales sur les rejets durant l'exploitation normale d'installations nucléaires, il faut davantage d'orientations concernant les situations post-accidentelles.

- **Il est nécessaire de reconnaître les conséquences socio-économiques de tout accident nucléaire et des actions protectrices ultérieures, et de mettre au point des projets de revitalisation et de reconstruction qui traitent notamment les questions de reconstruction des infrastructures, de revitalisation des collectivités et d'indemnisation.**

Les accidents nucléaires et les actions protectrices et correctives appliquées pendant la phase d'urgence et la phase de relèvement après l'accident pour réduire les doses sont lourds de conséquences pour le mode de vie de la population touchée. Il est essentiel

que les parties prenantes s'engagent à divers stades de la remédiation et du relèvement.

- **L'appui des parties prenantes est essentiel pour tous les aspects du relèvement après un accident. En particulier, l'engagement de la population touchée dans les processus de prise de décisions est indispensable pour assurer le succès des opérations de relèvement, les faire accepter et les rendre efficaces, et pour revitaliser les collectivités. Un programme de relèvement ne peut être efficace que si la population touchée a confiance et y participe. Pour qu'elle ait confiance dans la mise en œuvre des mesures de relèvement, il faut dialoguer avec elle, lui communiquer des informations cohérentes, claires et à jour et la soutenir.**

Les gouvernements doivent fournir une description réaliste du programme de relèvement qui soit cohérente, claire et à jour. Il faut utiliser divers canaux d'information, y compris les réseaux sociaux, pour toucher tous les groupes intéressés.

Les perceptions des risques radiologiques et les réponses à la question de savoir ce que l'on entend par niveaux de rayonnements 'sûrs' ont plusieurs dimensions, notamment scientifiques, sociétales et éthiques. Ces réponses doivent être clairement communiquées aux collectivités concernées grâce à des programmes de vulgarisation – de préférence avant qu'un accident ne survienne.

Il est important que la population touchée soit soutenue dans les activités de relèvement locales. Le fait de l'aider à mener des activités d'entraide concernant la remédiation et à rebâtir des entreprises peut faciliter sa participation au programme de relèvement et accroître sa confiance.

## 6. INTERVENTION DE L'AIEA APRÈS L'ACCIDENT

La présente section donne un aperçu des principales activités menées par l'AIEA à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, aussi bien immédiatement après qu'à plus long terme. Ces activités englobent ses premiers travaux, ses missions au Japon, les conférences ministérielles sur la sûreté nucléaire et son plan d'action.

L'AIEA, qui est le dépositaire de la Convention sur la sûreté nucléaire, a pour tâches d'assurer le secrétariat des réunions (organisation, préparation et prestation des services nécessaires) et de communiquer les informations pertinentes aux Parties contractantes. Les activités relatives aux réunions des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire tenues après l'accident de Fukushima Daiichi sont aussi évoquées dans la présente section.

### 6.1. ACTIVITÉS DE L'AIEA

#### 6.1.1. Activités initiales

La responsabilité d'une intervention en cas d'urgence nucléaire ou radiologique mais aussi de la protection des travailleurs, du public et de l'environnement incombe à l'organisme exploitant au niveau de l'installation concernée et à l'État touché aux niveaux local, régional et national.

L'AIEA est au cœur du dispositif international<sup>115</sup> pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence. Ses attributions couvrent : 1) la notification et l'échange d'informations officielles par l'intermédiaire de points de contact officiels ; 2) la communication d'informations à jour, claires et compréhensibles ; 3) la fourniture et la facilitation d'une assistance internationale sur demande ; et 4) la coordination des interventions interorganisations<sup>116</sup>.

L'Agence s'acquitte de ce rôle par l'intermédiaire de son Système des incidents et des urgences (IES). Ce système comprend un point de contact joignable vingt-quatre heures sur vingt-quatre et un point de contact opérationnel constitué par le Centre des incidents et des urgences (IEC).

À 6 h 42 UTC<sup>117</sup> le 11 mars 2011, l'AIEA a activé l'IES après avoir reçu une notification de son Centre international pour la sûreté sismique. Cette notification faisait état de la survenue

---

<sup>115</sup> Au moment de l'accident, le dispositif international pour la préparation et la conduite des interventions d'urgence comprenait les éléments suivants : a) des instruments et accords juridiques internationaux, en particulier la Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire (Convention sur la notification rapide) et la Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique (Convention sur l'assistance) ; b) les normes de sûreté et les orientations techniques de l'AIEA portant sur la préparation et la conduite des interventions d'urgence ; et c) des dispositions et outils opérationnels à l'échelle internationale, notamment le Manuel des opérations techniques de notification et d'assistance en cas d'urgence (ENATOM), le Réseau d'intervention et d'assistance (RANET) de l'AIEA et le Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales (JPLAN).

<sup>116</sup> Le principal organe de coordination pour les situations d'urgence nucléaire et radiologique est le Comité interorganisations des situations d'urgence nucléaire et radiologique (IACRNE). Créé après l'accident de Tchernobyl en 1986, celui-ci compte maintenant 18 organisations internationales. Une de ses principales attributions est d'élaborer et de tenir à jour le Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales (dont le sigle était JPLAN 2010 au moment de l'accident).

<sup>117</sup> Temps universel coordonné, qui est le temps légal au Japon moins neuf heures.

d'un séisme, d'un possible endommagement de quatre centrales nucléaires<sup>118</sup> sur la côte nord-est du Japon et d'un risque de tsunami [143]. À 7 h 21 UTC, l'AIEA a établi une première communication avec le point de contact officiel désigné par le Japon au titre de la Convention sur la notification rapide et de la Convention sur l'assistance.

Dans les premiers jours de l'accident, il s'est avéré que les réacteurs et le combustible placé dans les piscines d'entreposage du combustible usé de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi risquaient d'être gravement endommagés. Par conséquent, l'AIEA a créé des équipes chargées d'évaluer les principaux problèmes de sûreté nucléaire et radiologique. Les Laboratoires de l'AIEA<sup>119</sup> ont examiné les données environnementales de la surveillance du milieu marin communiquées par les autorités japonaises et reçu des échantillons de l'environnement terrestre pour en faire une analyse indépendante.

Le Directeur général de l'AIEA s'est rendu à Tokyo du 17 au 19 mars pour mener des consultations de haut niveau, exprimer la solidarité de la communauté internationale et son entier soutien au Japon face aux conséquences du séisme, du tsunami et de l'accident nucléaire et transmettre les offres d'assistance de plus d'une douzaine de pays. Il a aussi étudié la possibilité que l'AIEA fournisse ou coordonne des types particuliers d'assistance, comme des missions d'experts et des missions de recherche d'informations, et a souligné l'importance de la transparence et de la communication en temps opportun d'informations officielles par le Japon.

Le 28 mars, lors d'une réunion d'information spécialement consacrée à l'accident qui était organisée à l'intention des États Membres de l'AIEA, le Directeur général a annoncé que celle-ci organiserait une conférence de haut niveau sur la sûreté nucléaire à Vienne avant l'été. Il a déclaré qu'« il [était] absolument crucial que nous tirions les bons enseignements de ce qui s'est passé le 11 mars et après, pour renforcer la sûreté nucléaire à travers le monde » [315].

Entre le 18 mars et le 18 avril, l'AIEA a dépêché quatre équipes de contrôle radiologique au Japon, à la demande de ce pays, pour aider à valider les résultats de mesures plus étendues effectuées par les autorités japonaises. Les équipes ont procédé à des mesures sur plusieurs emplacements situés à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'évacuation de 20 km autour de la centrale de Fukushima Daiichi et dans les environs de Tokyo. Un haut responsable de l'AIEA s'est rendu au Japon pour coordonner les activités pertinentes de cette dernière et transmettre aux autorités japonaises les offres d'assistance d'États Membres. Des agents de liaison de l'AIEA ont été envoyés à Tokyo pour faciliter et améliorer la communication avec l'organisme de réglementation japonais, qui était alors la NISA.

---

<sup>118</sup> Fukushima Daiichi et Fukushima Daini de la Compagnie d'électricité de Tokyo (TEPCO), Onagawa (Compagnie d'électricité Tohoku) et Tokai (Japan Atomic Power Company).

<sup>119</sup> Les laboratoires de l'AIEA, situés à Seibersdorf (Autriche) et à Monaco, sont spécialisés dans l'évaluation d'échantillons des environnements terrestre et marin, respectivement.

Une équipe conjointe FAO/AIEA d'évaluation de la sécurité sanitaire des aliments s'est rendue au Japon du 26 au 31 mars. Elle a donné des avis et prêté assistance aux autorités aux niveaux national et local en ce qui concerne des questions techniques relatives à la sécurité sanitaire des aliments et les contre-mesures agricoles. Des conseils ont été prodigués sur les stratégies d'échantillonnage et d'analyse et l'interprétation des données du contrôle radiologique afin que des mises à jour fiables puissent être communiquées en continu sur l'ampleur de la contamination des aliments dans les zones touchées. Les autorités japonaises se sont servi de ces données pour élaborer des stratégies d'atténuation et de remédiation.

Une équipe de l'AIEA composée de spécialistes des réacteurs à eau bouillante est partie pour le Japon le 3 avril et a achevé ses travaux le 12 avril. Elle s'est rendue sur les sites des centrales de Fukushima Daiichi et de Fukushima Daini pour y rencontrer des membres de leur personnel afin de se faire une meilleure idée de l'accident, des mesures d'atténuation prises jusque-là et des raisons ayant motivé les principales décisions prises. Ses membres ont aussi tenu des réunions avec le personnel de plusieurs instances gouvernementales et mené des discussions techniques approfondies avec la TEPCO et la NISA à Tokyo.

La première déclaration de l'AIEA sur l'accident a été rendue publique moins de trois heures après le séisme le 11 mars. Cinq autres déclarations transmettant les informations reçues du Japon ont été publiées plus tard dans la journée. Jusqu'au 22 avril 2011, plus de 120 mises à jour ont été diffusées. L'AIEA a tenu 16 conférences de presse entre le 14 mars et le 2 juin 2011, sans compter celles organisées pendant la visite du Directeur général au Japon. Ses activités d'information du public ont aussi consisté à répondre à des milliers d'appels téléphoniques et à donner des détails techniques en réponse à des centaines de demandes d'information envoyées par les médias.

L'AIEA a publié tous les jours sur son site web public des notes d'information à l'intention des États Membres et des populations. Elle y exposait la situation dans les tranches 1 à 6 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi ; les données du contrôle radiologique concernant des radionucléides comme le  $^{131}\text{I}$ , le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  ; les résultats du contrôle radiologique des aliments et des informations sur les restrictions applicables à leur distribution et leur consommation ainsi qu'à celles d'eau de boisson, et enfin des données sur la surveillance du milieu marin. Elle a aussi organisé des réunions d'information sur l'accident à l'intention des missions permanentes des États Membres à Vienne.

### **6.1.2. Missions de l'AIEA au Japon**

Comme convenu avec le gouvernement japonais, une mission internationale de recherche d'informations composée d'experts de l'AIEA et d'États Membres s'est déroulée du 24 mai au 2 juin 2011. Elle a recueilli des informations pour une évaluation préliminaire de l'accident dans la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi et des événements survenus sur d'autres sites (Fukushima Daini et Tokai Daini). Elle a aussi recensé des problèmes génériques de sûreté associés aux événements naturels qui nécessitaient une étude ou une évaluation plus approfondies à l'aune des normes de sûreté de l'AIEA.

La portée de la mission recouvrait : les événements externes d'origine naturelle ; l'évaluation de la sûreté des centrales et l'application du concept de défense en profondeur ; la réponse des centrales après un séisme et un tsunami ; la gestion d'un accident grave ; la gestion du combustible usé dans une installation gravement endommagée ; la préparation et la conduite des interventions d'urgence et enfin les conséquences radiologiques. Elle a établi ses constats [320], dont 15 conclusions et 16 enseignements, qui ont été présentés lors de la Conférence ministérielle de l'AIEA sur la sûreté nucléaire organisée en juin 2011.

Les autres missions de l'AIEA au Japon sont récapitulées dans le tableau 6.1.

Sur recommandation de la deuxième mission sur le déclassement, des projets ont été lancés pour améliorer la transparence et fournir des évaluations indépendantes de la surveillance du milieu marin effectuée par le Japon. Des tests de compétence ont été menés dans les Laboratoires de l'environnement de l'AIEA à Monaco pour surveiller la bonne marche et les capacités d'analyse des laboratoires participants. Les résultats du programme de surveillance du milieu marin sont régulièrement mis à jour sur le site web de l'AIEA.

### **6.1.3. Conférence ministérielle de l'AIEA sur la sûreté nucléaire**

En juin 2011, une conférence ministérielle sur la sûreté nucléaire a été organisée par le Directeur général au Siège de l'AIEA, l'objectif étant de renforcer la sûreté nucléaire à partir des enseignements tirés de l'accident. Elle a donné l'occasion d'entreprendre, au niveau ministériel et à un niveau technique élevé, une évaluation préliminaire de l'accident. Elle a aussi permis d'examiner les mesures susceptibles d'améliorer la sûreté, des questions en rapport avec la préparation et la conduite des interventions d'urgence et les conséquences pour le cadre mondial de sûreté nucléaire.

La conférence a débouché sur une déclaration ministérielle relative à la sûreté nucléaire [320], qui présentait plusieurs mesures destinées à améliorer encore la sûreté nucléaire, la préparation des interventions d'urgence et la radioprotection des personnes et de l'environnement à travers le monde. Les États Membres de l'AIEA s'y engageaient fermement à veiller à l'application de ces dernières. Les principales mesures visaient à : renforcer les normes de sûreté de l'AIEA ; revoir systématiquement la sûreté de toutes les centrales nucléaires, notamment en développant le programme de l'AIEA d'examen par des pairs spécialisés ; accroître l'efficacité des organismes nationaux de réglementation nucléaire et garantir leur indépendance ; renforcer le système mondial de préparation et de conduite des interventions d'urgence ; et accroître le rôle de l'AIEA en ce qui concerne la réception et la diffusion des informations. Dans la déclaration ministérielle, le Directeur général était par ailleurs prié d'élaborer un projet de Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, en consultation avec les États Membres.

