



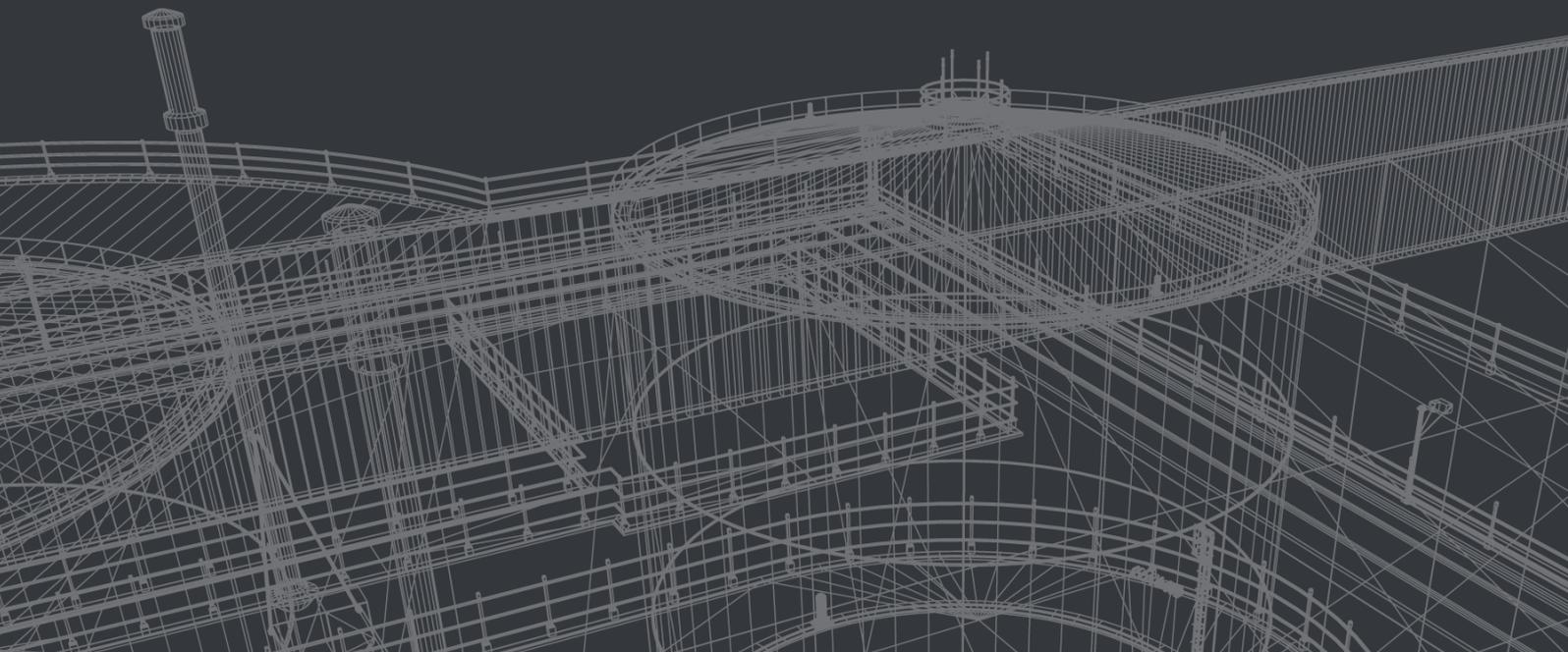
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN

Swiss Confederation

Conséquences Fukushima 11032011

Conséquences radiologiques
des accidents nucléaires de
Fukushima du 11.03.2011



Sommaire

1	Introduction	4
2	Classement INES, détermination de la quantité des rejets	6
2.1	Vue d'ensemble	6
2.2	Classement INES de l'événement	7
2.2.1	Systématique de l'échelle INES	7
2.2.2	Application de l'échelle INES à Fukushima Dai-ichi	8
2.3	Rejets radioactifs dans l'atmosphère	10
2.4	Rejets radioactifs dans la mer par voie aquatique	15
2.5	Résumé et évaluation	19
3	Débits de dose ambiante sur le site de la centrale nucléaire	20
3.1	Vue d'ensemble	20
3.2	Résultats et évolutions des mesures de débit de dose ambiante	20
3.3	Résumé et évaluation	25
4	Exposition aux radiations et conditions de travail du personnel	26
4.1	Vue d'ensemble	26
4.2	Limites des doses applicables au personnel exposé aux rayonnements ionisants au Japon	27
4.3	Surveillance dosimétrique du personnel des installations nucléaires	28
4.3.1	État avant les événements du 11 mars 2011	28
4.3.2	Modifications de la surveillance dosimétrique du fait de l'accident	28
4.3.2.1	Mesures prises à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi	28
4.3.2.2	Mesures prises au «Village J»	30
4.3.2.3	Équipements de radioprotection et planification du travail	30
4.4	État des expositions aux rayonnements ionisants	30
4.4.1	Unités de l'armée et de la police	30
4.4.2	Service du feu	31
4.4.3	Personnel de la centrale et travailleurs externes	31
4.4.4	Dépassements des valeurs limites de dose et causes possibles	33
4.4.5	Expositions exceptionnelles aux rayonnements ionisants	34
4.5	Mesures prises pour la réduction des doses	35
4.5.1	Mesures prises pour le contrôle et la réduction des doses	35
4.5.2	Mesures prises dans le bâtiment parasismique principal	37
4.6	Résumé et évaluation	39
5	Exposition de la population locale aux rayonnements ionisants	40
5.1	Vue d'ensemble	40
5.2	Retombées de substances radioactives au sol	41
5.2.1	Situation météorologique	41
5.2.2	Débit de dose ambiante associé à la contamination des sols	42
5.2.3	Mesures de la radioactivité du sol: nucléides volatils I-131, Cs-134 et Cs-137	47
5.2.4	Mesures de la radioactivité du sol: autres nucléides (Sr, Pu, U)	50
5.3	Contamination des produits alimentaires	52
5.4	Contamination de l'eau de boisson	56
5.5	Contamination de l'eau de mer et des fonds marins	58

5.6	Mesures visant à réduire l'exposition aux rayonnements ionisants	61
5.6.1	Évacuation des populations locales	61
5.6.2	Mesures de décontamination	63
5.7	Évaluation de la dose reçue par les populations locales	63
5.7.1	Dose reçue au cours de la phase aiguë	63
5.7.2	Évaluation de la dose reçue à long terme	64
5.8	Résumé et évaluation	65
6	Effets sur la population en Suisse	
	(contribution de l'Office fédéral de la santé publique OFSP)	66
6.1	Vue d'ensemble	66
6.2	Mesures de la radioactivité de l'air	67
6.2.1	Préleveurs d'aérosols à haut débit (PHD, filtres à air)	67
6.2.2	I-131 sous forme gazeuse	68
6.2.3	Mesures sur filtres aéroportés à haute altitude (FHA)	69
6.3	Échantillons de produits alimentaires et de l'environnement	71
6.4	Résumé et évaluation	71
7	Comparaison des événements de Fukushima avec ceux de Tchernobyl	
	(avec des contributions de la „Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH“ allemande, GRS)	72
7.1	Déroulement de l'accident et rejets	72
7.2	Situation radiologique sur le site des installations	74
7.3	Situation radiologique dans l'environnement	76
7.4	Exposition des équipes d'intervention et de la population locale aux rayonnements ionisants	78
7.5	Évaluation des expositions à long terme	79
7.6	Résumé et évaluation	83
8	Répertoire des abréviations	84
9	Répertoire des tableaux et illustrations	86
10	Références	89

1 Introduction

Le séisme Tohoku Chihou Taiheiyou Oki qui s'est produit le 11 mars 2011 à 14h46 (heure locale) le long des côtes nippones été le séisme le plus violent de l'histoire du Japon depuis que les secousses sismiques sont enregistrées. Le tsunami qui en est résulté a submergé de vastes zones de la côte nord-est et a atteint les installations nucléaires de Fukushima Dai-ichi (Fukushima I) avec une première lame vers 15h27 et une seconde lame vers 15h35. Le séisme et le tsunami qui a suivi ont endommagé les installations de Fukushima Dai-ichi avec une ampleur telle que, le 12 avril 2011, les autorités japonaises ont classé l'événement comme «accident catastrophique» de niveau 7 de l'échelle internationale des événements nucléaires (International Nuclear and Radiological Event Scale - INES).

La Tokyo Electric Power Company (TEPCO) exploitait sur le site de Fukushima Dai-ichi six réacteurs à eau bouillante (REB, BWR) d'une puissance nette totale de 4'547 mégawatts électriques (MWel), une piscine commune de stockage des assemblages combustibles usés (Common Spent Fuel Pool) ainsi qu'un entrepôt de stockage à sec (Dry Cask Storage). Associé au site voisin de Fukushima Dai-ni (Fukushima II) situé à 12 km et équipé de quatre autres tranches d'une puissance unitaire de 1'100 MWel, ce complexe constituait le plus grand ensemble de production d'énergie nucléaire au monde. Au moment du séisme, les tranches 1 à 3 de Fukushima Dai-ichi étaient en production. Les tranches 4 à 6 étaient à l'arrêt depuis plusieurs mois pour des travaux de maintenance. L'ensemble des assemblages combustibles extraits de la cuve du réacteur de la tranche 4 était stocké dans le bassin prévu à cet effet dans le bâtiment du réacteur. Les quatre tranches de la centrale de Fukushima Dai-ni étaient en production au moment du séisme.

Outre Fukushima I et II, d'autres centrales nucléaires (Onagawa 1-3, Tokai et Higashidori) ont été touchées par le séisme et le tsunami, mais ceci sans conséquences graves.

A partir du 12 mars 2011 à 14h30, des rejets significatifs de substances radioactives dans l'environnement ont eu lieu sur le site de Fukushima Dai-ichi. Ces rejets ont eu et ont toujours des conséquences importantes pour la population proche. L'irradiation associée au passage du nuage radioactif, l'absorption de substances radioactives par la respiration (inhalation) et la retombée de substances radioactives sur les sols représentent pour la population locale une menace majeure d'exposition aux radiations ionisantes. Afin d'éviter cela, il a fallu procéder à l'évacuation des personnes résidant dans une vaste zone autour du site. L'accident a eu aussi des répercussions sur les conditions de vie de la population locale du fait de la contamination radioactive de l'eau de boisson, de la mer, des plantes et des animaux et donc de l'ensemble de la chaîne alimentaire.

En réaction aux événements du Japon, l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) a mis sur pied le 12 mars 2011 son organisation de gestion de crise, afin de suivre l'événement en continu et d'émettre en temps réel ses estimations sur la situation régnant dans les centrales nucléaires concernées. Après stabilisation de la situation, l'organisation de gestion de crise de l'IFSN est revenue le 24 mars 2011 à son état de disponibilité de routine. Une équipe a ensuite été chargée de suivre l'évolution des événements au Japon et de procéder à une analyse exhaustive de l'accident de Fukushima Dai-ichi. Le déroulement détaillé de l'accident /47/, une analyse approfondie de l'accident tenant particulièrement compte des facteurs organisationnels et humains /48/ et les enseignements qui en ont été tirés (Lessons Learned) /49/ ont été publiés dans des rapports spécifiques de l'IFSN.

Le chapitre 2 traite tout d'abord des liens entre l'accident survenu sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi et son évaluation selon des critères internationaux. Il décrit également les rejets de substances radioactives des réacteurs des tranches 1 à 3 et les évalue. Il décrit enfin les taux de rejet moyens persistants et le traitement des eaux contaminées présentes sur le site de l'installation.

Le chapitre 3 décrit les débits de dose sur le site de la centrale nucléaire imputables aux retombées et à la dissémination des substances radioactives après les décompressions des enceintes de confinement et les explosions d'hydrogène. Ces débits de dose constituent la base de la description au chapitre 4 de l'irradiation subie par le personnel d'intervention ; ils ont aussi marqué les conditions de travail. Ce chapitre fait également état des difficultés rencontrées lors de la surveillance dosimétrique par l'exploitant après l'accident et des mesures palliatives prises alors. L'état actuel connu de l'IFSN de l'exposition du personnel et des autres intervenants, de même que les difficultés de maîtrise d'un accident de cette ampleur, sont expliqués à l'aide d'exemples choisis.

Le chapitre 5 décrit l'exposition de la population du fait des rejets de substances radioactives dans l'environnement de la centrale nucléaire. Au cours de la phase initiale, l'essentiel de l'irradiation a été provoqué par le rayonnement externe associé au passage du nuage radioactif et à l'inhalation de substances radioactives. Dans la phase au sol qui a suivi, l'irradiation externe due aux substances radioactives déposées sur le sol y a ajouté une contribution d'exposition sur le long terme. Les substances radioactives qui sont parvenues de manière directe ou indirecte sur et dans les fourrages et les légumes constituent une autre source d'exposition importante découlant de la consommation

de produits alimentaires (ingestion). De plus, des substances radioactives rejetées dans les lacs, dans les cours d'eau et en mer se retrouvent dans la chaîne alimentaire humaine par la consommation de poissons et de fruits de mer. Les rejets radioactifs qui ont touché les eaux de surfaces (lacs, cours d'eau) ont contaminé les réserves d'eau potable et ont contribué du fait de leur distribution à une exposition supplémentaire aux rayonnements ionisants. Le chapitre décrit également les mesures prises par le gouvernement japonais pour réduire les doses à la population.

Le chapitre 6 du présent rapport décrit les conséquences de l'accident en Suisse. Il présente les mesures préventives prises par l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) à la suite de l'accident et les conséquences de ce dernier pour la population suisse. Il documente enfin les résultats de mesure les plus importants et les conclusions à en tirer pour la Suisse.

Le chapitre 7 compare les événements de Fukushima et ceux de Tchernobyl. Il en éclaire ainsi les différents aspects et procède à une comparaison de leurs effets sur la population et sur l'environnement, pour autant que cela soit possible avec les données disponibles aujourd'hui.

Le chapitre 6 du présent rapport provient de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP). L'organisme allemand Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) a contribué pour une part importante à la rédaction du chapitre 7.

2 Classement INES, détermination de la quantité des rejets

2.1 Vue d'ensemble

Le présent chapitre décrit le classement de l'accident survenu sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi selon les critères de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

L'échelle INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) a été mise au point en 1990 à la suite de l'accident de Tchernobyl pour faciliter la perception de l'importance des incidents et accidents survenant dans des installations nucléaires. L'échelle

s'étend du niveau de gravité 1 – la simple «anomalie» – jusqu'au niveau de gravité 7 correspondant à un «accident majeur». Les événements des niveaux 1 à 3 sont qualifiés «d'incidents», ceux de niveau supérieur sont considérés comme des «accidents». Les événements anodins ou sans signification critique pour la sécurité de l'installation sont classés au niveau 0.

Le classement d'un événement s'effectue à l'aide d'un catalogue très fourni de critères, publié dans un manuel de l'AIEA (voir /2/).

Niveau	Description succincte	Aspect		
		Conséquences radiologiques en dehors de l'installation	Conséquences radiologiques au sein de l'installation	Dégradation des mesures de sûreté
7	Accident majeur	Rejets majeurs dans l'environnement: effets sur la santé et l'environnement dans une large zone géographique	-	-
6	Accident grave	Rejets importants: application totale des mesures de protection en cas de catastrophe	-	-
5	Accident sérieux	Rejets limités: application de certaines mesures de protection en cas de catastrophe	Endommagement grave du cœur du réacteur / des barrières radiologiques	-
4	Accident	Rejets mineurs: exposition de la population à un niveau correspondant à l'irradiation naturelle	Endommagement limité du cœur du réacteur / des barrières radiologiques Exposition létale d'un travailleur	-
3	Incident grave	Très faibles rejets: exposition de la population à un niveau correspondant à une fraction de l'irradiation naturelle	Contaminations graves Effets aigus sur la santé du personnel	Accident évité de peu Défaillance prononcée des dispositifs de sûreté de la défense en profondeur
2	Incident	-	Contamination importante Exposition inadmissible du personnel	Incident Défaillance limitée de dispositifs de sûreté de la défense en profondeur
1	Anomalie	-	-	Écarts par rapport aux domaines admissibles pour l'exploitation sûre de l'installation
0	Écart	-	-	Aucune ou très faible importance pour la sûreté des installations

Tab. 2-1 Aspects de l'évaluation pour le classement INES selon les critères internationaux³

Le classement de l'accident de Fukushima au niveau INES le plus élevé repose sur des évaluations des quantités de substances radioactives rejetées. Les rejets des nucléides importants pour le classement, l'iode-131 et le césium-137, ont progressivement augmenté après l'accident et ont finalement dépassé la valeur à partir de laquelle l'événement doit être classé au niveau 7 de l'échelle INES.

Outre le classement INES de l'événement, il convient d'expliquer aussi plus en détail les voies de rejet des substances radioactives hors des bâtiments des réacteurs dans l'environnement et de chiffrer l'ampleur de ces rejets. Outre les émissions de nucléides sous forme gazeuse ou particulaires dans l'atmosphère, on a assisté, en raison de fuites du confinement primaire, à des déversements d'eaux contaminées dans la mer proche.

Le déroulement même de l'accident est décrit en détail dans une publication IFSN distincte (voir /47/).

2.2 Classement INES de l'événement

2.2.1 Systématique de l'échelle INES

L'échelle d'évaluation internationale des événements nucléaires (International Nuclear and Radiological Event Scale, INES) comprend les niveaux 1 à 7 pour les événements ayant une implication importante pour la sécurité et le niveau 0 pour les événements sans importance ou de très faible importance pour la sécurité des installations. L'échelle INES permet donc un classement des événements en huit niveaux (voir illustration 2-1).

La signification des différents niveaux est indiquée par un nombre et une dénomination abrégée.

Les niveaux sont caractérisés par différents aspects, comme indiqué dans le tableau 2-1.

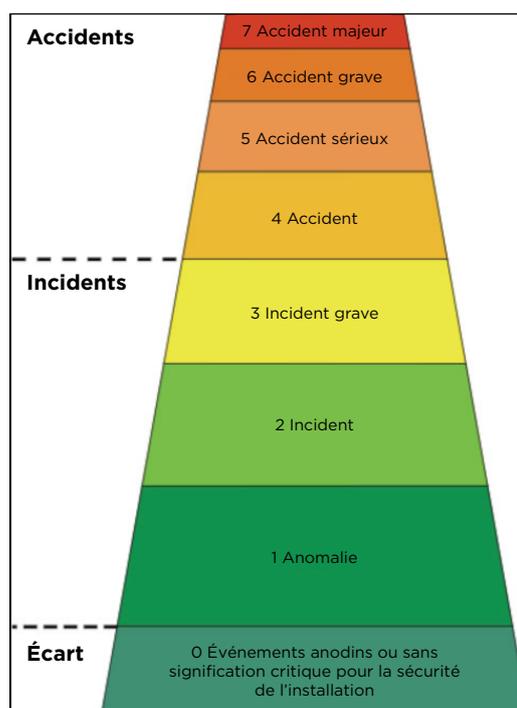


Fig. 2-1 Échelle internationale d'évaluation des événements nucléaires - INES²

2.2.2 Application de l'échelle INES à Fukushima Dai-ichi

Le 11 mars 2011 à 16h36, l'Agence japonaise de sécurité nucléaire et industrielle (Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA) classait provisoirement l'événement du site de Fukushima Dai-ichi au niveau INES 3. Cette décision se justifiait par la panne des pompes d'alimentation et donc par la perte des systèmes de refroidissement de secours et d'évacuation de la puissance résiduelle des tranches 1 et 2 après la panne totale d'alimentation en énergie électrique (voir /1/). Le classement INES s'est effectué en fonction de l'aspect «Dégradation des mesures de sécurité» sous le critère «Accident évité de peu, défaillance prononcée des dispositifs de sécurité de la défense en profondeur».

Le 12 mars 2011, il a fallu procéder à la décompression de l'enceinte de confinement primaire de la tranche 1 ; elle fut suivie d'une explosion d'hydrogène dans le bâtiment du réacteur. Sur la base des résultats de mesure de surveillance de l'environnement, la NISA a informé que des rejets d'iode et de césium radioactifs dans l'environnement avaient eu lieu. Elle a alors calculé que l'activité des substances rejetées correspondaient à 0,1 % du contenu du cœur et a augmenté le classement provisoire de l'événement pour la tranche 1 au niveau INES 4 (voir /1/).

Après que le postulat de dommages graves au cœur des tranches 1 à 3 se soit imposé, la NISA devait classer l'événement pour les tranches 1 à 3 au niveau 5 pour chacune d'entre elles ; les rejets étaient alors quantifiés à plusieurs pour cent du contenu des cœurs (voir /1/). Le classement INES 5 s'est effectué en fonction de l'aspect «Conséquences radiologiques au sein de l'installation» du tableau 2-1, sur la considération du critère «Endommagement grave du cœur du réacteur / des barrières radiologiques».

La NISA a ensuite procédé à des calculs de la quantité des rejets dans l'atmosphère (voir /5/). Les résultats obtenus, comparés à ceux de la Nuclear Safety Commission (NSC), sont indiqués dans le tableau 2-2 ci-après.

Indépendamment de cela, dans le cadre d'une collaboration entre la NSC et la Japan Atomic Energy Agency (JAEA), on a déterminé, à des fins de classement INES, les quantités de I-131 et de Cs-137 rejetées dans l'atmosphère sur le site de Fukushima Dai-ichi durant la période du 11 mars 2011 au 5 avril 2011. Le communiqué de la NSC en date du 12 avril 2011 chiffre les rejets pour la période considérée à 1.5E+17 Bq pour l'I-131 et à 1.2E+16 Bq pour le Cs-137 /4/.

Nucléide	Rejets estimés du site de Fukushima Dai-ichi [Bq]		(Valeur de référence) Rejets Tchernobyl tranche 4 [Bq]
	Indications NISA	Indications NSC	
I-131	1.3E+17	1.5E+17	1.8E+18
Cs-137	6.1E+15	1.2E+16	8.5E+16
Cs-137 converti en équivalent I-131	2.4E+17	4.8E+17	3.4E+18
Somme des équivalents I-131	3.7E+17	6.3E+17	5.2E+18

Tab. 2-2 Comparaison de la quantité des rejets pour le classement INES⁴

4 | Source: /5/

5 | La conversion des valeurs de Cs-137 en équivalent I-131 a été effectuée par la NISA selon les instructions du manuel d'utilisation INES 10.

La fig. 2-2 ci-après représente la comparaison des courbes de rejets cumulés calculés par la NSC (communiqué du 12 avril 2011) sur la période définie plus haut.

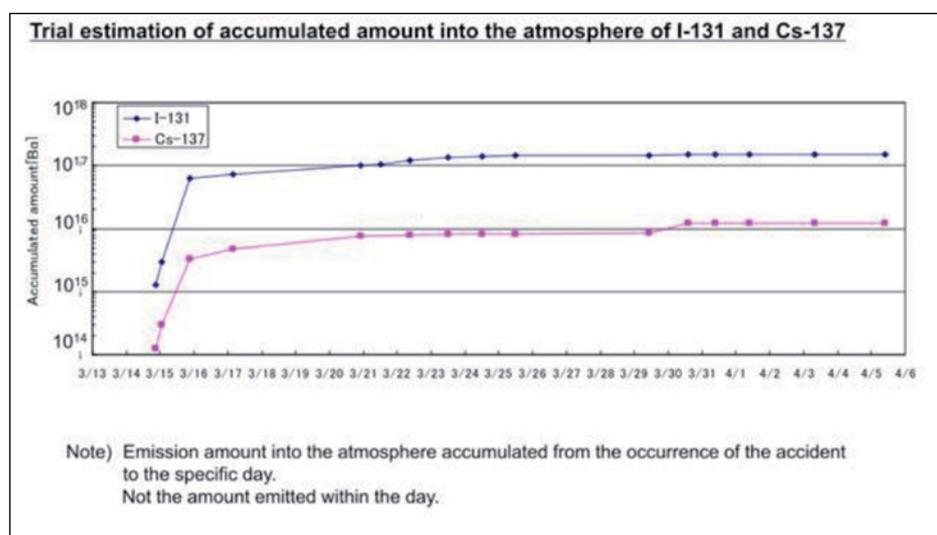


Fig. 2-2 Rejets cumulés d'I-131 et de Cs-137 d'après les calculs de la NSC pour la période du 11 mars 2011 au 5 avril 2011⁶

Le 12 avril 2011, la NISA procédait au classement pour l'ensemble du site de Fukushima Dai-ichi. En fonction de l'aspect «Conséquences radiologiques en dehors de l'installation» sous le critère «Rejets majeurs dans l'environnement, effets sur la santé et l'environnement dans une large zone géographique», l'événement a été classé au niveau INES 7. Ce classement a été justifié à partir des rejets d'équivalent en iode estimés à 3.7E+17 Bq (NISA) et à 6.3E+17 Bq (NSC et JAEA) (voir /1/). Selon le manuel INES (voir /2/), un événement doit être classé INES 7 lorsque les rejets de substances radioactives dans l'atmosphère sont équivalents à plusieurs fois 10'000 TBq (1E+16 Bq) d'iode-131. Les rejets calculés sont détaillés dans les chapitres 2.3 et 2.4 ci-après.

2.3 Rejets radioactifs dans l'atmosphère

D'après l'état actuel des connaissances, la presque totalité des rejets de substances radioactives issues des tranches de réacteur 1 à 3 de Fukushima Dai-ichi résulte de deux processus. D'une part des décompressions non filtrées des enceintes de confinement primaires ont provoqué le rejet de quantités importantes de substances radioactives par voie atmosphérique. D'autre part, les explosions d'hydrogène ont provoqué d'autres rejets et ont eu pour résultat final la perte des barrières de sécurité visant à retenir la radioactivité.

Dans le détail, ces rejets sont le résultat des processus suivants. La perte de l'intégrité des assemblages combustibles, jusqu'à la fusion des pastilles de combustible et leur accumulation partielle subséquente dans le fond de la cuve du réacteur (RDB), de même que la perte partielle de l'intégrité de la cuve de pression elle-même, sont dues à la mise à découvert temporaire du cœur du réacteur en raison de l'insuffisance du niveau de fluide caloporteur.

La défaillance du refroidissement du cœur et la nécessité qui en est résultée de procéder à des décompressions de la cuve de réacteur par les soupapes de décharge a essentiellement contribué au transfert d'aérosols de substances radioactives dans l'enceinte de confinement primaire par l'intermédiaire de la chambre de condensation (conçue sous la forme d'un tore sur les enceintes de confinement de type Mark I). Du fait de l'apport continu d'énergie dans l'enceinte de confinement primaire, sans possibilité d'évacuation vers l'extérieur, la pression interne et la quantité de produits de fission n'ont fait qu'augmenter. Dans la suite de l'évolution de la défaillance, les mesures d'urgence qui ont dû être prises (décompressions de l'enceinte de confinement primaire, dites «venting») ont entraîné d'importants rejets radioactifs dans l'environnement. Il est de plus soupçonné que l'augmentation de la température et de la pression régnant dans l'enceinte de confinement primaire est à l'origine de fuites sur le joint de couvercle et sur des traversées de la paroi de l'enceinte de confinement. Cette perte partielle de l'intégrité de l'enceinte de confinement primaire a provoqué l'évacuation de radionucléides et d'hydrogène hors de l'enceinte de confinement dans le volume du bâtiment du réacteur. Les explosions de H₂ qui ont suivi ont détruit le bâtiment du réacteur et libéré de grandes quantités de radionucléides. Les bâtiments béants du réacteur ont ainsi contribué au rejet continu, quoique décroissant, de substances radioactives (voir illustration 2-4). De telles substances ont également

été rejetées dans l'environnement par voie aquatique, ceci aussi bien du fait de la réalimentation en eau de refroidissement au moyen d'équipements de fortune que du fait de fuites internes (par ex. au niveau du tore, du couvercle de l'enceinte de confinement ou de l'enceinte elle-même) et de défauts d'étanchéité des bâtiments.

Des inspections effectuées sur les bassins de stockage des assemblages combustibles usés des tranches 2, 3 et 4, y compris les mesures des nucléides associés, laissent supposer jusqu'à maintenant que les assemblages combustibles stockés n'ont pas subi de dommages importants. On peut donc tirer la conclusion que la majeure partie des rejets est imputable aux décompressions des enceintes de confinement et aux fuites. Aucune information n'est pour le moment disponible en ce qui concerne les bassins de stockage des tranches 1, 5 et 6. Il est néanmoins possible de supposer que les tranches 5 et 6, moins touchées par le tsunami et dont les bâtiments sont restés intacts, ne sont pas à l'origine de rejets (voir /11/). Aussi bien la piscine commune de stockage des assemblages combustibles que les conteneurs de stockage à sec sont restés intacts et n'ont aucunement contribué à des rejets de radionucléides dans l'environnement. Le local de stockage à sec proche de la salle des turbines de la tranche 5 a été endommagé par le tsunami (voir illustration 2-3). Comme les mesures effectuées /3/ n'ont permis de constater aucun rejet de substances radioactives, on peut admettre que les conteneurs sont restés intacts.



Fig. 2-3 Situation dans le local de stockage à sec de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi⁷

Des analyses effectuées par la NISA en mai 2011 ont indiqué pour le site de Fukushima Dai-ichi des rejets, variables selon les tranches, du contenu des cœurs d'environ 0.4 - 7 % pour les nucléides d'iode, d'environ 0.4 - 3 % pour les nucléides de tellure, d'environ 0.3 - 6 % pour les nucléides de césium et de pratiquement la totalité des gaz rares.

Ces valeurs sont donc supérieures aux premières estimations effectuées pour le classement de l'événement sur l'échelle INES. Les rejets de produits de fission dans l'environnement au début de l'événement sont répertoriés dans le tableau 2-3 pour les différentes tranches /1/.

Les rapports des rejets calculés dépendent toutefois d'hypothèses, par ex. en ce qui concerne les conditions d'exploitation, les volumes d'eau injectés dans les cuves de réacteurs ainsi que les fuites possibles. Les rejets calculés peuvent varier dans un certain intervalle en fonction des grandeurs d'influence de référence. Au moment des calculs, les informations relatives aux données d'exploitation n'étaient pas encore toutes connues. Ceci explique que le comportement des installations n'a pu être décrit avec la précision nécessaire.

Nucléide	Période ⁹	Quantité de rejets [Bq]			
		Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Total tranches 1-3
Xe-133	5.25 d	3.4E+18	3.5E+18	4.4E+18	1.1E+19
Cs-134	2.06 a	7.1E+14	1.6E+16	8.2E+14	1.8E+16
Cs-137	30.17 a	5.9E+14	1.4E+16	7.1E+14	1.5E+16
Sr-89	50.5 d	8.2E+13	6.8E+14	1.2E+15	2.0E+15
Sr-90	28.64 a	6.1E+12	4.8E+13	8.5E+13	1.4E+14
Ba-140	12.75 d	1.3E+14	1.1E+15	1.9E+15	3.2E+15
Te-127m	109.0 d	2.5E+14	7.7E+14	6.9E+13	1.1E+15
Te-129m	33.6 d	7.2E+14	2.4E+15	2.1E+14	3.3E+15
Te-131m	30.0 h	9.5E+13	5.4E+10	1.8E+12	9.7E+13
Te-132	76.3 h	7.4E+14	4.2E+11	1.4E+13	7.6E+14
Ru-103	39.35 d	2.5E+9	1.8E+9	3.2E+9	7.5E+9
Ru-106	373.6 d	7.4E+8	5.1E+8	8.9E+8	2.1E+9
Zr-95	64.0 d	4.6E+11	1.6E+13	2.2E+11	1.7E+13
Ce-141	32.5 d	4.6E+11	1.7E+13	2.2E+11	1.8E+13
Ce-144	284.8 d	3.1E+11	1.1E+13	1.4E+11	1.1E+13
Np-239	2.355 d	3.7E+12	7.1E+13	1.4E+12	7.6E+13
Pu-238	87.74 a	5.8E+8	1.8E+10	2.5E+8	1.9E+10
Pu-239	2.411E+4 a	8.6E+7	3.1E+9	4.0E+7	3.2E+9
Pu-240	6'563 a	8.8E+7	3.0E+9	4.0E+7	3.2E+9
Pu241	14.35 a	3.5E+10	1.2E+12	1.6E+10	1.2E+12
Y-91	58.5 d	3.1E+11	2.7E+12	4.4E+11	3.4E+12
Pr-143	13.57 d	3.6E+11	3.2E+12	5.2E+11	4.1E+12
Nd-147	10.98 d	1.5E+11	1.3E+12	2.2E+11	1.6E+12
Cm-242	162.94 d	1.1E+10	7.7E+10	1.4E+10	1.0E+11
I-131	8.02 d	1.2E+16	1.4E+17	7.0E+15	1.6E+17
I-132	2.3 h	4.5E+14	9.6E+11	1.8E+13	4.7E+14
I-133	20.8 h	6.5E+14	1.4E+12	2.6E+13	6.8E+14
I-135	6.61 h	6.1E+14	1.3E+12	2.4E+13	6.3E+14
Sb-127	3.85 d	1.7E+15	4.2E+15	4.5E+14	6.4E+15
Sb-129	4.4 h	1.6E+14	8.9E+10	3.0E+12	1.6E+14
Mo-99	66.0 h	8.1E+7	1.0E+4	6.7E+6	8.8E+7

Tab. 2-3 Evaluation provisoire des rejets atmosphériques de substances radioactives dans la phase initiale de l'accident (en tenant compte des données d'exploitation jusqu'au 16 mai 2011) ⁸

Le ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI) publie des rapports d'avancement à intervalles réguliers (voir /6/). Ces rapports indiquent toujours les taux de rejet moyens estimés. Comme le montre la fig. 2-4, les taux de rejets moyens ont chuté de plusieurs ordres de grandeur, notamment d'environ $8\text{E}+14$ Bq/h le 15 mars à environ $1\text{E}+8$ Bq/h dans la période du 03 au 13 octobre 2011. Ces estimations reposent sur différentes mesures de concentrations dans l'air. Entre-temps des collecteurs de précipitations, permettant d'obtenir des valeurs plus précises, ont été installés.

Le 24 août 2011, la NSC annonçait dans un communiqué que la JAEA avait effectué de nouveaux calculs qui prenaient en compte des mesures radiologiques supplémentaires de l'environnement et d'autres facteurs concernant le début de l'événement. Compte tenu de ces nouvelles conditions, les rejets de radioactivité pour la période du 11 mars au 5 avril 2011 ont été estimés à $1.3\text{E}+17$ Bq pour l'I-131 et à $1.1\text{E}+16$ Bq pour le Cs-137. Les rejets totaux d'iode et d'aérosols auraient donc été inférieurs de 10 % aux valeurs publiées en avril (voir tableau 2-2). Aucun rejet significatif n'a été observé sur les sites de Fukushima Dai-ichi, de Tokai et d'Onagawa.

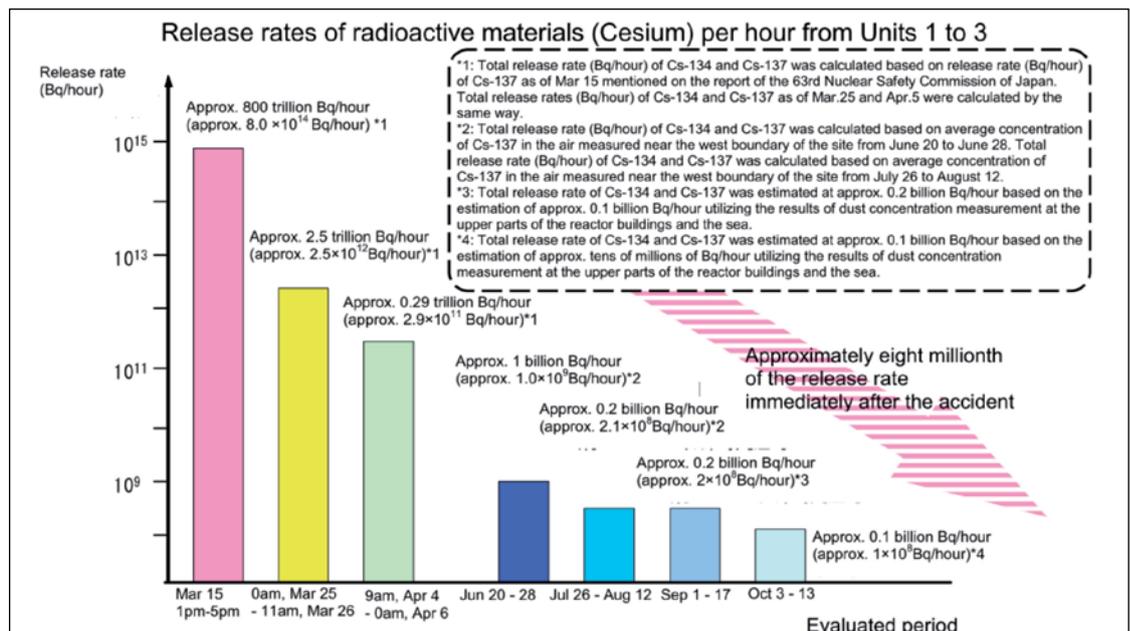


Fig. 2-4 Taux de rejets des tranches 1-3 à Fukushima Dai-ichi ¹⁰

2.4 Rejets radioactifs dans la mer par voie aquatique

L'introduction de substances radioactives dans les enceintes primaires de confinement est due aux décompressions effectuées sur les cuves de pression de réacteur et aux défauts d'étanchéité de ces mêmes cuves à la suite de la fusion des cœurs. La présence de fuites a permis que cette eau s'échappe hors de l'enceinte de confinement primaire et se rassemble aux niveaux inférieurs des bâtiments de réacteur. De gros volumes d'eau radioactive se sont ainsi échappés de la tranche 2 sur laquelle on suspecte un tore non étanche. Une autre cause de cet apport de radioactivité est imputable à l'échappement d'un mélange d'hydrogène, d'azote et de vapeur d'eau dans les bâtiments du réacteur (voir chapitre 2.3).

Après les détonations, la réalimentation en eau des bassins de stockage des assemblages combustibles s'est effectuée au départ à l'aide de canons à eau, puis à l'aide de pompes à béton. Il se peut donc que des radionucléides aient été transportés jusqu'aux niveaux inférieurs du bâtiment de réacteur, de même que la pluie ait provoqué des lessivages des décombres dispersés dans le fond du bassin de rétention par les explosions. Des niveaux inférieurs des bâtiments de réacteur, l'eau contaminée s'est ensuite écoulée par des canaux de liaison vers les salles des turbines. Celles-ci sont elles-mêmes reliées aux stations de pompage d'eau par des chemins de câbles et des puits bétonnés (voir illustration 2-5). L'eau contaminée a ainsi eu accès par cette voie aux prises d'eau en mer. Au début du mois de septembre 2011, les tranches 1 à 4 renfermaient environ 90 000 m³ d'eau contaminée.

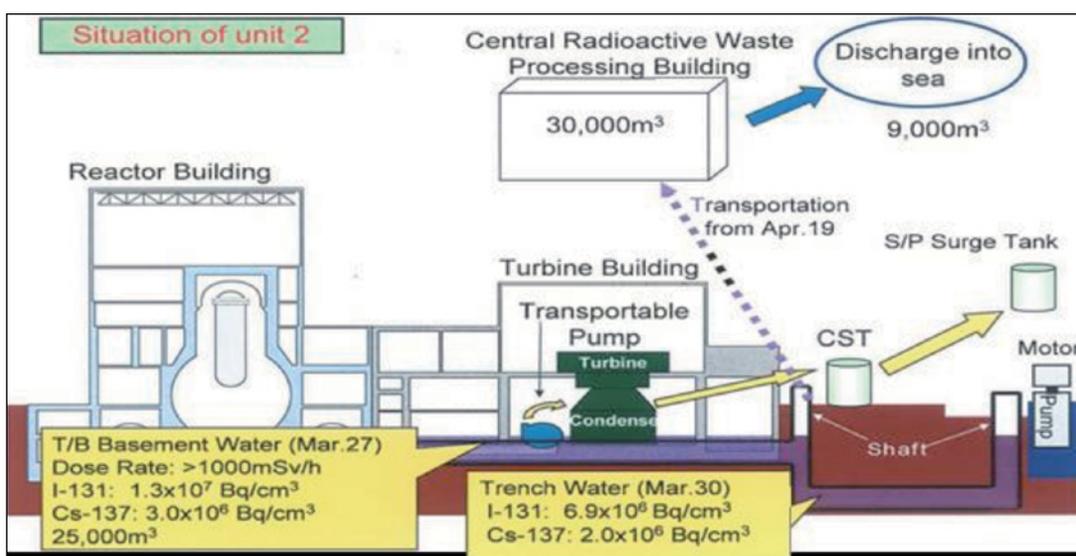


Fig. 2-5 Voies d'écoulement d'eau contaminée dans la tranche 2¹¹

Les résultats des analyses de concentration de radionucléides dans l'eau accumulée dans les salles des turbines à la fin mars 2011 sont récapitulés dans le tableau 2-4 (voir /1/). L'analyse de l'eau dans la salle des turbines de la tranche 2 a donné des concentrations de produits de fission de $1.3E+10$ Bq/l pour l'I-131 et de $3.0E+9$ Bq/l pour le Cs-137 (voir /7/). Ces valeurs dépassent d'un facteur 10 celles mesurées dans les eaux contaminées de la tranche 1 ou 3. Le défaut d'étanchéité du tore en constitue la cause supposée. Le volume d'eau contaminée accumulé jusqu'à la fin mars 2011 a été estimé à 25'000 m³ pour la tranche 2.

Le 2 avril 2011, on a mesuré, dans le chemin de câbles à proximité de la prise d'eau de la tranche 2, un débit de dose supérieur à 1 Sv/h, imputable à la présence d'eau hautement contaminée avec des activités de $6.9E+9$ Bq/l pour l'I-131 et de $2.0E+9$ Bq/l pour le Cs-137. De cette eau issue de la salle des turbines de la tranche 2, les gaines de liaison, les chemins de câbles et les défauts d'étanchéité du béton auraient laissé s'écouler environ 520 m³ dans la mer selon des estimations de la NISA. Ces fuites ont pu être colmatées le 6 avril 2011.

Tranche		Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Tranche 4
Lieu du prélèvement d'échantillons		Sous-sol Salle des turbines		Sous-sol Salle des turbines	
Date		26.03.2011	27.03.2011	24.03.2011 (22.04.2011)	24.03.2011 (21.04.2011)
Nucléide ($T_{1/2}$) Activité [Bq/l]	Mo-99 (66.0 h)	< LD ¹²	< LD	< LD (< LD)	1.0E+3 (< LD)
	Tc-99m (6.0 h)	< LD	< LD	2.0E+6 (< LD)	6.5E+2 (< LD)
	Te-129m (33.6 d)	< LD	< LD	< LD (< LD)	1.3E+4 (< LD)
	I-131 (8.02 d)	1.5E+8	1.3E+10	1.2E+9 (6.6E+8)	3.6E+5 (4.3E+6)
	I-132 (2.30 h)	< LD	< LD	< LD (< LD)	1.3E+4 (< LD)
	Te-132 (76.3 h)	< LD	< LD	< LD (< LD)	1.4E+4 (< LD)
	Cs-134 (2.06 a)	1.2E+8	3.1E+8	1.8E+8 (1.5E+9)	3.1E+4 (7.8E+6)
	Cs-136 (13.16 d)	1.1E+7	3.2E+8	2.3E+7 (4.4E+7)	3.7E+3 (2.4E+5)
	Cs-137 (30.17 a)	1.3E+8	3.0E+9	1.8E+8 (1.6E+9)	3.2E+4 (8.1E+6)
	Ba-140 (12.75 d)	< LD	6.8E+8	5.2E+7 (9.6E+7)	< LD (6.0E+5)
	La-140 (40'272 h)	< LD	3.4E+8	9.1E+6 (9.3E+7)	4.1E+2 (4.8E+5)

Tab. 2-4 Concentration radioactive de l'eau contaminée présente dans les salles des turbines ¹³

12 | LD = limite de détection

13 | Source: /1/

Au cours des mesures d'urgence, la décision a été prise d'évacuer vers la mer environ 9 070 m³ d'eau faiblement contaminée issue de l'installation centrale de décontamination des déchets, car les capacités de stockage étaient épuisées. Pour créer des capacités de stockage supplémentaires, de l'eau faiblement active du condenseur de la salle des turbines a été pompée vers le réservoir tampon des condensats et vers le réservoir de compensation du tore. Une partie de l'eau hautement radioactive accumulée dans la salle des turbines et dans les puits et conduits adjacents de la tranche 2 a alors pu être pompée vers l'installation centrale de traitement des déchets et vers le condenseur. L'abaissement du niveau d'eau a ainsi permis de réduire le risque de fuites vers la mer ou la nappe phréatique.

Un autre défaut d'étanchéité a été détecté le 10 mai 2011 sur le conduit principal de la tranche 3. L'étanchéité a pu être rétablie le 11 mai 2011. Les calculs des écoulements probables s'élèvent à environ 250 m³ avec une d'activité de 2.0E+13 Bq.

Environ 1 320 m³ d'eau faiblement radioactive présente dans les galeries bétonnées des tranches 5 et 6 ont également été évacués vers la mer entre le 4 et le 9 avril 2011. La radioactivité totale de ces effluents liquides déversés dans l'environnement a été de l'ordre de 1.5E+11 Bq. En comparaison, les rejets d'effluents radioactifs annuels autorisés pour le site de Fukushima Dai-ichi sont de 2.2E+11 Bq (voir /1/).

La radioactivité totale des effluents liquides déversés en mer serait selon /1/ d'environ 4.7E+15 Bq.

Depuis la mi-juin 2011, l'eau radioactive est épurée dans une installation de décontamination spécialement installée et sert à nouveau au refroidissement des réacteurs (principe d'un circuit quasi fermé).

2.5 Résumé et évaluation

Après la perte de l'ensemble des barrières de sécurité destinées au confinement des produits de fission (matrice des pastilles combustibles, gaines des assemblages, cuve de pression de réacteur avec son circuit primaire, enceinte de confinement avec son blindage de béton et bâtiment du réacteur), les tranches de réacteur 1 à 3 ont rejeté d'importantes quantités de produits de fission dans l'environnement.

Ces rejets ont eu lieu lors des différentes phases des accidents dans les tranches 1 à 3 et en plusieurs vagues. Ceci explique pourquoi il a fallu réévaluer à plusieurs reprises, en fonction de l'évolution des événements, les classements sur l'échelle INES. Les autorités japonaises ont effectué les évaluations en utilisant des codes de calcul éprouvés utilisés dans le monde entier (par ex. MELCOR). Ceux-ci supposent la saisie de certaines conditions particulières, telles que l'usure du combustible, le confinement dans le bâtiment, etc.

Le volume total des effluents radioactifs rejetés à la mer n'est pas non plus connu avec précision. Les données disponibles reposent sur des évaluations grossières de l'exploitant TEPCO, car les durées précises des écoulements et les débits de fuite (notamment au début de l'accident) ne peuvent être déterminés a posteriori. Le déversement volontaire d'eau contaminée radioactive dans l'océan avait pour objectif de réduire les conséquences de l'accident et était indispensable dans la situation concrète rencontrée.

Les travaux d'étanchéité des petites fuites radioactives persistantes se poursuivent depuis le début du mois d'avril 2011. Les destructions et contaminations du site de la centrale causées par les explosions d'hydrogène ont considérablement gêné les travaux. De plus, la quasi-simultanéité des accidents dans les tranches 1 à 3 et les interactions entre les tranches ont constitué un défi énorme du point de vue des ressources en personnel et en matériel.

Selon le calendrier d'assainissement de la société exploitante, l'arrêt total des rejets et la décontamination du site prendront environ trois années.

3 Débits de dose ambiante sur le site de la centrale nucléaire

3.1 Vue d'ensemble

Le présent chapitre documente les débits de dose ambiante mesurés pendant et après l'accident sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi.

Le séisme et le tsunami ont entraîné la défaillance partielle des sondes de mesure fixes du débit de dose ambiante. La fonction de mesurage a toutefois pu être maintenue par des moyens de fortune et des dosimètres mobiles. Cette fonction a ensuite été étendue au cours des opérations de maîtrise de l'accident et les sondes fixes de mesure ont été remises en service.

Au début de l'accident, les débits de dose ambiante ont été fortement influencés par les rejets radioactifs dus aux décompressions des enceintes de confinement et aux explosions d'hydrogène. L'évolution de l'accident a entraîné entre le 11 et le 27 mars 2011 des pointes de débit de dose nettement accentuées. Durant la prise en charge de l'accident, le débit de dose ambiante a amorcé une décroissance continue depuis le 27 mars 2011 et est actuellement dominé par les dépôts radioactifs jonchant le terrain et les structures des bâtiments. Les décombres ou les éléments d'installations présentant des débits de dose élevés, appelés points chauds (ou hot spots), sont très nombreux dans les installations comme sur l'ensemble du site et rendent plus difficiles les conditions de travail des équipes d'intervention.

3.2 Résultats et évolutions des mesures de débit de dose ambiante

En ce qui concerne le site des installations, nous disposons de nombreuses valeurs de mesure de l'exploitant. Sur la figure 3-1, les postes fixes de mesure du débit de dose ambiante sont représentés en bleu. Le fonctionnement de ces sondes a été partiellement entravé par le séisme et le tsunami du fait des dommages subis par l'alimentation électrique, les lignes de transmission des données et les unités de calcul du bâtiment principal. Les sondes ont alors été alimentées pour certaines d'entre elles par des piles, tandis que les données de mesure étaient exploitées à l'aide d'ordinateurs portables.

Le volume des données recueillies s'est sensiblement amélioré par la mise en place de nouvelles sondes de mesure (temporary monitoring posts) lors de la phase post-accidentelle (représentées en rouge). Compte tenu de difficultés liées à l'alimentation électrique, on ne dispose pas de relevés continus pour toutes les sondes.

Lors de la phase initiale de l'accident, les valeurs de débit de dose ambiante mesurées résultaient des rejets inhérents à la décompression des enceintes de confinement primaires et aux explosions de H₂. Les pointes de débit de dose ont ainsi pu être associées à des événements clés de l'évolution de l'accident par alignement sur la chronologie des événements. Ces données sont représentées figure 3-2 qui provient de l'organisme allemand Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH



Fig. 3-1 Localisation des sondes de débit de dose ambiante sur le site des installations de Fukushima Dai-ichi ¹⁴

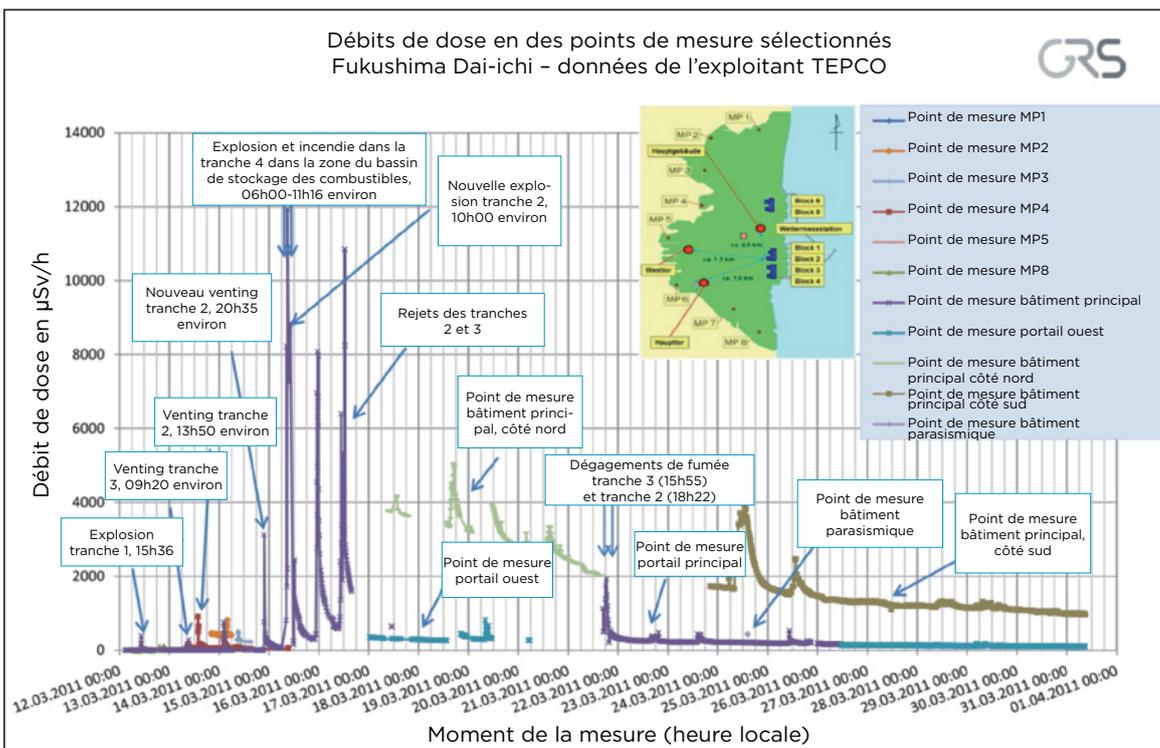


Fig. 3-2 Récapitulatif des valeurs de débit de dose durant la période du 12 au 31 mars 2011 ¹⁵

14 | Source: TEPCO <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/fl/index-e.html>

15 | Source: GRS <http://fukushima.grs.de/kommunikation-medien/japan-statusmeldung-stand-31-03-2011-1400>

De larges secteurs du site ont été parsemés de décombres radioactifs du fait des explosions d'hydrogène. Ceci a conduit à de nombreux points chauds (voir figure 3-4) qui ne sont pas faciles à éliminer. De plus, les retombées de substances radioactives sous l'action des précipitations et d'autres effets ont contribué à l'augmentation des débits de dose sur le site de la centrale. Ces effets sont partiellement atténués par les courtes périodes des nucléides de l'iode. Des engins de terrassement télécommandés sont mis en œuvre pour évacuer la ferraille et les gravats contaminés afin de réduire les débits de dose ambiante. Mais par ailleurs, la mise en place de moyens auxiliaires de maîtri-

se et de réduction des conséquences de l'accident (par ex. stations d'épuration d'eau, conduites souples de pompage des eaux contaminées) est à l'origine de nouvelles sources d'irradiation. S'y ajoutent les rejets permanents en provenance des réacteurs eux-mêmes (voir chapitre 2.2).

Les graphiques ci-après représentent les valeurs de débits de dose ambiante mesurés par TEPCO à l'aide de sondes mobiles (voir /1/). Si le 23 mars 2011 il n'avait été possible que de procéder à des mesures restreintes sur le site, essentiellement à proximité immédiate des tranches de réacteur (voir figure 3-3), il a plus tard été possible, après enlèvement des décombres, d'étendre les mesures à la plupart des zones entourant les tranches (voir figure 3-4).

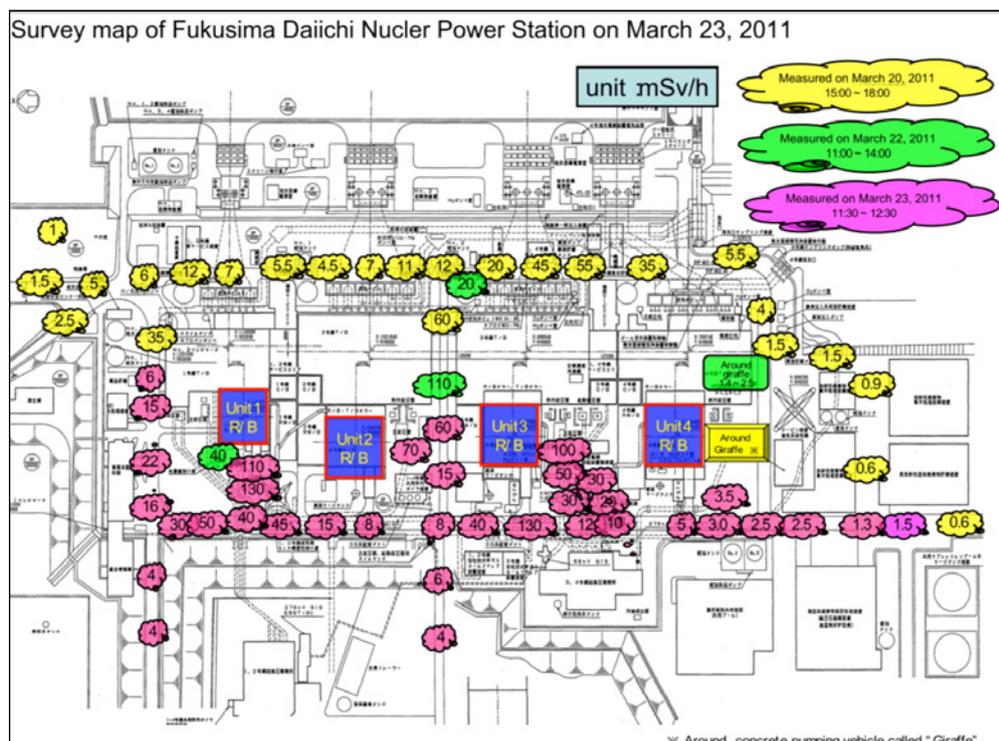


Fig. 3-3 Valeurs de débit de dose ambiante relevées sur le site de Fukushima Dai-ichi le 23 mars 2011 ¹⁶

On y constate une décroissance nette des valeurs de débit de dose ambiante autour des tranches. Mais l'évacuation des décombes a contribué à la découverte continue de points chauds avec des débits de dose ambiante très élevés (U1/2 SGTS >10 000 mSv/h) (voir figure 3-4).

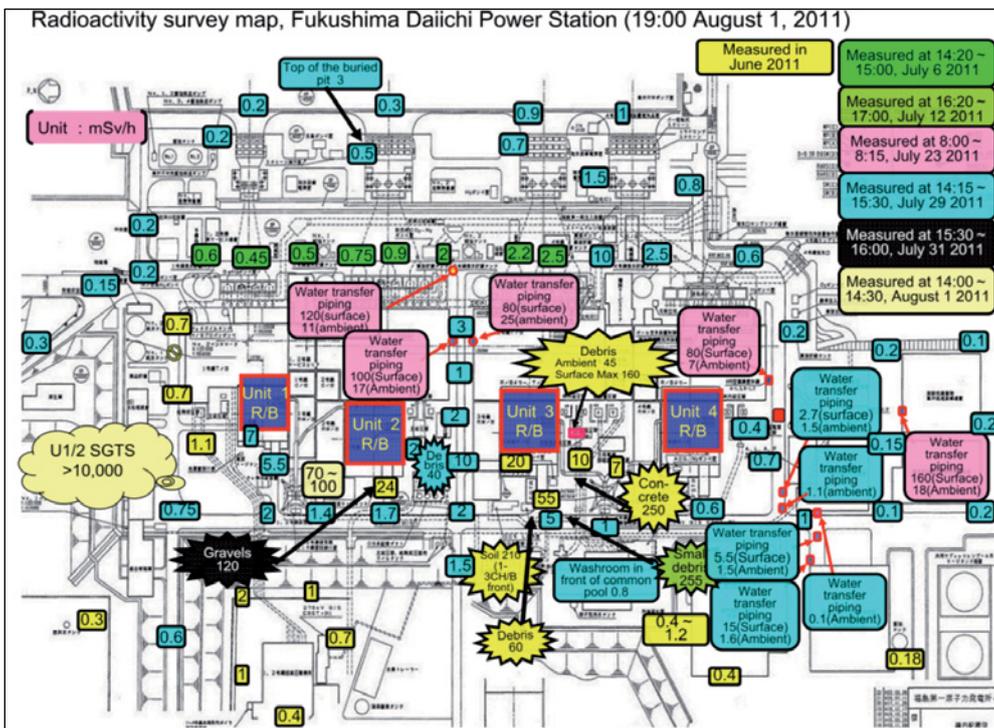


Fig. 3-4 Valeurs de débit de dose ambiante relevées sur le site de Fukushima Dai-ichi le 1er août 2011 ¹⁷

C'est ainsi par exemple que l'on a mesuré le 21 mai 2011 dans un amas de décombres proche de la tranche 1 un débit de dose de 1 000 mSv/h (voir figure 3-5).



Fig. 3-5 Décombres radioactifs à proximité de la tranche ¹⁸

TEPCO a mesuré le 31 juillet 2011, au moyen d'une caméra gamma, des niveaux élevés de rayonnement gamma au pied de la cheminée d'évacuation commune aux tranches 1 et 2 (voir illustration 3-6).

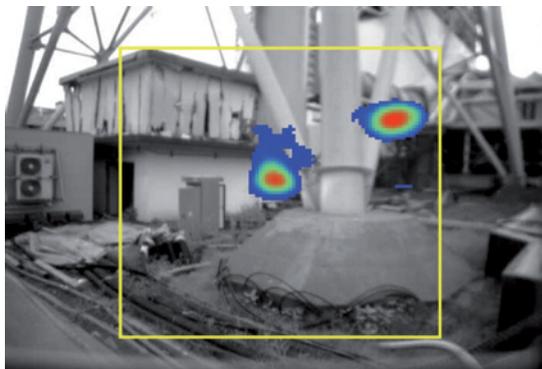


Fig. 3-6 Pied de la cheminée des tranches 1 et 2, vue prise au moyen d'une caméra gamma ¹⁹

L'endroit a fait l'objet de mesures plus précises le 1er août 2011 à l'aide d'un détecteur télescopique (voir illustration 3-7). Selon TEPCO, le débit de dose mesuré en surface à la jonction des conduites avec la cheminée d'évacuation était supérieur à 10 Sv/h (voir /8/). Il s'agit selon l'exploitant de la plus forte valeur de débit de dose mesurée jusqu'à présent en dehors des bâtiments des réacteurs.

Ces conduites relient le système de traitement des effluents gazeux (Standby Gas Treatment System, SGTS), également désigné par système de traitement de secours des effluents gazeux, à la cheminée.



Fig. 3-7 Pied de cheminée entre les tranches 1 et 2, mesure au moyen d'un détecteur télescopique ²⁰

18 | Source: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110521_7.jpg

19 | Source: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/images/110802_2.jpg

20 | Source: TEPCO http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_110803_01-e.pdf

Le 2 août 2011, toujours selon TEPCO, on a mesuré au niveau 2 du bâtiment de liaison avec la salle des turbines (turbine building) de la tranche 1, à proximité de l'entrée du «train room for the emergency gas treatment system» (local de commande du système de traitement de secours des effluents gazeux) un débit de dose local supérieur à 5 000 mSv/h (voir figure 3-8).

Il s'agit là de la plus forte valeur de débit de dose ambiante mesurée à l'intérieur des bâtiments des réacteurs. Elle a été constatée, selon /9/, sur des conduites utilisées le 12 mars 2011 pour la décompression de l'enceinte de confinement de la tranche 1.

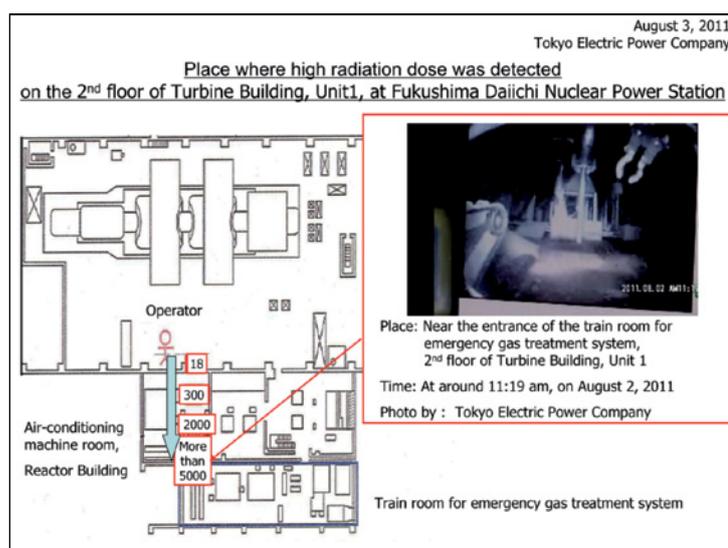


Abb. 3-8 Valeurs de débit de dose ambiante [mSv/h] à l'intérieur du bâtiment de liaison vers la salle des turbines de la tranche 1 ²¹

3.3 Résumé et évaluation

Du fait du dénoyage de la partie supérieure des cœurs de réacteur par manque d'eau et des rejets massifs de substances radioactives hors des réacteurs, une forte augmentation des débits de dose ambiante à l'intérieur des tranches de réacteur et sur le site de la centrale nucléaire a eu lieu. Tout particulièrement dans la phase initiale de l'accident, le personnel a été confronté à des débits de dose tels que le travail au sein des installations selon les règles de la radioprotection était devenu impossible. Compte tenu des débits de dose élevés mesurés, le personnel s'est vu contraint à plusieurs reprises de quitter certaines zones de l'installation et même momentanément la tranche dans son intégralité.