TABLEAU 6.1. MISSIONS DE L’AIEA AU JAPON

Date	Mission	Objectifs
7-15 octobre 2011	Mission internationale sur la remédiation de grandes zones contaminées hors du site de la centrale de Fukushima Daiichi [316]	Aider le Japon à planifier la remédiation de vastes zones contaminées par l’accident. Passer en revue les stratégies, plans et activités de remédiation du Japon en cours d’exécution, y compris la cartographie des zones contaminées. Communiquer ses conclusions à la communauté internationale pour diffuser les enseignements tirés de l’accident.
23-31 janvier 2012	Mission d’examen de l’approche suivie par la NISA pour les évaluations approfondies de la sûreté des installations existantes dotées de réacteurs de puissance [317]	Examiner (à la demande du gouvernement japonais) les évaluations approfondies de la sûreté des installations existantes dotées de réacteurs de puissance effectuées par la NISA, ainsi que les résultats des évaluations du titulaire de licences.
30 juillet-11 août 2012	Mission d’experts à la centrale nucléaire d’Onagawa [318]	Étudier le fonctionnement des systèmes, structures et composants après le séisme et le tsunami.
15-22 avril 2013	Mission internationale d’examen par des pairs de la feuille de route à moyen et long termes pour le déclassement des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO (première mission) [319]	Examiner la « feuille de route pour le déclassement » ; les défis à relever ; l’état des réacteurs ; la gestion des déchets ; la protection des employés ; et l’intégrité des structures des bâtiments des réacteurs et autres édifices.
14-21 octobre 2013	Mission internationale de suivi sur la remédiation de vastes zones contaminées hors du site de la centrale de Fukushima Daiichi [265]	Évaluer l’état d’avancement des travaux de remédiation en cours au Japon et donner des avis sur les défis à relever dans ce domaine.
6-12 novembre 2013	Visite d’experts consacrée à la surveillance du milieu marin	Observer l’échantillonnage d’eau de mer et l’analyse des données à Fukushima (7 et 8 novembre 2013) et rencontrer les autorités japonaises compétentes à Tokyo pour recueillir des informations sur la surveillance du milieu marin effectuée par le Japon dans le cadre de son plan de surveillance des zones maritimes.
25 novembre - 4 décembre 2013	Mission internationale d’examen par des pairs de la feuille de route à moyen et long termes pour le déclassement des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO (deuxième mission) [288]	Examiner la feuille de route actualisée pour le déclassement ; l’enlèvement du combustible usé des piscines d’entreposage ; la gestion de l’eau contaminée ; la gestion des déchets ; et la surveillance du milieu marin.
10-16 septembre 2014 et 4-14 novembre 2014	Mission d’experts sur le renforcement de la confiance dans la surveillance du milieu marin et l’assurance de la qualité des données	Se concentrer sur l’accessibilité des résultats de la surveillance du milieu marin.
8-15 février 2015	Mission internationale d’examen par des pairs de la feuille de route à moyen et long termes pour le déclassement des tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO (troisième mission) [289]	Examiner l’application de la feuille de route pour le déclassement ; la gestion de l’eau contaminée ; les infiltrations d’eaux souterraines ; l’enlèvement du combustible usé et des débris de combustible ; et les questions institutionnelles et organisationnelles.

#### 6.1.4. Le plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire

Le projet de Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire a été approuvé par le Conseil des gouverneurs en septembre 2011. Il a ensuite été présenté à la Conférence générale de l'AIEA à sa session ordinaire de 2011, durant laquelle il a été unanimement entériné par les États Membres [144]. Les participants ont ensuite demandé au Secrétariat et aux États Membres de l'AIEA de mettre en œuvre les actions à titre de priorité absolue de manière complète et coordonnée [321].

Les activités relevant du Plan d'action ont commencé à être mises en œuvre immédiatement après l'adoption de ce dernier. Des efforts conjoints et un engagement sans réserve de la part du Secrétariat de l'AIEA, des États Membres et d'autres parties prenantes ont été nécessaires pour les exécuter intégralement et efficacement.

Depuis l'adoption du Plan d'action, d'importants progrès ont été accomplis dans plusieurs domaines clés, par exemple : évaluations des vulnérabilités de la sûreté des centrales nucléaires, renforcement des services d'examen par des pairs de l'AIEA, réexamen et révision, si besoin était, des normes de sûreté de l'AIEA applicables, amélioration des capacités de préparation et de conduite des interventions d'urgence, création de capacités, renforcement de la communication et de l'échange d'informations avec les États Membres, les organisations internationales et le public. Des rapports d'étape ont été régulièrement présentés au Conseil des gouverneurs et à la Conférence générale de l'AIEA [322-324].

Dans la résolution qui a permis l'adoption du Plan d'action, le rôle de l'AIEA face à une urgence nucléaire a été élargi pour qu'elle puisse notamment communiquer en temps voulu aux États Membres, aux organisations internationales et au public des informations à jour, claires, rapportant des faits exacts, objectives et facilement compréhensibles sur ses conséquences possibles. Elle doit aussi fournir une analyse des informations disponibles et des prévisions de scénarios possibles basés sur des preuves, les connaissances scientifiques et les capacités des États Membres.

Plusieurs réunions d'experts internationaux (REI) consacrées à différents aspects de la sûreté ont eu pour tâches d'analyser les aspects techniques et de tirer les enseignements de l'accident de Fukushima Daiichi. Des rapports sur ces domaines clés, y compris sur les résultats desdites réunions, ont été publiés par l'AIEA (voir le tableau 6.2).

D'autres rapports ont été élaborés en 2013 sur les sujets suivants :

- Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, établi à partir d'une série de réunions techniques tenues en 2012–2013 [327].
- Strengthening Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, établi à partir des résultats de la Conférence internationale sur des systèmes de réglementation nucléaire efficaces, tenue à Ottawa (Canada), en 2013 [328].

### 6.1.5. Coopération avec la préfecture de Fukushima

Un mémorandum de coopération entre l’AIEA et la préfecture de Fukushima a été signé en décembre 2012 [329]. Sur la base de ce mémorandum, des arrangements pratiques sur la coopération dans les domaines du contrôle radiologique et de la remédiation [330], de la santé humaine [331] ainsi que de la préparation et de la conduite des interventions d’urgence [332] ont été signés avec la préfecture de Fukushima, l’Université de médecine de Fukushima et le Ministère japonais des affaires étrangères, respectivement.

Un centre de création de capacités du Réseau d’intervention et d’assistance (RANET) de l’AIEA a été désigné dans la ville de Fukushima en mai 2013. Il sert à diverses activités de l’AIEA visant à renforcer les capacités de préparation et de conduite des interventions d’urgence, tant au Japon qu’ailleurs dans le monde. Plusieurs ateliers de formation y ont été organisés sur le contrôle radiologique pendant une situation d’urgence nucléaire et radiologique, la notification, l’établissement de rapports et la demande d’une assistance, ainsi que sur la préparation et la conduite des interventions d’urgence.

TABLEAU 6.2. RÉUNIONS D’EXPERTS INTERNATIONAUX (REI)

Date	Intitulé	Orientation générale
19-22 mars 2012	REI I : Sûreté des réacteurs et du combustible usé à la lumière de l’accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [42]	Analyser des questions techniques ; comprendre les causes profondes ; partager les enseignements tirés de l’accident.
18-20 juin 2012	REI II : Amélioration de la transparence et de l’efficacité de la communication en cas d’urgence nucléaire ou radiologique [314]	Tirer des enseignements de l’accident, les analyser et étudier les meilleures pratiques destinées à améliorer la diffusion des informations.
4-7 septembre 2012	REI III : Protection contre les séismes et les tsunamis extrêmes à la lumière de l’accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [325]	Mettre en commun les enseignements tirés ; échanger des informations et répertorier les questions à approfondir : évaluation du risque de séismes et de tsunamis ; problèmes particuliers d’inondation ; incertitudes associées aux évaluations du risque ; méthodes d’établissement des valeurs nominales ; événements hors dimensionnement ; sûreté à l’épreuve des séismes et des tsunamis.
28 janvier – 1 <sup>er</sup> février 2013	REI IV : Déclassement et remédiation après un accident nucléaire [293]	Examiner les problèmes se posant à court et à long terme en matière de déclassement d’installations endommagées par un accident, la gestion des déchets radioactifs dus à un accident nucléaire et la remédiation de l’environnement hors site.
21-24 mai 2013	REI V : Facteurs humains et organisationnels dans le domaine de la sûreté nucléaire à la lumière de l’accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi [67]	Étudier les moyens d’améliorer la culture de sûreté nucléaire dans divers établissements clés, y compris les organismes exploitants et les organismes de réglementation.
17-21 février 2014	REI VI : Radioprotection après l’accident de Fukushima Daiichi : pour une confiance accrue et une meilleure compréhension [326].	Se concentrer sur les questions de radioprotection que l’accident de Fukushima Daiichi a mis en lumière et sur la manière de les traiter aux niveaux national et international.

Date	Intitulé	Orientation générale
17-20 mars 2014	REI VII : Gestion des accidents graves à la lumière de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi	Recueillir et mettre en commun les connaissances et les données d'expérience acquises à la lumière de l'accident de Fukushima Daiichi en ce qui concerne la gestion des accidents graves (GAG) ; tirer des enseignements et recenser les meilleures pratiques.
16-20 février 2015	REI VIII : Renforcement de l'efficacité de la recherche-développement à la lumière de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi	Faciliter l'échange d'informations tirées des nouveaux travaux de recherche-développement entrepris par les États Membres de l'AIEA, ainsi que par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (OCDE/AEN) et d'autres organisations internationales s'intéressant aux accidents graves dans les centrales nucléaires, y compris ceux qui ont des incidences sur les piscines d'entreposage du combustible usé ; renforcer davantage la collaboration internationale entre les États Membres et les organisations internationales.
20-24 avril 2015	REI IX : Évaluation et prévisions en réponse à une situation d'urgence nucléaire ou radiologique	Pendant une situation d'urgence nucléaire ou radiologique, faciliter la mise en commun d'informations à jour, claires et rapportant des faits exacts sur la situation et ses conséquences possibles, y compris l'analyse des informations disponibles et les prévisions de scénarios possibles basés sur des preuves, les connaissances scientifiques et les capacités des États Membres.

#### 6.1.6. Conférence ministérielle de Fukushima sur la sûreté nucléaire

En décembre 2012, le gouvernement japonais a organisé dans la préfecture de Fukushima une conférence ministérielle coparrainée par l'AIEA, dont le principal objectif était de contribuer au renforcement de la sûreté nucléaire dans le monde [333]. La conférence a donné l'occasion de partager avec la communauté internationale les connaissances et enseignements supplémentaires tirés de l'accident et d'examiner les progrès des efforts déployés au niveau international pour renforcer la sûreté nucléaire, notamment ceux de la mise en œuvre du Plan d'action.

Les discussions y ont porté notamment sur l'intensité du rayonnement à Fukushima Daiichi, les obstacles à surmonter après l'accident en vue du déclassement et de la remédiation, et le bilan des dommages et des opérations de relèvement dans les zones situées autour de la centrale. Les participants ont souligné l'importance de prendre des mesures à partir d'informations scientifiques et factuelles en cas d'urgence nucléaire ou radiologique et de renforcer la coopération internationale.

## 6.2. RÉUNIONS DES PARTIES CONTRACTANTES À LA CONVENTION SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

### *Encadré 6.1. Convention sur la sûreté nucléaire*

La Convention sur la sûreté nucléaire a été adoptée le 17 juin 1994 à Vienne [334]. C'est le premier traité international juridiquement contraignant à traiter de la sûreté des installations nucléaires (centrales nucléaires civiles fixes), dont les objectifs sont les suivants : atteindre et maintenir un haut niveau de sûreté nucléaire dans le monde entier ; établir et maintenir des défenses efficaces contre les dangers radiologiques potentiels afin de protéger les individus, la société et l'environnement ; et prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et atténuer ces conséquences au cas où de tels accidents se produiraient. La Convention est entrée en vigueur le 24 octobre 1996. En mars 2015, elle comptait 77 Parties contractantes.

Les obligations des Parties contractantes reposent en grande partie sur les principes qui sont énoncés dans la publication de l'AIEA intitulée Principes fondamentaux de sûreté (SF-1) [335]. Elles couvrent en particulier : le choix du site, la conception, la construction et l'exploitation des installations nucléaires ; l'établissement et le maintien d'un cadre législatif et réglementaire ; la création d'un organisme de réglementation doté de pouvoirs, d'une compétence et de ressources financières et humaines adéquats ; la mise à disposition de ressources financières et humaines adéquates pour promouvoir la sûreté des installations nucléaires ; l'évaluation et la vérification de la sûreté ; l'assurance de la qualité ; et la préparation des interventions d'urgence.

Les Parties contractantes sont tenues de présenter un rapport sur les mesures qu'elles ont prises pour remplir chacune des obligations énoncées dans la convention. Ces rapports sont examinés pendant les réunions d'examen qu'elles tiennent tous les trois ans sous les auspices de l'AIEA.

### **6.2.1. Réunion extraordinaire des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire**

À la cinquième réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire, tenue du 4 au 14 avril 2011, les Parties ont adopté une déclaration dans laquelle elles ont notamment réaffirmé leur engagement en faveur des objectifs de la convention. Les Parties contractantes ont convenu d'organiser une réunion extraordinaire pour passer en revue les premières analyses de l'accident et en débattre et étudier l'efficacité de cet instrument.

La réunion extraordinaire s'est déroulée au Siège de l'AIEA à Vienne, du 27 au 31 août 2012. Les Parties contractantes ont passé en revue les questions suivantes : événements externes ; questions relatives à la conception ; gestion des accidents graves et opérations de relèvement (sur site) ; organismes nationaux ; préparation et conduite des interventions d'urgence ; gestion post-accidentelle (hors site) et coopération internationale.

Les Parties contractantes ont en outre approuvé par consensus plusieurs actions concrètes destinées à renforcer l'efficacité du processus d'examen par des pairs. Les trois documents d'orientation <sup>120</sup> qui sous-tendent la convention ont été modifiés de sorte à améliorer la transparence du processus d'examen, à encourager les Parties contractantes à se référer aux normes de sûreté de l'AIEA dans leurs rapports nationaux et à renforcer les travaux d'amélioration continue par la réalisation de réévaluations périodiques de la sûreté grâce à des examens périodiques de la sûreté ou d'autres méthodes appropriées.

Un Groupe de travail sur l'efficacité et la transparence a été chargé de faire rapport à la sixième réunion d'examen des Parties contractantes sur d'autres mesures destinées à

<sup>120</sup> Les règles de procédure et règles financières [336], les principes directeurs concernant le processus d'examen [337] et les principes directeurs concernant les rapports nationaux [338].

renforcer la Convention sur la sûreté nucléaire et des propositions d'amendement de cette dernière, si nécessaire. Les Parties contractantes ont aussi étudié une liste d'objectifs orientés vers l'action pour le renforcement de la sûreté nucléaire, qui a été annexée au rapport de synthèse de la réunion extraordinaire [339].

### **6.2.2. Sixième réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire**

La sixième réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire s'est tenue du 24 mars au 4 avril 2014. Pendant une séance spéciale de la réunion, les Parties contractantes ont rendu compte des mesures prises à la lumière de l'accident de Fukushima Daiichi. Il a été noté que si la sûreté nucléaire et les dispositions concernant la préparation et la conduite des interventions d'urgence avaient été améliorées, il restait encore beaucoup à faire. Les dispositifs nationaux de sûreté ont été encore renforcés par des mesures destinées à assurer l'indépendance réelle des organismes de réglementation et à mettre à jour les règlements. Par ailleurs, la coopération internationale s'est amplifiée grâce à une participation accrue aux examens par des pairs et à l'échange d'informations [340].

Les Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire ont fait rapport sur la mise en œuvre de mesures de mise à niveau de la sûreté, notamment les suivantes : application de nouveaux moyens permettant de résister à une panne prolongée de l'alimentation électrique et du système de refroidissement, consolidation des systèmes d'alimentation électrique pour améliorer la fiabilité, réévaluation des aléas naturels externes auxquels les sites sont exposés et des événements affectant les centrales à plusieurs tranches, amélioration des centres de crise sur site et hors site pour assurer une protection contre les événements externes extrêmes et les risques radiologiques, renforcement des mesures destinées à maintenir l'intégrité du confinement, et enfin amélioration des dispositions et des directives sur la gestion des accidents graves.

Par ailleurs, les Parties contractantes ont adopté des propositions visant à modifier encore les documents d'orientation qui sous-tendent la convention et fait des recommandations de mesures à prendre à l'intention du Secrétariat de l'AIEA, des Parties contractantes et d'autres organisations.

Enfin, les Parties contractantes ont décidé lors d'un vote d'organiser, dans un délai d'un an, une conférence diplomatique pour examiner une proposition d'amendement de l'article 18 de la convention traitant de la conception et de la construction des centrales nucléaires existantes et nouvelles, soumise par la Suisse.

### **6.2.3. Conférence diplomatique et Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire**

La conférence diplomatique a été organisée par le Directeur général au Siège de l'AIEA le 9 février 2015 et a réuni 71 Parties contractantes. Les Parties ont adopté à l'unanimité la Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire. Cette déclaration énonce les principes ci-après visant à atteindre le troisième objectif de la convention, à savoir prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et atténuer ces conséquences au cas où de tels accidents se produiraient :

« 1. Les nouvelles centrales nucléaires doivent être conçues, implantées et construites conformément à l'objectif de prévenir les accidents lors de la mise en service et de l'exploitation et, en cas d'accident, d'atténuer les rejets éventuels de radionucléides

causant une contamination hors site à long terme et d'empêcher les rejets précoces de matières radioactives et les rejets de matières radioactives d'une ampleur telle que des mesures et des actions protectrices à long terme sont nécessaires.

2. Des évaluations complètes et systématiques de la sûreté doivent être effectuées périodiquement et régulièrement tout au long de la vie utile des installations existantes afin de répertorier les améliorations de la sûreté destinées à atteindre l'objectif susmentionné. Les améliorations de la sûreté raisonnablement possibles ou faisables doivent être mises en œuvre en temps utile.

3. Les prescriptions et règlements nationaux devant permettre d'atteindre cet objectif tout au long de la vie utile des centrales nucléaires doivent tenir compte des normes de sûreté pertinentes de l'AIEA et, selon qu'il convient, d'autres bonnes pratiques répertoriées notamment lors des réunions d'examen de la CSN [Convention sur la sûreté nucléaire] » [341].

Il était tenu compte dans cette déclaration du grand nombre d'efforts déployés et d'initiatives prises aux niveaux national, régional et international depuis l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi pour améliorer la sûreté nucléaire.

## RÉFÉRENCES

- [1] NATIONAL POLICE AGENCY, Damage Situation and Police Countermeasures Associated with the 2011 Tohoku District–off the Pacific Ocean Earthquake (2015),  
[https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo\\_e.pdf](https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf)
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Introductory Statement to Board of Governors (2013),  
<https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3>
- [3] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The Accident at TEPCO’s Fukushima Nuclear Power Stations (2011),  
<http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>
- [4] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO’s Fukushima Nuclear Power Stations, Second Report (2011),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea\\_110911.html](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html)
- [5] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Final Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2012),  
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>
- [6] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Interim Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2011),  
<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html>
- [7] NATIONAL DIET OF JAPAN FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION, The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, National Diet of Japan, Tokyo (2012).
- [8] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, TEPCO, Tokyo (2012).
- [9] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Situation of Cores and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and Examination into Unsolved Issues in the Accident Progression, TEPCO, Tokyo (2013).
- [10] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident, Progress Rep. No. 2, TEPCO, Tokyo (2014).
- [11] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Analysis of the TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident, Interim Rep. (2014),  
[https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis\\_nra1014.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf)
- [12] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (2015),  
[http://www.jma.go.jp/jma/en/2011\\_Earthquake/Information\\_on\\_2011\\_Earthquake.html](http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html)
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Power Reactor Information System (PRIS) (2015),  
<http://www.iaea.org/pris/>
- [14] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Tsunami Information (Estimated Tsunami Arrival Time and Height) (2011),  
[http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info\\_04\\_20110311145026.html](http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html)

- [15] COASTAL ENGINEERING COMMITTEE OF JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information (2013), <http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results>
- [16] AGENCE DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET INDUSTRIELLE, Permis de construire de la tranche 1 de Fukushima Daiichi, NISA (1966) (en japonais).
- [17] MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DU COMMERCE ET DE L'INDUSTRIE, Résultats du test de la fuite du château d'entreposage à sec - Rapport adressé au METI (2013) (en japonais), [http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20130530\\_03.html](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20130530_03.html)
- [18] COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ DE TOKYO, Manuels des opérations de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi de la TEPCO en cas d'accident (2011) (en japonais), [http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/manual/manual\\_index.html](http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/manual/manual_index.html)
- [19] Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, Act No. 156 of 1999, as last amended by Act No. 118 of 2006 (Japan), <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/ASMCNEP.pdf>
- [20] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Building diagrams for 1F ground level and cross section of Unit 4 and the common spent fuel pool, official communication (2014).
- [21] Décret d'application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire n° 195 du 5 avril 2000 (Japon) (en japonais), <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12SE195.html>
- [22] COMMISSION DE LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Gestion des accidents : mesures contre les accidents graves dans des réacteurs nucléaires de puissance à eau ordinaire (1992) (en japonais), [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/nc/t19920528001/t19920528001.html](http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19920528001/t19920528001.html)
- [23] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Accident Management for Severe Accidents at Light Water Power Reactor Installations, NSCRG: L-AM-II.01, NSC, Tokyo (1997).
- [24] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011), [http://www.meti.go.jp/english/speeches/pdf/20110417\\_a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/speeches/pdf/20110417_a.pdf)
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18, IAEA, Vienna (2011).
- [26] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Évaluation des sites d'installations nucléaires, collection Normes de sûreté n° NS-R-3, AIEA, Vienne (2010).
- [27] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Sûreté des centrales nucléaires : conception, collection Normes de sûreté, n° NS-R-1, AIEA, Vienne (2005). (Cette publication est remplacée par le n° SSR-2/1 (2012), disponible en anglais uniquement).
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting, Safety Series No. 50-SG-S1, IAEA, Vienna (1979). (This publication is superseded by SSG-9 (2010)).
- [29] Nuclear Reactor Establishment Change Permit Application, Nuclear Industry Report to the Government No. 5–11 (1993).
- [30] SAKAI, T., TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, “Past tsunami assessments and tsunami on 11 March 2011”, paper presented at 5th Meeting of Working Group 2, Vienna, 2014.
- [31] ASSOCIATION JAPONAISE DES INGÉNIEURS CIVILS, Méthode d'évaluation des tsunamis pour les centrales nucléaires au Japon (2002) (en japonais), <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>

- [32] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities, NSC, Tokyo (2006).
- [33] CENTRE DE PROMOTION DE LA RECHERCHE SUR LES SÉISMES, Évaluation à long terme de l'activité sismique au large de la côte est du Japon, entre la côte de Sanriku et la péninsule de Boso (2002) (en japonais),  
[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou\\_pdf/sanriku\\_boso.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso.pdf)
- [34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami (2011),  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200\\_Final-Fukushima-Mission\\_Report.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf)
- [35] GOVERNMENT OF INDIA, Actions Taken for Indian NPPs Subsequent to Fukushima Nuclear Accident. National Report to the Convention on Nuclear Safety (2012),  
<http://www.aerb.gov.in/AERBPortal/pages/English/t/documents/CNS2012.pdf>
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1341, IAEA, Vienna (2003).
- [37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Reporting System for Operating Experience (2014) (unpublished).
- [38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Follow-up IAEA Mission in Relation to the Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP, IAEA, Vienna (2009).
- [39] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, La défense en profondeur en sûreté nucléaire, INSAG-10, AIEA, Vienne (1997).
- [40] GROUPE CONSULTATIF INTERNATIONAL POUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Principes fondamentaux de sûreté pour les centrales nucléaires, 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12, AIEA, Vienne (1999).
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.15, IAEA, Vienna (2009).
- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Conference on Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Defence in Depth — Advances and Challenges for Nuclear Installation Safety, IAEA-TECDOC-CD-1749, IAEA, Vienna (2014).
- [44] SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012) SAND2012-6173, SNL, Albuquerque, NM (2012).
- [45] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Fukushima Technical Evaluation, Phase 1 — MAAP5 Analysis, EPRI, Palo Alto (2013).
- [46] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident. Progress Rep. No. 2 (2014),  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu14\\_e/images/140806e0101.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu14_e/images/140806e0101.pdf)
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
- [48] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Glossaire de sûreté de l'AIEA : Terminologie employée en sûreté nucléaire et radioprotection, Édition 2007, AIEA, Vienne (2007).

- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4, IAEA, Vienna (2010).
- [50] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Sûreté des centrales nucléaires : exploitation, collection Normes de sûreté n° NS-R-2, AIEA, Vienne (2004). (Cette publication est remplacée par le n° SSR-2/2 (2012), disponible en anglais uniquement).
- [51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Integrated Regulatory Review Service (IRRS) to Japan, IAEA-NSNI-IRRS-2007/01, IAEA, Vienna (2007).
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.10, IAEA, Vienna (2003). (This publication is superseded by SSG-25 (2013)).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons Learned from the JCO Nuclear Criticality Accident in Japan in 1999 (2009),  
<http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/tokaimura-report.pdf>
- [54] SHIROYAMA, H., “Regulatory failures of nuclear safety in Japan — the case of Fukushima accident”, paper presented at Earth System Governance Tokyo Conf.: Complex Architectures, Multiple Agents, Tokyo (2013),  
[http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/wp-content/uploads/2013/01/0202-SHIROYAMA\\_Hideaki-.pdf](http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/wp-content/uploads/2013/01/0202-SHIROYAMA_Hideaki-.pdf)
- [55] GOVERNMENT OF JAPAN, Convention on Nuclear Safety National Report of Japan for the Fifth Review Meeting (2010),  
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/documents/conventions/2011.pdf>
- [56] KATO, S., “Recent development in safety regulation of nuclear fuel cycle activities”, Proc. Int. Conf. on Topical Issues in Nuclear Safety, Vienna, 2001, IAEA, Vienna (2002).
- [57] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GSR Part 1, AIEA, Vienne (2010).
- [58] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants: Experience of Member States, IAEA-TECDOC-1643, IAEA, Vienna (2010).
- [59] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, FY2012 Annual Report, NRA, Tokyo (2012).
- [60] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Enforcement of the New Regulatory Requirements for Commercial Nuclear Power Reactors (2013),  
<http://www.nsr.go.jp/data/000067212.pdf>
- [61] GROUPE CONSULTATIF INTERNATIONAL POUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Culture de sûreté, 75-INSAG-4, AIEA, Vienne (1991).
- [62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.5, IAEA, Vienna (2009).
- [63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Developing Safety Culture in Nuclear Activities: Practical Suggestions to Assist Progress, Safety Reports Series No. 11, IAEA, Vienna (1998).
- [64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Culture in Nuclear Installations, IAEA-TECDOC-1329, IAEA, Vienna (2002).
- [65] INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS, Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005 Addendum, INPO, Atlanta (2012).
- [66] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Comparison of US and Japanese Regulatory Requirements in Effect at the Time of the Fukushima Accident, NRC, Washington, DC (2013).