Les décompressions des enceintes de confinement primaires et les explosions d'hydrogène ont disséminé des substances et des décombres radioactifs sur de vastes

surfaces du site. Des débits de dose atteignant dans certains cas plusieurs Sv/h ont constitué un obstacle majeur à la maîtrise de l'accident et ont obligé la mise en place de zones d'interdiction. Encore aujourd'hui, les débits de dose pénalisent toujours fortement les travaux de déblaiement. A de nombreux endroits, les décombres ne peuvent toujours être enlevés qu'au moyen d'engins de terrassement téléguidés.

Depuis la fin mars 2011, les débits de dose relevés sur le site connaissent une décroissance continue. Ceci est dû à la désintégration radioactive essentiellement d'isotopes de courte période, à la diminution des rejets de substances radioactives hors des réacteurs ainsi qu'au déblaiement progressif des décombres.

4 Exposition aux radiations et conditions de travail du personnel

4.1 Vue d'ensemble

Ce chapitre présente l'exposition radiologique subie par le personnel de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi depuis l'accident du 11 mars 2011 jusqu'au début septembre 2011. Les données mentionnées ici sont également accessibles au public sur Internet.

Le séisme et les vagues du tsunami (submersion) n'ont pas seulement détruit la structure des bâtiments et des installations techniques de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi, mais également une part importante de l'infrastructure du système dosimétrique. Immédiatement après le tsunami, l'exploitant et son personnel ne disposaient plus d'un nombre suffisant de dosimètres en état de fonctionnement. Ceci explique pourquoi jusqu'à la mi-avril environ, il n'a pas été possible d'assurer une dosimétrie automatique du personnel avec des dosimètres personnels actifs (APD), comme il était d'usage avant le séisme. Il a donc fallu avoir recours à des méthodes alternatives telles que par ex. le calcul des doses individuelles par estimation du temps de séjour et du débit de dose ambiante sur le lieu de l'engagement. Pour chaque groupe d'intervention, seul le chef a pu être équipé d'un dosimètre électronique. La dose mesurée par ce dosimètre a été admise comme dose individuelle pour chaque membre du groupe. Les doses cumulées ont été lues après chaque intervention et reportées manuellement dans des tableaux Excel.

La détermination de l'exposition interne à l'aide de compteurs du corps entier s'est heurtée à des difficultés du fait du niveau de radiation accru sur le site de Fukushima Dai-ichi. Le nombre de personnes à examiner était très important et le nombre de compteurs du corps entier était insuffisant.

Pour les raisons indiquées, il subsiste donc une incertitude concernant les doses réellement accumulées. Les informations sur les doses individuelles associées aux irradiations interne et externe sont certes disponibles en grand nombre sur Internet, mais elles ne sont pas toujours interprétables. Des données fiables sur les doses collectives semblent manquer.

En partant des valeurs limites de dose fixées au Japon, le développement ci-après procède à la comparaison entre la dosimétrie individuelle avant l'accident et celle utilisée lors de la maîtrise de l'accident, avec un rappel des équipements de protection disponibles et des conditions de travail extraordinaires. L'exposition radiologique des personnes actives dans l'installation pendant et après l'accident, ainsi que les dépassements de valeurs limites de dose, constituent l'élément central du présent chapitre. Des informations sur les mesures de réduction des doses lors d'interventions sur l'installation le complètent.

4.2 Limites des doses applicables au personnel exposé aux rayonnements ionisants au Japon

En situation normale, la valeur limite de dose fixée par la loi japonaise pour le personnel soumis à des rayonnements ionisants dans le cadre de sa profession est de 50 mSv par an. De plus, le cumul ne doit pas excéder 100 mSv sur une période de cinq ans. Pour les femmes, la valeur limite est fixée à 5 mSv sur une période de 3 mois (voir /39/).

Pour le personnel d'intervention en cas d'urgence, la dose effective est limitée à 100 mSv par an. La valeur limite de la dose équivalente est fixée à 300 mSv/an pour le cristallin et à 1 Sv/an pour la peau.

Les valeurs limites citées ci-dessus se réfèrent aux recommandations de la CIPR de 1990, Pub. 60 (voir /35/) et ont été fixées par le Radiation Review Council du Ministère japonais de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT).

En cas d'accident nucléaire, il est possible de fixer des valeurs limites de dose supérieures, si cela se révèle indispensable pour la maîtrise des défaillances. Dans les zones nécessitant des mesures destinées à lutter contre un accident nucléaire, la dose effective annuelle peut être relevée de 100 mSv à 250 mSv à

partir de la déclaration de l'état d'urgence jusqu'à sa levée. L'état d'urgence a été déclaré le 14 mars 2011 et l'augmentation a été fixée le lendemain par le Ministère japonais de la Santé, du Travail et de l'Assistance publique (MHLW) (voir /36/). L'augmentation de la valeur limite à 250 mSv a été justifiée par l'application de la recommandation de la CIPR de 1990 (voir /35/). Celle-ci fixe une valeur limite proche de 500 mSv pour les personnes participant volontairement à des interventions d'urgence lorsqu'il s'agit d'éviter une aggravation des conséquences.

Le président du MHLW et le ministre de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT) ont d'abord discuté de l'adaptation de la valeur limite de dose avec le Radiation Review Council du MEXT et ont obtenu en retour l'avis qu'une augmentation correspondante était justifiée.

Le MHLW a publié des documents supplémentaires pour la réglementation de l'exposition aux rayonnements ionisants du personnel qui a d'abord été engagé dans des interventions d'urgence et qui a ensuite effectué d'autres travaux impliquant une exposition aux radiations.

4.3 Surveillance dosimétrique du personnel des installations nucléaires

4.3.1 État avant les événements du 11 mars 2011

Avant l'accident, TEPCO avait appliqué des mesures de radioprotection destinées à réduire l'exposition aux rayonnements ionisants du personnel. La centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi disposait d'un système dosimétrique destiné à la mesure de l'exposition dans le cadre de l'activité en zone contrôlée qui garantissait l'équipement de chaque personne avec un dosimètre électronique (Active Personal Dosimeter, APD). Ce système assure l'attribution personnelle automatique des doses individuelles reçues ainsi que leur exploitation assistée par programmes informatiques.

De plus, la dose reçue par chaque personne est enregistrée lors de l'entrée puis de la sortie de la zone contrôlée. Les doses sont également enregistrées automatiquement lors du revêtement de la combinaison de protection et de la lecture de l'APD immédiatement avant l'accès à une zone contrôlée.

TEPCO a également effectué des mesures régulières de surveillance des incorporations par le personnel à l'aide de compteurs du corps entier. Ces mesures sont effectuées lors du premier accès en zone contrôlée, puis régulièrement tous les trois mois.

4.3.2 Modifications de la surveillance dosimétrique du fait de l'accident

4.3.2.1 Mesures prises à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi

Lorsque les vagues du tsunami ont atteint les bâtiments de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi tournés vers la mer et dans lesquels se situaient les accès aux zones contrôlées, le système de contrôle dosimétrique, les stations de lecture et bon nombre d'APD ont été submergés et donc rendus inutilisables. Selon un communiqué de l'agence de presse Kyodo du 1er avril 2011, le personnel de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi disposait avant l'accident du 11 mars 2011 de 5'000 dosimètres. Après le passage du tsunami, seuls quelque 320 appareils étaient encore en état de fonctionner.

Immédiatement après l'accident, il n'a donc plus été possible de doter chaque personne de son propre APD. TEPCO a donc décidé que seuls les chefs des groupes d'intervention porteraient un dosimètre. La dose de rayonnement mesurée par ce dosimètre a été prise en compte comme dose individuelle pour chaque membre du groupe. Après que TEPCO s'est vu imposer par la NISA d'entreprendre tous les efforts possibles pour permettre un relevé et une surveillance individuels des doses, TEPCO a, à partir du 01 avril 2011, approvisionné suffisamment de dosimètres pour équiper chaque personne.

Compte tenu de l'augmentation du niveau de rayonnement et de la contamination sur le site de la centrale nucléaire, il a été exigé qu'en dehors des interventions le personnel se réfugie dans un bâtiment résistant aux secousses sismiques («bâtiment parasismique principal») situé sur le site. C'est dans ce bâtiment qu'auraient également dû être préparées les interventions, la distribution des APD et l'enregistrement des doses cumulées.

Au début, la dosimétrie du personnel et l'enregistrement des doses reçues ont dû être effectués à la main. Les résultats des mesures devaient être saisis manuellement dans des tableaux Excel afin de pouvoir ensuite les enregistrer dans une banque de données.

Dans le bâtiment parasismique principal, le personnel ne portait pas son APD. L'irradiation externe aux rayonnements ionisants y était donc déterminée par la durée du séjour et le débit de dose ambiante. On n'y portait pas non plus d'équipements de protection appropriés tels que masques de protection, bien que la contamination de l'air dans ce bâtiment ait dépassé les valeurs limites (voir /37/). Ces circonstances ont entraîné des incorporations et le dépassement de la dose limite de trois mois pour deux travailleuses.

Un nouveau système de dosimétrie quasi identique au système endommagé (avec enregistrement automatique de l'identité des personnes et des doses reçues) a pu être mis en service le 14 avril 2011. Les travaux de rétablissement de la surveillance dosimétrique légale étaient ainsi pratiquement achevés.

Les compteurs du corps entier de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ne pouvaient pas être utilisés du fait de l'important bruit de fond radiologique, ce qui a imposé la mise à disposition de compteurs mobiles. De plus, le personnel ayant participé aux interventions a été transféré sur d'autres sites pour procéder aux examens de radioprotection et aux mesures d'incorporation. Compte tenu du grand nombre de personnes à surveiller, TEPCO a décidé que les personnes ayant subi des irradiations externes importantes ainsi que les personnes qui ont participé à des interventions d'urgence en mars devaient être examinées en priorité.

Plus tard, le gouvernement japonais a exigé, dans la «Lesson Learned» n° 12 (voir /11/), des mesures destinées à améliorer le système de radioprotection en cas d'accident. Le document recommande entre autres une collaboration entre exploitants, selon les instructions de la NISA, visant à assurer une dosimétrie personnelle continue même en cas d'accident. Des règles définissant pour le personnel de radioprotection les tâches à accomplir pour la maîtrise d'un cas d'urgence y sont aussi fixées. Ces mesures doivent assurer la continuité de la radioprotection dans les cas d'urgence. Pour que cet objectif puisse être atteint, il y est également exigé un entraînement du personnel à l'exécution des tâches de radioprotection dans les cas d'urgence.

4.3.2.2 Mesures prises au «Village J

A partir du 17 mars 2011, la préparation des interventions dans la centrale nucléaire a également été assurée dans le «Village J», une installation sportive de TEPCO située à 20 km environ au sud du site nucléaire de Fukushima Dai-ichi. C'est ici notamment que l'on revêtait les combinaisons de protection et que l'on effectuait les tests de décontamination.

Pour les personnes professionnellement exposées aux radiations de la centrale de Fukushima Dai-ichi qui ne pouvaient pénétrer dans la citadelle parasismique pour y retirer leur APD, un système dosimétrique a été installé au « Village J ». Les dosimètres utilisés au «Village J» étaient de divers types ; ils avaient été mis à disposition en urgence par différents organismes. Lors des retours quotidiens au «Village J», les doses reçues devaient être relevées et enregistrées à la main. Dès le début de juin 2011, TEPCO a utilisé un système de code-barres pour l'identification individuelle.

En août 2011, TEPCO a transféré les compteurs du corps entier de Fukushima Dai-ichi et de Fukushima Dai-ni au «Village J». Un nouveau compteur de ce type a également été fourni pour le «Village J».

4.3.2.3 Équipements de radioprotection et planification du travail

Il a été difficile d'empêcher l'intrusion de substances radioactives dans le bâtiment parasismique principal, car la porte d'entrée n'était pas étanche à l'air et avait été endommagée par les explosions d'hydrogène survenues dans les tranches 1 et 3. Il ne disposait de plus d'aucune protection particulière

pouvant atténuer les effets d'un accident nucléaire. Les personnes qui ont séjourné dans ce bâtiment ont donc incorporé des substances radioactives. Pour contrer ces difficultés, un système de ventilation séparé avec filtres à charbon actif a été installé à l'entrée pour réduire la radioactivité de l'air dans le bâtiment. TEPCO n'a pas jugé utile de prévoir d'autres mesures.

Des planifications du travail, comportant des mesures de radioprotection particulières, ont été préparées pour les interventions dans les secteurs présentant des hauts débits de dose. De même, le personnel a été informé de la situation radiologique.

4.4 État des expositions aux rayonnements ionisants

Les interventions sur le lieu de l'accident et dans son environnement proche ont été et restent associées à une exposition notable de tous les intervenants. Cette exposition présente une composante externe et une composante interne. Outre le personnel propre à la centrale nucléaire, on a fait appel à des entreprises extérieures et à des membres d'organisations de secours (armée, police, pompiers, etc.).

4.4.1 Unités de l'armée et de la police

Les forces d'intervention (forces d'autodéfense du Japon) qui ont travaillé dans la zone des 30 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ont estimé leur irradiation avant intervention à partir des valeurs de débit de dose ambiante et de la durée d'intervention prévue. Les équipements de protection ont alors été choisis

en conséquence. Les forces d'intervention ont également utilisé des dosimètres pour l'enregistrement des expositions. Comme pour le personnel exposé professionnellement aux radiations, la valeur limite de dose pour ces intervenants est fixée à 50 mSv/an.

Lorsqu'une dose individuelle de 30 mSv est atteinte lors d'une intervention, celle-ci est immédiatement interrompue afin de se ménager une marge pour le retour depuis le lieu d'intervention. Pour les intervenants de sexe féminin, l'intervention est suspendue à partir de 3 mSv (la valeur limite applicable au personnel féminin est de 5 mSv par trimestre). Pour les cas d'urgence et pour les interventions destinées au sauvetage de vies humaines, la dose individuelle maximale a aussi été fixée à 250 mSv. Les femmes sont exclues de telles interventions. D'après les informations actuellement disponibles (voir /1/), aucun intervenant n'a dépassé les limites de doses citées plus haut.

A la date du 22 mars 2011, 19 703 hommes de troupe de la marine et de l'armée de l'air américaines ont été engagés au Japon dans le cadre de l'opération Tomodachi d'aide humanitaire et de lutte contre les catastrophes (voir /38/). On ne dispose actuellement d'aucune donnée précise sur les effectifs des forces armées américaines engagés à Dai-ichi, sur les contaminations du personnel, sur les contaminations de surface mesurées dans les installations et sur les doses cumulées des personnes concernées.

4.4.2 Service du feu

Pour les membres du service du feu, les doses individuelles maximales sont définies dans le manuel opérationnel du service du feu (Operation Measure Manual of the Fire and Disaster Management Agency). Ce manuel fixe à 100 mSv la valeur limite pour les

interventions de sauvetage de vies humaines avec des valeurs limites d'alarme à 30 et à 50 mSv. Le cumul ne doit pas excéder 100 mSv sur une période de cinq ans, avec une dose annuelle maximale de 50 mSv.

Pour toute intervention dans le périmètre des 20 km autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi, les limites de dose spécifiques à l'intervention sont déterminées au cas par cas par le poste de commandement du service du feu en tenant compte des indications ci-dessus et de la nécessité de réduire les doses d'exposition.

4.4.3 Personnel de la centrale et travailleurs externes

Jusqu'au 23 mai 2011, près de 7 800 personnes ont participé aux travaux d'urgence dans la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi. La dose individuelle moyenne due à l'irradiation externe a été jusqu'à cette date de l'ordre de 7,7 mSv. 30 personnes ont reçu des doses individuelles de plus de 100 mSv (voir figure 4-1).

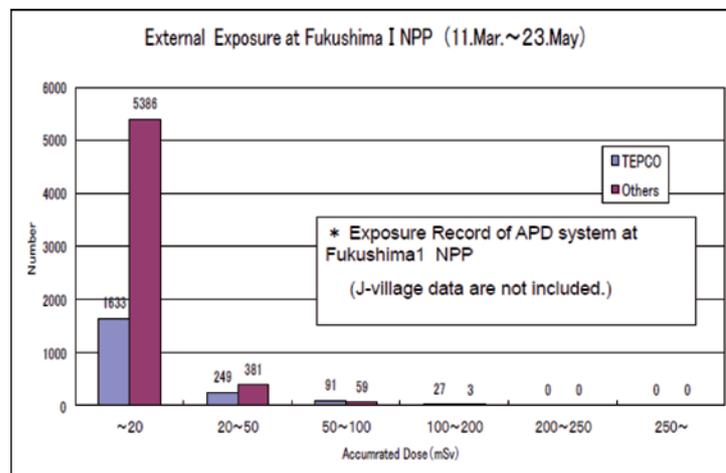


Fig. 4-1 Répartition des doses accumulées du 11 mars jusqu'au 23 mai 2011 environ ²²

Si l'on prend en compte les irradiations externes et internes, 3 715 personnes ont reçu en moyenne une dose individuelle de 22,4 mSv selon un rapport du gouvernement japonais /1/. En avril 2011, 3 463 personnes ont reçu en moyenne une dose individuelle de 3,9 mSv; en mai 2011, 2 721 personnes ont reçu en moyenne une dose individuelle de 3,1 mSv (voir figure 4-2).

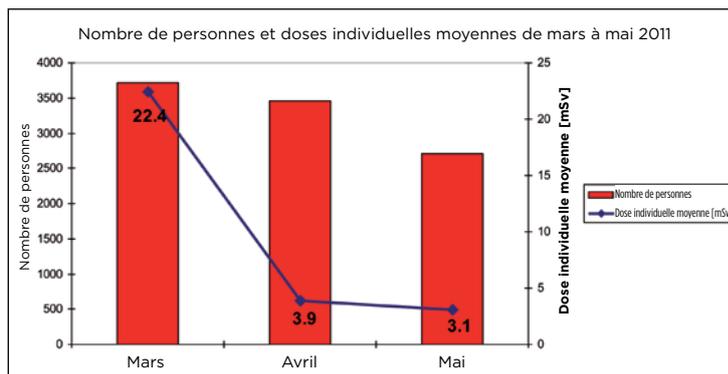


Fig. 4-2 Nombre de personnes et doses individuelles moyennes, mars à mai 2011

Selon le rapport complémentaire du gouvernement japonais /11/, environ 9 900 personnes actives à un titre ou à un autre sur le site de Fukushima Dai-ichi ont fait l'objet d'un examen de l'exposition externe et interne. 103 personnes (84 membres du personnel TEPCO et 19 personnes extérieures) ont reçu des doses individuelles supérieures à 100 mSv. Si l'on additionne les irradiations externes de la période de mars à juillet 2011 aux irradiations internes pour la période de mars à mai 2011, il en résulte une dose moyenne reçue de 10,4 mSv. La dose individuelle maximale est d'environ 672 mSv.

Selon les indications du JAIF (voir /42/), les valeurs de dose du 10 août 2011 ont été actualisées par TEPCO. C'est ainsi qu'au 30 septembre 2011, sur près de 14 800 personnes examinées jusqu'à cette date, 99 avaient reçu une dose individuelle supérieure à 100 mSv (100-150 mSv: 77 personnes (état au 10.08.2011: 81); 150-200 mSv: 14 personnes; 200-250 mSv: 2 personnes; >250 mSv: 6 personnes). Les différences observées (réduction de 103 à 99 personnes avec une dose supérieure à 100 mSv) sont plausibles compte tenu de la précision de la dosimétrie individuelle.

4.4.4 Dépassements des valeurs limites de dose et causes possibles

Des employés de TEPCO ont reçu des doses dépassant la valeur limite de 250 mSv. Au moment des explosions d'hydrogène sur les tranches 1 et 3, ils réalisaient principalement des travaux dans les salles de commande principales. Comme les portes d'accès avaient été endommagées, de l'air contaminé a pu s'infiltrer dans les salles de commande et conduire à des incorporations car les équipes travaillaient en partie sans masque.

Les incorporations subies par six personnes (trois opérateurs et trois membres des équipes de maintenance) ont pu être favorisées dans une large mesure par les facteurs suivants:

- L'accident s'est produit de manière inattendue et soudaine, ce qui a laissé peu de temps pour prendre les mesures de radioprotection nécessaires.
- Les personnes présentes en salle de commande ont retiré leur masque occasionnellement pour boire et se restaurer.
- Chez deux porteurs de lunettes, il se peut que les masques n'aient pas été portés de manière totalement étanche.
- Deux personnes ont «relevé» leur masque un bref instant afin de pouvoir mieux travailler.
- Quatre personnes ont travaillé près de la porte d'accès d'urgence de la salle de commande, endroit où la radioactivité de l'air était très élevée.

Le 24 mars 2011, deux personnes ont été fortement contaminées aux pieds en posant des câbles dans la salle des turbines de la tranche 3 alors inondée par de l'eau contaminée. Ils portaient lors de ces travaux des chaussures de faible hauteur, ce qui explique pourquoi la peau des pieds a été contaminée par l'eau. Ceci a conduit à un risque de «brûlures bêta». TEPCO a immédiatement pris des mesures de décontamination, puis a envoyé les personnes concernées au Fukushima Medical University Hospital où étaient également assurés des contrôles de la NISA. Lors d'un nouvel examen médical effectué le 11 avril 2011, aucun effet aigu sur leur santé n'a été constaté. L'irradiation résultante des pieds des personnes concernées a atteint 2 à 3 Sv en dose équivalente à la peau.

Après évaluation des doses reçues, TEPCO a confirmé le 27 avril 2011 qu'une personne de sexe féminin avait reçu une dose de plus de 5 mSv (valeur limite pour le personnel féminin professionnellement exposé aux rayonnements ionisants afin de protéger l'enfant en gestation) sur une période de trois mois (janvier - mars).

Le 22 avril 2011, l'exposition d'une personne de sexe féminin à une dose effective de 17,6 mSv a été confirmée. Cette valeur comprenait une irradiation interne de 13,6 mSv provoquée par l'inhalation de poussières contaminées lors de l'enlèvement de la combinaison de protection. Le 1er mai 2011, une dose effective de 7,5 mSv a été constaté sur une deuxième personne de sexe féminin. Des examens médicaux effectués sur ces deux femmes ont montré qu'il n'y avait pas de risque sanitaire dans le cas d'une grossesse insoupçonnée (voir /41/).

4.4.5 Expositions exceptionnelles aux rayonnements ionisants

Dans le bâtiment de réacteur de la tranche 1 de Fukushima Dai-ichi, des débits de dose atteignant 700 mSv/h ont été mesurés à des endroits nécessitant des réparations. Dans un tel environnement, le personnel ne peut travailler que 20 minutes environ. Le personnel qui a mesuré ces débits de dose a cumulé en près de 30 minutes une dose individuelle atteignant jusqu'à 11 mSv.

Après l'explosion du 15 mars 2011, le personnel a pénétré pour la première fois dans le bâtiment de la tranche 2 le 18 mai 2011. Quatre personnes avec combinaison de protection et équipement respiratoire (bouteilles d'air comprimé) s'étaient vu fixer pour mission d'analyser la situation radiologique et de recueillir d'autres données d'importance. Lors de cette intervention, elles ont cumulé des doses comprises entre 3 et 4 mSv par personne.

Après l'explosion du 14 mars 2011, le personnel a pénétré pour la première fois dans le bâtiment de la tranche 3 le 19 mai 2011. Deux personnes avec combinaison de protection et équipement respiratoire (bouteilles d'air comprimé) y ont séjourné pendant 10 minutes environ pour effectuer des mesures radiologiques. Les débits de dose ambiante relevés ont atteint les 170 mSv/h. Lors de ces mesures, les deux personnes ont reçu des doses individuelles comprises entre 2 et 3 mSv.

Chez deux personnes ayant travaillé dans les salles de commande des tranches 3 et 4, mais également en d'autres endroits, une activité respective de 9 760 Bq et de 7 699 Bq d'I-131 dans la glande thyroïde a été mesurée. Ces valeurs sont dix fois supérieures à celles relevées sur d'autres personnes qui sont intervenues au cours de l'accident.

Ces deux personnes ont par ailleurs reçu des doses effectives externes respectives de 74 et de 89 mSv. Il convient donc de considérer que les irradiations tant externes qu'internes ont dépassé les 250 mSv par personne. Les deux personnes concernées n'ont pas eu jusqu'à présent de problème de santé. On ne dispose pas de résultats d'une dosimétrie biologique (examens sanguins avec recherche d'aberrations chromosomiques).

Lors de travaux à l'extérieur sur le site de la centrale nucléaire, une personne a oublié, pendant deux heures, de fixer le filtre à charbon actif sur son masque intégral. L'irradiation d'origine externe a été de 0,5 mSv. TEPCO analyse si des mesures de sécurité insuffisantes sont à l'origine de cette exposition.

TEPCO n'est pas en mesure d'indiquer le lieu de résidence actuel de 198 personnes ayant travaillé à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi depuis l'accident du 11 mars 2011. Le MHLW a exigé de TEPCO que ces personnes soient retrouvées et qu'elles soient soumises à un examen de l'exposition aux radiations. Dans un rapport, TEPCO a mentionné que ces personnes n'avaient pas pu être retrouvées, mais a confirmé qu'ils figuraient bien sur la liste nominative des effectifs en fonction pendant les mois de mars et d'avril 2011.

TEPCO signale que deux personnes ont été accidentellement aspergées d'eau fortement contaminée issue du système d'épuration mis en œuvre pour la décontamination des importants volumes d'eau accumulés dans les bâtiments de réacteur. Une personne a reçu une dose de 0,2 mSv et a été décontaminée. La deuxième personne qui portait un ciré au moment de l'incident a reçu 0,1 mSv. TEPCO précise que ces deux personnes n'ont incorporé aucune substance radioactive lors de cet incident.

4.5 Mesures prises pour la réduction des doses

4.5.1 Mesures prises pour le contrôle et la réduction des doses

Les autorités de surveillance MHLW et NISA ont émis dans leur domaine respectif plusieurs instructions et exigences à l'adresse de TEPCO avec pour objectif l'amélioration de la radioprotection des personnels exposés sur le site de la centrale nucléaire. C'est ainsi que le 6 juin 2011 les mesures suivantes ont été ordonnées pour éviter le dépassement des doses limites lors des interventions de maîtrise de l'accident:

- Lorsque, lors de la mesure du corps entier, la dose interne d'une personne dépasse 100 mSv, ses collègues de travail se voient interdite toute autre activité sur le site avant que soient connus les résultats des mesures les concernant.
- Toute personne dont la dose effective dépasse 170 mSv ne peut plus travailler que dans le bâtiment parasismique principal (Main Anti-Earthquake Building).

Il a de plus été constaté que quelques personnes n'avaient pas été régulièrement déclarées comme exposées aux rayonnements ionisants du fait de leur activité professionnelle. La NISA a mis TEPCO en garde contre cette anomalie et a exigé un contrôle de la procédure de surveillance de la radioprotection dans la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi. La société exploitante a donc dû prendre des mesures correctives appropriées sur la base de ces résultats afin d'exclure la répétition d'une telle erreur.

La NISA a requis un rapport à ce sujet. Après examen de ce rapport, la NISA a adressé le 25 mai 2011 les instructions suivantes à TEPCO :

- Obligation de rapporter périodiquement sur la procédure de surveillance des doses internes et externes du personnel intervenant sur le site et exécution d'examens médicaux temporaires réguliers, comme stipulé en /40/;
- Obligation d'annoncer à l'avance au «Labor Standards Inspection Office» toute intervention d'urgence particulière, afin de permettre le contrôle de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants;
- Obligation de créer une banque de données sécurisée permettant le suivi sur le long terme des doses d'irradiation reçues par le personnel ayant participé aux travaux d'urgence. Ce suivi doit également être possible si les personnes ayant participé aux interventions d'urgence changent par la suite d'activité professionnelle. L'état de santé de ces personnes doit également pouvoir être suivi à long terme.

Dans les deux centrales nucléaires de Fukushima Dai-ichi et Dai-ni, les doses reçues du fait des activités de maîtrise de la situation d'urgence ont été ajoutées à celles reçues dans le cadre de l'activité normale. La valeur limite de dose a été relevée à 250 mSv (voir chapitre 4.2). Ceci s'applique également au personnel qui n'était pas enregistré et employé auparavant dans les centrales nucléaires, mais qui effectuent à présent des interventions d'urgence.

Comme le personnel du bâtiment parasismique principal comprenait des personnes classées comme non exposées professionnellement aux rayonnements ionisants, il a été nécessaire de mettre au point a posteriori une procédure qui permet le classement de ces personnes comme exposées professionnellement. Les personnes à reclasser ainsi ont été inscrites sur des listes. Au fur et à mesure de l'application de la procédure, ces personnes ont été identifiées et enregistrées officiellement pour faire l'objet d'une surveillance continue de leur irradiation interne et externe. Les contrôles par compteur du corps entier sont également prévus ultérieurement, même si ces personnes n'exercent ensuite plus aucune activité les exposant professionnellement à des rayonnements ionisants.

Parmi les personnes actives dans le bâtiment parasismique principal, il y avait quatre employés de sexe féminin non classés comme exposés professionnellement à des rayonnements ionisants. Deux de ces femmes ont reçu une dose équivalente de l'ordre de 3,4 mSv. Or la valeur limite de dose reçue est fixée à 1 mSv/an au Japon pour les personnes non exposées professionnellement à des rayonnements ionisants. L'IFSN suppose donc que ces personnes ont été ultérieurement classées comme «exposées professionnellement aux rayonnements ionisants». Avec ce classement il n'y aurait plus à l'avenir aucun dépassement des valeurs limites.

Le personnel est informé mois après mois sur son exposition personnelle aux radiations. Dès qu'une valeur directrice (voir ci-après) est dépassée, il convient de prendre les mesures suivantes:

- dépassement des 100 mSv par irradiation externe > mesure corps entier pour s'assurer de l'absence d'incorporations;

- dépassement des 150 mSv par irradiation externe > contrôle des tâches désormais confiées;
- dépassement des 200 mSv par irradiation externe et interne > interdiction de toute activité dans le champ de rayonnements ionisants.

TEPCO a procédé au cours des derniers mois aux améliorations suivantes:

- système de dosimétrie: nouvelle organisation et renforcement des effectifs de contrôle dosimétrique;
- système d'identification individuel à code-barres;
- mesures d'irradiation corps entier : plus grand nombre de compteurs du corps entier et meilleure accessibilité de ces systèmes ;
- recours à des robots dans les zones présentant des débits de dose élevés;
- formation et entraînement du personnel de radioprotection : prévision de formation de 4 000 personnes.

Le système de ventilation des salles de commande principales a été équipé de filtres à charbon actif. De plus des zones spéciales destinées au contrôle de la contamination du matériel ont été définies. Du fait du dépassement de la valeur limite de dose chez deux employés de sexe féminin (voir plus haut), il est interdit depuis le 23 mars 2011 et jusqu'à nouvel ordre d'employer des femmes à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi.

Des dortoirs provisoires ont été installés pour 1 600 personnes environ. Ces dortoirs sont utilisés par le personnel depuis la fin

juin. Durant la période d'avril à juin 2011 plusieurs locaux d'attente et de repos disposant de l'air conditionné ont été installés.

En juillet et en août 2011, le travail a cessé entre 14h00 et 17h00 en raison de la canicule. Des médecins sont à disposition du personnel 24 heures sur 24.

4.5.2 Mesures prises dans le bâtiment parasismique principal

Le rejet de substances radioactives a provoqué l'augmentation du débit de dose ambiante sur les sites des centrales nucléaires de Fukushima Dai-ichi et Dai-ni. Compte tenu des débits de dose ambiante relevés sur le site de Fukushima Dai-ichi, l'ensemble de la zone d'exploitation de la centrale a été classé zone contrôlée. Dans la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi, le personnel ne peut travailler que protégé de la contamination par des combinaisons en tyvek (papier synthétique) et par le port de gants. Ceci a également pour but d'éviter l'introduction de substances radioactives dans le bâtiment parasismique principal (Main Anti-Earthquake Building). Les masques respiratoires doivent être portés dès que la radioactivité de l'air dépasse les seuils d'alerte. D'autres équipements de protection doivent être portés en fonction des conditions météorologiques et du niveau de contamination.