- [67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2014).
- [68] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-2.1, IAEA, Vienna (2007).
- [69] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, BUREAU DE LA COORDINATION DES AFFAIRES HUMANITAIRES DE L'ONU, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, Préparation et intervention en cas de situation d'urgence nucléaire ou radiologique, collection Normes de sûreté de l'AIEA n° GS-R-2, AIEA, Vienne (2004).
- [70] Disaster Countermeasures Basic Act, Act No. 223 of 15 November 1961, as last amended in 1997 (Japan),  
<http://www.adrc.asia/documents/law/DisasterCountermeasuresBasicAct.pdf>
- [71] Ordonnance portant application de la Loi sur les mesures spéciales concernant la préparation aux situations d'urgence nucléaire n° 2 du 5 avril 2000 (Japon) (en japonais),  
<http://law.e-gov.go.jp/haishi/H12F03103016002.html>
- [72] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Comment received on Section 3.1 on Technical Volume 3, official communication (23 July 2014).
- [73] GOUVERNEMENT JAPONAIS, Manuel d'intervention en cas d'urgence nucléaire, Gouvernement japonais (2010) (en japonais).
- [74] PRÉFECTURE DE FUKUSHIMA, Plan des opérations de gestion des catastrophes de la préfecture de Fukushima (2009) (en japonais).
- [75] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Nuclear Operator Emergency Action Plan for the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO, Tokyo (2010).
- [76] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Specific Event Report, Fax No. 0042 (11 March 2011).
- [77] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report from Nuclear Power Plant Management of TEPCO to Minister of Economy, Trade and Industry, Fax No. 1560 (11 March 2011).
- [78] GOVERNMENT OF JAPAN, CENTRAL DISASTER MANAGEMENT COUNCIL, The Basic Disaster Management Plan, Government of Japan, Tokyo (2008).
- [79] GOVERNMENT OF JAPAN, Official web site of the Prime Minister of Japan and His Cabinet (2015),  
<http://japan.kantei.go.jp/index.html>
- [80] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About NISA (2015),  
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/aboutnisa/contact.html>
- [81] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, TEPCO at a Glance (2015),  
<http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/overview/p-glance-e.html>
- [82] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About the Nuclear Safety Commission (2015),  
<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/aboutus/overview/overview.htm>
- [83] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About JNES (2015),  
<http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/english/index.html>
- [84] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Home page of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2015),

- <http://www.mext.go.jp/english/>
- [85] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Home page of the Ministry of Health, Labour and Welfare (2015),  
<http://www.mhlw.go.jp/english/>
- [86] MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES, Home page of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2015),  
<http://www.maff.go.jp/e/>
- [87] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Home page of the Ministry of Environment (2015),  
<http://www.env.go.jp/en/>
- [88] MINISTRY OF DEFENSE, Home page of the Ministry of Defense of Japan (2015),  
<http://www.mod.go.jp/e/index.html>
- [89] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Home page of the Japan Meteorological Agency (2015),  
<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>
- [90] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Home page of the Japan Atomic Energy Agency (2015),  
<http://www.jaea.go.jp/english/index.html>
- [91] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Home page of National Institute of Radiological Sciences (2015),  
<http://www.nirs.go.jp/ENG/index.shtml>
- [92] JAPAN NUCLEAR ENERGY SAFETY ORGANIZATION, Initial Operations in the Local Nuclear Emergency Response Headquarters (2013),  
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000124530.pdf>
- [93] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide: Emergency Preparedness for Nuclear Facilities, NSC, Tokyo (1980).
- [94] Ordonnance relative à la prévention des risques de rayonnements ionisants, Ordonnance du Ministère du Travail n° 41 du 30 septembre 1972, amendée par l'Ordonnance n° 172 du 16 juillet 2001 (Japon) (en japonais),  
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html>
- [95] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Enforcement of the Ministerial Ordinance on Exemption of the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011 (2011),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/ri\\_0315\\_07.html](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/ri_0315_07.html)
- [96] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Consultation with and Recommendation from the Labor Policy Council on “the Outline of the Draft Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011” (2011),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/pr\\_111121.html](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepcor/pr_111121.html)
- [97] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Response and Action Taken by the MHLW of Japan on Radiation Protection for Workers Involved in the TEPCO Fukushima Daiichi NPP Accident, MHLW, Tokyo (2013).
- [98] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011).  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110719\\_assistance\\_03.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110719_assistance_03.pdf)
- [99] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the “Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident” (2011).

- [http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110617roadmap\\_assistance\\_report.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110617roadmap_assistance_report.pdf)
- [100] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Status of Improvement on Working Environment of workers in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Attachment 2: About Cool Vest) (2011),  
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061013-e.html>
- [101] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Cooling (Reactors) (2011),  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11\\_e/images/110517e5.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110517e5.pdf)
- [102] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Occupational Safety and Health Department Notification (2011),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/ri\\_0909\\_01.html](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/ri_0909_01.html)
- [103] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Guidelines on Prevention of Radiation Hazards for Workers Engaged in Decontamination Works (2011),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/pr\\_120615\\_a03.pdf](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/pr_120615_a03.pdf)
- [104] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 4, 1st submission, official communication (2013).
- [105] GOVERNMENT OF JAPAN, WG3 question 5, 6th submission, official communication (2014).
- [106] WATANABE, Y., "Relief activities conducted by the Japanese Red Cross Society after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and the challenges for the future", IAEA Report on Severe Accident Management in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2015).
- [107] TOMINAGA, T., HACHIYA, M., AKASHI, M., Lessons learned from response to the accident at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: from the viewpoint of radiation emergency medicine and combined disaster, *Radiat. Emergency Med.* 1 1–2 (2012) 56–61.
- [108] TANIGAWA, K., HASEGAWA, A., "Medical perspective", *Radiation Disaster Medicine* (TANIGAWA, K., CHHEM, R. K., Eds), Springer, Heidelberg (2014).
- [109] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 7, 1st submission, official communication (2013).
- [110] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Food Contaminated by Radioactivity (2011),  
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/foodsafety/dl/food-110317.pdf>
- [111] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Issuance of Instruction to Restrict Distribution of Foods Concerned, in Relation to the Accident at Fukushima Nuclear Power Plant (2011),  
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110321.pdf>
- [112] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Restriction of Distribution and/or Consumption of Foods Concerned in Fukushima and Ibaraki Prefectures (2011),  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000015wun-att/2r98520000015xym.pdf>
- [113] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Monitoring of Radioactive Contaminants for Agricultural and Livestock Products (2011),  
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110323.pdf>
- [114] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Provisional Regulation Values for Radioactive Iodine in Fishery Products (2011),  
<http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110405.pdf>
- [115] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, New Standard Limits for Radionuclides in Foods (2012),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new\\_standard.pdf](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf)

- [116] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Telephone Consultations on Radiation Exposure: Report on Tabulated Results from the Year Following the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Disaster (2014),  
[http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs\\_m\\_265en.pdf](http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_265en.pdf)
- [117] MINISTERE DE L'ÉCONOMIE, DU COMMERCE ET DE L'INDUSTRIE, Questions relatives aux activités de communication avec le public et mesures futures concernant l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi de la TEPCO, NISA, Tokyo (2012) (en japonais).
- [118] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817\\_assistance\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_assistance_02.pdf)
- [119] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110920\\_assistance\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110920_assistance_02.pdf)
- [120] ORGANISATION JAPONAISE DU COMMERCE EXTÉRIEUR, Influence du grand séisme de l'est du Japon sur le commerce international (2014) (en japonais),  
[www.jetro.go.jp/world/shinsai/20110318\\_11.html](http://www.jetro.go.jp/world/shinsai/20110318_11.html)
- [121] GOVERNMENT OF JAPAN, National Report of Japan to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (2011),  
[http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/jc\\_4th.pdf](http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/jc_4th.pdf)
- [122] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Near-term Policy to Ensure the Safety in Treating and Disposing Contaminated Waste around the Site of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants, NSC, Tokyo (2011).
- [123] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Basic Policy for Emergency Response on Decontamination Work (2011),  
[http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai19/19\\_03\\_gensai.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai19/19_03_gensai.pdf)
- [124] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Act on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District — Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011, Act No. 110 as of 2011 (Japan).
- [125] ATOMIC ENERGY SOCIETY OF JAPAN, Final Report of the AESJ Investigation Committee (Announcement) (2014),  
<http://www.aesj.or.jp/en/announcement/finalreport20141119.pdf>
- [126] INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION ON THE FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Disaster: Investigating the Myth and Reality, Routledge, London and New York (2014).
- [127] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Publication 109, Pergamon Press, Oxford and New York (2009).
- [128] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Basic Policy of the Nuclear Safety Commission of Japan on Radiation Protection for Termination of Evacuation and Reconstruction (2011),  
[http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20110719suggest\\_4.pdf](http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20110719suggest_4.pdf)
- [129] COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique, Publication 103 de la CIPR, IRSN (2009).
- [130] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Nuclear Sufferers (2011),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap\\_assistance.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf)

- [131] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Plan to Conduct Detailed Monitoring in Restricted Area and Planned Evacuation Zone (2011),  
[http://www.mext.go.jp/component/english/\\_icsFiles/afieldfile/2011/06/29/1304084\\_0613.pdf](http://www.mext.go.jp/component/english/_icsFiles/afieldfile/2011/06/29/1304084_0613.pdf)
- [132] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Lifting the Evacuation-Prepared Area in Case of Emergency Designation (2011),  
<http://www.reconstruction.go.jp/topics/41gennshiryoku.pdf>
- [133] COMMISSION DE PRÉPARATION AUX SITUATIONS D'URGENCE NUCLÉAIRE, Manuel d'intervention en cas d'urgence nucléaire (2012) (en japonais),  
[http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku\\_bousai/pdf/taisaku\\_manual.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf)
- [134] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, National Report to the 6th Review Meeting of the Convention on Nuclear Safety (2013),  
[http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/cns\\_6th.pdf](http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/cns_6th.pdf)
- [135] COMMISSION DE LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Rapport intérimaire de l'examen du Guide réglementaire sur la préparation des interventions d'urgence dans les installations nucléaires (2012) (en japonais),  
[http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20120322review\\_3.pdf](http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20120322review_3.pdf)
- [136] AUTORITÉ DE RÉGLEMENTATION NUCLÉAIRE, Principes directeurs pour l'intervention dans une situation d'urgence (2012) (en japonais),  
[http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/130905\\_saitaishishin.pdf](http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/130905_saitaishishin.pdf)
- [137] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINNE DE LA SANTÉ, Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements, collection Sécurité no 115, AIEA, Vienne (1997). (Cette publication est remplacée par le n° GSR Part 3 (2014), disponible en anglais uniquement).
- [138] Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire, document INFCIRC/335, AIEA, Vienne (1986).
- [139] Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique, document INFCIRC/336, AIEA, Vienne (1986).
- [140] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales, EPR-JPLAN, AIEA, Vienne (2010).
- [141] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Emergency Notification and Assistance Technical Operations Manual, EPR-ENATOM (2007), IAEA, Vienna (2007).
- [142] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Response and Assistance Network (2010),  
<http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/info-brochures/13-27031-ranet.pdf>
- [143] Activités de l'AIEA en réaction à l'accident de Fukushima (document GOV/INF/2011/8 publié le 6 juin 2011).
- [144] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, AIEA, Vienne (2011).  
<http://www.iaea.org/sites/default/files/actionplann.pdf>
- [145] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Patterns in Governmental Decisions and Recommendations (GDR) Information Exchange during the Fukushima NPP Accident, NEA/CRPPH(2012)3, OECD, Paris (2012).

- [146] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Preliminary Dose Estimation from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, WHO, Geneva (2012).
- [147] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation, WHO, Geneva (2013).
- [148] UNITED NATIONS, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
- [149] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis-à-vis the ICRP System of Radiological Protection, ICRP, Ottawa (2012).
- [150] GONZÁLEZ, A.J., AKASHI, M., BOICE, J.D., Jr., CHINO, M., HOMMA, T., ISHIGURE, N., KAI, M., KUSUMI, S., LEE, J.-K., MENZEL, H.-G., NIWA, O., SAKAI, K., WEISS, W., YAMASHITA, S., YONEKURA, Y., Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident, *J. Radiol. Prot.* 33 3 (2013) 497–571.
- [151] UNITED NATIONS, FAO/IAEA Food Database, UNSCEAR 2013 Report, Attachment C-8 of Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
- [152] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Evaluation of Meteorological Analyses for the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, WMO, Geneva (2013).
- [153] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Response and Lessons Learnt, OECD, Paris (2013).
- [154] ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, Directives de qualité pour l’eau de boisson, 3e éd., OMS, Genève (en cours de traduction).
- [155] Norme générale Codex pour les contaminants et les toxines présents dans les produits de consommation humaine et animale, amendée en 2013, Commission du Codex Alimentarius
- [156] JAPAN HEALTH PHYSICS SOCIETY, Issues Associated with Radiation Protection after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster: Responses of and Recommendations from Japan Health Physics Society, JHPS (2012).
- [157] YASUMURA, S., “Overview of Fukushima Health Management Survey”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014),  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5\\_S2\\_Yasumura\\_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL(0909).pdf)
- [158] PRÉFECTURE DE FUKUSHIMA, Ordre du jour de la troisième réunion du Comité de contrôle pour l’enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima (2011) (en japonais),  
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/6497.pdf>
- [159] SASAKAWA, Y., International Expert Symposium in Fukushima, September 2011, *J. Radiol. Prot.* 32 1 (2012) E7–E8.
- [160] Conclusions and recommendations of the International Expert Symposium in Fukushima: Radiation and Health Risks, *J. Radiol. Prot.* 31 4 (2011) 381–384.
- [161] PRÉFECTURE DE FUKUSHIMA, Cadre de référence du Comité de contrôle pour l’enquête sur la gestion de la situation sanitaire à Fukushima (2011) (en japonais),  
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/65128.pdf>

- [162] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, Basic Survey (Radiation Dose Estimates), 19th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey, Fukushima, Japan, (2015),  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/19-1\\_Basic\\_Survey.pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/19-1_Basic_Survey.pdf)
- [163] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Radiation Quantities and Units, ICRU Rep. 33, Bethesda, MD (1980).
- [164] ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, Convention concernant la protection des travailleurs contre les radiations ionisantes, n° 115, OIT, Genève (1960).
- [165] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. I, Annexes A and B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2010).
- [166] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION MEASUREMENTS, Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates Used in Radiation Protection, NCRP Rep. No. 126, NCRP, Bethesda, MA (1997).
- [167] ORGANISATION DES NATIONS UNIES, Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, A/67/46, ONU, New York (2012).
- [168] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1977).
- [169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Chernobyl Project: Technical Report, IAEA, Vienna (1991).
- [170] ESLINGER, P. W., et al., Source term estimation of radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactors using measured air concentrations and atmospheric transport modeling, *J. Environ. Radioact.* 127 (2014) 127–132.
- [171] STOHL, A., et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.* 12 5 (2012) 2313–2343.
- [172] BOWYER, T. W., et al., Elevated radionuclides detected remotely following the Fukushima Nuclear accident, *J. Environ. Radioact.* 102 7 (2011) 681–687.
- [173] SCHÖPPNER, M., et al., Estimation of the time-dependent radioactive source-term from the Fukushima nuclear power plant accident using atmospheric transport modelling, *J. Environ. Radioact.* 114 (2012) 10–14.
- [174] TERADA, H., KATATA, G., CHINO, M., NAGAI, H., Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, *J. Environ. Radioact.* 112 (2012) 141–154.
- [175] SCIENCE COUNCIL OF JAPAN, A Review of the Model Comparison of Transportation and Deposition of Radioactive Materials Released to the Environment as a Result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident (2014),  
[http://www.jpgeu.org/scj/report/20140902scj\\_report\\_e.pdf](http://www.jpgeu.org/scj/report/20140902scj_report_e.pdf)
- [176] CHINO, M., et al., Preliminary estimation of release amounts of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere, *J. Nucl. Sci. Technol.* 48 7 (2011) 1129–1134.
- [177] BUESSELER, K., AOYAMA, M., FUKASAWA, M., Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity, *Environ. Sci. Technol.* 45 23 (2011) 9931–9935.
- [178] EUROPEAN COMMISSION, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD HEALTH ORGANIZATION, One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident, IAEA, Vienna (1996).
- [179] Chernobyl: Looking Back to Go Forward (Proc. Int. Conf Vienna, 2005), IAEA, Vienna (2005).

- [180] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Accident de la centrale de Fukushima Daiichi : modélisation de la dispersion des rejets radioactifs dans l'atmosphère à l'échelle mondiale (2011),  
[http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france\\_30mars.aspx](http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_30mars.aspx)
- [181] Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [182] MADIGAN, D.J., BAUMANN, Z., FISHER, N.S., Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 24 (2012) 9483-9486.
- [183] MASUMOTO, Y., "Ocean models: How far/fast does Fukushima contamination travel?", Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [184] MASUMOTO, Y., et al., Oceanic dispersion simulations of <sup>137</sup>Cs released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Elements* 8 3 (2012) 207–212.
- [185] HONDA, M.C., AONO, T., AOYAMA, M., Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the Western North Pacific one month after the Fukushima accident, *Geochem. J.* 46 6 (2012) e1–9.
- [186] RYPINA, I.I., et al., Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison, *Biogeosciences* 10 1 (2013) 4973–4990.
- [187] AOYAMA, M., HIROSE, K., IGARASHI, Y., Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests <sup>137</sup>Cs fallout, *J. Environ. Monitor.* 8 4 (2006) 431–438.
- [188] BUESSELER, K., AOYAMA, M., "Fukushima results", Exploring the impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
- [189] AUTORITÉ DE RÉGLEMENTATION NUCLÉAIRE, Informations relatives au contrôle radiologique. Contrôle du niveau de radioactivité dans l'environnement, NRA (2015) (en japonais),  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html>
- [190] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2000 Report, Vol. I, Sources, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
- [191] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Reading of Radioactivity Level in Fallout by Prefecture (2011-2015),  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/194/list-1.html>
- [192] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Airborne Monitoring,  
<http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/278/list-1.html>
- [193] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Notice No. 0315 Article 1 of the Department of Food Safety (2012),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-120821\\_1.pdf](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-120821_1.pdf)
- [194] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mission Report: Project NSRW 9/13 Assistance in the Use of Radiation Monitoring Data to Develop Maps to be Made Available to the Public, Fukushima Prefecture, 16–19 December 2013 (unpublished).
- [195] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, The Survey Results of Radioactive Materials in Tap Water, MHLW, Tokyo (2011).
- [196] COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, *Recommandations de la Commission internationale de protection radiologique*, Publication 60, Pergamon Press, Oxford et New York (1991).

- [197] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 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, Publication 111, Elsevier, Oxford (2009).
- [198] EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).
- [199] AKASHI, M., TOMINAGA, T., HACHIYA, M., TATSUZAKI, H., "Medical management of the consequences of the Fukushima nuclear plant incident", Medical Basis for Radiation Accident Preparedness (Proc. 5th Int. REAC/TS Symp. Oak Ridge, 2013), Oak Ridge, TN (2013).
- [200] YASUMURA, S., GOTO, A., YAMAZAKI, S., REICH, M.R., Excess mortality among relocated institutionalized elderly after the Fukushima nuclear disaster, Public Health 127 2 (2013) 186–188.
- [201] NOMURA, S., et al., Mortality risk amongst nursing home residents evacuated after the Fukushima Nuclear accident: A retrospective cohort study, PLoS ONE 8 3 (2013) e60192.
- [202] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency, Publication 63, Pergamon Press, Oxford and New York (1993).
- [203] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Publication and Enforcement of "the Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011" (2011),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepc/rp/pr\\_111216.html](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepc/rp/pr_111216.html)
- [204] AKAHANE, K., et al., NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, Sci. Rep. 3 (2013) 1670.
- [205] ISHIKAWA, T., "The basic survey: Estimation of external doses to residents in Fukushima Prefecture", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014,  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/6\\_S2\\_Ishikawa.pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/6_S2_Ishikawa.pdf)
- [206] NAGATAKI, S., TAKAMURA, N., KAMIYA, K., AKASHI, M., Measurements of individual radiation doses in residents living around the Fukushima nuclear power plant, Radiat. Res. 180 5 (2013) 439–447.
- [207] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, "Response rates to the basic survey by district. Data as of 31 December 2014" (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015),  
[https://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1\\_Basic\\_Survey\\_Appendix.pdf](https://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey_Appendix.pdf)
- [208] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, "Basic survey (radiation dose estimates)" (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015) (2015),  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1\\_Basic\\_Survey.pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey.pdf)
- [209] VILLE DE DATE, Lettre d'information sur le redressement et la reprise dans la ville de Date n° 8 : Analyses des mesures de dose annuelle provenant d'une exposition externe (2013) (en japonais),  
<http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10035.pdf>

- [210] TSUBOKURA, M., et al., Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster, *Health Phys* 108 1 (2015) 39–43.
- [211] HAYANO, R.S., et al., Whole-body counter survey results 4 months after the Fukushima Daiichi NPP accident in Minamisoma City, Fukushima, *J. Radiol. Prot.* (34 4 2014 787).
- [212] HAYANO, R. S., et al., Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-counter surveys, *Proc. Jpn Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci.* 89 4 (2013) 157–163.
- [213] MATSUDA, N., et al., Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident, *J. Radiat. Res.* 179 6 (2013) 663–668.
- [214] KIM, E., et al., “Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident”, *Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident (Proc. 1st NIRS Symp.)* (KURIHARA, O., AKAHANE, K., FUKUDA, S., MIYAHARA, N., YONAI, S., Eds), National Institute of Radiological Sciences, Chiba (2012) 59–66.
- [215] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Updated worker doses, official communication (2015).
- [216] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Exposure Dose of Workers at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Attachment: Distribution of Thyroid Equivalent Doses (2015),  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2015/1248073\\_6844.html](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2015/1248073_6844.html)
- [217] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Re-evaluation Results of Committed Doses for Emergency Workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013),  
[http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr\\_130705\\_a02.pdf](http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_130705_a02.pdf)
- [218] YASUI, S., Governmental re-evaluation of the committed effective dose received by emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident, *J. Occupat. Environ. Hyg.* 12 5 (2015) D60–D70.
- [219] DEFENSE THREAT REDUCTION AGENCY, Radiation Dose Assessments for Shore-based Individuals in Operation Tomodachi, DTRA-TR-12-001, DTRA, Fort Belvoir, VA (2012).
- [220] HASHIMOTO, S., et al., “First two-year result of the comprehensive health check as one facet of the Fukushima Health Management Survey” paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014,  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7\\_S2\\_Hashimoto\\_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL(0909).pdf)
- [221] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs: Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Publication 118, Elsevier, Oxford (2012).
- [222] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Result of the Investigation on Exposure to Radiation of Workers from Cooperative Companies at Unit 3 in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011),  
<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11032503-e.html>
- [223] ORGANISATION DES NATIONS UNIES, Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l’étude des effets des rayonnements ionisants, A/68/46, ONU, New York (2013).
- [224] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk, Publication 99, Elsevier, Oxford (2005).
- [225] ORGANISATION DES NATIONS UNIES, Rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l’étude des effets des rayonnements ionisants, A/63/46, ONU, New York (2008).

- [226] SUZUKI, S., et al., “Three-Year Results and Future Scope of the Fukushima Thyroid Ultrasound Examination after the Fukushima NPP Accident”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014),  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9\\_S2\\_Suzuki\\_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL(0909).pdf)
- [227] HAYASHIDA, N., et al., Thyroid ultrasound findings in a follow-up survey of children from three Japanese Prefectures: Aomori, Yamanashi, and Nagasaki, *Sci. Rep.* 5 (2015).
- [228] FUKUSHIMA PREFECTURE, Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey (2015),  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/20150212\\_Thyroid\\_Ultrasound\\_Examination.html](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/20150212_Thyroid_Ultrasound_Examination.html)
- [229] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Pregnancy and Medical Radiation*, Publication 84, Pergamon Press, Oxford and New York (2000).
- [230] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother*, Publication 88, Pergamon Press, Oxford and New York (2001).
- [231] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus)*, Publication 90, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).
- [232] NOMURA, Y., “Pregnancy and birth survey (by the Radiation Medical Science Center for the Fukushima Health Management Survey)”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014,  
[http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10\\_S2\\_Nomura\\_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL(0909).pdf)
- [233] NOMURA, Y., FUJIMORI, K., Survey of pregnant women in Fukushima Prefecture and future issues, *Fukushima J. Med. Sci.* 60 2 (2014) 213.
- [234] YASUMURA, S., et al., Study protocol for the Fukushima Health Management Survey, *J. Epidemiol.* 22 5 (2012) 375–383.
- [235] KAWAKAMI, N., *Mental Health of Residents Living in Shelters*, Japan Epidemiological Association, Tokyo (2014).
- [236] YABE, H., et al., Psychological distress after the Great East Japan Earthquake and Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: results of a Mental Health and Lifestyle Survey through the Fukushima Health Management Survey in FY2011 and FY2012, *Fukushima J. Med. Sci.* 60 1 (2014) 57–67.
- [237] KAWAKAMI, N., TSUCHIYA, M., UMEDA, M., KOENEN, K.C., KESSLER, R.C., Trauma and posttraumatic stress disorder in Japan: results from the World Mental Health Japan Survey, *J. Psychiatr. Res.* 53 (2014) 157–165.
- [238] IWADARE, Y., et al., Posttraumatic symptoms in elementary and junior high school children after the 2011 Japan earthquake and tsunami: Symptom severity and recovery vary by age and sex, *J. Pediatrics* 164 4 (2014) 917–921.
- [239] BROMET, E.J., Emotional consequences of nuclear power plant disasters, *Health Phys.* 106 2 (2014) 206–210.
- [240] GOTO, A., et al., Maternal confidence of Fukushima mothers before and after the nuclear power plant disaster in Northeast Japan: analyses of municipal health records, *J. Commun. Healthcare* 7 2 (2014) 106–116.
- [241] BROMET, E. J., et al., Cross-national epidemiology of DSM-IV major depressive episode, *BMC Med.* 9 1 (2011) 90.
- [242] SHIGEMURA, J., TANIGAWA, T., SAITO, I., NOMURA, S., Psychological distress in workers at the Fukushima nuclear power plants, *JAMA* 308 7 (2012) 667–669.