Au début des événements, le bâtiment parasismique principal était considéré comme zone non contaminée. C'est pourquoi aucune mesure de radioactivité n'a été effectuée à l'intérieur du bâtiment avant le 24 mars 2011. Le 3 avril 2011, les niveaux de contamination de l'air ont dépassé la valeur limite légale ($1E+3$ Bq/m³, valeur moyenne sur trois mois), ce qui fait que le bâtiment ne pouvait plus être considéré comme situé hors de

la zone contrôlée. Depuis, les contrôles de radioprotection et le port de l'équipement de protection y sont imposés. Des systèmes d'extraction de l'air rejeté ont été installés dans le bâtiment parasismique principal, dans les installations sanitaires ainsi que dans les salles de repos. Des interventions de nettoyage sont assurées en continu. Les conditions régnant dans le bâtiment parasismique principal sont constamment améliorées par l'application d'autres mesures:

- installation de filtres à charbon actif;
- installation d'écrans de protection au plomb;
- mise en place d'une zone tampon temporaire pour éviter l'introduction de contaminations (sas d'entrée);
- dépose des moquettes difficilement décontaminables;
- pose de revêtements de sol et muraux aisément décontaminables.

Les travaux sont planifiés sur la base d'analyses préalables précises (par ex. de la situation radiologique). Le personnel est informé en permanence sur les questions de sécurité. L'exposition aux rayonnements ionisants est maintenue à un niveau aussi faible que possible par interdiction de l'accès à des zones présentant des débits de dose élevés. Le personnel reçoit une formation complémentaire en matière de radioprotection. Les valeurs de débits de dose ambiante sur le site et dans le bâtiment parasismique principal ont chuté depuis l'accident à environ dix pour cent des valeurs maximales atteintes. Pour le personnel, aucune atteinte à la santé due à l'incorporation de substances radioactives n'a jusqu'à présent été observée.

4.6 Résumé et évaluation

Les rapports publiés par les autorités gouvernementales et l'exploitant ont établi que la dosimétrie individuelle n'a pas fonctionné dans des conditions satisfaisantes au cours des premières heures et des premiers jours de l'accident. Il manquait en effet plus des deux tiers des dosimètres personnels nécessaires. Les déficits ont été particulièrement évidents en matière de dosimétrie des incorporations. On remarquera tout particulièrement que le triage (contamination des mains, des pieds et des vêtements) ainsi que les compteurs du corps entier n'ont pu fournir aucune mesure fiable du fait du niveau élevé du bruit de fond radiologique. Compte tenu de la gravité de l'accident, l'exposition du personnel de TEPCO et des entreprises extérieures peut cependant être considérée comme modérée. Aucun décès imputable à une irradiation massive ni aucun syndrome radiologique n'est à déplorer à ce jour. Il serait intéressant dans ce contexte de disposer dans un avenir proche des résultats de la dosimétrie biologique (examens sanguins avec recherche d'abberations chromosomiques) des personnes qui ont reçu une dose équivalente de plus de 100 mSv. Après que la valeur limite de dose a été fixée à 250 mSv du fait de l'accident, ce qui est courant dans le monde entier et en Suisse également, un dépassement de la limite de dose a été indentifié chez six personnes. Ce bilan ne tient pas non plus compte des deux femmes pour lesquelles la valeur limite trimestrielle de 5 mSv a été dépassée.

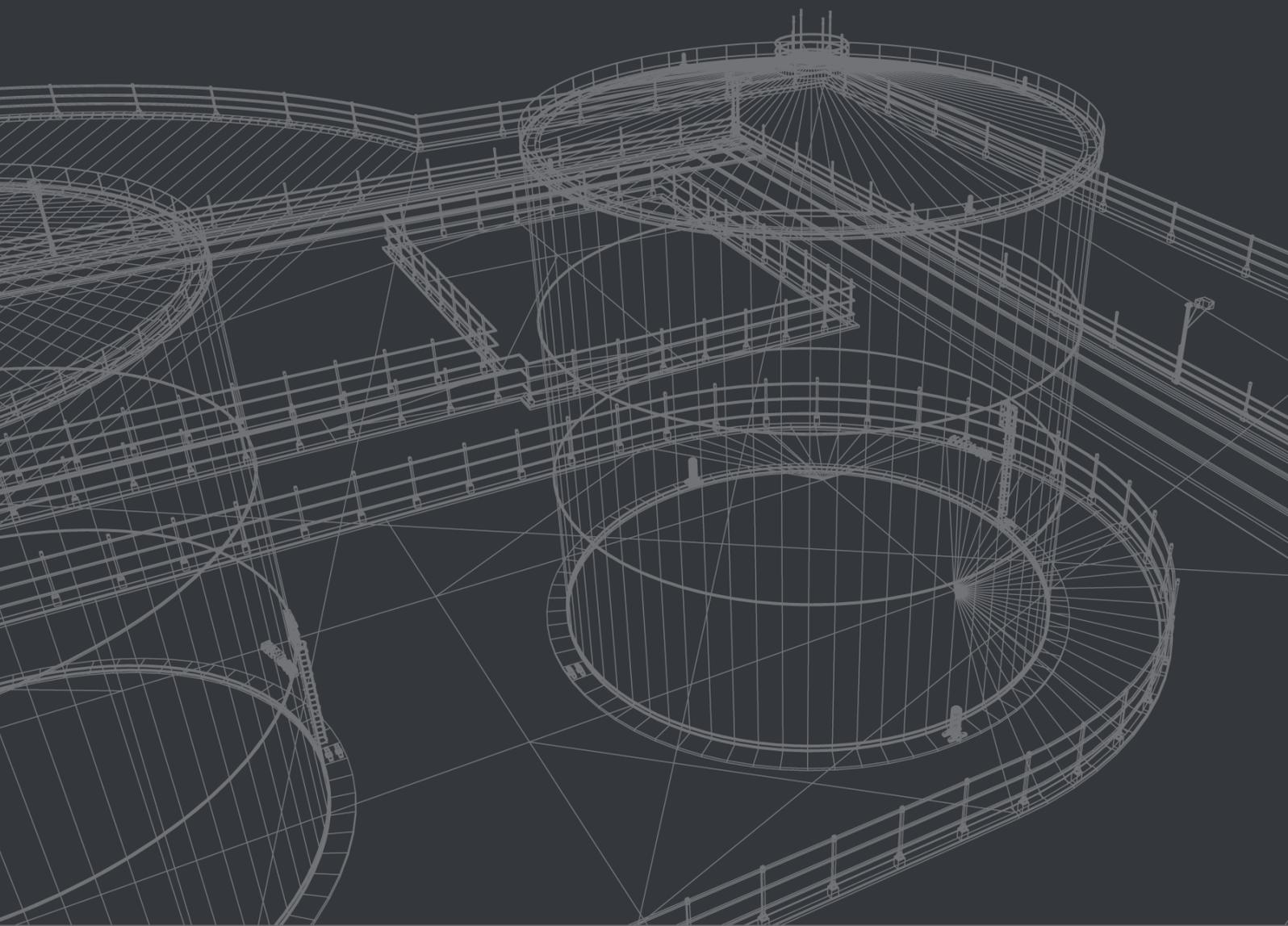
Les conditions de travail radiologiques dans les locaux des installations et sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi se distinguent sérieusement de celles régnant avant l'accident. Les mesures prises montrent toutefois que même dans le cas d'un accident de cette gravité, il subsiste toujours de nombreuses possibilités de réduction des doses reçues et de prévention des incorporations et contaminations de la peau si les moyens de protection sont systématiquement utilisés. En cas d'accidents avec rejets de radionucléides, les besoins aussi bien en personnel qu'en matériel de radioprotection augmentent très fortement par rapport à une situation d'exploitation normale. Ceci conduit à la conclusion que dans ce domaine il est nécessaire de tenir à disposition des réserves pour le cas d'accident bien plus importantes que ce qu'il était communément admis jusqu'alors.

De nombreux indicateurs découlant des leçons tirées de Fukushima pourraient se révéler également pertinents pour une amélioration de la radioprotection en Suisse. L'IFSN a déjà présenté toute une série de points à contrôler en matière de dosimétrie individuelle et de radioprotection opérationnelle (voir /49/). La formation pratique des personnes chargées de tâches de radioprotection devra tenir compte, bien plus que jusqu'à présent, des comportements à adopter en présence de contaminations de l'air et des surfaces de très haut niveau et sur de grandes étendues.

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E

11.03.2011



5 Exposition de la population locale aux rayonnements ionisants

5.1 Vue d'ensemble

Les substances radioactives qui atteignent l'environnement suite à un accident nucléaire comme celui de Fukushima Dai-ichi contribuent par différentes voies à l'irradiation de la population proche (voir figure 5-1). Au cours de la phase initiale de l'accident (dite phase du nuage), l'essentiel de l'irradiation découle du rayonnement externe associé au passage du nuage radioactif et de l'absorption de substances radioactives par les voies respiratoires (inhalation) (voir chapitres 5.6 et 5.7). Dans la phase au sol qui suit, l'irradiation externe par les substances radioactives déposées sur le sol y ajoute une composante d'exposition sur le long terme (voir chapitre 5.2). Compte tenu de la désintégration radioactive et de la pénétration des radionucléides dans les couches plus profondes du sol qui constituent alors un écran, cette dose décroît lentement avec le temps.

La radioactivité qui est directement déposée sur les fourrages et les légumes ou encore celle qui pénètre dans le sol et est absorbée par les racines des plantes (voir chapitre 5.3) constitue une autre source d'exposition importante découlant de la consommation de produits alimentaires (ingestion).

Les effluents liquides versés dans les eaux de surface (fleuves, lacs) peuvent contaminer le réservoir d'eau de boisson et ainsi constituer une cause d'irradiation par le réseau de distribution d'eau (voir chapitre 5.4). De plus, la radioactivité rejetée dans les lacs, dans les cours d'eau et en mer se retrouve également dans la chaîne alimentaire humaine par la consommation de poissons et de fruits de mer (voir respectivement chapitre 5.3 et 5.5).

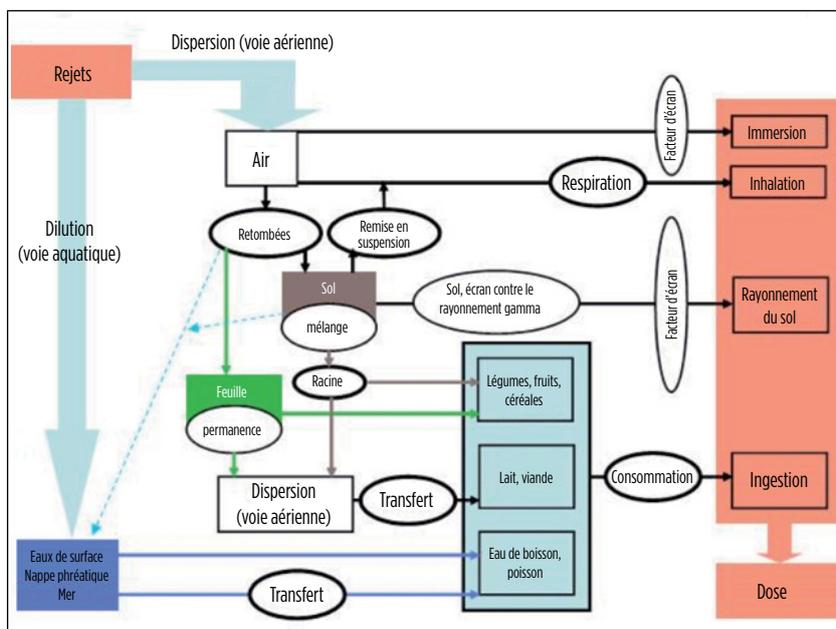


Fig. 5-1 Représentation schématique des voies d'exposition qui contribuent principalement à l'irradiation dans l'environnement d'une installation nucléaire ²³

5.2 Retombées de substances radioactives au sol

5.2.1 Situation météorologique

Comme le montre la figure 3-2, la majeure partie des rejets de Fukushima Dai-ichi est imputable à partir du 15 mars 2011 à l'explosion de la tranche 2. Le soir du 15 mars, il soufflait à 100 m de hauteur au-dessus du site de la centrale des vents de secteur sud-est, et dans la nuit du 15 au 16 mars on a observé sous le vent des précipitations (pluie ou neige) continues (voir figure 5-2 en haut). Ceci a entraîné dans la direction du nord-ouest et jusqu'à une distance de 50 à 60 km du site d'importantes retombées d'iode et de césium (Cs-134 et Cs-137) sous forme d'aérosols (voir figure 5-2 en bas). Comparées à celles-ci, les retombées de substances radioactives en direction du nord, dans le secteur sud-est et le long de la côte ont été nettement moindres.

Au cours de la journée du 16 mars 2011, le vent a à nouveau tourné à l'ouest, ce qui fait que les rejets ont alors été évacués au-dessus de l'Océan Pacifique.

Après ces émissions de substances radioactives, différents organismes officiels et privés ont lancé autour de la centrale nucléaire, et en complément au programme de surveillance de routine, un programme étendu de mesure de l'environnement pour déterminer les débits de dose ambiante (DDA) et la radioactivité locale déposée sur et dans le sol à l'origine de ces débits de dose. Cette large campagne, coordonnée par le MEXT, a compris des mesures régulières des DDA en différents points dans et en dehors de la zone interdite d'accès autour des installations. De plus, des vols de mesure aéro-

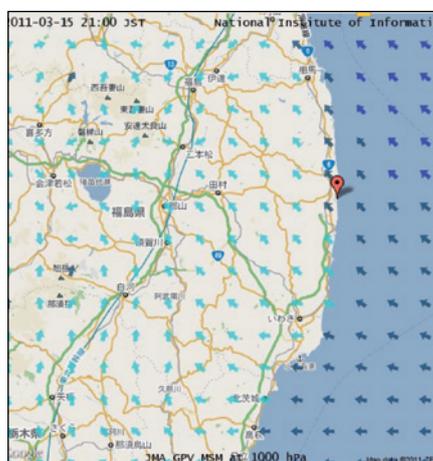


Fig. 5-2 Situation météorologique le soir du 15 mars 2011 dans le secteur géographique de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi²⁴

radiométrique étendus ont été assurés en collaboration avec le Département américain de l'énergie (DOE) (voir chapitre 5.2.2). En outre, les concentrations radioactives dans le sol et leur évolution dans le temps ont également été déterminées par prélèvement direct d'échantillons et évaluation spécifique des radionucléides (voir chapitre 5.2.3 et 5.2.4).

5.2.2 Débit de dose ambiante associé à la contamination des sols

Les débits de dose ambiante relevés dans l'environnement de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi étaient au départ principalement dus à la présence d'I-131. Compte tenu de sa période relativement courte de 8,02 jours, cet isotope s'est entre-temps largement désintégré, ce qui fait que les débits de dose relevés depuis la fin avril 2011 sont imputables principalement aux deux isotopes de césium que sont le Cs-134 (période de 2,06 ans) et le Cs-137 (période de 30,17 ans).

Très rapidement après l'accident, le MEXT a effectué en collaboration avec le DOE

américain des vols de mesure destinés à la cartographie des débits de dose ambiante. Une telle carte présentant les résultats au 29 avril 2011, soit six semaines environ après l'accident, est représentée à la figure 5-3. Cette illustration comporte en outre les valeurs maximales, relevées en certains points sélectionnés, de la concentration radioactive imputable au Cs-137 dans le sol et dans l'eau de mer.

La carte montre nettement le panache de retombées imputable aux rejets radioactifs de la tranche de réacteur 2 du 15 mars 2011. Dans la zone indiquée en rouge, le débit de dose ambiante, alors imputable principalement au Cs-134 et au Cs-137, a dépassé 19 µSv/h, soit environ 200 fois le bruit de fond radiologique naturel. Une person-

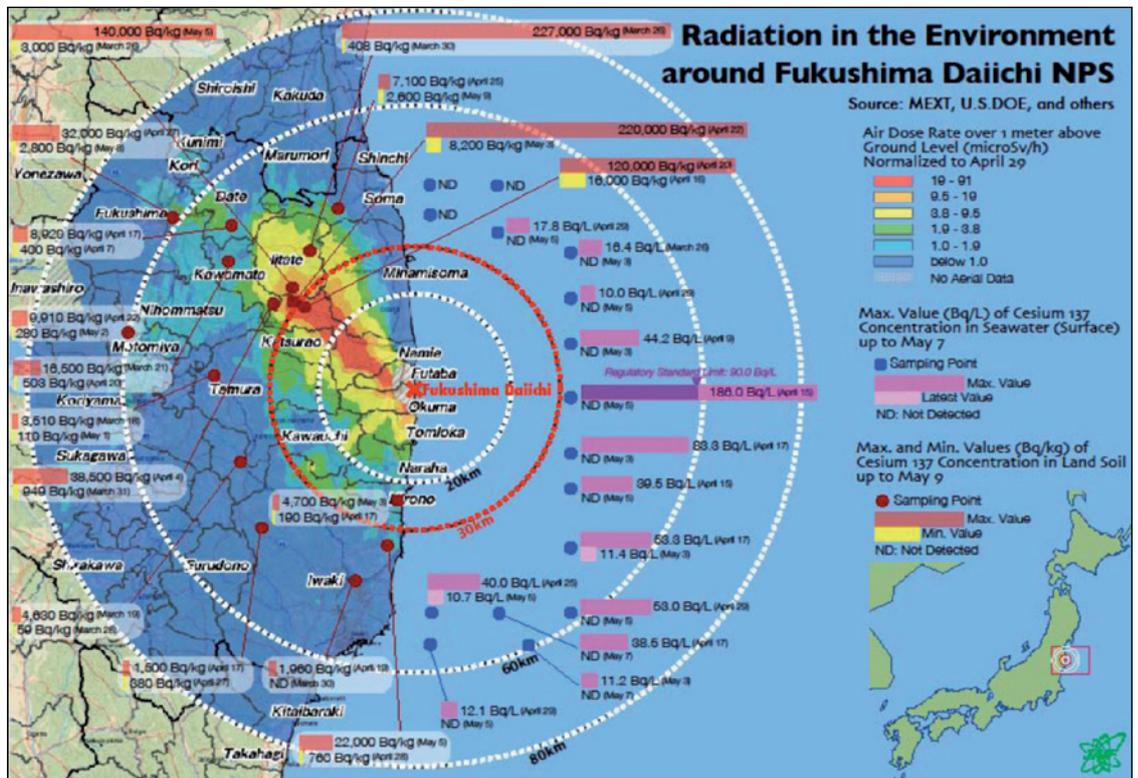


Fig. 5-3 Débits de dose ambiante dans l'environnement de Fukushima Dai-ichi le 29 avril 2011, sélection de concentrations radioactives dans le sol et dans l'eau de mer ²⁵

25 | Source: JAIF http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1316677149P.pdf

ne qui se tiendrait donc en permanence à l'extérieur dans cette zone recevrait en un an une dose effective nettement supérieure à 100 mSv par exposition externe. Dans la zone indiquée en jaune, cette dose annuelle externe serait encore toujours de l'ordre de 20-50 mSv. L'extension de ces zones rouge, orange et jaune atteint près de 40-50 km en direction du nord-ouest et s'étend donc bien au-delà du rayon des 20 km d'où la population a été évacuée en guise de première mesure d'urgence immédiatement après l'accident. La zone critique a fait l'objet d'une évacuation ultérieure (voir chapitre 5-6) pour respecter la valeur limite de dose annuelle. Inversement, et notamment le long de la côte vers le nord et vers le sud du site, ainsi qu'à l'intérieur du cercle des 20 km, il existe des zones dans lesquelles l'exposition externe pendant une année entraînerait des doses reçues inférieures à 5 mSv.

Les mesures aéroradiométriques ont été étendues et affinées jusqu'à la fin juillet 2011 (voir figure 5-4). Comme on pouvait s'y attendre, les débits de dose ambiante ont légèrement diminué avec le temps, ce qui se manifeste par une réduction des zones affectées par un niveau donné de radioactivité. Ceci s'explique par la pénétration de la radioactivité dans le sol et donc par l'augmentation de l'épaisseur d'écran protégeant du rayonnement externe. En revanche, la décroissance due à la désintégration radioactive est insignifiante (période du Cs-137 : 30,17 ans). A des distances de plus de 75 km du site nucléaire, on ne mesure plus que sporadiquement des valeurs de DDA supérieures à la radioactivité naturelle (dont la valeur typique est de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ en Suisse).

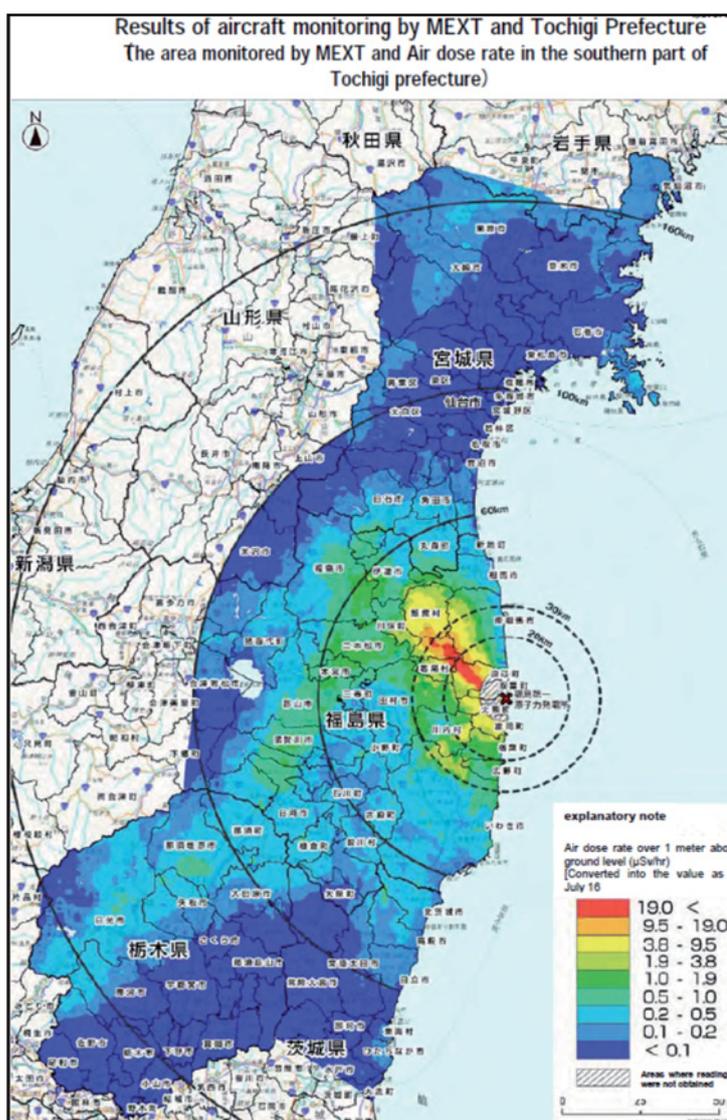


Fig. 5-4 Débit de dose ambiante dans l'environnement de Fukushima Dai-ichi, mesure étendue et affinée, juillet 2011 ²⁶

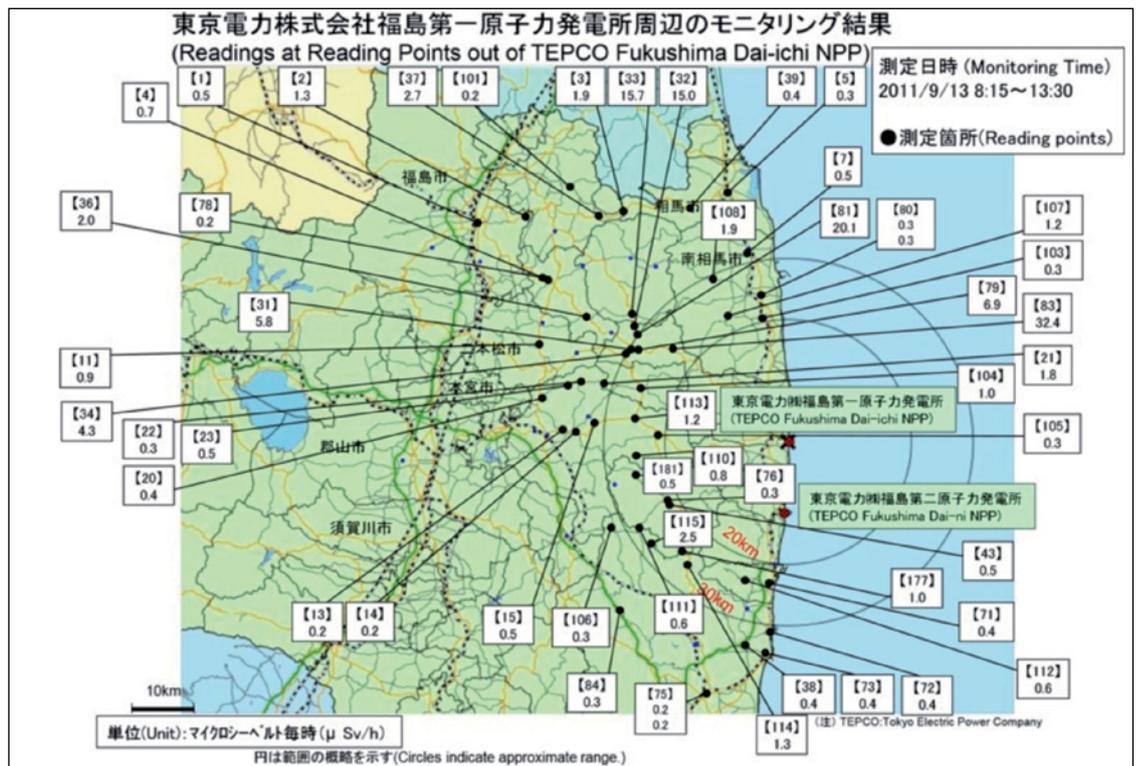


Fig. 5-5 Points de mesure sélectionnés pour le relevé régulier du débit de dose ambiante en dehors de la zone d'accès interdit des 20 km (indications en μSv/h) ²⁷

Outre les mesures aëroradiométriques qui autorisent une vue d'ensemble des débits de dose ambiante dans l'environnement et donc de la radioactivité déposée au sol, des mesures régulières ont été effectuées, dès le 17 mars 2011 et sous la coordination du MEXT, en un grand nombre de points à l'intérieur comme à l'extérieur de la zone d'accès interdit des 20 km. La figure 5-5 présente la vue d'ensemble des points de mesure en dehors de la zone d'accès interdit. A titre d'exemple, les relevés de mesure du 13 septembre 2011 ont été intégrés au graphique.

L'évolution des débits de dose locaux entre le 17 mars 2011 et début septembre 2011 est représentée sur la figure 5-6 pour tous les

points de mesure, tandis que la figure 5-7 montre l'évolution relevée sur les cinq points de mesure ayant présenté les débits de dose les plus élevés après l'accident.

Au cours de la phase initiale, le rayonnement de l'iode-131 domine dans les débits de dose ambiante. A partir de la mi-avril 2011, cet isotope dont la période n'est que de 8,02 jours s'est suffisamment désintégré pour ne laisser subsister parmi les contributeurs aux débits de dose que le Cs-134 et le Cs-137. Dans la suite de l'évolution, ces débits de dose locaux n'ont décliné que très faiblement et leur diminution n'a été due en premier lieu qu'à la pénétration de ces nucléides dans le sol et à l'effet d'écran qui en est résulté. Le calcul par modélisation pour le point de mesure 32 montre l'évolution du débit de dose ambiante tel qu'il aurait dû se présenter du fait de la seule désintégration radioactive. Il s'avère que les radionucléides ont dû rapidement pénétrer dans le sol dès la phase initiale de la contamination. Les variations quotidiennes relativement importantes sont vraisemblablement dues au fait que les mesures n'ont pas toujours été effectuées au même endroit précis et dans des conditions identiques (même appareil, etc.).

Les résultats de mesure au sol présentent, dans le cadre de la précision attendue, une bonne corrélation avec les mesures aéro-radiométriques présentées plus haut.

La figure 5-8 montre l'évolution des débits de dose ambiante dans différentes villes de l'est du Japon (Tokyo compris). On y remarque nettement quelques pointes dues à des retombées d'I-131 qui se sont produites dans le sud du site lorsque le vent a tourné dans cette direction durant la phase initiale de l'accident.

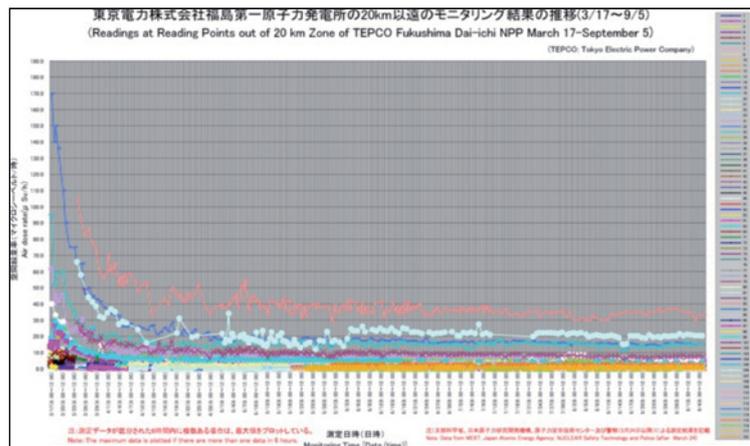


Fig. 5-6 Évolution du débit de dose ambiant en des points de mesure sélectionnés en dehors de la zone interdite d'accès de 20 km autour de Fukushima ²⁸

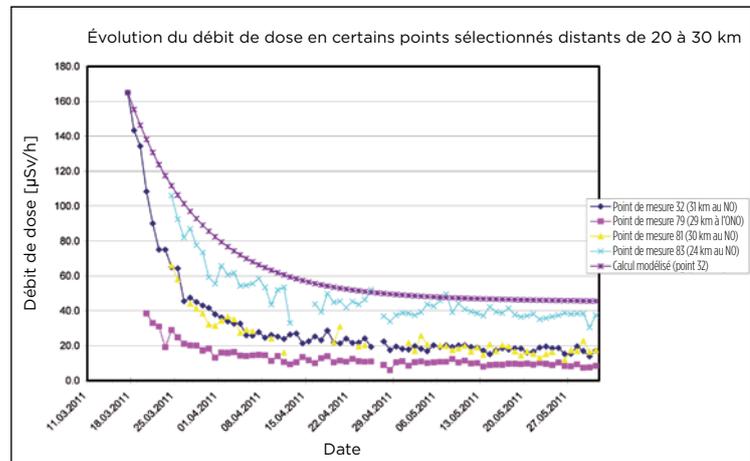


Fig. 5-7 Évolution aux points de mesure présentant les débits de dose les plus élevés, immédiatement après l'accident

28 | Source: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_monitoring_out_of_20km/2011/09/12475/index.html

Ces retombées d'iode ont eu entre autres pour conséquence qu'à Tokyo la valeur limite applicable aux enfants en bas âge pour l'I-131 dans l'eau de boisson a été dépassée un court laps de temps (voir chapitre 5.4). Au cours du mois d'avril, les valeurs d'I-131 sont revenues à des niveaux normaux du fait de la désintégration radioactive de cet isotope. Elles se situent à nouveau dans une plage autour de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$, ce qui est par ex. typique pour le Mittelland berinois.

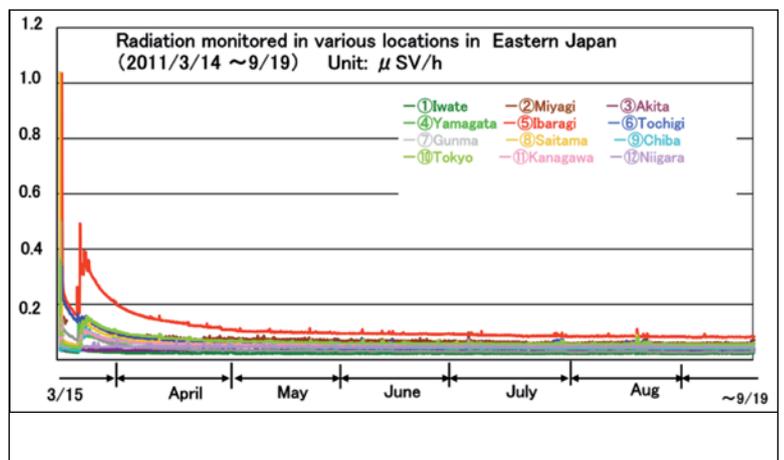
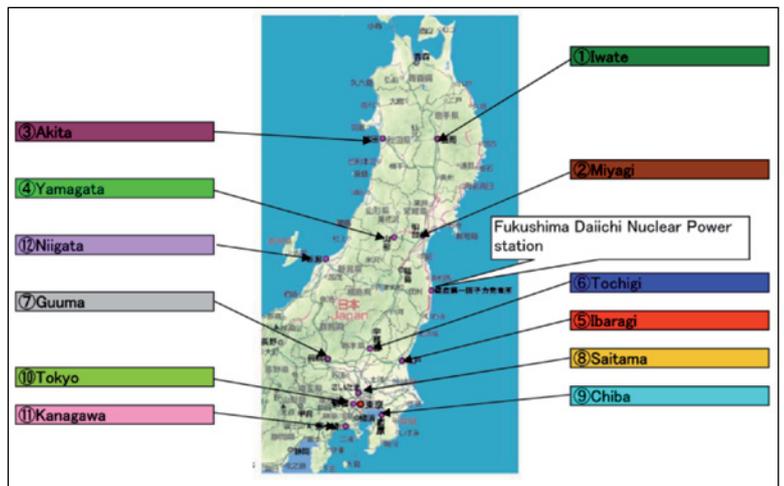


Fig. 5-8 Évolution des débits de dose dans des grandes villes de l'est du Japon entre le 15 mars et le début septembre ²⁹

5.2.3 Mesures de la radioactivité du sol : nucléides volatils I-131, Cs-134 et Cs-137

Peu après l'accident, on a effectué d'une part des mesures directes des concentrations de radioactivité du sol dans l'environnement proche et réalisé d'autre part des calculs de conversion en concentrations radioactive dans la couche supérieure du sol à partir des débits de dose mesurés par aéroradiométrie. Les résultats de ce calcul sont représentés sur la figure 5-9.

Le panache de retombées orienté vers le nord-ouest est à nouveau clairement identifiable. Dans la zone indiquée en rouge les contaminations de surface calculées sont supérieures à 3 MBq/m². Dans la zone indiquée en gris vert, les concentrations de radioactivité déposées au sol des deux isotopes du Cs atteignent encore 30-60 kBq/m², valeur équivalente à celle qui a pu être mesurée dans certains secteurs du sud du canton du Tessin après l'accident de réacteur de Tchernobyl en 1986.

Immédiatement après les retombées au sol, l'I-131 a été le nucléide dominant dans la contamination au sol du fait de sa grande volatilité et des importantes concentrations présentes dans le réacteur. A ce moment-là, les retombées d'iode au sol dépassaient celles des deux isotopes du Cs d'un facteur de 3 à 20 (voir par ex. les lignes «Sol» dans le tableau 5-1). Les fluctuations du rapport Cs/I au sol et les rapports nettement éloignés relevés à la surface des plantes s'expliquent par les différences de comportement de l'iode et du césium au lessivage et à

la pénétration. Compte tenu de la période relativement courte de l'I-131, ce sont les deux isotopes du Cs qui dominent dans la contamination au sol à partir de la mi-avril.

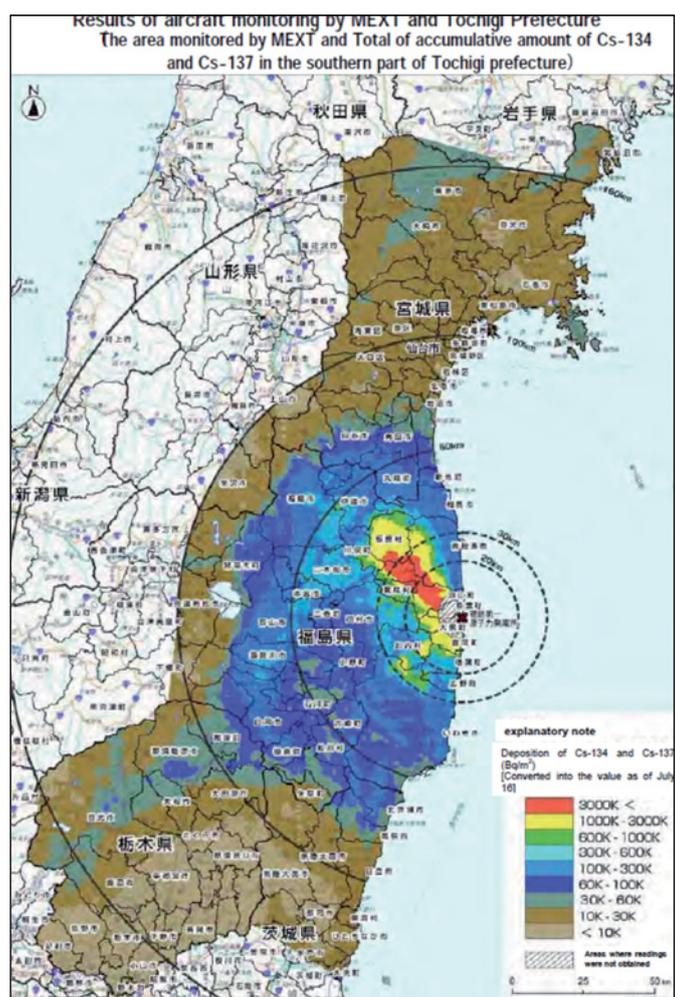


Fig. 5-9 Radioactivité en Cs-134 et Cs-137 déposée au sol (Bq/m²) déduite des mesures aéroradiométriques ³⁰

Les valeurs de mesure maximales des concentrations de radioactivité pour le Cs-137 telles que mesurées en différents points dans le sol peuvent être relevées sur la figure 5-3. La valeur la plus élevée est de 227 000 Bq/kg, cependant il est très difficile de la corrélérer ici directement avec les mesures aéroradiométriques exprimées en Bq/m², puisque l'on ne sait pas à quelle profondeur l'échantillon de sol a été prélevé.

A partir de la fin mai 2011, le ministère japonais de l'Agriculture, des Forêts et des Pêches (MAFF) a lancé une campagne d'analyse par spectrométrie gamma des concentrations radioactives de césium dans les sols agricoles, en 580 points au total, de la préfecture de Fukushima et des cinq préfectures voisines (Miyagi, Tochigi, Gunma, Ibaraki et Chiba). Les résultats de ces mesures sont récapitulés sur la figure 5-10.

Comme il est dans ce cas défini avec précision jusqu'à quelle profondeur l'échantillon a été prélevé, il est possible d'effectuer une comparaison directe avec les mesures aéroradiométriques présentées plus haut. Les résultats obtenus par ces deux méthodes de mesure sont très concordants dans la fourchette de précision de mesure attendue. Pour le césium, on est parti d'un facteur de transfert de 0,05 entre le sol et la plante. Ceci signifie qu'à partir d'une valeur de 10 000 Bq/kg (points rouges et orange sur la carte) il convient de s'attendre à ce que les produits agricoles récoltés sur ces sols dépassent la valeur limite en césium fixée au Japon pour les produits alimentaires, soit 500 Bq/kg (voir chapitre 5.2).

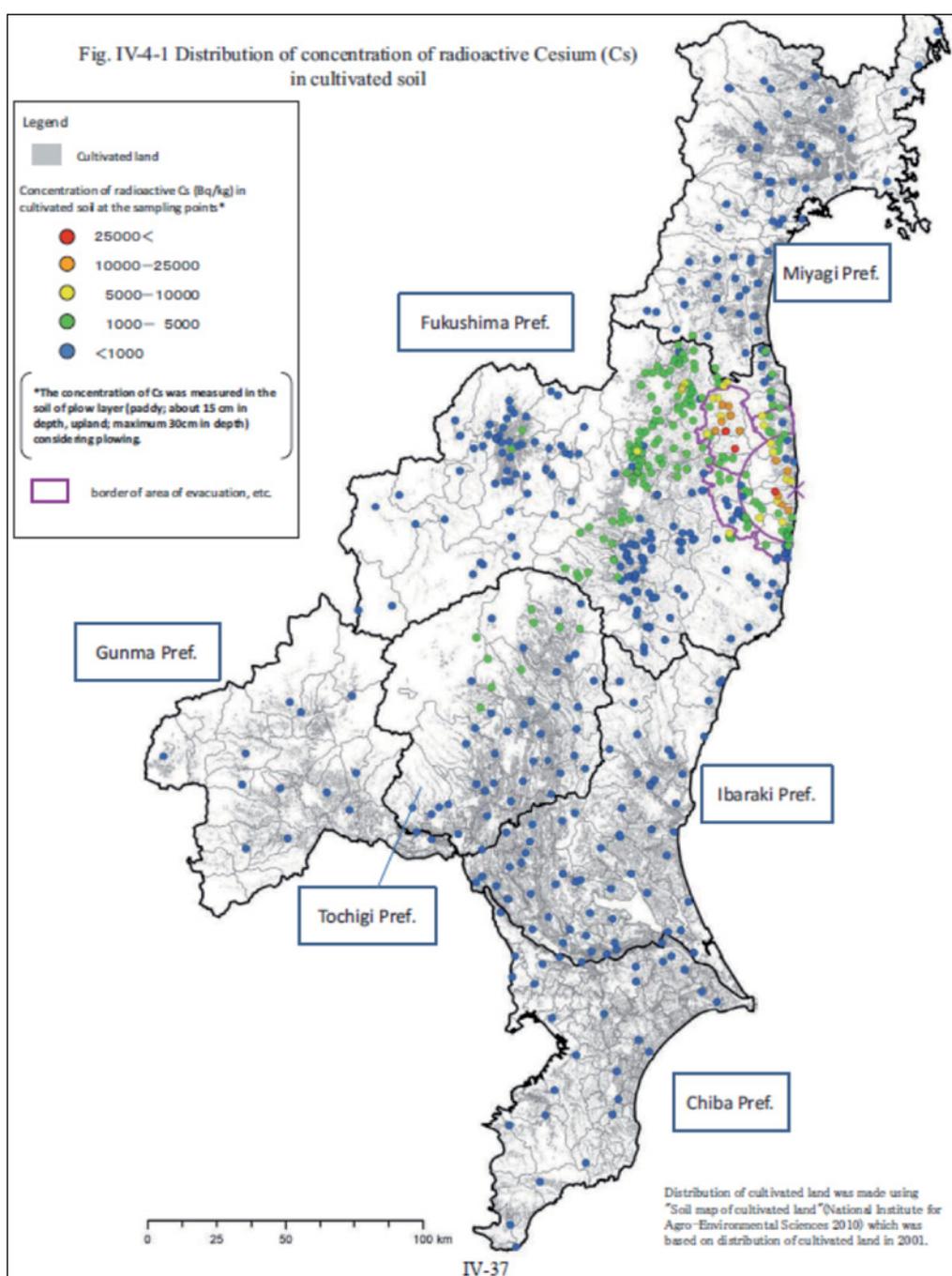


Fig. 5-10 Concentration radioactive en césium dans les sols agricoles pour la zone racinaire des plantes ³¹

5.2.4 Mesures de la radioactivité du sol: autres nucléides (Sr, Pu, U)

Outre l'iode et le césium, le fonctionnement d'un réacteur produit aussi des quantités comparables d'autres nucléides de longue période (voir tableau 2-3), mais ceux-ci sont nettement moins volatils. Nous nous intéresserons tout particulièrement aux émetteurs bêta purs tels que le Sr-89 ou le Sr-90 ou encore aux émetteurs alpha tels que le plutonium et l'uranium, qui en cas d'absorption dans le corps humain peuvent entraîner des irradiations significatives et qui ne peuvent être mesurés en règle générale qu'avec des moyens relativement lourds. A la suite de l'accident, la discussion a porté entre autres sur des rejets accrus possibles

de plutonium (quoique très peu volatil), puisque le réacteur de la tranche 3 de Fukushima Dai-ichi était chargé d'assemblages combustibles de mélanges d'oxydes (MOX). Dans ce combustible, une petite partie de l'uranium fissile est remplacée par du plutonium, ce qui entraîne une présence de plutonium supérieure à celle contenue dans les assemblages combustibles à uranium pur.

Immédiatement après les retombées des substances radioactives, les autorités japonaises ont prélevé en plusieurs endroits des échantillons de sol afin d'en analyser la teneur en iode, césium et strontium. La figure 5-11 donne une vue d'ensemble des prélèvements effectués, les points de prélèvement 1

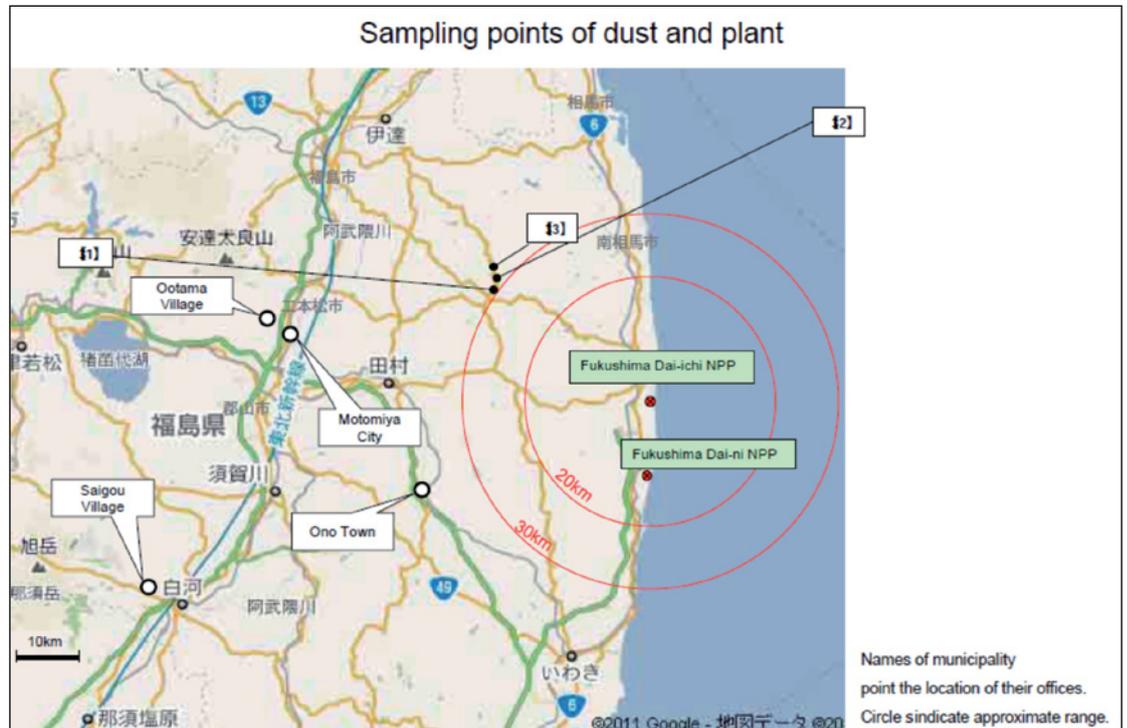


Fig. 5-11 Points de prélèvement d'échantillons ayant servi à l'analyse des rapports d'activité d'autres nucléides immédiatement après les retombées ³²

Échantillon	Lieu du prélèvement d'échantillons	Datum	Activité par nucléide [Bq/kg] (sol humide, plantes non traitées)				
			I-131	Cs-134	Cs-137	Sr-89	Sr-90
Sol	Namie Town	17.03.2011	30'000	2'300	2'300	13	3.3
Sol	Namie Town	16.03.2011	100'000	20'000	19'000	81	9.4
Sol	Iitate Village	16.03.2011	160'000	52'000	51'000	260	32
Plantes	Ootama Village	19.03.2011	43'000	89'000	90'000	61	5.9
Plantes	Motomiya City	19.03.2011	21'000	57'000	57'000	28	3.7
Plantes	Ono Town	19.03.2011	22'000	12'000	12'000	12	1.8
Plantes	Nishigou Village	19.03.2011	12'000	25'000	25'000	15	3.8

Tab. 5-1 Résultats de mesure des concentrations radioactives dans le sol pour l'iode, le césium et le strontium environ une semaine après la survenue de l'accident ³³

à 3 se situant dans l'axe du panache principal de dispersion.

Comme il ressort du tableau 5-1, les concentrations de Sr-89 mesurées au sol sont dans tous les cas inférieures d'au moins un facteur 100, les concentrations de Sr-90 inférieures d'au moins un facteur 1 000, aux valeurs mesurées aux mêmes points pour le Cs-134 ou le Cs-137. Pour les plantes, le ratio Cs/Sr est encore plus important. Ceci permet d'affirmer que même en prenant en compte les facteurs de transfert et les facteurs de dose du strontium les plus défavorables, l'exposition à ses isotopes dans l'environnement de Fukushima est d'importance très secondaire par rapport à celle des deux isotopes de césium.

L'exploitant TEPCO a mis en évidence des traces de plutonium dans deux échantillons de sol prélevés à proximité immédiate de la centrale nucléaire. Dans les deux cas, le

rapport isotopique laisse supposer que le plutonium provient de l'un des deux réacteurs endommagés.

La concentration de plutonium mesurée, légèrement supérieure à 1 – 2 Bq/kg, était du même ordre de grandeur que celle détectée par exemple en Suisse à la suite des essais nucléaires effectués dans l'atmosphère par les puissances nucléaires.

Dans le reste de l'environnement autour de la centrale nucléaire, la concentration en plutonium s'est révélée inférieure au seuil de détection, même dans le panache radioactif. L'uranium détecté aux mêmes endroits présente le même rapport isotopique naturel entre les isotopes U-235 et U-238 (voir tableau 5-2). Si cet uranium était issu d'un réacteur endommagé, le combustible enrichi utilisé aurait dû entraîner un décalage du rapport vers l'U-235.

Ainsi les effets radiologiques du plutonium et de l'uranium sont aussi insignifiants par rapport à ceux du Cs-134 et du Cs-137. D'autres nucléides ont certes été mis en évidence dans l'environnement, mais ils présentent une importance radiologique de rang très secondaire par rapport aux radionucléides cités.

Lieu du prélèvement d'échantillons	Date	DDA [$\mu\text{Sv/h}$]	Activité par nucléide [Bq/kg]		Rapport isotopique U-235/U-238 ³⁶
			Pu-238	Pu-239 & 240	
A proximité de Kodeya, Kuzuo Village	23.03.2011	43.5	< 0.1 (< SD) ³⁵	< 0.1 (< SD)	7.31E-3
A l'est du tunnel d'Hirusone, Namie Town	23.03.2011	46.5	< 0.1 (< SD)	< 0.1 (< SD)	7.26E-3
Akougi, Namie Town	22.03.2011	50.1	< 0.1 (< SD)	< 0.1 (< SD)	7.23E-3

Tab. 5-2 Résultats de mesure des concentrations radioactives dans le sol pour le plutonium et l'uranium environ une semaine après la survenue de l'accident³⁴

5.3 Contamination des produits alimentaires

Sous la coordination du MHLW, dans tout le Japon, depuis l'accident et jusqu'en septembre, plus de 15'000 échantillons de produits alimentaires ont été prélevés afin d'en déterminer la teneur en iode et en césium et de la comparer aux valeurs limites en vigueur au Japon:

- Pour l'iode (essentiellement I-131), dans le lait et les produits laitiers ainsi que dans l'eau potable: 300 Bq/kg pour les adultes et 100 Bq/kg pour les enfants en bas âge; dans les légumes et le poisson : 2 000 Bq/kg;
- Pour le césium (Cs-134 et 137), dans le lait et les produits laitiers ainsi que dans l'eau potable: 200 Bq/kg; dans les légumes, le poisson, la viande, les œufs et autres produits alimentaires: 500 Bq/kg;
- Pour l'uranium, dans l'eau potable, le lait et les aliments pour nourrissons: 20 Bq/kg; pour tous les autres produits alimentaires: 100 Bq/kg;
- Pour les transuraniens dans l'eau potable, le lait et les aliments pour nourrissons: 1 Bq/kg; pour tous les autres produits alimentaires: 10 Bq/kg.

³⁴ | Source: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/1250/2011/04/1305381_0401.pdf

³⁵ | Selon le MEXT, les valeurs de mesure des isotopes de plutonium sont inférieures au seuil de perceptibilité.

³⁶ | Les proportions naturelles d'U-235 et d'U-238 sont respectivement de 0,7204 % et de 99,274 % (voir /45/), le ratio naturel U-235/U-238 se situe à environ 7.26E-3.

Nucléide	Valeur limite provisoire de substances radioactives dans les produits alimentaires selon le «Food Sanitation Act», [Bq/kg]	
Iode radioactif	Eau de boisson	300
	Lait et produits laitiers	
	Légumes (à l'exception des racines et tubéreux)	2'000
	Produits de la pêche	
Césium radioactif	Eau de boisson	200
	Lait et produits laitiers	
	Légumes	500
	Céréales	
	Viande, œufs, poisson et autres	
Uranium	Aliments pour nourrissons	20
	Eau de boisson	
	Lait et produits laitiers	100
	Légumes	
	Céréales	
	Viande, œufs, poisson et autres	
Emetteurs alpha, plutonium et transuraniens (concentration totale en Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Am-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244)	Aliments pour nourrissons	1
	Eau de boisson	
	Lait et produits laitiers	10
	Légumes	
	Céréales	
	Viande, œufs, poisson et autres	

Tab. 5-3 Valeurs limites de radioactivité pour les produits alimentaires au Japon ³⁷

En Suisse, les valeurs limites de radioactivité dans les produits alimentaires sont définies de manière nettement plus détaillée dans l'Ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC) /12/. Le concept suisse est aujourd'hui quelque peu différent de la procédure japonaise dans la mesure où la valeur limite en Suisse est précédée par une valeur de tolérance plus faible à partir de laquelle un produit doit être considéré comme impropre à la consommation. Cependant, pour les radionucléides cités ci-dessus, les valeurs limites sont d'un ordre de grandeur comparable.

Le tableau 5-4 représente par ex. un extrait des données publiées par le MHLW pour les préfectures de Fukushima et d'Ibaraki. La comparaison porte, pour différents groupes de produits alimentaires, sur le rapport entre le nombre des échantillons analysés et le nombre d'échantillons analysés pour lesquels on a constaté un dépassement de la valeur limite au cours des sept mois écoulés entre l'accident (mars 2011) et la mi-octobre 2011.

A Fukushima, l'analyse a porté sur environ 10 500 échantillons. La valeur limite a été dépassée pour 4,5 % d'entre eux. Dans les préfectures voisines, la part des échantillons de produits alimentaires ayant dépassé la valeur limite est de 3 % (Tochigi), 2 % (Ibaraki, Chiba et Miyagi) et moins de 1 % (Gunma).

La valeur d'activité la plus élevée mesurée concernait un échantillon d'épinards du 20 mars 2011 en provenance d'Ibaraki avec une concentration mesurée nettement supérieure à 50 000 Bq/kg pour l'I-131 et de 2 000 Bq/kg environ pour le Cs-134/137. La consommation d'un kilo d'épinards ainsi contaminés aurait conduit à une dose effective de 1 mSv pour une personne adulte.

En mars 2011, on a mesuré, dans le lait et des produits laitiers, des concentrations maximales de 5'000 Bq/kg pour l'iode-131 et d'environ 400 Bq/kg pour le Cs-134/137. Ces activités correspondent à une dose équivalente de 1 mSv pour un enfant en bas âge buvant un litre de ce lait.

Des concentrations de l'ordre de 12 000 Bq/kg en I-131 et en Cs-134/137 ont été mises en évidence dans un poisson de mer (anguille de sable) pêché dans la préfecture de Fukushima à la mi-avril 2011.

Compte tenu de la courte période de ces isotopes, les dépassements de valeurs limites pour l'iode dans les produits alimentaires ne se sont manifestés que jusque vers la fin avril 2011 environ. Tous les dépassements des valeurs limites ensuite constatés étaient tous imputables à des concentrations élevées de Cs-134 et de Cs-137. Classés par groupes de produits, les concentrations les plus élevées en césium (Cs-134 + Cs-137) relevées dans des produits alimentaires se présentent comme suit:

Préfecture d'origine	Groupe de produits alimentaires	Nombre d'échantillons analysés	Échantillons avec dépassement de la valeur limite	Exemples de produits alimentaires concernés (nombre)
Fukushima	Légumes	5'215	260	Pousses de bambou (55), épinards (39), shiitake de pleine terre (40), brocolis (21), abricots (11), semence de colza (6), chou (6), et autres
	Poissons et fruits de mer	1'379	109	Ayu (21), pocheteau (14), morue-lingue (10), anguille de sable (6), morue rouge (5), et autres
	Lait et produits laitiers	448	18	Lait cru (18)
	Viande et œufs	1'907	61	Bœuf (56), porc (3), ours à collier (2)
	Céréales	1'502	1	Blé (1)
	Autres	30	2	Thé (1), colza (1)
	Total		10'481	451
Ibaraki	Légumes	735	43	Épinards (29), persil (7), shiitake de pleine terre (4), et autres
	Poissons et fruits de mer	473	6	Anguille de sable (5), morue rouge (1)
	Lait et produits laitiers	90	5	Lait cru (5)
	Viande et œufs	2'582	4	Porc (4)
	Céréales	469	-	-
	Autres	83	13	Thé (13)
	Total		4'432	71

Tab. 5-4 Échantillons de produits alimentaires analysés et nombre de dépassements constatés des valeurs limites à l'exemple des préfectures de Fukushima et d'Ibaraki ³⁸

- Légumes:
34 000 Bq/kg (épinards, fin mars),
13 000 Bq/kg (champignons, début avril),
3000 Bq/kg (thé, mi-mai),
4 600 Bq/kg (champignons mi-août),
1 300 Bq/kg (thé, mi-août),
2 400 Bq/kg (agrumes, fin août)
- Lait, produits laitiers:
400 Bq/kg (mi-mars)
- Poissons, fruits de mer:
<15 000 Bq/kg (lançons, avril),
1 000 Bq/kg environ (divers, mai),
4 500 Bq/kg environ (ayu, juin),
1 800 Bq/kg environ (ayu, août)
- Viande: jusqu'à 4 500 Bq/kg environ
(viande de bœuf, à partir de juillet)

Les concentrations radioactives en Cs les plus élevées ont été trouvées dans les légumes (légumes à feuilles) immédiatement après les rejets de radioactivité dans l'environnement sur une période de deux mois environ (dépôt direct sur les feuilles). La valeur de 34 000 Bq/kg citée plus haut pour des épinards correspondrait, en cas de consommation d'un kilo, à une dose effective de 0,5 mSv environ pour une personne adulte. Dans la phase qui a suivi, l'absorption racinaire a dominé en matière de concentrations d'activité dans les plantes ; les concentrations ont du reste fortement diminué par rapport à la période juste après les rejets.

Les plantes traitées et stockées, par ex. le thé, constituent un cas particulier. Les feuilles de thé sont séchées après récolte, ce qui signifie un renforcement de la concentration si l'on considère l'activité présente par unité de masse de produit. Elles sont ensuite longuement stockées avant consommation. Cela signifie donc pour les nucléides de longue période, tels que le Cs-137, que les

feuilles récoltées lors de la phase initiale après l'accident, avec contamination directe des feuilles, peuvent subsister longtemps dans les circuits commerciaux jusqu'à leur consommation finale.

Le transfert des radionucléides du fourrage vers le lait s'effectue relativement rapidement, et le lait frais est aussi rapidement mis en circuit commercial. Le maximum d'activité relevé dans le lait frais est donc très bien corrélé avec le maximum d'activité constaté dans les fourrages.

La situation se présente différemment pour la viande (de bœuf). En effet la durée entre l'élevage du bétail et le stockage de la viande d'une part et sa mise en vente et sa consommation d'autre part est relativement long. Ceci explique (comme pour les feuilles de thé) pourquoi le maximum de l'activité dans le produit apparaît avec un décalage de quelques mois par rapport au maximum d'activité relevé dans les fourrages, une constatation qui vaut généralement pour tous les produits stockés.

La concentration radioactive dans le poisson et les fruits de mer est corrélée avec la concentration dans l'eau des lacs et de la mer et, dans une moindre mesure, avec celle des sédiments. Mais ici également, la durée de croissance des poissons et des fruits de mer, de même que le retard résultant de la capture et de la valorisation, introduisent un décalage dans le temps entre le maximum de concentration relevé dans l'eau et celui relevé dans les poissons et les fruits de mer.

Sur la base des mesures effectuées, le MHLW a donc ordonné dans certains cas des interdictions de consommation pour maintenir aussi faible que possible la dose à la population du fait de la consommation d'aliments contaminés.

5.4 Contamination de l'eau de boisson

Compte tenu des conditions de vent, on a constaté, dans les jours qui ont suivi l'accident, un dépassement de courte durée de la valeur limite de l'I-131 dans l'eau potable pour les adultes ou les enfants en bas âge du fait des retombées de substances radioactives dans les eaux de surface de zones de captage du réseau d'alimentation en eau potable. Ceci est illustré sur la figure 5-12 sur la base des enregistrements effectués sur deux usines de traitement des eaux respectivement localisées à Iitate (dépassement de la valeur limite applicable aux adultes de 300 Bq/kg pour l'eau l'eau potable) et à Tokyo (dépassement de la valeur directrice de 100 Bq/kg pour les enfants en bas âge).

Les autorités ont alors demandé à la population de renoncer provisoirement à la consommation d'eau potable provenant des eaux de surface. Compte tenu de la désintégration radioactive de l'I-131 et de la réduction des rejets et ainsi des dépôts au sol, les valeurs limites ont été à nouveau respectées partout dès la fin mars 2011.

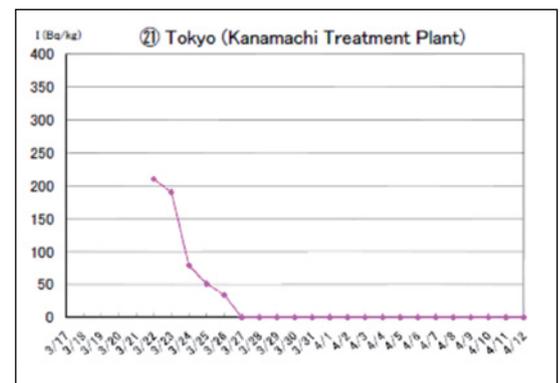
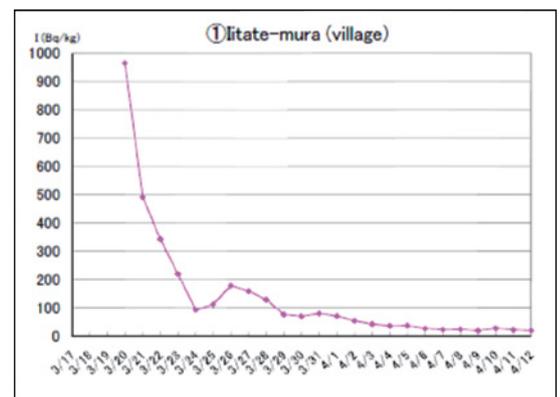


Fig. 5-12 Dépassement de la valeur limite de contamination en I-131 de l'eau de boisson après l'accident ; illustration sur la base des mesures effectuées dans deux usines de traitement des eaux, à Iitate (préfecture de Fukushima) et à Tokyo ³⁹

Les figures 5-13 et 5-14 montrent l'évolution de la radioactivité de l'eau de boisson dans différentes provinces pour l'I-131 et le Cs-134/137 ; vers la mi-avril environ, les valeurs sont retombées au niveau de celles mesurées avant l'accident et se situaient donc à nouveau nettement au-dessous des valeurs limites.