- [243] SHIGEMURA, J., et al., Associations between disaster exposures, peritraumatic distress, and posttraumatic stress responses in Fukushima nuclear plant workers following the 2011 nuclear accident: the Fukushima NEWS project study, *PLoS One* 9 2 (2014) e87516.
- [244] MATSUOKA, Y., et al., Concern over radiation exposure and psychological distress among rescue workers following the Great East Japan Earthquake, *BMC Public Health* 12 (2012) 249.
- [245] BROMET, E.J., Mental health consequences of the Chernobyl disaster, *J Radiol Prot* 32 1 (2012) N71–75.
- [246] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., Psychological and perceived health effects of the Chernobyl disaster: A 20-year review, *Health Phys* 93 5 (2007) 516–521.
- [247] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., GUEY, L. T., A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident, *Clin. Oncol.* 23 4 (2011) 297–305.
- [248] MAEDA, M., et al., “Psychological effects on people in Fukushima: Results of a mental health and lifestyle survey”, paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, [http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8\\_S2\\_Nomura\\_FINAL\(0909\).pdf](http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Nomura_FINAL(0909).pdf)
- [249] KESSLER, R.C., et al., Screening for serious mental illness in the general population, *Arch. Gen. Psychiat.* 60 2 (2003) 184–189.
- [250] BLANCHARD, E.B., JONES-ALEXANDER, J., BUCKLEY, T.C., FORNERIS, C.A., Psychometric properties of the PTSD checklist (PCL), *Behav. Res. Ther.* 34 8 (1996) 669–673.
- [251] EWING, J.A., Detecting alcoholism. The CAGE questionnaire, *JAMA* 252 14 (1984) 1905–1907.
- [252] GOODMAN, R., Psychometric properties of the strengths and difficulties questionnaire, *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry* 40 11 (2001) 1337–1345.
- [253] MATSUISHI, T., et al., Scale properties of the Japanese version of the strengths and difficulties questionnaire (SDQ): A study of infant and school children in community samples, *Brain Dev.* 30 6 (2008) 410–415.
- [254] OGURI, K., et al., Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku–Oki earthquake, *Sci. Rep.* 3 (2013).
- [255] CENTRE JAPONAIS POUR LA BIODIVERSITÉ, site web officiel traitant des effets du séisme et du tsunami (en japonais), <http://www.shiokaze.biodic.go.jp>
- [256] NAKAJIMA, H., KOARAI, M., Assessment of tsunami flood situation from the Great East Japan Earthquake, *Bull. Geosp. Inf. Auth. Jpn.* 59 (2011) 55–66.
- [257] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species, Publication 91, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).
- [258] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Environment Under Different Exposure Situations, Publication 124, Pergamon Press, Oxford and New York (2014).
- [259] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants, Publication 114, Elsevier, Oxford (2009).
- [260] LINKOV, I., BURMISTROV, D., Model uncertainty and choices made by modelers: Lessons learned from the International Atomic Energy Agency model intercomparisons, *Risk Anal.* 23 6 (2003) 1297–1308.
- [261] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. II, Scientific Annexes C, D and E, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2011).

- [262] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 1996 Report, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1996).
- [263] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté Édition provisoire, collection Normes de sûreté de l'AIEA, n° GSR Part (Interim), AIEA, Vienne (2011). (Cette publication est remplacée par le n° GSR Part 3 (2014), disponible uniquement en anglais).
- [264] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Summary Report of the Preliminary Findings of the IAEA Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011),  
<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport130515.pdf>
- [265] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013),  
[https://www.iaea.org/sites/default/files/final\\_report230114.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114.pdf)
- [266] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Basic Principles of the Act on Special Measures Concerning the Handling of Environment Pollution by Radioactive Materials Discharged from the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District—Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011 (2011),  
[http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic\\_principles.pdf](http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf)
- [267] GOLIKOV, V., et al., Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms, Radiat. Environ. Biophys 46 4 (2007) 375–382.
- [268] CABINET OFFICE, "Designating and rearranging the areas of evacuation", paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [269] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima (2014),  
<http://www.pref.fukushima.lg.jp.e.od.hp.transer.com/sec/11015b/fukkoukeikaku1081.html>
- [270] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Areas to which Evacuation Orders have been Issued (2013),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807_01.pdf)
- [271] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Use of Knowledge and Experience Gained from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident to Establish the Technical Basis for Strategic Off-Site Response (2015),  
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5049878>
- [272] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation of Contaminated Areas in the Aftermath of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Overview, Analysis and Lessons Learned, Part 1: A Report on the “Decontamination Pilot Project”, JAEA-Review 2014-051, JAEA, Tokyo (2015).
- [273] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Progress on Off-site Clean-up Efforts in Japan (2015),  
[http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressseet\\_progress\\_on\\_cleanup\\_efforts.pdf?150113](http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf?150113)
- [274] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Unit prices for decontamination in the Special Decontamination Areas directly controlled by the national government, official communication (2015).
- [275] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, TEPCO (2011),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/111221\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/111221_01.pdf)

- [276] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Revised Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (2013),  
[http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic\\_principles.pdf](http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf)
- [277] INTER-MINISTERIAL COUNCIL FOR CONTAMINATED WATER AND DECOMMISSIONING ISSUES, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2015).
- [278] Act for Establishment of the Nuclear Regulation Authority, Act No. 47, 27 June, 2012, as amended by Act No. 82 of 2013 (Japan),  
<https://www.nsr.go.jp/data/000067231.pdf>
- [279] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Implementation Plan of the Measures to be taken at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Designated as a Specified Reactor Facility (Outline) (2012),  
[http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts\\_12120701-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_12120701-e.pdf)
- [280] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Measures for Mid-Term Risk Reduction at TEPCO's Fukushima Daiichi NPS (2015),  
<http://www.nsr.go.jp/data/000098679.pdf>
- [281] CONTAMINATED WATER TREATMENT MEASURES COMMITTEE, Measures for the Prevention of Groundwater Inflow, TEPCO (2012).
- [282] GOVERNMENT OF JAPAN, TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status and Future Challenges of Mid-to-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Units 1-4 of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2012),  
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m121203-e.pdf>
- [283] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Comments received on Section 5, official communication (2 March 2015).
- [284] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Contaminated Water Treatment (2015),  
<http://www.tepco.co.jp/en/decommision/planaction/alps/index-e.html>
- [285] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Daiichi NPS Prompt Report 2014: Bypass of Clean Groundwater to Ocean Starts (2014),  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236566\\_5892.html](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236566_5892.html)
- [286] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, "Measures to stop or reduce ingress of groundwater into reactor and turbine buildings", paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [287] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Fact Sheet: Overview of Contaminated Water Issue at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Agency for Natural Resources and Energy (2013),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130822\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130822_01.pdf)
- [288] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Second Mission) (2014),  
<http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140213003/20140213003-2.pdf>
- [289] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Third Mission) (2015),  
<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf>
- [290] COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ DE TOKYO, Fin du retrait de combustible de la piscine d'entreposage de la tranche 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (2014) (en japonais),

- [http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts\\_141222\\_04-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_141222_04-j.pdf)
- [291] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, TEPCO (2013),  
[http://www.meti.go.jp/english/press/2013/pdf/0627\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2013/pdf/0627_01.pdf)
- [292] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Déclassement des installations utilisant des matières radioactives, collection Normes de sûreté n° WS-R-5, AIEA, Vienne (2009). (Cette publication est remplacée par le n° GSR Part 6 (2014), disponible uniquement en anglais).
- [293] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna (2013).
- [294] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ENERGIE NUCLEAIRE, Bulletin de droit nucléaire, n° 90, Volume 2012/2 (2012).
- [295] GOVERNMENT OF JAPAN, Flow chart of specified waste and contaminated soil management in other prefectures, official communication (2015).
- [296] COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ DE TOKYO, Plans à moyen et long termes pour l'entreposage des déchets solides de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (Projet) (2014) (en japonais),  
[http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/1140407\\_05-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/1140407_05-j.pdf)
- [297] COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ DE TOKYO, Installation de châteaux d'entreposage temporaire à sec (2014) (en japonais),  
[http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120625/120625\\_02cc.pdf](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120625/120625_02cc.pdf)
- [298] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, A Mid-and-long-term plan for storage of solid wastes in Fukushima Daiichi NPS, official communication (2014).
- [299] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, "Radioactive Waste Management — Toward the decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4", paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [300] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (2012),  
<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m120730-e.pdf>
- [301] SECRETARIAT OF THE TEAM FOR COUNTERMEASURES FOR DECOMMISSIONING AND CONTAMINATED WATER TREATMENT, Summary of Decommissioning and Contaminated Water Management (2014),  
[http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20140529\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20140529_01.pdf)
- [302] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Reports from ICRP Dialogue Initiatives (2014),  
<http://www.uicc.org/node/189>
- [303] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, 2011 JETRO Global Trade and Investment Report: International Business as a Catalyst for Japan's Reconstruction, JETRO, Tokyo (2011).
- [304] FISHERIES AGENCY, The Leakage of Contaminated Water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and the Safety of Fishery Products (2015).
- [305] FOOD STANDARDS AGENCY, Import of Feed and Food Originating in or Consigned from Japan (2012),  
[http://www.food.gov.uk/business-industry/imports/banned\\_restricted/japan#.UKS7deQ0V8E](http://www.food.gov.uk/business-industry/imports/banned_restricted/japan#.UKS7deQ0V8E)
- [306] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, JETRO Global Trade and Investment Report — Overview (2014),

- [http://www.jetro.go.jp/en/reports/white\\_paper/trade\\_invest\\_2014.pdf](http://www.jetro.go.jp/en/reports/white_paper/trade_invest_2014.pdf)
- [307] Act on Compensation for Nuclear Damage, 1961, Act. Nr. 147, as amended by Act Nr. 19 in 2009.
- [308] MINISTERE DE L'ÉDUCATION, DE LA CULTURE, DES SPORTS, DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE, COMITÉ DE REGLEMENT DES DIFFÉRENDS POUR LA RÉPARATION DES DOMMAGES NUCLÉAIRES, Principes directeurs provisoires relatifs à la détermination de la portée des dommages nucléaires résultant de l'accident aux centrales nucléaires de Fukushima Daiichi et Daini de la Compagnie d'électricité de Tokyo (2011) (en japonais),  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/kaihatu/016/houkoku/\\_icsFiles/afieldfile/2011/08/17/1309452\\_1\\_2.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/016/houkoku/_icsFiles/afieldfile/2011/08/17/1309452_1_2.pdf)
- [309] COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ DE TOKYO, Dédommagement des frais supplémentaires résultant du retour rapide après la levée de l'ordre d'évacuation (2014) (en japonais),  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1235026\\_5892.html](http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1235026_5892.html)
- [310] PERKO, T., VALUCH, J., NAGY, A., LAMMERS, P., MAYS, C., Overview of Mass and New Media Treatment of Ionizing Radiation Topics: The Case of Fukushima, EAGLE Coordination Project (2013),  
<http://eagle.sckcen.be/en/Deliverables>
- [311] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima (2013),
- [312] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, FUKUSHIMA PREFECTURE, Decontamination Information Plaza (2013).
- [313] CABINET OFFICE, "Designating and rearranging the areas of evacuation", paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
- [314] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Enhancing Transparency and Communication Effectiveness in the Event of a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA, Vienna (2012).
- [315] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Calls for High Level Conference to Strengthen Nuclear Safety (2011),  
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-calls-high-level-conference-strengthen-nuclear-safety>
- [316] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Summary Report of the Preliminary Findings of the IAEA Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011),  
[http://www.mofa.go.jp/mofaj/saigai/pdfs/iaea\\_mission\\_1110\\_en.pdf](http://www.mofa.go.jp/mofaj/saigai/pdfs/iaea_mission_1110_en.pdf)
- [317] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Review NISA's Approach to the Comprehensive Assessments for the Safety of Existing Power Reactor Facilities Conducted in Japan (2012),  
<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf>
- [318] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Onagawa Nuclear Power Station to Examine the Performance of Systems, Structures and Components Following the Great East Japanese Earthquake and Tsunami (2012).
- [319] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Third Mission) (2013),  
<https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf>
- [320] Déclaration de la Conférence ministérielle de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, Vienne, le 20 juin 2011 (document INFCIRC/821 publié le 21 juin 2011).

- [321] Mesures pour renforcer la coopération internationale dans les domaines de la sûreté nucléaire et radiologique et de la sûreté du transport et des déchets, résolution GC(57)/RES/9, AIEA, Vienne (2013)
- [322] Progrès réalisés dans la mise en œuvre du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, GOV/INF/2012/11-GC(56)/INF/5, AIEA, Vienne (2012).
- [323] Progrès réalisés dans la mise en œuvre du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, GOV/INF/2013/8-GC(57)/INF/5, AIEA, Vienne (2013).
- [324] Progrès réalisés dans la mise en œuvre du Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, GOV/INF/2014/15-GC(58)/INF/7, AIEA, Vienne (2014).
- [325] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Protection against Extreme Earthquakes and Tsunamis in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
- [326] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Radiation Protection After the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding, IAEA, Vienna (2014).
- [327] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
- [328] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Strengthening Nuclear Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
- [329] Memorandum of Cooperation between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency Following the Accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2012),  
[http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima\\_2012/pdfs/fukushima\\_iaea\\_en\\_04.pdf](http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_04.pdf)
- [330] Practical Arrangements between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Radiation Monitoring and Remediation (2012),  
[http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima\\_2012/pdfs/fukushima\\_iaea\\_en\\_05.pdf](http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_05.pdf)
- [331] Practical Arrangements between Fukushima Medical University and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Human Health (2012),  
[http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima\\_2012/pdfs/fukushima\\_iaea\\_en\\_06.pdf](http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_06.pdf)
- [332] Practical Arrangements between the Ministry of Foreign Affairs of Japan and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Emergency Preparedness and Response (2012),  
[http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima\\_2012/pdfs/fukushima\\_iaea\\_en\\_07.pdf](http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_07.pdf)
- [333] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA and Japan Host Fukushima Ministerial Conference on Nuclear Safety (2012),  
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-japan-host-fukushima-ministerial-conference-nuclear-safety>
- [334] Convention sur la sûreté nucléaire, document INFCIRC/449, AIEA, Vienne (1994).
- [335] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINNE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Principes fondamentaux de sûreté, collection Normes de sûreté n° SF-1, AIEA, Vienne (2007).
- [336] Convention sur la sûreté nucléaire, Règles de procédure et règles financières, INFCIRC/573/Rev.6, AIEA, Vienne (2015).