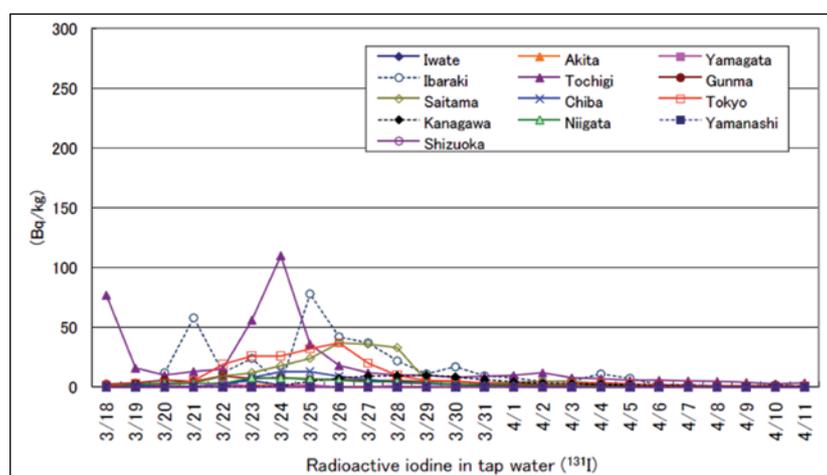


Fig. 5-13 Concentration radioactive en I-131 dans les réseaux de distribution d'eau de différentes préfectures du nord du Japon ⁴⁰

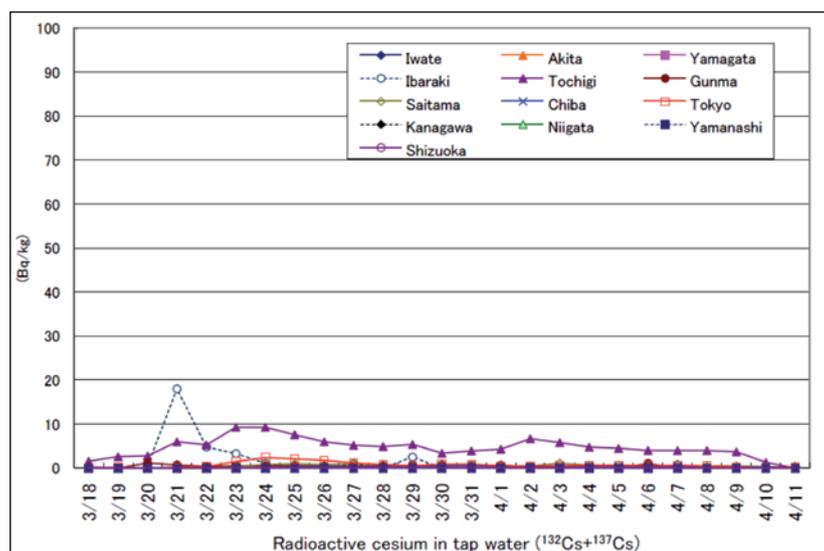


Fig. 5-14 Concentration radioactive en Cs-134/137 dans les réseaux de distribution d'eau de différentes préfectures du nord du Japon ⁴¹

40 | Source: MHLW /13/

41 | Source: MHLW /13/

5.5 Contamination de l'eau de mer et des fonds marins

Au début du mois d'avril, d'importants volumes d'eau fortement contaminée ont été rejetés à la mer du fait du manque d'étanchéité d'une galerie souterraine (voir chapitre 2.4). Ce rejet s'est manifesté sous la forme d'une augmentation de la concentration radioactive dans l'eau de mer en des points de mesure répartis autour des réacteurs accidentés

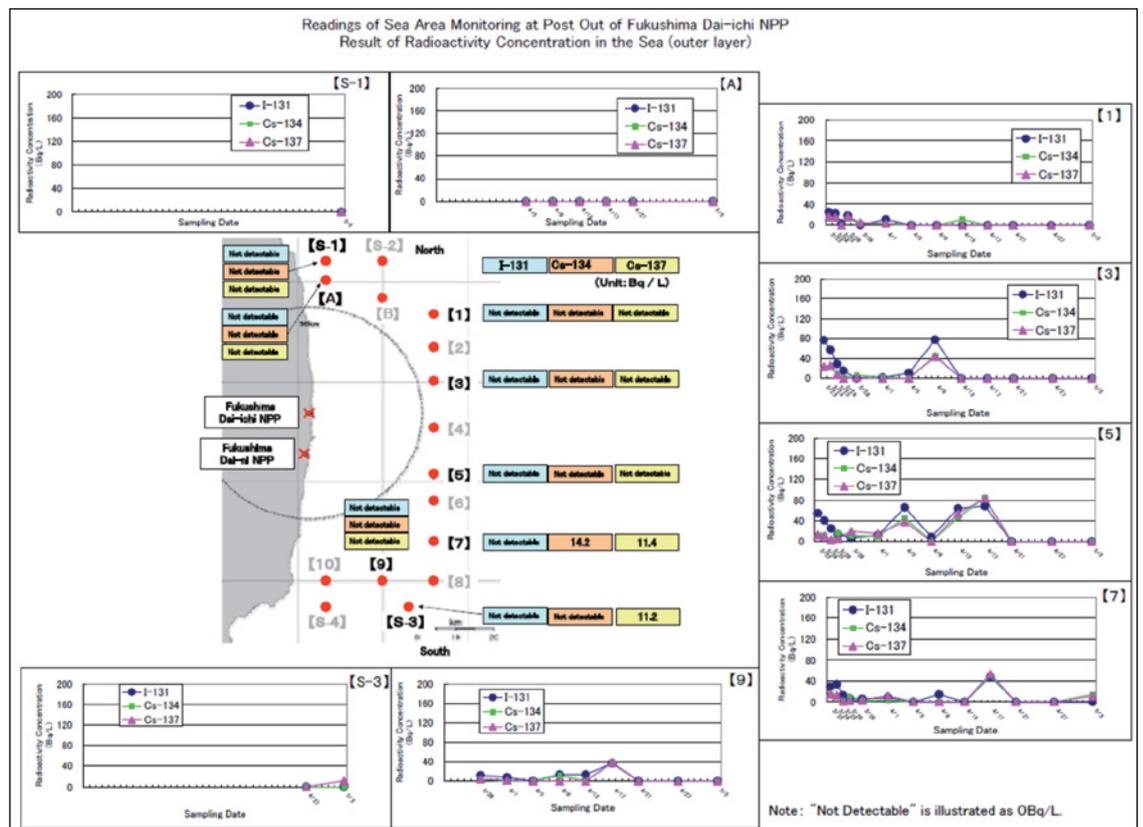


Fig. 5-15 Concentration radioactive en I-131, en Cs-134 et en Cs-137 dans l'eau de mer autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi du 5 mai 2011 ⁴²

(voir figure 5-15 et figure 5-16) puis, avec un décalage dans le temps, sous la forme de concentrations radioactives accrues dans le poisson et les fruits de mer (voir chapitre 5.3). En fonction des courants, les valeurs limites japonaises ont été presque atteintes en certains endroits (90 Bq/l pour le Cs), voire dépassées d'un facteur 4 (en appliquant la

somme des activités respectives du Cs-134 et du Cs-137).

Après que l'on ait réussi à arrêter les importants déversements en mer, les valeurs d'activité ont rapidement régressé, pour se retrouver pratiquement partout en dessous du seuil de détection à partir de mai 2011.

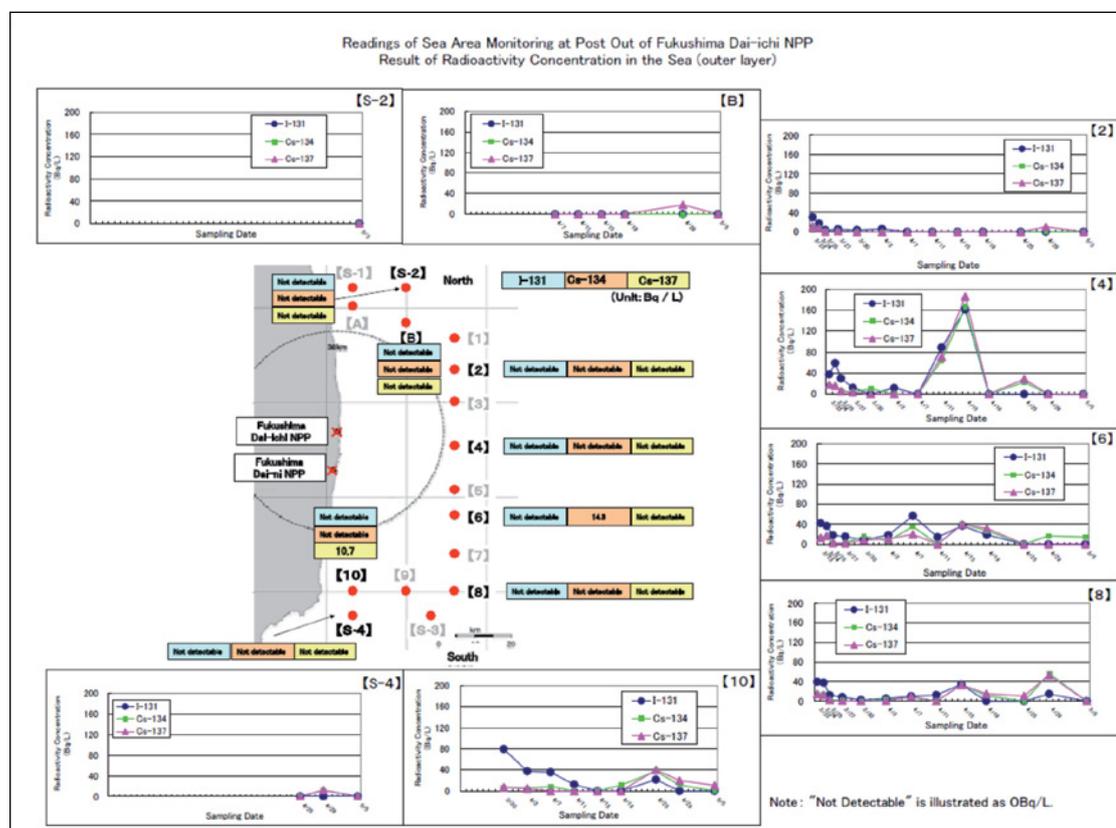


Fig. 5-16 Concentration radioactive en I-131, en Cs-134 et en Cs-137 dans l'eau de mer autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi du 7 mai 2011 ⁴³

Tout comme les retombées au sol des rejets aériens, les rejets humides dans les eaux de surface et en mer peuvent se déposer dans les lits de fleuve et sur les fonds marins. La JAEA a effectué à la fin du mois de juillet 2011 des mesures sur les côtes autour de Fukushima Dai-ichi (et Dai-ni). Les résultats correspondants sont récapitulés sur la figure 5-17. En certains points, et notamment au sud et à l'est du site de la centrale nucléaire, on constate des concentrations radioactives sensiblement accrues. Elles peuvent constituer, aussi à long terme, une source d'augmentation de concentrations radioactives dans le poisson et les fruits de mer. Les effets devraient toutefois être nettement moindres que dans le cas de l'augmentation directe de la radioactivité de l'eau de mer.

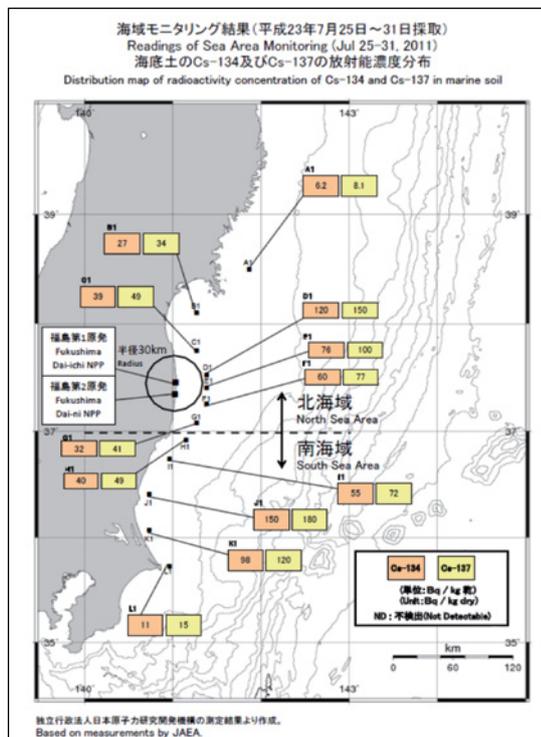


Fig. 5-17 Dépôt de Cs sur les fonds marins ou les sédiments autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ⁴⁴

Les échantillons présentant des valeurs élevées de Cs ont été analysés par la suite vis-à-vis d'éventuels dépôts de Sr-89 et de Sr-90 ; les valeurs relevées se situaient toutes au-dessous des seuils de détection (voir figure 5-18).

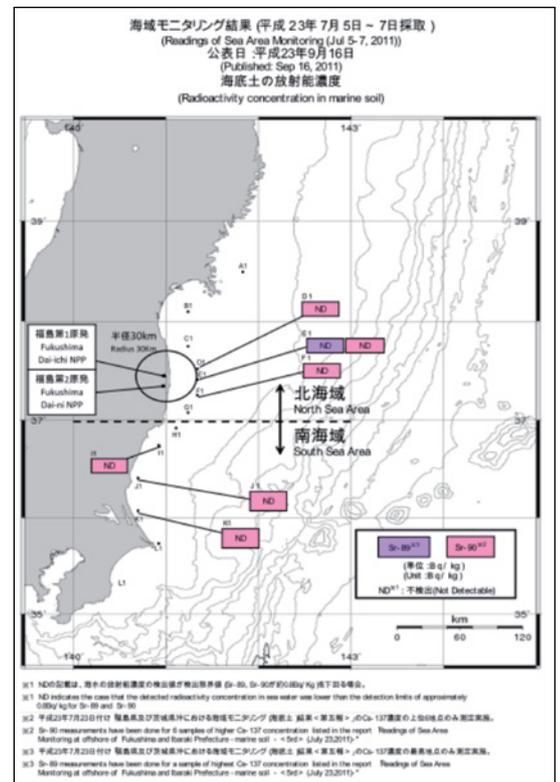


Fig. 5-18 Dépôt de Sr sur les fonds marins ou les sédiments autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi ⁴⁵

44 | Source: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_sea_marine_soil/2011/08/1350_081310.pdf
45 | Source: MEXT http://radioactivity.mext.go.jp/en/monitoring_around_FukushimaNPP_sea_marine_soil/2011/09/1350_091610.pdf

5.6 Mesures visant à réduire l'exposition aux rayonnements ionisants

5.6.1 Évacuation des populations locales

L'évacuation autour de la centrale nucléaire de Fukushima s'est effectuée par étapes successives (voir /1/, /11/ et /14/):

- Le 11 mars 2011 à 20h50, compte tenu de la situation dans la tranche 1, le gouvernement lance un préavis d'évacuation dans une zone de 2 km autour de la centrale nucléaire de Dai-ichi.
- Face à l'aggravation de la situation, le gouvernement décide le 11 mars 2011 à 21h23 l'évacuation d'une zone de 3 km autour de la centrale et donne l'ordre aux habitants de ne pas quitter leur maison dans un rayon de 3 à 10 km autour de la centrale.
- Le 12 mars 2011 à 05h44, le gouvernement ordonne une évacuation de la population dans une zone de 10 km autour de la centrale nucléaire.
- Le 12 mars 2011 à 18h25, suite à l'explosion d'hydrogène dans la tranche 1 et à l'augmentation du débit de dose ambiante sur le site de la centrale nucléaire, l'évacuation de la population dans une zone de 20 km autour de la centrale est ordonnée.
- Le 15 mars 2011, le séjour à l'intérieur des habitations est ordonné dans la zone située entre 20 à 30 km. A 23h30 la fin de l'évacuation de la zone des 20 km est annoncée.
- Le 25 mars 2011, le gouvernement conseille à la population d'évacuer de son plein gré la zone comprise entre 20 et 30 km autour de la centrale.
- Le 22 avril 2011, suite aux résultats de mesures effectuées dans l'environnement, une zone d'évacuation «délibérée» («Deliberate Evacuation Area») est établie en dehors de la zone des 20 km autour de la centrale de Dai-ichi). La zone des 20 km est déclarée «zone interdite d'accès» («Restricted Area»). Dans un secteur compris entre 20 et 30 km, une nouvelle zone d'évacuation planifiée en cas d'urgence («Evacuation Prepared Area in Case of Emergency») est définie à titre préventif pour une éventuelle évacuation ultérieure en cas de nouvelle détérioration de la situation.
- En juin 2011, quelques points spécifiques d'évacuation recommandée («Specific Spots Recommended for Evacuation») sont identifiés dans des secteurs voisins.

L'évacuation autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ni s'est effectuée selon les étapes successives suivantes:

- Le 12 mars 2011 à 7h45, le gouvernement ordonne l'évacuation d'une zone de 3 km et donne l'ordre aux habitants de ne pas quitter leur maison dans la zone située entre 3 et 10 km autour de la centrale de Dai-ni.
- Le 12 mars 2011 à 17h39, l'évacuation de la zone de 10 km autour de la centrale est ordonnée.
- Le 21 avril 2011, la zone d'évacuation est réduite à 8 km.

La population avait été tout d'abord évacuée dans une zone de 20 km autour de la centrale de Fukushima Dai-ichi à titre préventif (voir figure 5-19).

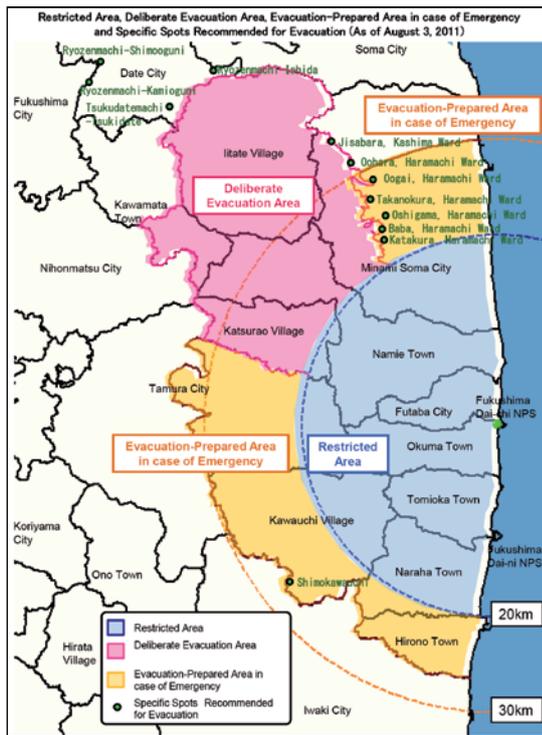


Fig. 5-19 Zones d'évacuation autour de Fukushima Dai-ichi ⁴⁶

Plus tard, les autorités ont décidé d'étendre la zone d'évacuation au-delà de la zone des 20 km pour certains secteurs («zones d'évacuation délibérée») dans lesquels la population recevrait jusqu'en mars 2012 une dose supérieure à 20 mSv. Les communes concernées s'étendent en direction du nord-ouest, partiellement jusqu'à une distance de 40 km environ de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi. La zone des 20 km déjà évacuée autour de la centrale de Fukushima Dai-ichi est transformée en «zone interdite d'accès» («Restricted Area»). Dans les autres zones contaminées situées entre 20 et 30 km («zone d'évacuation planifiée en cas d'urgence / Evacuation Prepared Area in Case of Emergency»), il est conseillé aux habitants de quitter la zone.

Dans d'autres secteurs géographiques voisins, les autorités ont recommandé en certains endroits auxquels une dose annuelle de plus de 20 mSv pourrait être reçue («points spécifiques d'évacuation recommandée / Specific Spots Recommended for Evacuation») de respecter certaines mesures de précaution ou de quitter l'endroit concerné (voir figure 5-20).

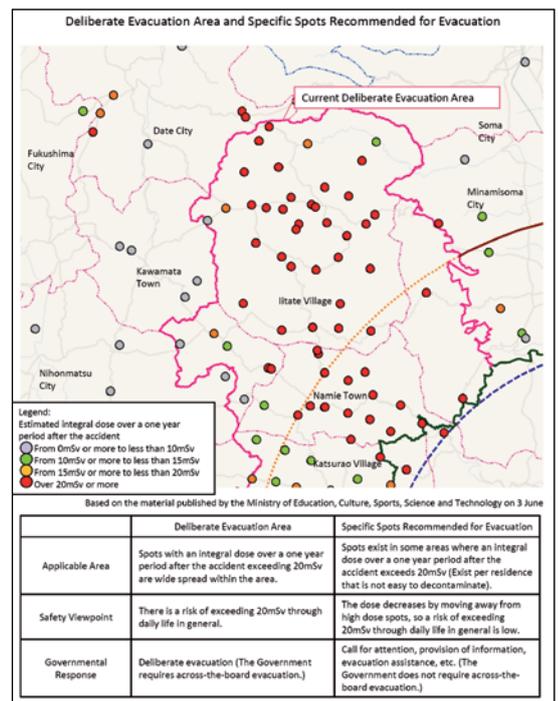


Fig. 5-20 Secteurs d'évacuation en dehors de la zone des 20 km ⁴⁷

Le 30 septembre 2011, la «zone d'évacuation planifiée en cas d'urgence» (zone orange de la figure 5-19) devait être supprimée sur décision du Nuclear Emergency Response Headquarter.

46 | Source: METI http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/evacuation_map_a.pdf
 47 | Source: METI http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/evacuation_map_b.pdf

5.6.2 Mesures de décontamination

Le 26 août 2011, le Parlement japonais votait une nouvelle loi sur les «mesures particulières relatives au traitement de la pollution de l'environnement par des substances radioactives rejetées du fait du séisme Tohoku». Le Centre japonais de maîtrise des accidents nucléaires (Nuclear Emergency Response Headquarters) devait en outre déclarer urgente la décontamination de zones polluées par la radioactivité. La décontamination envisagée a pour objectif de réduire l'exposition aux rayonnements ionisants à moins de 20 mSv par an dans les zones fortement polluées (dont la dose actuelle est supérieure à 20 mSv par an). Dans les autres secteurs, il convient de ne pas dépasser 1 mSv par an. La priorité absolue doit être accordée à la décontamination des jardins d'enfants, des cours d'école et d'autres lieux dans lesquels des enfants séjournent chaque jour.

Diverses mesures ont été engagées pour atteindre ces objectifs. Les villes de Date et de Minamisoma font actuellement l'objet depuis la fin août 2011 de projets pilotes destinés à montrer la manière dont les zones résidentielles peuvent être décontaminées. A Fukushima et dans les préfectures limitrophes, des séances d'information ont été organisées au niveau des communes, entre autres sur les thèmes suivants: «Principes généraux des travaux de décontamination», «Mesures particulières relatives à la manipulation des souillures radioactives», «Règles de précaution à respecter lors de l'exécution de travaux de décontamination par les habitants» ou encore «Procédure de manipulation des déchets recueillis lors des travaux de décontamination».

La décontamination extensive des terres agricoles et des forêts constitue également

un réel défi. Plusieurs études de faisabilité ont été lancées depuis mai 2011. En outre, des méthodes adéquates de décontamination sont mises au point. Le 30 septembre 2011, le Centre de maîtrise des accidents nucléaires a officiellement publié différentes méthodes qui convenaient, à son avis, pour la décontamination des terres agricoles et des forêts. Rappelons à ce propos que l'on ne dispose, à l'heure actuelle et dans le monde entier, de presque aucune expérience concernant les travaux de décontamination sur de grandes surfaces. Le problème de ce qu'il doit advenir des déchets radioactifs issus de la décontamination, de la manière et de l'endroit où ils devraient être entreposés à titre définitif, est aussi encore ouvert.

5.7 Évaluation de la dose reçue par les populations locales

5.7.1 Dose reçue au cours de la phase aiguë

Tout au début, les vents dominants d'ouest ont emporté une part importante des substances radioactives vers l'Océan Pacifique. Comme les gros rejets de substances radioactives en direction de terres habitées n'ont commencé que le 14 mars 2011 vers 20 h environ, il a été possible d'évacuer à temps les 70 000 à 80 000 personnes dans un rayon de 20 km autour de la centrale. Plus tard, cette évacuation devait être étendue à certaines zones plus fortement contaminées en dehors du rayon défini initialement.

Près de 78 200 personnes vivaient dans la zone des 20 km, et 62 400 entre 20 et 30 km (voir /1/).

L'iode s'accumule essentiellement dans la glande thyroïde et les enfants y sont particulièrement sensibles. La prise d'iode non radioactif permet de saturer la thyroïde en iode et d'éviter ainsi que l'iode radioactif ne s'y accumule. La prise unique d'iode non radioactif a été recommandée à certains groupes de personnes, mais les autorités ont mis en garde la population contre toute utilisation non contrôlée de ce produit. Les écoles ont fait l'objet d'une surveillance particulièrement intensive.

Jusqu'à la fin mai 2011, aucune atteinte à la santé n'a été observée chez les 195 345 personnes examinées. Une quantité accrue d'iode radioactif n'a été mesurée dans la glande thyroïde d'aucun des 1 080 enfants examinés (voir /16/). De même, aucune incorporation de strontium radioactif n'a été constatée jusqu'à présent chez les personnes examinées (voir /15/).

5.7.2 Évaluation de la dose reçue sur le long terme

L'Institut français de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) a calculé, sur la base des retombées mesurées au sol (voir figure 5-9 et figure 5-10), les doses externes attendues pour une année (voir tableau 5-5), ainsi que pour 10 et 70 ans (voir tableau 5-6). Le nombre de personnes concernées, également indiqué, se rapporte aux territoires situés en dehors de la zone interdite d'accès de 20 km initialement évacuée. Sur la base de ce calcul, les personnes présentant une dose pronostiquée de plus de 20 mSv pour la première année ont été aussi évacuées (voir figure 5-20).

Ceci est conforme aux recommandations données dans les publications ICRP-103 (voir /17/) et ICRP-109 (voir /18/) de la Commission Internationale de Protection Radiologique.

Dépôts de Cs-134 + Cs-137 (selon le MEXT)	>300 kBq/m ²	>600 kBq/m ²	>1 MBq/m ²	>3 MBq/m ²	6 - 30 MBq/m ²
Dose imputable à l'irradiation externe durant la première année (16,6 mSv/MBq/m ²)	>5 mSv	>10 mSv	>16 mSv	>50 mSv	100 - 500 mSv
Nombre de personnes concernées (en dehors de la zone interdite d'accès)	292'000	43'000	21'100	3'100	2'200

Tab. 5-5 Irradiation externe attendue pour une année de séjour en fonction de la contamination des sols ⁴⁸

Dépôts de Cs-134 + Cs-137 (selon le MEXT)	>300 kBq/m ²	>600 kBq/m ²	>1 MBq/m ²	>3 MBq/m ²	6 - 30 MBq/m ²
Dose imputable à l'irradiation externe au cours des 10 premières années (70 mSv/MBq/m ²)	>19 mSv	>38 mSv	>63 mSv	>190 mSv	380 - 1'900 mSv
Dose cumulée sur la vie entière imputable à l'irradiation externe (70 ans) (160 mSv/MBq/m ²)	>41 mSv	>82 mSv	>136 mSv	>408 mSv	816 - 4'080 mSv
Nombre de personnes concernées (en dehors de la zone interdite d'accès)	292'000	43'000	21'100	3'100	2'200

Tab. 5-6 Irradiation externe attendue pour 10 et 70 années de séjour en fonction de la contamination des sols ⁴⁹

48 | Source: /22/

49 | Source: /22/

Sans application d'autres mesures (par ex. décontamination, mise en place d'écrans, limitation de la durée de séjour à l'extérieur, etc.), cela signifierait que les personnes non évacuées accumuleraient, du fait de l'irradiation externe, une dose sur la vie entière de 100 mSv tout au plus. Ce calcul ne tient pas compte des doses supplémentaires dues au rayonnement direct du nuage radioactif au début de l'accident ou à la consommation de produits alimentaires éventuellement contaminés. Compte tenu de l'évacuation précoce, des mesures effectuées sur bon nombre de personnes et des dispositions préventives appliquées dans le domaine des produits alimentaires (contrôle de leur contamination et le cas échéant interdiction de commercialisation), il convient de partir du principe que ces contributions de dose ne devraient présenter qu'une importance très secondaire.

5.8 Résumé et évaluation

Suite à l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi, des substances radioactives ont été rejetées à partir du 12 mars 2011. Au cours de la phase initiale (jusqu'au 15 mars 2011), des gaz rares ont été rejetés, principalement lors des opérations de décompression des enceintes de confinement primaire des différentes tranches de réacteurs et lors de l'explosion du bâtiment du réacteur de la tranche 1. Comme les vents dominants portaient vers la mer au cours de cette phase aiguë et que les autorités japonaises ont engagé précocement des opérations d'évacuation, l'irradiation de la population par le rayonnement direct du nuage radioactif est restée limitée.

A partir du 15 mars 2011, et notamment après l'explosion d'hydrogène dans la tranche 2, de grandes quantités d'iode et de césium radioactifs ont été rejetées dans l'environnement. Comme ce jour-là les vents, accompagnés de fortes précipitations, avaient viré au sud-est, le secteur géographique situé au nord-ouest de l'installation a été fortement contaminé par les retombées de substances radioactives jusqu'à une distance de 50 km. Ce phénomène a entraîné dans la zone concernée des augmentations partiellement très importantes du débit de dose ambiante, mais également une contamination des produits agricoles dans ces secteurs. En dehors des zones évacuées par les autorités japonaises, les débits de dose locaux présentent encore à l'heure actuelle (novembre 2011) des valeurs telles qu'il en résulterait pour une personne une dose de 20 mSv par irradiation externe au cours de la première année faisant suite à l'accident, ou encore de 100 mSv sur une vie entière si cette personne se tenait en permanence à l'extérieur. La dose supplémentaire due à la consommation de produits alimentaires contaminés (incorporation) reste quant à elle d'importance très secondaire pour la population japonaise.

En dehors des rejets de substances radioactives dans l'atmosphère, le défaut d'étanchéité d'un chemin de câbles a été la cause début avril 2011 d'importants rejets de radioactivité dans la mer. Les concentrations radioactives de l'eau à proximité de la centrale nucléaire endommagée sont revenues à la normale à la fin du mois d'avril. Il convient toutefois de noter que l'on trouve encore au Japon des échantillons isolés de produits de la pêche dans lesquels la valeur limite pour le Cs-137 est dépassée. Le gouvernement japonais a publié entre-temps un plan détaillant les possibilités de mesures de décontamination destinées à poursuivre la réduction des irradiations subies par la population.

6 Effets sur la population en Suisse

(contribution de l'Office fédéral de la santé publique OFSP)

6.1 Vue d'ensemble

L'accident provoqué dans la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi par le séisme extrême du 11 mars 2011 et le tsunami qui en est résulté ont entraîné dans les jours suivants le rejet d'importantes quantités de radioactivité. Des masses d'air radioactives issues de cet accident de réacteur ont également atteint la Suisse à la fin mars 2011, quoique sous une forme très diluée.

La radioactivité dans l'environnement et dans les produits alimentaires est surveillée en Suisse par l'Office fédéral de la santé publique (OFSP). Cette surveillance est assurée en collaboration avec les laboratoires cantonaux et avec d'autres laboratoires spécialisés de la Confédération et des cantons. Après l'accident de réacteur de Fukushima Dai-ichi de mars 2011, le plan permanent de prélèvement d'échantillons a été complété par des échantillonnages complémentaires de filtres à air, d'herbe, de légumes et de lait. Le présent chapitre documente les résultats de mesure les plus importants et les conclusions qui en sont tirées.

Les concentrations radioactives mesurées en Suisse ont toujours été inférieures au seuil de

détection des réseaux d'alerte automatiques (NADAM, MADUK, RADAIR) et sont restées inférieures d'un facteur 1 000 à 10 000 aux concentrations mesurées en Suisse après l'accident de Tchernobyl.

Des instruments de mesure ultrasensibles ont permis de détecter, dans l'air proche du sol, principalement une augmentation de la concentration en iode-131. De plus faibles concentrations de radio-isotopes issus de Fukushima, tels que par ex. le Cs-134 et le Cs-137, ont également pu être mises en évidence. L'I-131 s'est présenté sous forme lié à des particules, mais également, à des concentrations jusqu'à 5 fois supérieures, sous forme gazeuse. La concentration globale maximale d'iode-131 (lié à des particules et sous forme gazeuse) mesurée en Suisse a atteint environ 2 000 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ dans l'air à proximité du sol. Par l'air, des traces d'I-131 sont parvenues dans l'eau de pluie, ainsi que sur l'herbe et dans les légumes cultivés en pleine terre (quelques Bq par kilo de matière fraîche). Parmi les échantillons de lait analysés en provenance de Suisse, un seul présentait des traces d'I-131 (0,1 Bq/kg). La radioactivité issue de Fukushima mise en évidence en Suisse a donc été insignifiante pour la santé de la population suisse. Depuis la mi-avril 2011, on n'observe plus dans l'air en Suisse de radio-isotopes issus de Fukushima (voir figure 6-1).

Des échantillons d'aérosols ont été collectés au moyen de préleveurs à haut débit (PHD) en cinq endroits du territoire, puis analysés en laboratoire par spectrométrie gamma. Les rejets de Fukushima ont entraîné en mars et en avril 2011 des valeurs de mesure nettement plus élevées que la normale, mais qui sont restées en tout temps sans danger pour la santé de la population suisse.