- [337] Principes directeurs concernant le processus d'examen au titre de la Convention sur la sûreté nucléaire, INFCIRC/571/Rev.7, AIEA, Vienne (2015).
- [338] Principes directeurs concernant les rapports nationaux prévus par la Convention sur la sûreté nucléaire, INFCIRC/572/Rev.5, AIEA, Vienne (2015).
- [339] Deuxième réunion extraordinaire des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire - Rapport de synthèse final CNS/ExM/2012/04/Rev.2 (2012),  
[http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety\\_convention/2012-cns-summary-report-for-web-f.PDF](http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/2012-cns-summary-report-for-web-f.PDF)
- [340] Sixième réunion d'examen des Parties contractantes à la Convention sur la sûreté nucléaire - Rapport de synthèse, CNS/6RM/2014/11\_Final (2014),  
[http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety\\_convention/2014-cns-summary-report-french-final.pdf](http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/2014-cns-summary-report-french-final.pdf)
- [341] Rapport de synthèse et Déclaration de Vienne sur la sûreté nucléaire, contenus dans le document CNS/DC/2015/3/Rev.2 (2015),  
[http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety\\_convention/diplomatic-conference/summary-report-with-annexs-french.pdf](http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/diplomatic-conference/summary-report-with-annexs-french.pdf)

## ABRÉVIATIONS ET SIGLES

μGy	microgray
μSv	microsievert
AC	courant alternatif
ANRE	Agence des ressources naturelles et de l'énergie
Bq	becquerel
CC	courant continu
CE	Commission européenne
CI	condenseur d'isolement
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
CN	centrale nucléaire
ConvEx	exercices organisés au titre des conventions
CRCI	circuit de refroidissement du cœur isolé
CRIEPI	Institut central de recherche de l'industrie électrique
DCP	Convention sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires
ECP	enveloppe de confinement primaire
ED	eau douce
EM	eau de mer
ENATOM	Manuel des opérations techniques de notification et d'assistance en cas d'urgence
EPS	Étude probabiliste de sûreté
ERSS	système d'appui aux interventions d'urgence
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GAG	gestion des accidents graves
GDS	générateur diesel de secours
Gy	gray
HP	point d'arrêt
IACRNE	Comité interorganisations d'intervention à la suite d'accidents nucléaires et radiologiques
IC	intervalle de confiance
IEC	Centre des incidents et des urgences
IES	Système des incidents et des urgences
IGP	Institut de géodésie et de photogrammétrie
IHPC	système d'injection haute pression du cœur
IMMSP	Institut des problèmes des machines mathématiques et des systèmes
INES	Échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques
INSAG	Groupe international pour la sûreté nucléaire
IRRS	Service intégré d'examen de la réglementation
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
JAEA	Agence japonaise de l'énergie atomique
JAMSTEC	Agence japonaise pour la science et la technologie marines et terrestres
JCNER	Conseil commun pour l'intervention en cas d'urgence nucléaire
JCOPET	<i>Tide-resolving regional nested subsystem of Japan Coastal Ocean Predictability Experiment</i>
JKEO	Observatoire de l'extension du courant du Kuroshio de la JAMSTEC
JMA	Office météorologique japonais
JNES	Organisation japonaise de sûreté de l'énergie nucléaire
JPLAN	Plan de gestion des situations d'urgence radiologique commun aux organisations internationales
KEO	Observatoire de l'extension du courant du Kuroshio

KIOST	Institut coréen des sciences et technologies océanographiques
KNOT	série chronologique de données sur l'océan Pacifique Nord de Kyodo
Kobe U	Université de Kobe
MAFF	Ministère de l'agriculture, des forêts et des pêches
METI	Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie
MEXT	Ministère de l'éducation, de la culture, des sports, des sciences et de la technologie
mGy	milligray
MHLW	Ministère de la santé, du travail et des affaires sociales
MITI	Ministère du commerce et de l'industrie
MO	motorisé
MOD (SDF)	Ministère de la défense (forces d'autodéfense)
MOE	Ministère de l'environnement
MPa	mégapascal
MSSG	simulateur multi-échelle pour le géoenvironnement
mSv	millisievert
NDF	Organisme chargé de faciliter la réparation des dommages nucléaires et le déclassement
NERHQ	Centre de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire
NERHQ local	Centre local de conduite de l'intervention en cas d'urgence nucléaire
NFI	Normes fondamentales internationales
NIES	Institut national d'études environnementales
NIRS	Institut national des sciences radiologiques
NISA	Agence de sûreté nucléaire et industrielle
NRA	Autorité de réglementation nucléaire
NSC	Commission de la sûreté nucléaire du Japon
OCDE/AEN	Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques
OIT	Organisation internationale du Travail
OMM	Organisation météorologique mondiale
OMS	Organisation mondiale de la Santé
OP	Port d'Onahama
OPS	Organisation panaméricaine de la Santé
PBq	petabecquerel
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
RANET	Réseau d'intervention et d'assistance de l'AIEA
REI	réunion d'experts internationaux
REMAT	équipe d'assistance médicale pour les situations d'urgence nucléaire ou radiologique
SF-1	Principes fondamentaux de sûreté de l'AIEA
SPEEDI	Système d'information pour la prévision des doses en situation d'urgence environnementale
Sv	sievert
TEPCO	Compagnie d'électricité de Tokyo
UNSCEAR	Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants
USDA	Département de l'agriculture des États-Unis
USGS	Service géologique des États-Unis
UTC	zone du temps universel coordonné
WHOI	Institut océanographique de Woods Hole

## PERSONNES AYANT COLLABORÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN

### Secrétariat de l'AIEA

#### Gestion des projets

*Responsable du projet*  
Caruso, G.

*Responsables des analyses*  
Bevington, L. (Spécialiste principal de la sûreté)  
Boreta, B.  
Massegg, V.

*Coordination des graphiques et des données*  
Zimmermann, M.

*Graphiste*  
Kasper, M.

*Assistante d'exécution*  
Gutierrez Flores, S.

*Assistante*  
Fitzpatrick, L.

#### *Rédacteurs et correcteurs techniques*

Boemeke, M.  
Delves, D.  
Harbison, S.  
McDonald, A.  
Ramesh, G. V.  
Robinson, C.

#### *Secrétaire scientifique des réunions des coprésidents*

Webster, P.

#### Évaluateurs externes

Alonso, A., Espagne  
Gray, R., Royaume-Uni  
Robinson, I., Royaume-Uni  
Simmonds, J., Royaume-Uni  
Webster, P., Canada

## GRUPE DE TRAVAIL 1 : DESCRIPTION ET CONTEXTE DE L'ACCIDENT

### **Coprésidents**

Jammal, R.  
Commission canadienne de sûreté nucléaire  
Canada

Vincze, P.  
Département de l'énergie nucléaire  
AIEA

### **Secrétaire scientifique**

Heitsch, M. (jusqu'en août 2014)  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Membres**

Dobrzyński, L.  
Centre national pour la recherche nucléaire  
Pologne

Dolganov, K.  
Institut de développement sûr du génie  
électronucléaire de l'Académie des sciences  
de Russie  
Fédération de Russie

Duspiva, J.  
Institut de recherche nucléaire de Řež  
République tchèque

Grant, I.  
Autorité fédérale de réglementation nucléaire  
(Émirats arabes unis)

Guerpinar, A.  
Consultant de haut niveau  
Turquie

Hirano, M.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Japon

Khouaja, H.  
Commission canadienne de sûreté nucléaire  
Canada

Kim, H. T.  
Institut central de recherche de la KHNP  
République de Corée

Krijger, H.  
Electriciteits-Productiemaatschappij  
Zuid-Nederland  
Pays-Bas

Lequerica, I.  
ENDESA  
Espagne

Noel, M.  
Centre commun de recherche de la Commission  
européenne

Orders, W.  
Commission de la réglementation nucléaire  
États-Unis d'Amérique

Urzua, G.  
AREVA  
France

Volkholz, P.  
AREVA  
France

Weidenbrück, K.  
Ministère fédéral de l'environnement, de la  
protection de la nature et de la sûreté  
nucléaire  
Allemagne

Weiss, B.  
Société pour la sûreté des installations et des  
réacteurs  
Allemagne

Zheng, M. G.  
Institut de recherche et de conception en  
ingénierie nucléaire de Shanghai  
Chine

## **Experts invités**

Dodo, T.  
Institut japonais de sûreté nucléaire  
Japon

Ihara, T.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Kanno, M.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Japon

Kawano, A. (jusqu'en août 2013)  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Muftuoglu, K.  
GE Hitachi Nuclear Energy  
États-Unis d'Amérique

Taira, J.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Yamamoto, M. (à partir d'août 2013)  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

## **Fonctionnaires du Secrétariat de l'AIEA à l'appui du groupe de travail 1**

Kang, K.-S.  
Kilic, N.  
Pagannone, B.  
Yamada, K.  
Yoshimoto, Y.

## GROUPE DE TRAVAIL 2 : ÉVALUATION DE LA SÛRETÉ

### **Coprésidents**

Chande, S.  
Office de réglementation de l'énergie atomique  
Inde

Hughes, P. (jusqu'en août 2014)  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

Ulses, A. (à partir d'août 2014)  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Secrétaire scientifique**

Aparkin, F.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Membres**

Alonso, J. R.  
Conseil de sûreté nucléaire  
Espagne

Ayub, M.  
Autorité pakistanaise de réglementation  
nucléaire  
Pakistan

Bucalossi, A.  
Centre commun de recherche de la Commission  
européenne

Chaikiat, P.  
Autorité suédoise de sûreté radiologique  
Suède

Dermarkar, F.  
Groupe de propriétaires de CANDU  
Canada

Foucher, L.  
Autorité de sûreté nucléaire  
France

Gauntt, R.  
Laboratoires nationaux Sandia  
États-Unis d'Amérique

Giannelli, I. A.  
Slovenské Elektrárne, a.s. (filiale d'Enel)  
Italie

Godoy, A. R.  
James J. Johnson and Associates  
Argentine

Gonzalez, V.  
Commission nationale de la sûreté nucléaire et  
des garanties  
Mexique

Harbison, S.  
Bureau de la réglementation nucléaire  
Royaume-Uni

Heppell-Masys, K.  
Commission canadienne de sûreté nucléaire  
Canada

Hoshi, H.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Japon

Kajimoto, M.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Japon

Kuivalainen, H.  
Autorité de sûreté radiologique et nucléaire  
Finlande

Lankin, M.  
Service fédéral de supervision  
environnementale, technologique et  
nucléaire  
Fédération de Russie

de L'Épinois, B.  
AREVA  
France

Macchi, L.  
Dédale  
France

Mildenberger, O.  
Société pour la sûreté des installations et des  
réacteurs  
Allemagne

Misak, J.  
Institut de recherche nucléaire de Řež  
République tchèque

Perryman, L.  
Eskom  
Afrique du Sud

Ryser, C.  
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire  
Suisse

Song, J. H.  
Institut coréen de recherche sur l'énergie  
atomique  
République de Corée

Weidenbrück, K.  
Ministère fédéral de l'environnement, de la  
protection de la nature et de la sûreté  
nucléaire  
Allemagne

### **Experts invités et personnes de contact**

Donges, A.  
Institut des opérations nucléaires  
États-Unis d'Amérique

Haber, S.  
Human Performance Analysis, Corp.  
États-Unis d'Amérique

Harter, R.  
Groupe des propriétaires de réacteurs à eau  
bouillante  
États-Unis d'Amérique

Hatamura, Y.  
Université de Tokyo  
Japon

Ihara, T.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Iino, K.  
SYDROSE  
Japon

Kunito, S.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Nakagawa, Y.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Takizawa, S.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Watford, G.  
GE Hitachi Nuclear Energy  
États-Unis d'Amérique

Yamanaka, Y.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

### **Fonctionnaires du Secrétariat de l'AIEA à l'appui du groupe de travail 2**

Beltran, F.  
Earle, K.  
Haage, M.  
Haber, S.  
Roveti, B.  
Rycraft, H.  
Skarbo, B.  
Yllera, J.  
Yoshimoto, Y.

GROUPE DE TRAVAIL 3 : PRÉPARATION ET CONDUITE DES INTERVENTIONS  
D'URGENCE

**Coprésidents**

Drábová, D.  
Autorité nationale de sûreté nucléaire  
République tchèque

Buglova, E.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

**Secrétaire scientifique**

Shiraga, K.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

**Membres**

Aaltonen, H.  
Autorité de sûreté radiologique et nucléaire  
Finlande

Ahier, B.  
Bureau de la radioprotection  
Canada

Bardelay, J.  
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire  
France

Blackburn, C.  
FAO

Byron, D.<sup>†</sup>  
FAO

Chen, P. (jusqu'en juin 2014)  
Organisation météorologique mondiale

Chugunov, V.  
Société nationale d'énergie atomique  
« Rosatom »  
Fédération de Russie

Cortes Carmona, A.  
Commission nationale de la sûreté nucléaire et  
des garanties  
Mexique

Dela Rosa, A.  
Institut philippin de recherche nucléaire  
Philippines

Harou, A. (à partir de juin 2014)  
Organisation météorologique mondiale

Hernández, D.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Argentine

Homma, T.  
Agence japonaise de l'énergie atomique  
Japon

Hubbard, L.  
Autorité suédoise de sûreté radiologique  
Suède

Kelly, N.  
Consultant de haut niveau  
Royaume-Uni

Kenigsberg, J.<sup>†</sup>  
Commission nationale de radioprotection  
Biélorus

Maree, M.  
Eskom  
Afrique du Sud

McClelland, V.  
Ministère de l'énergie  
États-Unis d'Amérique

<sup>†</sup> Décédé.

Molina, G.  
Institut national de recherche nucléaire  
Mexique

Pascal, G.  
Centre commun de recherche de la Commission  
européenne

Sigouin, L.  
Commission canadienne de sûreté nucléaire  
Canada

Soufi, I.  
Centre national de l'énergie, des sciences et des  
techniques nucléaires  
Maroc

Sumargo, D. E.  
Agence de réglementation de l'énergie nucléaire  
Indonésie

Takahara, S.  
Agence japonaise de l'énergie atomique  
Japon

de la Vega, R.  
Conseil de sûreté nucléaire  
Espagne

### **Experts invités et personnes de contact**

Taminami, T.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Tanigawa, K.  
Université d'Hiroshima  
Japon

Tominaga, T.  
Institut national des sciences radiologiques  
Japon

Wiley, A.  
REAC/TS – centre collaborateur OMS  
États-Unis d'Amérique

Yamashita, S.  
Université de Nagasaki  
Japon

### **Fonctionnaires du Secrétariat de l'AIEA à l'appui du groupe de travail 3**

Callen, J.  
Chaput, J.  
Kaiser, P.  
Martincic, R.  
McKenna, T.  
Mutluer, A.  
Nestoroska Madjunarova, S.  
Vilar Welter, P.  
Yoshimoto, Y.

## GRUPE DE TRAVAIL 4 : CONSÉQUENCES RADIOLOGIQUES

### **Coprésidents**

González, A.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Argentine

Chhem, R. (jusqu'en août 2014)  
Département des sciences et des applications  
nucléaires  
AIEA

Meghzifene, A. (à partir de septembre 2014)  
Département des sciences et des applications  
nucléaires  
AIEA

Pinak, M.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Secrétaire scientifique**

Müskens, P. (jusqu'en août 2013)  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

Bevington, L. (à partir de septembre 2013)  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Membres**

Akashi, M.  
Institut national des sciences radiologiques  
Japon

Betancourt, A.  
Agence de l'énergie nucléaire et des  
technologies avancées  
Cuba

Blumenthal, D.  
Administration nationale de sécurité nucléaire  
Ministère de l'énergie  
États-Unis d'Amérique

Bromet, E. J.  
State University of New York, Stony Brook  
États-Unis d'Amérique

Brown, J.  
Autorité norvégienne de radioprotection  
Norvège

Coleman, C. N.  
Institut national du cancer  
États-Unis d'Amérique

Demidchik, Y.  
Académie nationale des sciences du Bélarus et  
Académie médicale du Bélarus pour  
l'enseignement du troisième cycle  
Bélarus

Dobrzyński, L.  
Centre national pour la recherche nucléaire  
Pologne

Gallego, E.  
Université technique de Madrid  
Espagne

Haquin, G.  
Centre de recherche nucléaire de Soreq  
Israël

Jones, C. G.  
Mission permanente des États-Unis d'Amérique  
auprès de l'AIEA à Vienne  
et Commission de la réglementation  
nucléaire  
États-Unis d'Amérique

Lee, J. K.  
Université de Hanyang  
République de Corée

Magnusson, S.  
Autorité islandaise de sûreté radiologique  
Islande

Mason, C.  
BHP Billiton  
Australie

McEwan, A. C.  
Consultant de haut niveau  
Nouvelle-Zélande

McGinnity, P. A.  
Agence de protection de l'environnement  
Irlande

Ng, K. H.  
Université de Malaya  
Malaisie

Niwa, O.  
Université de Kyoto et Université de médecine  
de Fukushima  
Japon

Pentreath, R. J.  
Université de Reading  
Royaume-Uni

Perrin, M. L.  
Autorité de sûreté nucléaire  
France

Rochedo, E.  
Coordination des installations nucléaires  
Brésil

Shinkarev, S.  
Agence fédérale de médecine et de biologie  
Fédération de Russie

Sundell-Bergman, S.  
Université suédoise des sciences agricoles  
Suède

Thomas, G.  
Imperial College London  
Royaume-Uni

Valentin, J.  
Jack Valentin Radiological Protection  
Suède

## **Experts invités et personnes de contact**

Brenner, A.  
Institut national du cancer  
États-Unis d'Amérique

Chino, M.  
Agence japonaise de l'énergie atomique  
Japon

Fukui, T.  
Autorité de réglementation nucléaire  
Japon

Ivanov, V.  
Registre épidémiologique et radiologique  
national  
Fédération de Russie

Makihira, A.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

Nagataki, S.  
Université de Nagasaki  
Japon

Ohtsuru, A.  
Université de médecine de Fukushima  
Japon

## **Fonctionnaires du Secrétariat de l'AIEA à l'appui du groupe de travail 4**

Harms, A. V.  
McGinnity, P. A.  
Nies, H.  
Osvath, I.  
Sakai, K.  
Yonehara, H.

## GRUPE DE TRAVAIL 5 : RELÈVEMENT APRÈS L'ACCIDENT

### **Coprésidents**

Williams, G.  
Agence australienne pour la protection  
radiologique et la sûreté nucléaire  
Australie

Mele, I.  
Département de l'énergie nucléaire  
AIEA

Proehl, G.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Secrétaire scientifique**

Delaunay, N.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

### **Membres**

Al-Masri, M. S.  
Commission syrienne de l'énergie atomique  
République arabe syrienne

Balonov, M.  
Institut de radiohygiène – Institut de recherche  
scientifique de Saint-Pétersbourg  
Fédération de Russie

Bassanelli, A.  
SOGIN – Société de gestion des installations  
nucléaires  
Italie

Brennecke, P.  
Consultant de haut niveau  
Allemagne

Darko, E. O.  
Commission ghanéenne de l'énergie atomique  
Ghana

Gallay, F.  
Autorité de sûreté nucléaire  
France

Howard, B. J.  
Centre pour l'écologie et l'hydrologie  
Royaume-Uni

Inoue, T.  
Institut central de recherche de l'industrie  
électrique  
Japon

Kifanga, L. D.  
Commission tanzanienne de l'énergie atomique  
République-Unie de Tanzanie

Nakayama, S.  
Agence japonaise de l'énergie atomique  
Japon

Oughton, D. H.  
Université norvégienne des sciences de la vie  
Norvège

Rowan, D.  
Énergie atomique du Canada limitée  
Canada

Seitz, R.  
Laboratoire national de Savannah River  
États-Unis d'Amérique

Tokarevsky, V.  
Institut Chernobyl  
Ukraine

Zeleznik, N.  
Centre environnemental régional  
Slovénie

### **Experts invités et personnes de contact**

Belencan, H.  
Consultant de haut niveau  
États-Unis d'Amérique

Negin, C.  
Project Enhancement Corporation  
États-Unis d'Amérique

Takizawa, S.  
Compagnie d'électricité de Tokyo  
Japon

### **Fonctionnaires du Secrétariat de l'AIEA à l'appui du groupe de travail 5**

Izumo, A.  
Fesenko, S.  
Kumano, Y.  
Monken-Fernandes, H.  
Sakai, K.  
Walker, J.  
Yankovich, T.  
Yonehara, H.

## GROUPE CONSULTATIF TECHNIQUE INTERNATIONAL

### Président

Meserve, R.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Kim, M.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Laaksonen, J.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

### Secrétaire scientifique

Bevington, L.  
Département de la sûreté et de la sécurité  
nucléaires  
AIEA

Le, C. D.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Liang, Q.  
Organisation des Nations Unies pour  
l'alimentation et l'agriculture

### Membres

Asmolov, V. G.  
Société Rosenergoatom

Magwood, W. (à partir de septembre 2014)  
Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire

Mohammad Jais, A.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Carrière, J. M.  
Organisation météorologique mondiale

Niu, S.  
Organisation internationale du Travail

Clement, C.  
Commission internationale de protection  
radiologique

Sharma, S. K.<sup>†</sup>  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Cousins, C.  
Commission internationale de protection  
radiologique

Torgerson, D.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

De Boeck, B.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Weightman, M.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Echávarri, L. E. (jusqu'en avril 2014)  
Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire

Weiss, W.  
Comité scientifique des Nations Unies pour  
l'étude des effets des rayonnements  
ionisants

Ellis, K.  
Association mondiale des exploitants nucléaires

Wiroth, P.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Fuketa, T.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

Ziqiang, P.  
Commission internationale de protection  
radiologique

Jamet, P.  
Groupe international pour la sûreté nucléaire

## RÉUNIONS

### Réunions des groupes de travail

18 mars 2013

Réunion initiale des coprésidents des groupes de travail, Vienne

21 et 22 mars 2013

1<sup>re</sup> réunion de tous les groupes de travail, Vienne

12-14 juin 2013

2<sup>e</sup> réunion de tous les groupes de travail, Vienne

12 et 13 septembre 2013

3<sup>e</sup> réunion des groupes de travail 1 et 2, Vienne

7 et 9 octobre 2013

3<sup>e</sup> réunion des groupes de travail 3, 4 et 5, Vienne

9-13 décembre 2013

4<sup>e</sup> réunion de tous les groupes de travail, Vienne

10-14 février 2014

5<sup>e</sup> réunion de tous les groupes de travail, Vienne

14-17 avril 2014

6<sup>e</sup> réunion des groupes de travail 1, 2 et 3, Vienne

5-9 mai 2014

6<sup>e</sup> réunion du groupe de travail 4, Vienne

26-30 mai 2014

6<sup>e</sup> réunion du groupe de travail 5, Vienne

### Réunions du Groupe consultatif technique international (ITAG)

21 et 22 mars 2013

1<sup>re</sup> réunion de l'ITAG, Vienne

10 juin 2013

1<sup>re</sup> réunion conjointe ITAG/coprésidents, Vienne

11 juin 2013

2<sup>e</sup> réunion de l'ITAG, Vienne

6 décembre 2013

2<sup>e</sup> réunion conjointe ITAG/coprésidents, Vienne

7 mai 2014

3<sup>e</sup> réunion conjointe ITAG/coprésidents, Vienne

23 et 24 octobre 2014

4<sup>e</sup> réunion conjointe ITAG/coprésidents, Vienne

23 et 24 février 2015

5<sup>e</sup> réunion conjointe ITAG/coprésidents, Vienne

### Réunions pour la fourniture de services de consultants

6 et 7 août 2013

Services de consultants sur le terme source, Vienne

29-31 octobre 2013

Services de consultants sur les facteurs humains et organisationnels et sur la culture de sûreté, Vienne

17-21 novembre 2013

Services de consultants sur les facteurs humains et organisationnels et sur la culture de sûreté, Atlanta

13-17 janvier 2014

Services de consultants sur les facteurs humains et organisationnels et sur la culture de sûreté, Vienne

17-21 mars 2014

Services de consultants sur les facteurs humains et organisationnels et sur la culture de sûreté, Ottawa

24-26 mars 2014

Services de consultants sur la radioactivité dans l'environnement, Monaco

20 et 21 mai 2014  
Services de consultants sur les rayonnements  
et les distributions log-normales, Vienne

23-27 juin 2014  
Services de consultants sur les rayonnements  
et les distributions log-normales, Vienne

### **Réunions bilatérales au Japon**

14-21 octobre 2013  
Entretiens bilatéraux sur les questions liées au  
rapport de l'AIEA dans le domaine de la  
remédiation

25-27 novembre 2013  
Services de consultants pour l'examen des  
questions liées aux conséquences  
radiologiques à l'occasion de  
l'établissement des chapitres 4  
(Conséquences radiologiques) et 5  
(Relèvement après l'accident)

25 novembre - 4 décembre 2013  
Entretiens bilatéraux sur les questions liées au  
rapport de l'AIEA dans le domaine du  
déclassement

20-24 janvier 2014  
Services de consultants pour l'examen des  
questions liées aux thèmes Activités  
réglementaires, Expérience d'exploitation  
et Gestion des déchets à l'occasion de  
l'établissement du rapport de l'AIEA

23 janvier 2014  
Réunions avec l'Agence pour la reconstruction  
et l'Équipe chargée de faciliter la vie des  
victimes de la catastrophe – Bureau du  
Cabinet

24 janvier 2014  
Réunion avec l'Institut japonais de l'économie  
de l'énergie

## NOTE CONCERNANT LE DROIT D'AUTEUR

Toutes les publications scientifiques et techniques de l'AIEA sont protégées par les dispositions de la Convention universelle sur le droit d'auteur adoptée en 1952 (Berne) et révisée en 1972 (Paris). Depuis, le droit d'auteur a été élargi par l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (Genève) à la propriété intellectuelle sous forme électronique. La reproduction totale ou partielle des textes contenus dans les publications de l'AIEA sous forme imprimée ou électronique est soumise à autorisation préalable et habituellement au versement de redevances. Les propositions de reproduction et de traduction à des fins non commerciales sont les bienvenues et examinées au cas par cas. Les demandes doivent être adressées à la Section d'édition de l'AIEA :

Unité de la promotion et de la vente  
Section d'édition  
Agence internationale de l'énergie atomique  
Centre international de Vienne  
BP 100  
1400 Vienne  
Autriche

télécopie : +43 1 2600 29302  
téléphone : +43 1 2600 22417  
courriel : [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
<http://www.iaea.org/books>

©IAEA, 2015

Imprimé par l'AIEA en Autriche  
Août 2015

STI/PUB/1710

#### NOTE DE L'ÉDITEUR

*Le présent Rapport du Directeur général a été élaboré sur la base des informations détaillées fournies dans les volumes techniques. Son contenu ne reflète pas nécessairement les opinions des États Membres de l'AIEA ou des organismes désignant des experts pour siéger dans les groupes de travail chargés de l'élaboration des volumes techniques.*

*L'exactitude des informations contenues dans le présent rapport a fait l'objet d'un soin particulier. Toutefois, ni l'AIEA ni ses États Membres n'assument aucune responsabilité pour les conséquences éventuelles de l'utilisation de ces informations et aucune garantie de quelque nature que ce soit n'est donnée en lien avec ce rapport.*

*Le présent rapport n'a pas pour objectif de traiter des questions de la responsabilité, juridique ou autre, résultant d'actes ou omissions imputables à une quelconque personne ou entité.*

*Des extraits du présent rapport peuvent être utilisés librement à condition que la source soit mentionnée. Lorsqu'il est indiqué dans le présent rapport que les informations (y compris les photos et les graphiques) proviennent d'une source ou d'un site extérieur à l'AIEA, l'autorisation de reproduction doit être sollicitée auprès de la source d'origine.*

*L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'AIEA, aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières.*

*La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.*

*L'AIEA n'assume aucune responsabilité quant à l'exactitude ou la persistance des adresses URL de sites Internet externes ou de tiers mentionnées dans le présent rapport et ne peut garantir que le contenu desdits sites est ou demeurera exact ou approprié.*



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique

B.P. 100, Centre international de Vienne  
1400 Vienne (Autriche)

Imprimé en Autriche

**GC(59)/14**