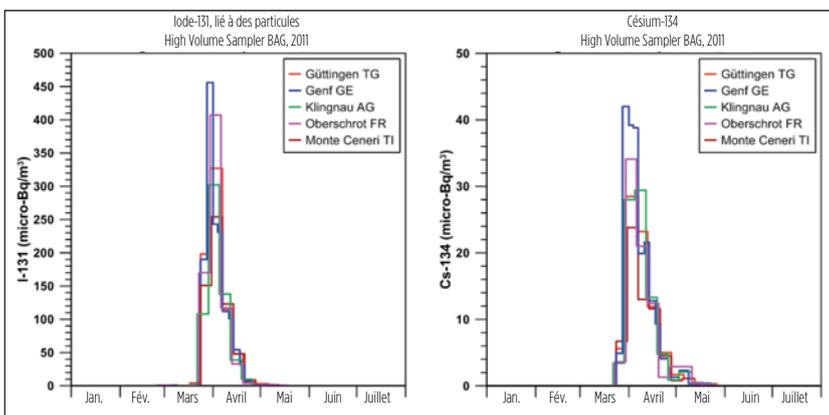


Fig. 6-1 Évolution des concentrations d'I-131 (à gauche, lié à des particules) et des concentrations de Cs-134 (à droite) en Suisse, du début janvier jusqu'à la fin juillet 2011 ⁵⁰

6.2 Mesures de la radioactivité de l'air

6.2.1 Préleveurs d'aérosols à haut débit (PHD, filtres à air)

Les échantillons destinés à des mesures de haute précision de la radioactivité des poussières en suspension dans l'air sont prélevés en Suisse par cinq stations équipées de préleveurs d'aérosols à haut débit. Pour ce faire, une puissante pompe aspire les aérosols (poussières en suspension) pendant une semaine à travers un filtre. Le filtre fait ensuite l'objet d'une analyse spectrométrique gamma au laboratoire de l'OFSP à Berne pour déterminer les différents nucléides présents. Pour les cinq stations on a clairement mis en évidence la radioactivité libérée et dispersée dans le monde entier par l'accident de réacteur de Fukushima (voir figure 6-1). Les forts taux d'accroissement ont concerné essentiellement les concentrations d'I-131 (concentration maximale de $450 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) et dans une moindre mesure les isotopes du césium (Cs-134 et Cs-137). Les concentrations maximales de Cs-134 ont été près de dix fois inférieures à celles d'I-131. Le rapport entre le Cs-134 et le Cs-137 est resté proche de 1. Quelques échantillons ont permis la mise en évidence d'isotopes de courte période tels que le tellure-132 (Te-132), l'I-132 et le Cs-136.

La figure 6-2 compare l'évolution des concentrations d'I-131 à Genève avec celles de stations de mesure situées au Japon (Takasaki, province de Gunma), aux États-Unis (côte ouest, Sacramento, Californie) ainsi qu'avec la station de Schauinsland près de Fribourg en Allemagne, immédiatement après les accidents de Fukushima (source: www.bfs.de). La ligne supérieure de tirets rouges indique la moyenne quotidienne maximale mesurée

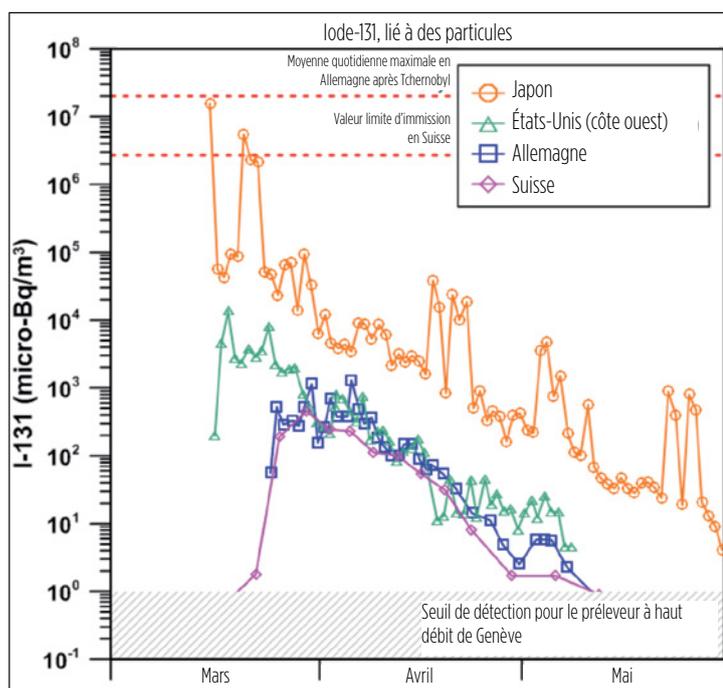


Fig. 6-2 Évolution de la concentration d'iode-131 lié à des particules dans l'atmosphère ⁵¹

en Allemagne après l'accident de Tchernobyl en 1986. La valeur limite suisse d'immissions (concentration maximale admissible pour une longue durée) est également représentée sur la figure.

Les stations de mesure européennes ont enregistré une radioactivité accrue à partir du 22 mars 2011 environ. Les valeurs les plus élevées (jusqu'à $6\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'I-131 lié à des particules) ont été mesurées entre le 28 mars et le 6 avril 2011, et ceci plutôt dans la partie septentrionale de l'Europe. Vers la fin mai 2011, les concentrations mesurées en Europe étaient revenues à des taux analogues à ceux relevés avant l'accident, c'est-à-dire dans la plupart des cas au-dessous des seuils de détection.

6.2.2 I-131 sous forme gazeuse

En Suisse, l'iode sous forme gazeuse est mesuré à l'aide de quatre détecteurs (NaI) qui déclenchent une alerte automatique (réseau RADAIR-Iode) en cas d'augmentation des valeurs. Ces détecteurs sont localisés dans les cantons de Genève, de Fribourg, d'Argovie et du Tessin. Les quantités d'I-131 sous forme gazeuse apparues en Suisse après les accidents du Japon ont été trop faibles pour être détectées directement par le système d'alerte de présence d'iode radioactif. En revanche, on a procédé à l'analyse en laboratoire de quelques cartouches filtrantes de granulats d'argent/nitrate qui fixent l'iode sous forme gazeuse, méthode qui permet de diminuer le seuil de détection. C'est ainsi que pour la période du 31 mars au 7 avril 2011, on a observé sur trois sites RADAIR-Iode des activités d'iode-131 sous forme gazeuse comprises entre 1 000 et 1 800 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Ces concentrations étaient ainsi quatre à six fois supérieures à celle de l'I-131 lié à des particules, ce qui est bien corrélé avec d'autres mesures effectuées ailleurs en Europe.

6.2.3 Mesures sur filtres aéroportés à haute altitude (FHA)

Des échantillons d'air prélevés à très haute altitude ont été recueillis sur des filtres à air montés sur deux chasseurs Tiger F5 des forces aériennes suisses.

Les résultats des mesures sur les FHA sont représentés dans le tableau 6-1. L'air à haute altitude a présenté à fin mars 2011, avec jusqu'à 1 900 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, des activités ana-

logues à celles de l'air au sol dans le nord de l'Europe.

Les valeurs plus faibles mesurées au sol en Suisse tiennent probablement à la situation météorologique (vent de secteur sud).

Le spectre représenté sur la figure 6-3 correspond à celui d'un échantillon d'aérosol prélevé le 30 mars 2011 à une altitude de 7 900 m par un Tiger F5.

Date	Altitude [m]	Activité spécifique par nucléide [$\mu\text{Bq}/\text{m}^3$]				
		Be-7	Cs-137	Cs-134	I-131	Co-60
23.03.2011	6'100	5'000 \pm 750	<17	<15	140 \pm 30	<16
24.03.2011	7'000	4'200 \pm 640	<16	<13	<20	<23
25.03.2011	8'070	5'500 \pm 830	<20	<19	230 \pm 40	<30
25.03.2011	5'030	6'900 \pm 900	<11	<9	40 \pm 12	<11
30.03.2011	5'200	2'000 \pm 330	25 \pm 12	<8	280 \pm 40	<8
30.03.2011	7'900	10'500 \pm 1'500	170 \pm 40	170 \pm 30	1'900 \pm 260	<14
08.04.2011	12'650	31'800 \pm 4'000	30 \pm 16	<10	21 \pm 4	<13

Tab. 6-1 Résultats de mesure sur des échantillons prélevés à haute altitude ⁵²

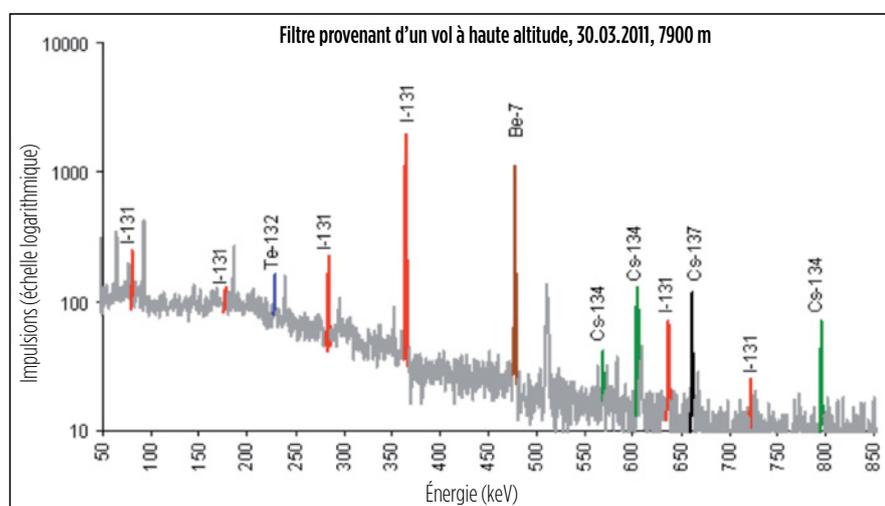


Fig. 6-3 Spectre gamma d'un filtre à air analysé en Suisse, mettant en évidence des radio-isotopes issus de l'accident de réacteur de Fukushima Dai-ichi ⁵³

⁵² | Source: OFSP <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/02372/11747/index.html?lang=de>

⁵³ | Source: OFSP

6.3 Échantillons de produits alimentaires et de l'environnement

La contamination de l'air a également entraîné de faibles dépôts de radionucléides au sol. Des mesures de radioactivité effectuées sur des échantillons d'herbe prélevés en Suisse ont indiqué des valeurs de l'ordre de quelques Bq/m². Les activités en I-131 dans l'herbe ont atteint au maximum quelques Bq/kg de matière fraîche. Des valeurs supérieures ont été observées en altitude où les quantités de précipitations sont relativement plus importantes. Des activités analogues à celles de l'herbe ont aussi été mesurées comme prévu sur des légumes à feuilles non lavés. Le facteur de transfert de l'I-131 entre l'herbe et le lait est de l'ordre de 1/3, ce qui signifie que pour une contamination durable de 3 Bq/kg de matière fraîche on peut s'attendre à une contamination pouvant aller jusqu'à 1 Bq/kg dans le lait. Sur les échantillons de lait analysés après Fukushima, un seul a présenté de faibles traces d'I-131 (0,1 Bq/kg). Au début du mois d'avril, peu de vaches étaient déjà nourries à l'herbe fraîche. La valeur limite fixée pour l'iode-131 dans les produits alimentaires en provenance du Japon est de 300 Bq/kg dans les aliments liquides (lait) et de 2'000 Bq/kg dans tous les autres produits alimentaires. Bien que de l'I-131 ait été mis en évidence dans de l'eau de pluie, l'eau de boisson n'a subi comme attendu aucune contamination radioactive. Quelques traces infimes de Cs-134 clairement imputables à des radio-isotopes en provenance du Japon ont aussi été détectées dans quelques échantillons d'herbe. Trois échantillons de lait et trois échantillons de salade prélevés au début d'avril dans la région de Lausanne ont fait l'objet d'une analyse de présence de strontium radioactif (Sr-90). Aucune augmentation des valeurs de concentration n'a été observée.

Milieu	Nombre d'échantillons	Valeur maximale en I-131	Valeur médiane en I-131
Air (PHD)	44	456 µBq/m ³	48 µBq/m ³
Pluie	12	1.4 Bq/l	0.2 Bq/l
Légumes	29	1.2 Bq/kg	< 0.5 Bq/kg
Herbe	22	4.6 Bq/kg	0.7 Bq/kg
Lait	61	0.1 Bq/kg	< 0.2 Bq/kg
Eau de boisson	22	< 0.1 Bq/l	
Mesure in situ	3	< seuil de détection	

Tab. 6-2 Récapitulatif des échantillons d'environnement et de produits alimentaires analysés à la suite des accidents de réacteurs de Fukushima (15 mars au 30 avril 2011) ⁵⁴

Le tableau 6-2 donne le récapitulatif des mesures effectuées sur des produits alimentaires et des échantillons d'air et de sol prélevés en Suisse entre la mi-mars et la mi-mai 2011.

6.4 Résumé et évaluation

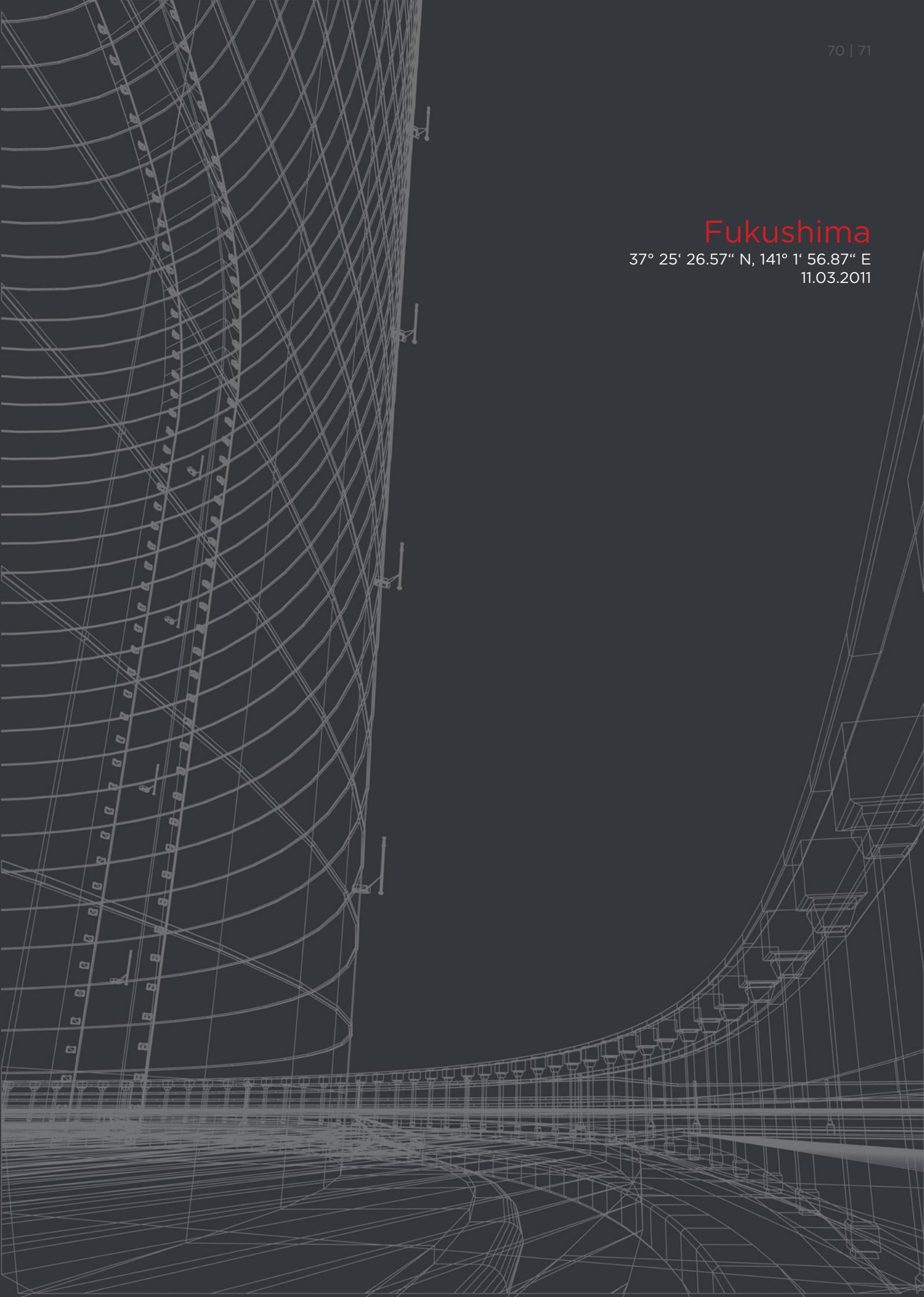
Bien que des traces de la radioactivité libérée à Fukushima Dai-ichi aient pu être mises en évidence en Suisse par des procédures de mesure de haute sensibilité, à aucun moment la population suisse n'a encouru de danger pour sa santé.

Les contributions de doses reçues par irradiation externe et par inhalation ont été négligeables.

La radioactivité en provenance de Fukushima ingérée avec la nourriture n'aurait atteint que 0,5 µSv, même en cas de consommation de 25 kg des légumes les plus contaminés (légumes à feuilles). Cette valeur correspond à un dix millième de l'exposition annuelle de la population suisse qui est d'environ 5 mSv.

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E
11.03.2011



7 Comparaison des événements de Fukushima avec ceux de Tchernobyl

(avec des contribution de la „Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH“ allemande, GRS)

7.1 Déroulement de l'accident et rejets

Tchernobyl: Dans la nuit du 25 au 26 avril 1986, le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl a explosé à la suite d'un accident de criticité. L'accident est dû à un excès de puissance incontrôlé dans le cœur du réacteur, mécanisme associé entre autres aux caractéristiques physiques des réacteurs de type RBMK (acronyme russe pour Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny, c'est-à-dire réacteur de haute puissance à tubes de force).

En comparaison avec les explosions qui se sont produites à Fukushima Dai-ichi, les dommages causés au bâtiment de réacteur ont été bien plus graves. C'est ainsi que l'explosion a détruit de grandes parties du bâtiment du réacteur de la tranche 4, de la salle des turbines et des constructions intermédiaires. Les parois du hall de réacteur ont été partiellement détruites, la toiture totalement. La plaque horizontale supérieure de la cuve du réacteur, d'une masse de 3 000 t environ, a été soulevée et est toujours en équilibre sous un angle de 15° par rapport à la verticale. Le secteur sud-est de la plaque inférieure, de même que le système de refroidissement de secours logé dans la partie nord-est du bâtiment de réacteur, ont été entièrement détruits. Le puits de réacteur qui logeait le cœur est pratiquement vide. La majeure partie du combustible nucléaire a été projeté dans le hall de réacteur où se trouve sous forme de lave figée sous la position initiale du réacteur.

L'explosion du réacteur et l'incendie consécutif de plusieurs jours qui a consumé le graphite du cœur du réacteur ont provoqué d'énormes rejets de substances radioactives dans l'environnement et l'éparpillement de

décombres hautement radioactifs du cœur du réacteur tout autour de la centrale nucléaire.

Au cours des rejets intenses qui auront duré dix jours environ, les conditions météorologiques dans les zones proches et éloignées du site ont évolué en permanence. Les substances radioactives libérées par l'explosion, puis par l'incendie du cœur, ont tout d'abord été soulevées en tourbillons jusqu'à 1 200 m d'altitude, puis entraînées en direction du nord-ouest au-dessus de la Biélorussie jusqu'en Finlande et dans le centre et le nord de la Suède. Le jour suivant, le vent a soufflé vers l'ouest. Les masses d'air contaminées ont alors été entraînées en direction de la Pologne, de la Tchécoslovaquie et de l'Autriche jusque dans le sud de l'Allemagne où les premières retombées ont été enregistrées entre le 30 avril et le 1er mai 1986. Les jours suivants, le vent a tourné en direction de la Grèce et de la Turquie, pour revenir ensuite vers les pays scandinaves.

Fukushima Dai-ichi: L'évolution du débit de dose ambiante sur le site Fukushima Dai-ichi montre en revanche plusieurs rejets séparés sur la période du 11 au 27 mars 2011 environ (voir figure 3-2). Au cours de cette période, le vent a essentiellement soufflé de l'ouest, ce qui a entraîné la majeure partie des rejets vers l'Océan Pacifique. Le 15 mars 2011 toutefois, une circulation d'air de secteur sud-est s'est formée, associée à de fortes précipitations ; ainsi ce jour-là d'importantes retombées de substances radioactives dans une bande de terre orientée vers le nord-ouest par rapport au site ont eu lieu (voir chapitre 5.2).

Tchernobyl: La quantité de substances radioactives libérées jusqu'au 6 mai 1986 a été estimée en 1986 à $1.8E+18$ Bq avec une incertitude de 3 50 %, sans prise en comp-

te des gaz rares de courte période et du tritium. La part du combustible nucléaire rejetée hors du réacteur lors de l'accident a été déterminée en 1986 à $3,5 \pm 0,5$ % de la masse du combustible (190 t). Ces deux estimations ont été confirmées par des analyses plus récentes. Les gaz rares krypton et xénon ainsi que le tritium présent dans le cœur se sont pratiquement intégralement volatilisés. Les plus grandes incertitudes subsistent en matière d'évaluation des fractions rejetées des isotopes de césium et d'iode très volatiles. Un récent bilan aboutit à une libération de césium-137 d'une valeur de 33 ± 10 % de l'inventaire du cœur. Ceci correspond à une activité d'environ $2.9E+17$ Bq, voir tableau 7-1.

La détermination des rejets d'isotopes d'iode est encore plus aléatoire, qu'il s'agisse d'aérosols ou de la forme gazeuse. La relative constance du rapport entre l'iode-131 et le césium-137 dans les retombées mesurées dans la plupart des États européens permet de limiter vers le bas la quantité d'iode libérée. L'estimation la plus précise fait état d'une libération d'au moins 50 % de l'iode-131 contenu dans le cœur du réacteur. Ceci correspond, compte tenu de la désintégration radioactive, à une libération d'activité d'environ $3.1E+18$ Bq. La fraction rejetée du strontium-90, élément représentatif du groupe des radionucléides peu volatils, est estimée à 4 % de l'inventaire du cœur. Pour ce qui est des rejets d'actinides, pour la plupart émetteurs alpha de longue période, dont notamment le plutonium, l'estimation tourne autour de 3 %.

Les fractions libérées indiquées dans le tableau 7-1 correspondent aux valeurs mentionnées dans le document UNSCEAR 2000 (voir /19/).

Radionucléide	Période [jours]	Inventaire du cœur [Bq]	Fraction libérée estimée [%]
Kr-85	3'930	3.3E+16	100
Xe-133	5.27	7.3E+18	100
I-131	8.05	3.1E+18	50
Te-132	3.25	3.2E+18	15
Cs-134	750	1.9E+17	33
Cs-137	11'000	2.9E+17	33
Ru-106	368	2.0E+18	3
Sr-89	53	2.3E+18	4
Sr-90	10'200	2.0E+17	4
Pu-238	31'500	1.0E+15	3
Pu-239	8'900'000	8.5E+14	3
Pu-240	2'400'000	1.2E+15	3
Pu-241	4'800	1.7E+17	3
Cm-242	164	2.6E+16	3

Tab. 7-1 Fraction des radionucléides les plus importants libérés lors de l'accident de Tchernobyl, état des connaissances 1996 ⁵⁵

Fukushima Dai-ichi: La NISA a publié le 12 avril 2011 deux évaluations /5/ des rejets atmosphériques totaux de substances radioactives. Ces évaluations ont été respectivement réalisées par la NISA et le NSC. Selon ces documents, les rejets estimés de $1.3E+17$ Bq pour l'iode-131 et de $6.1E+15$ Bq pour le césium-137 correspondent à environ 10 % des quantités de substances radioactives libérées lors de l'accident de Tchernobyl (équivalent iode). Au début du mois de juin 2011, le gouvernement japonais a publié un rapport pour l'AIEA /1/ actualisant et précisant les évaluations des rejets atmosphériques de substances radioactives. Le résultat de ces calculs, comportant un large spectre de nucléides, est reproduit dans le tableau 2-3.

Dans la comparaison avec l'accident de Tchernobyl, il s'avère que les rejets d'iode et de césium prédominent à Fukushima. Notamment la part des radionucléides faiblement volatils tels que le strontium (voir /31/) ou encore celle des actinides émetteurs alpha, tels que le plutonium (voir /32/), sont de plusieurs ordres de grandeur plus faibles.

7.2 Situation radiologique sur le site des installations

Tchernobyl: Après l'explosion de la tranche 4, l'urgence était d'isoler le réacteur détruit de son environnement immédiat afin d'empêcher la poursuite du rejet de substances hautement radioactives. C'est pourquoi la période de mai à octobre 1986 a été consacrée à la construction d'une structure d'acier et de béton autour du réacteur, structure appelée aussi «sarcophage», afin de le confiner. Compte tenu de l'urgence, l'opération n'a pas pu faire l'objet d'une planification détaillée.

Fukushima Dai-ichi: Il est prévu de réaliser des encapsulages de protection sur les bâtiments des tranches 1, 3 et 4 afin d'empêcher la poursuite du rejet de matières radioactives. Il s'agit là d'une structure en acier recouverte d'un film plastique renforcé, étanche à l'eau et tendu sur la structure métallique (voir figure 7-1). Les travaux de réalisation sur le site de Fukushima Dai-ichi ont commencé le 10 août 2011 sur la tranche 1. Selon les informations communiquées par TEPCO, l'exploitant, les travaux d'encapsulation ont été achevés avec succès le 28 octobre 2011. TEPCO a également précisé que l'encapsulation des tranches 3 et 4 commencerait au plus tôt durant l'été 2012, lorsque tous les décombres auront été évacués.



Fig. 7-1 Encapsulage de la tranche 1, vue du nord ⁵⁶

Tchernobyl: Sur les 190 t de combustible nucléaire usé qui se trouvaient dans la tranche 4 lors de l'explosion, 96 % sont encore présents à l'intérieur du sarcophage, environ 0,5 à 1 % sont dispersés sur le site jusqu'à 500 m du sarcophage, essentiellement sous forme de particules fines, mais également sous forme de décombres de la zone active. Une autre fraction d'environ 1,5 % a été dispersée sous forme de fines particules dans une zone de 80 km autour du site, la plus grande part étant retombée dans un rayon de moins de 30 km de la centrale. Le solde de 1,5 % environ a enfin été dispersé dans l'atmosphère, sous forme de particules très fines, au-delà de ces 80 km, en partie beaucoup plus loin. La masse totale de la poussière radioactive contenue dans le sarcophage est estimée à 1 t avec une activité de $4.3E+15$ Bq. Les locaux inférieurs du sarcophage renferment également environ 3 000 m³ d'eau contaminée provenant de l'extinction et de la pluie qui s'est infiltrée.

Fukushima Dai-ichi: Par l'injection d'eau pratiquée dans les premières heures, voire les premiers jours après l'accident, les réacteurs et les piscines de stockage d'assemblages combustibles usés ont été initialement réalimentés en eau non contaminée (tout

d'abord avec de l'eau de mer, plus tard avec de l'eau douce). Ceci a conduit à la production quotidienne de plusieurs centaines de mètres cubes d'eau contaminée, essentiellement issue des cuves de réacteur. De plus, d'importants volumes d'eau contaminée se sont accumulés dans les bâtiments, en sous-sol, et hors des bâtiments, dans des fossés et des puits. Des défauts d'étanchéité au niveau des prises d'eau ont provoqué à plusieurs reprises des déversements d'eau hautement contaminée dans l'Océan Pacifique. D'après des informations du JAIF, on a eu sur le site jusqu'à 100 000 m³ d'eau contaminée, d'une activité estimée à 720 000 TBq.

Tchernobyl: La figure 7-2 indique les débits de dose ambiante mesurés sur le site de Tchernobyl 10 ans après l'accident. Le débit de dose ambiante du rayonnement gamma se situe entre 0,3 et 0,5 mSv/h à 1 m au-dessus du sol à proximité immédiate du sarcophage, de l'aile de dégazage et de la salle des turbines de la tranche 4. Le débit de dose à des distances jusqu'à 150 m des bâtiments cités est encore de 0,1 à 0,2 mSv/h. On rencontre également sur le site, essentiellement contre la paroi ouest du

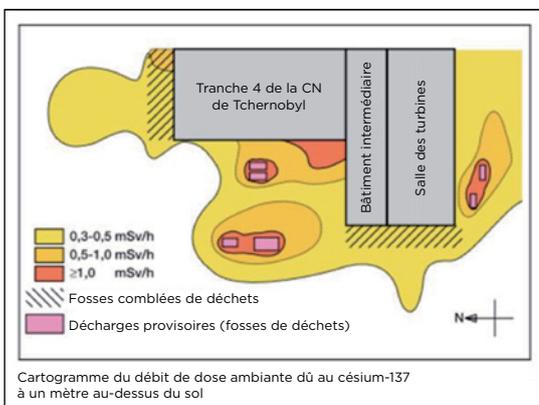


Fig. 7-2 Débit de dose ambiante, Tchernobyl tranche 4, 1 m au-dessus du sol ⁵⁷

sarcophage, quelque 10 fosses de déchets (décharges) de matières radioactives d'une dimension de 10 x 10 m environ. Au moins trois de ces fosses sont remplies de déchets hautement radioactifs, vraisemblablement des décombres issus de la zone active. Ces fosses ont été creusées et remplies au fur et à mesure des travaux de décontamination et de construction du sarcophage. Les concentrations de Cs-137 sur le site de la centrale nucléaire sont comprises entre 1 000 et plus de 10 000 kBq/m².

Fukushima Dai-ichi: Sur le site, le débit de dose ambiante au point de mesure «Bâtiment principal, côté sud» est actuellement de 0,3 mSv/h environ. Des débits de dose nettement plus élevés sont en revanche mesurés à proximité immédiate et à l'intérieur des tranches 1 à 4. Les échantillons de sol prélevés ont essentiellement permis la mise en évidence de dépôts d'iode-131, de césium-137 et de césium-134. Compte tenu de sa courte période de 8,02 jours, la contribution de l'iode-131 au débit de dose ambiante a pratiquement disparu depuis, ceci est également le cas à Tchernobyl.

Tchernobyl: En 1986, une commission médicale décidait des critères applicables aux mesures d'évacuation dans la zone actuelle des 30 km autour de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Au cours des premières semaines de l'évacuation, l'urgence a consisté à protéger du rayonnement ionisant les habitants et en particulier les enfants et les femmes enceintes vivant à proximité immédiate de la centrale nucléaire.

Le débit de dose ambiante a constitué à Tchernobyl le critère de décision pour l'évacuation. Il a donc été décidé d'évacuer en premier lieu les zones dans lesquelles la population risquait de recevoir une dose supplémentaire de plus de 5 mSv/an /20/. 116 000 personnes ont été concernées par l'évacuation d'urgence réalisée le 27 avril.

Les 2 et 3 mai 1986 une deuxième phase d'évacuation a impliqué près de 10 000 personnes dans la zone des 10 km autour du réacteur accidenté.

Les 4 et 5 mai 1986, la zone des 30 km autour du réacteur a également été évacuée. Au total, et selon un rapport des Nations Unies, ce sont près de 400 000 personnes (150 000 en Biélorussie, 150 000 en Ukraine et 75 000 dans la Fédération de Russie) qui ont dû quitter leur domicile de gré ou de force.

Fukushima Dai-ichi: Une évacuation de la population dans un rayon de 3 km autour de la tranche 1 a été décidée au soir du 11 mars 2011. Avant la phase du nuage, la zone d'évacuation a été étendue plusieurs fois dans une même journée jusqu'à un rayon final de 20 km. Le 15 mars 2011, on a recommandé à la population résidant au-delà des 20 km et jusqu'à 30 km de séjourner dans les habitations. Le 10 avril 2011, la décision a été prise d'étendre la zone d'évacuation des 20 km aux zones dans lesquelles on pouvait s'attendre à une exposition annuelle de plus de 20 mSv. Les mesures d'évacuation ont ainsi concerné environ 153 000 habitants /22/.

7.3 Situation radiologique dans l'environnement

Tchernobyl: En dehors de la zone interdite d'accès, les territoires de Russie, de Biélorussie et d'Ukraine présentant un niveau d'activité en césium-137 supérieur à 37 kBq/m² ont été définis comme contaminés et soumis à un contrôle radiologique. Ceci concernait, 10 ans après l'accident, et selon des données officielles, une surface de 46 500 km² en Biélorussie /23/, de 57 000 km² en Russie /24/ et de 41 800 km² en Ukraine (zone interdite d'accès comprise) /25/.

Fukushima Dai-ichi: Par comparaison, les secteurs géographiques japonais d'un niveau d'activité en césium-137 supérieur à 30 kBq/m² dans la première couche de sol se limitent à moins de quelques milliers de km² (voir figure 5-19). Ceci a entraîné des expositions bien moindres de la population (voir tableau 7-3) et permet, après application de mesures de décontamination appropriées, le retour prochain de nombreux habitants dans leur lieu de vie d'origine.

Tchernobyl: Compte tenu des différences géographiques d'implantation des sites de Tchernobyl et de Fukushima, les effets des accidents sur les eaux avoisinantes sont très différents. La centrale nucléaire de Tchernobyl est située à l'intérieur des terres, sur la rive du fleuve Prypiat. L'eau de refroidissement était prélevée dans un étang de refroidissement situé au sud-est de la centrale (voir figure 7-4). Cet étang constitue du point de vue de l'écologie un objet particulier. Long de 11,4 km, large de 2 km et d'une profondeur moyenne comprise entre 6 et 20 m, il offre une capacité d'environ 149 millions de m³. Il a subi une forte contamination du fait de l'accident. Des particules radioactives et des «particules chaudes» ont été précipitées dans cet étang par le nuage radioactif. A ceci s'ajoute près de 5 000 m³ d'eau fortement contaminée qui ont été déversés dans l'étang. Au total la radioactivité est estimée à quelque 2 200 TBq. Des mesures montrent que la contamination est actuellement essentiellement constituée de césium-137 et de strontium-90, dont 90% sont liés aux sédiments. Entre 3,6 et 14 GBq de strontium-90 s'écoulent chaque année de cet étang de refroidissement dans le fleuve Prypiat /27/.

Fukushima Dai-ichi: Le site de la centrale nucléaire se situe directement sur la côte de l'Océan Pacifique. Du fait des mesures d'urgence prises pour le refroidissement des réacteurs, une partie des quelque 100 000 tonnes d'eau hautement contaminée

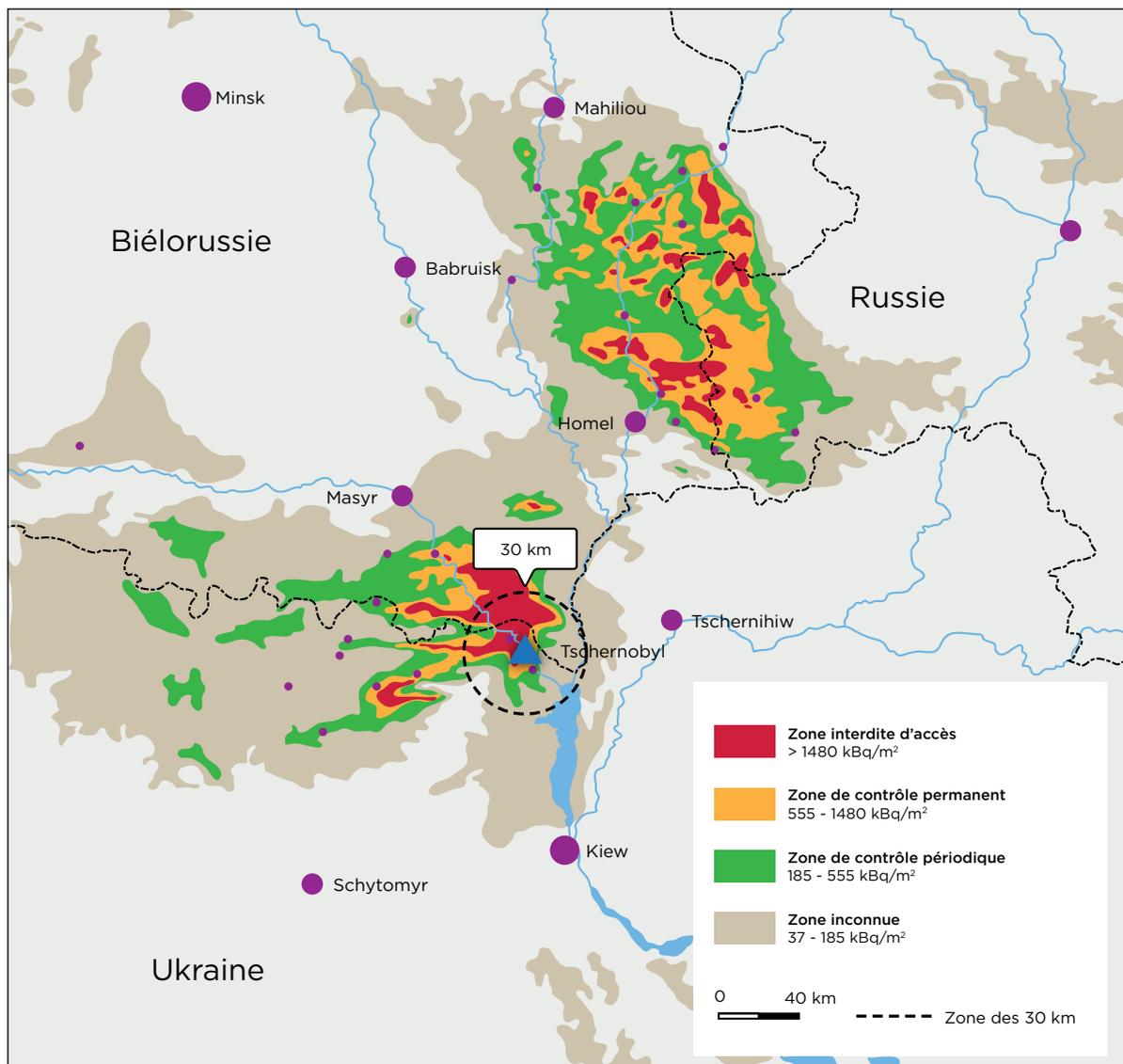


Fig. 7-3 Contaminations au césium-137 en Ukraine, en Biélorussie et en Russie après l'accident de réacteur de Tchernobyl ⁵⁸

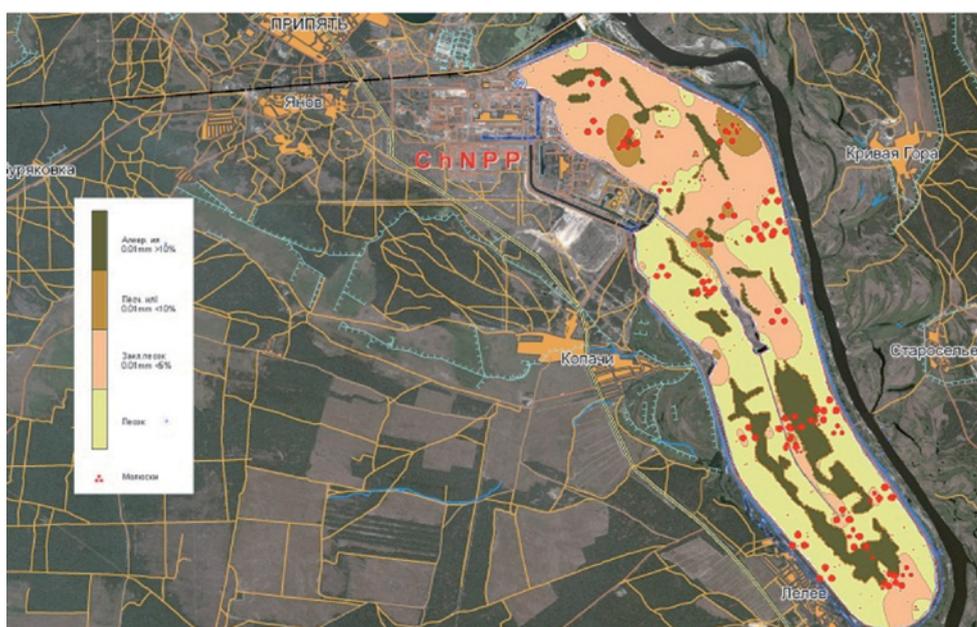


Fig. 7-4 Étang de refroidissement de la centrale nucléaire de Tchernobyl avec indication des sédiments ⁵⁹

58 | Source: University of Texas at Austin, http://www.lib.utexas.edu/maps/commonwealth/chornobyl_radiation96.jpg

59 | Source: /21/

s'est écoulée de manière incontrôlée dans le Pacifique (voir chapitre 2.3). Ceci a entraîné une forte augmentation des concentrations radioactives en iode et en césium dans l'eau de mer.

D'après des estimations de TEPCO, près de 11 000 tonnes d'eau d'une activité globale d'environ $5E+15$ Bq ont été déversées, de manière contrôlée par pompage ou incontrôlée du fait de fuites, entre le 1er avril et le 11 mai 2011 dans le Pacifique (voir chapitre 2.4). Les concentrations mesurées en césium-137 aux points de mesure le long de la côte sont indiquées dans la figure 7-5 ci-après. Jusqu'au 8 avril 2011, on observe une forte augmentation des concentrations radioactives en iode et en césium. Depuis, la pollution de l'eau de mer par des substances radioactives régresse progressivement avec des concentrations qui se situent en dessous du seuil de détection pour les points de mesure qui ne sont pas situés à proximité immédiate des installations nucléaires.

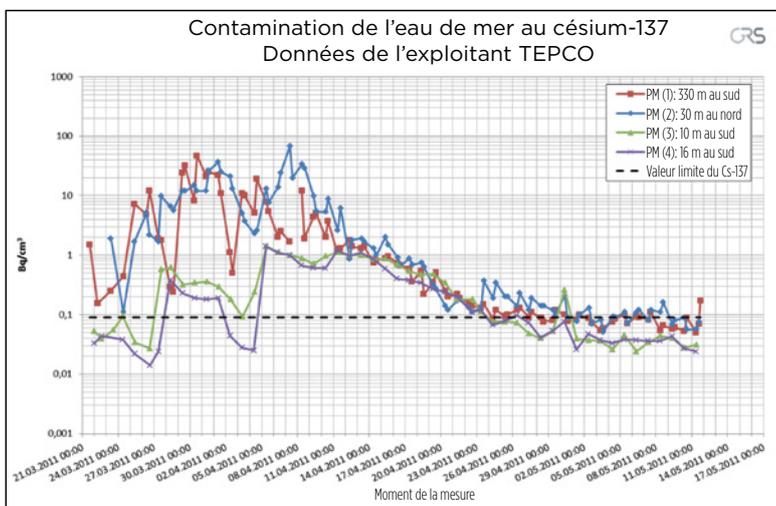


Fig. 7-5 Fukushima Dai-ichi: contamination de l'eau de mer au césium-137 ⁶⁰

7.4 Exposition aux rayonnements ionisants des équipes d'intervention et de la population locale

Tchernobyl: A Tchernobyl, la lutte directe contre l'incendie et l'effort pour recouvrir le cœur ouvert du réacteur a mobilisé le personnel d'exploitation du réacteur, les pompiers ainsi que des hommes de troupe, par ex. pilotes d'hélicoptère. Ces personnes ont été très fortement irradiées. Près de 300 d'entre elles ont dû être hospitalisées, dont 134 présentaient des syndromes d'irradiation aiguë avec atonies, vomissements, vertiges et brûlures de la peau. Malgré des soins médicaux intensifs, avec pour certains des greffes de moelle osseuse réalisées dans des cliniques spécialisées à Moscou et à Kiev avec le concours de médecins américains, 28 personnes sont décédées dans les quatre mois du mal des rayons et des brûlures subies. Les doses au corps entier reçues ont atteint jusqu'à 16 Gy (1 Gy correspond dans ce cas à une dose effective de 1 Sv). Jusqu'en 1998, 11 autres personnes sont décédées à la suite d'expositions comprises entre 1,3 et 5,2 Gy /19/.

Fukushima Dai-ichi: Pour l'accident de réacteur de Fukushima, on ne déplore à l'heure actuelle aucun mort pour cause de mal des rayons. Le rapport des autorités japonaises /1/ mentionne que jusqu'au 23 mai, environ 7 800 personnes ont séjourné sur le site de Fukushima pour y effectuer des travaux. Ces personnes ont reçu en moyenne une dose effective de 7,7 mSv ; 30 d'entre elles ont reçu plus de 100 mSv. La valeur limite pour le personnel masculin de la centrale applicable aux cas d'urgence a été relevée le 15 mars 2011 de 100 à 250 mSv en dose effective annu-

elle. Selon les informations communiquées par l'exploitant /29/, six personnes ont reçu en mars une dose supérieure à 250 mSv (par irradiation externe et interne).

Le 24 mars 2011, deux personnes ont eu les jambes et les pieds en contact avec de l'eau contaminée et ont reçu des doses locales à la peau situées entre 2 et 3 Sv.

Tchernobyl: Des hommes de troupe et des civils issus de nombreux endroits de l'Union soviétique ont été engagés pour procéder aux travaux de décontamination et de déblaiement dans le secteur du réacteur endommagé. Les effectifs de ce groupe de personnes, difficile à cerner dans son ensemble et généralement désignées par «liquidateurs», ont atteint quelques 600 000 personnes selon les indications des autorités soviétiques. Jusqu'à présent, selon le Comité scientifique de l'ONU sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR 2000), on n'a pas constaté d'augmentation de la mortalité globale et de celle imputable à des cancers ou encore de taux accrus de leucémies. Aucune donnée comparable n'est encore disponible pour Fukushima. L'irradiation subie par la population du fait de l'accident du réacteur de Tchernobyl est essentiellement imputable à l'I-131 de courte période et au Cs-137 de longue période. Jusqu'à présent, on n'a pas pu détecter d'augmentation de la mortalité parmi les populations des régions contaminées du fait d'une irradiation accrue après l'accident de Tchernobyl. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) toutefois, on observe chez les enfants une nette augmentation des carcinomes thyroïdiens imputables à cette irradiation /30/.

Fukushima Dai-ichi: A Fukushima, aucune dose marquante n'a été décelée jusqu'à présent dans la population. Jusqu'au 31 mai, 195 345 personnes ont été examinées dans la préfecture de Fukushima.

Lors des analyses de doses reçues au niveau de la thyroïde dans les villes d'Iwaki City, de Kawamata Town et d'Iitate, aucun des 1 080 enfants examinés, âgés de 0 à 15 ans, n'a dépassé le niveau de dépistage de 0,2 mSv/h (correspondant à une dose équivalente à la thyroïde de 100 mSv pour un enfant d'un an) /1/.

7.5 Évaluation des expositions à long terme

Le tableau 7-2 ci-après indique les doses externes, associées à la contamination des sols, reçues par les populations pendant la première année ayant suivi les événements de Tchernobyl. Ces données ne prennent pas en compte les irradiations internes par inhalation et ingestion (sauf dans le cas de la Suisse). Ce calcul ne tient pas compte non plus des doses supplémentaires associées au passage du nuage radioactif au début de l'accident (Fukushima), ni à celles dues à la consommation de produits alimentaires éventuellement contaminés. Contrairement à ce qui s'est passé à Tchernobyl, les populations japonaises résidant dans un périmètre de 20 km, respectivement de 30 km autour de la centrale, ont pu être évacuées à temps, avant la phase du nuage.

Lieu	Dose effective moyenne (externe) par habitant (mSv/an)	Nombre d'habitants concernés	Remarques
Fukushima	5-20	env. 340'000	En dehors de la zone évacuée jusqu'à environ 70 km vers le nord-ouest
Tchernobyl	1-14	env. 75 Mio.	En dehors de la zone évacuée, 30 à 1 000 km
		env. 135'000	A l'intérieur de la zone évacuée de 0-30 km du 26.4-5.5.1986
En Suisse du fait de Tchernobyl	env. 0,11	7,8 Mio. (état 2000)	En moyenne sur toute la Suisse + env. 0,15 mSv de dose interne

Tab. 7-2 Exposition externe pour la première année de séjour due à la contamination des sols ⁶¹

Tchernobyl: La figure 7-6 donne une vue d'ensemble de l'évolution de la dispersion du nuage radioactif de Tchernobyl. Dans la majeure partie de la Suisse, on a pu mettre en évidence des contaminations au sol en Cs-137 inférieures à 3 kBq/m² (par ex. sur le plateau 1.8 kBq/m²) et allant jusqu'à 50 kBq/m² dans le sud du Tessin

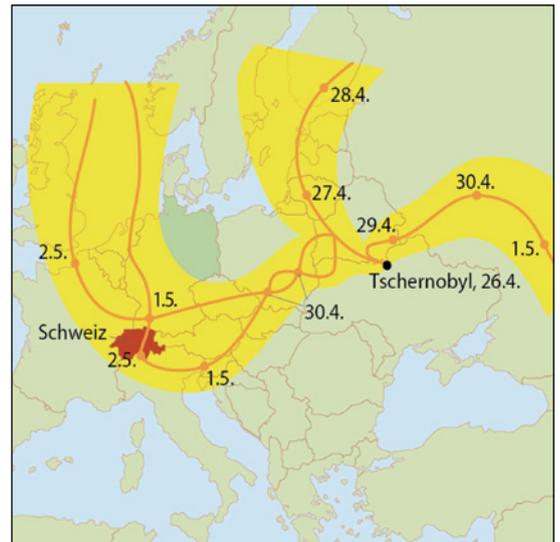


Fig. 7-6 Directions de dispersion et évolutions du nuage radioactif de Tchernobyl ⁶²

Fukushima Dai-ichi: La figure 7-7 représente les dépôts de Cs-134/137 autour de Fukushima Dai-ichi ainsi que les doses attendues dans la première année suivant les événements de mars 2011. Les zones évacuées sont représentées sur la figure 5-19 ainsi que sur la figure 5-20.

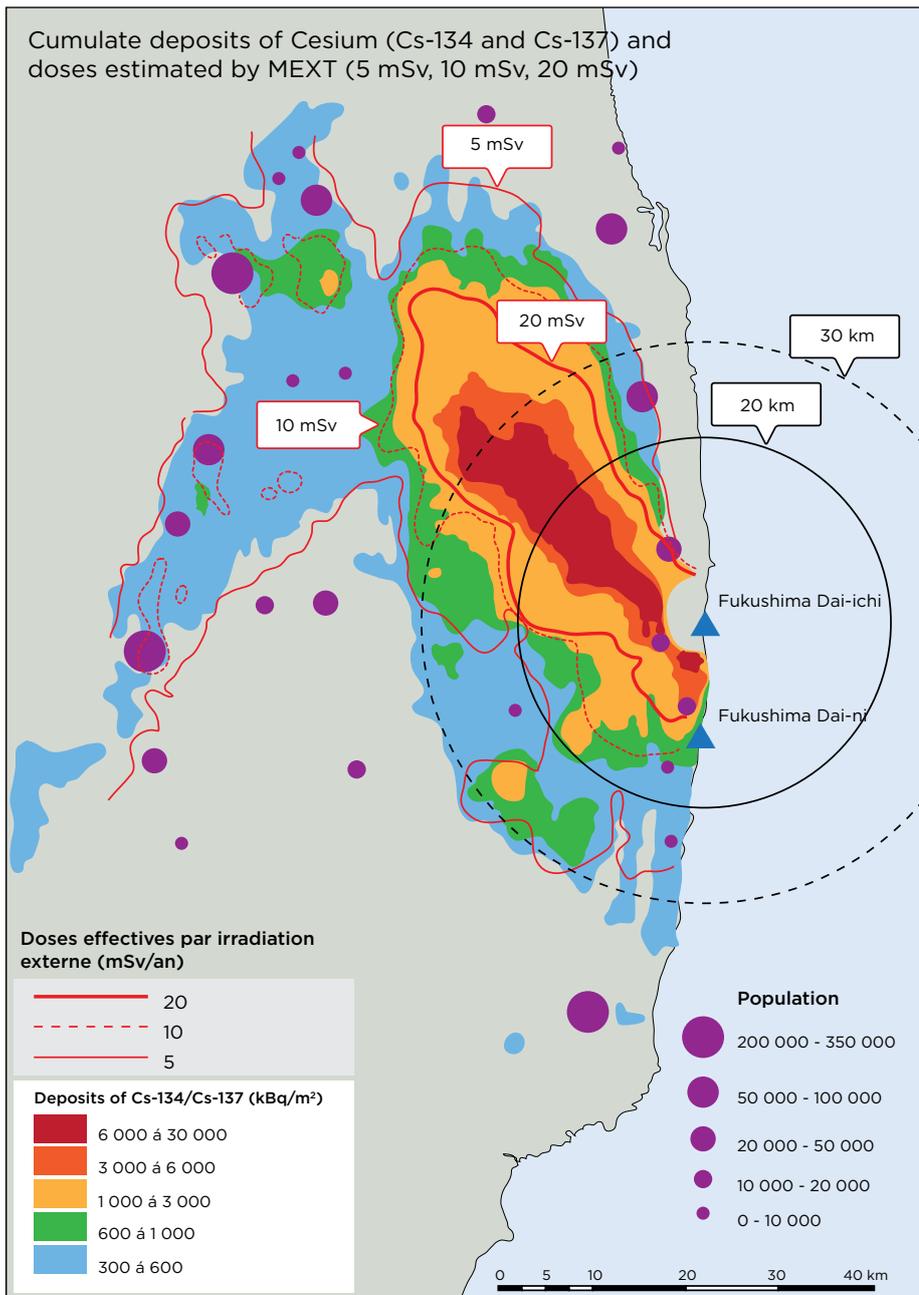


Fig. 7-7 Contamination des sols (Cs-137 + 134) et doses effectives externes attendues dans la première année associées à l'accident de Fukushima ⁶³

Le tableau ci-après donne un aperçu des doses estimées sur le long terme pour la population du fait de l'irradiation externe. Les valeurs de dose pour la Suisse et l'Allemagne sont uniquement fondées sur les dépôts résultant de l'accident de Tchernobyl, car la contribution de Fukushima est extrêmement faible comme indiqué au chapitre 6.4 et est négligée dans l'évaluation.

Lieu	Dose effective moyenne (externe) par habitant (mSv)	Nombre d'habitants concernés	Remarques
Fukushima	env. 100 en 10 ans env. 160 en 70 ans	env. 340 000	En dehors de la zone évacuée jusqu'à environ 70 km vers le nord-ouest
Tchernobyl	env. 190 en 50 ans	env. 75 millions	En dehors de la zone évacuée, 30 à 1 000 km
Suisse Estimé selon /44/,/46/	env. 0,6 en 50 ans env. 2,2 en 50 ans	7,8 millions (état 2000)	Dans le sud du Tessin du fait de la pluie
Allemagne /44/	env. 0,6 en 50 ans env. 2,2 en 50 ans		Au nord du Danube; Au sud du Danube du fait de la pluie le 30.04

Tab. 7-3 Doses effectives moyennes cumulées du fait de l'irradiation externe pour des durées de séjour de 10, 50 et 70 ans

7.6 Résumé et évaluation

A partir des informations disponibles et de la comparaison des conséquences écologiques et radiologiques des deux accidents de réacteur de Tchernobyl et de Fukushima, l'accident de Tchernobyl apparaît comme bien plus grave. Du fait de l'explosion et de l'incendie du cœur du réacteur à Tchernobyl, cinq à dix fois plus de substances radioactives ont été rejetées dans l'air et à de plus grandes distances qu'à Fukushima où une grande partie des rejets a été évacuée vers l'Océan Pacifique loin des zones habitées. Les effets sur la santé liés aux expositions sur le terrain autour des réacteurs ont été bien plus graves à Tchernobyl lors de l'exécution des interventions d'urgence. Toutefois en ce qui concerne Fukushima, les travaux pour rétablir une situation stable et durable des installations, de même que l'établissement d'un circuit fermé de refroidissement, ne sont toujours pas achevés, et nous ne disposons toujours pas de toutes les informations pertinentes permettant d'apprécier les conséquences sur le long terme. D'après les données disponibles jusqu'à présent, les doses effectives imputables à l'accident de Fukushima sont beaucoup plus faibles et concernent un groupe de population (dans le monde entier) d'un ordre de grandeur inférieur. On peut également affirmer dès à présent qu'au Japon même les conséquences de l'accident pour la population et l'environnement seront sensiblement moindres qu'à Tchernobyl. Il reste toutefois à procéder ultérieurement à une évaluation définitive.

Il convient enfin de ne pas oublier dans toutes ces considérations que le séisme Tohoku Chihou Taiheiyou Oki n'est pas seulement la cause directe de l'accident de réacteur de Fukushima, mais qu'il a aussi provoqué environ 24 000 morts et disparus ainsi que d'énormes dégâts à l'économie et à l'infrastructure, dont entre autres 792 000 bâtiments endommagés ou détruits (voir /11/).

8 Répertoire des abréviations

AC	Assemblage combustible
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
APD	Active Personal Dosimeter
BfS	Office fédéral allemand de radioprotection
BMU	Ministère fédéral allemand pour l'Environnement, la Protection de la nature et la Sécurité des réacteurs
CN	Centrale nucléaire
DDA	Débit de dose ambiante
DFI	Département fédéral de l'Intérieur
DOE	U.S. Department of Energy
FHA	Filtre de prélèvement à haute altitude
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
ICAPP	International Congress on Advances in Nuclear Power Plants
ICRP	Commission Internationale de Protection Radiologique
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire
INES	Echelle international d'évaluation des événements nucléaires
IRSN	Institut français de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JAIF	Japan Atomic Industrial Forum, Inc.
JMA	Japan Meteorological Agency
MADUK	Réseau de mesure pour la surveillance automatique des débits de dose dans l'environnement des centrales nucléaires suisses
MAFF	Ministère japonais de l'Agriculture, des Forêts et des Pêches
METI	Ministère japonais de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie
MEXT	Ministère japonais de l'Education, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie
MHLW	Ministère japonais de la Santé, du Travail et de l'Assistance publique
MOX	Mélange d'oxydes
NADAM	Réseau automatique de mesure et d'alarme pour l'irradiation ambiante
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency
NPP	Nuclear Power Plant
NPS	Nuclear Power Station
NSC	Nuclear Safety Commission
OFSP	Office fédéral de la santé publique
OSEC	Ordonnance sur les substances étrangères et les composants

OMS	Organisation mondiale de la santé
ONU	Organisation des Nations Unies
PHD	Préleveur d'aérosols à haut débit
RADAIR	Réseau Automatique de Détection dans l'Air d'Immissions Radioactives
RBMK	Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny
RDB	Cuve de pression du réacteur
SD	Seuil de détection
SGTS	Standby Gas Treatment System
SSSDB	Sarcophagus Safety Status Database
SWR	Réacteur à eau bouillante, REB, BWR
$T_{1/2}$	Période
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USA	États-Unis d'Amérique

9 Répertoire des tableaux et illustrations

Tableaux		Page
Tab. 2-1	Aspects de l'évaluation pour le classement INES selon les critères internationaux	6
Tab. 2-2	Comparaison de la quantité des rejets pour le classement INES	8
Tab. 2-3	Evaluation provisoire des rejets atmosphériques de substances radioactives dans la phase initiale de l'accident (en tenant compte des données d'exploitation jusqu'au 16 mai 2011)	13
Tab. 2-4	Concentration radioactive de l'eau contaminée présente dans les salles des turbines	17
Tab. 5-1	Résultats de mesure des concentrations radioactives dans le sol pour l'iode, le césium et le strontium environ une semaine après la survenue de l'accident	51
Tab. 5-2	Résultats de mesure des concentrations d'activité dans le sol pour le plutonium et l'uranium environ deux semaines après la survenue de l'accident	52
Tab. 5-3	Valeurs limites de radioactivité pour les produits alimentaires au Japon	53
Tab. 5-4	Échantillons de produits alimentaires analysés et nombre de dépassements constatés des valeurs limites à l'exemple des préfectures de Fukushima et d'Ibaraki	54
Tab. 5-5	Irradiation externe attendue pour une année de séjour en fonction de la contamination des sols	64
Tab. 5-6	Irradiation externe attendue pour 10 et 70 années de séjour en fonction de la contamination des sols	64
Tab. 6-1	Résultats de mesure sur des échantillons prélevés à haute altitude 52	69
Tab. 6-2	Récapitulatif des échantillons d'environnement et de produits alimentaires analysés à la suite des accidents de réacteurs de Fukushima (15 mars au 30 avril 2011)	70
Tab. 7-1	Fraction des radionucléides les plus importants libérés lors de l'accident de Tchernobyl, état des connaissances 1996	73
Tab. 7-2	Exposition externe pour la première année de séjour due à la contamination des sols 61	79
Tab. 7-3	Doses effectives moyennes cumulées du fait de l'irradiation externe pour des durées de séjour de 10, 50 et 70 ans	82
Illustrations		Page
Fig. 2-1	Échelle internationale d'évaluation des événements nucléaires - INES	6
Fig. 2-2	Rejets cumulés d'I-131 et de Cs-137 d'après les calculs de la NSC pour la période du 11 mars 2011 au 05 avril 2011	9
Fig. 2-3	Situation dans le local de stockage à sec de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi	11
Fig. 2-4	Taux de rejets des tranches 1-3 à Fukushima Dai-ichi	14
Fig. 2-5	Voies d'écoulement d'eau contaminée dans la tranche 2	15
Fig. 3-1	Localisation des sondes de débit de dose ambiante sur le site des installations de Fukushima Dai-ichi	21
Fig. 3-2	Récapitulatif des valeurs de débit de dose de la période du 12 au 31 mars 2011	21
Fig. 3-3	Valeurs de débit de dose ambiante relevées sur le site de Fukushima Dai-ichi le 23 mars 2011	22
Fig. 3-4	Valeurs de débit de dose ambiante relevées sur le site de Fukushima Dai-ichi le 01 août 2011	23
Fig. 3-5	Décombres radioactifs à proximité de la tranche 1	24
Fig. 3-6	Pied de la cheminée des tranches 1 et 2, vue prise au moyen d'une caméra gamma	24
Fig. 3-7	Pied de cheminée entre les tranches 1 et 2, mesure au moyen d'un détecteur télescopique	24
Fig. 3-8	Valeurs de débit de dose ambiante [mSv/h] à l'intérieur du bâtiment de liaison vers la salle des turbines de la tranche 1	25
Fig. 4-1	Répartition des doses accumulées du 11 mars jusqu'au 23 mai 2011 environ	31
Fig. 4-2	Nombre de personnes et doses individuelles moyennes de mars à mai 2011	32
Fig. 5-1	Représentation schématique des voies d'exposition qui contribuent principalement à l'irradiation dans l'environnement d'une installation nucléaire	40
Fig. 5-2	Situation météorologique le soir du 15 mars 2011 dans le secteur géographique de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi	41

Illustrations	Page	
Fig. 5-3	Débits de dose ambiante dans l'environnement de Fukushima Dai-ichi le 29 avril 2011, sélection de concentrations radioactives dans le sol et dans l'eau de mer	42
Fig. 5-4	Débit de dose ambiante dans l'environnement de Fukushima Dai-ichi, mesure étendue et affinée, juillet 2011	43
Fig. 5-5	Points de mesure sélectionnés pour le relevé régulier du débit de dose ambiante en dehors de la zone d'accès interdit des 20 km (indications en $\mu\text{Sv/h}$)	44
Fig. 5-6	Évolution du débit de dose ambiante en des points de mesure sélectionnés en dehors de la zone interdite d'accès de 20 km autour de Fukushima	45
Fig. 5-7	Évolution aux points de mesure présentant les débits de dose les plus élevés, immédiatement après l'accident	45
Fig. 5-8	Évolution des débits de dose ambiante dans des grandes villes de l'est du Japon entre le 15 mars et début septembre	46
Fig. 5-9	Radioactivité en Cs-134 et Cs-137 déposés au sol (Bq/m^2) déduite des mesures aéroradiométriques	47
Fig. 5-10	Concentration radioactive en césium dans les sols agricoles pour la zone racinaire des plantes	49
Fig. 5-11	Points de prélèvement d'échantillons ayant servi à l'analyse des rapports d'activité d'autres nucléides immédiatement après les retombées	50
Fig. 5-12	Dépassement de la valeur limite de contamination en I-131 de l'eau de boisson après l'accident ; illustration sur la base des mesures effectuées dans deux usines de traitement des eaux, à Iitate (préfecture de Fukushima) et à Tokyo ³⁹	56
Fig. 5-13	Concentration radioactive en I-131 dans les réseaux de distribution d'eau de différentes préfectures du nord du Japon	57
Fig. 5-14	Concentration radioactive en Cs-134/137 dans les réseaux de distribution d'eau de différentes préfectures du nord du Japon	57
Fig. 5-15	Concentration radioactive en I-131, en Cs-134 et en Cs-137 dans l'eau de mer autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi le 05 mai 2011	58
Fig. 5-16	Concentration radioactive en I-131, en Cs-134 et en Cs-137 dans l'eau de mer autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi le 07 mai 2011	59
Fig. 5-17	Dépôts de Cs sur les fonds marins ou les sédiments autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi	60
Fig. 5-18	Dépôts de Sr sur les fonds marins ou les sédiments autour de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi	60
Fig. 5-19	Zones d'évacuation autour de Fukushima Dai-ichi	62
Fig. 5-20	Secteurs d'évacuation en dehors de la zone des 20 km	62
Fig. 6-1	Évolution des concentrations d'I-131 (à gauche, lié à des particules) et des concentrations de Cs-134 (à droite) en Suisse, du début janvier jusqu'à la fin juillet 2011	66
Fig. 6-2	Évolution de la concentration d'iode-131 lié à des particules dans l'atmosphère	67
Fig. 6-3	Spectre gamma d'un filtre à air analysé en Suisse, mettant en évidence des radio-isotopes issus de l'accident de réacteur de Fukushima	69
Fig. 7-1	Encapsulage de la tranche 1, vue du nord	74
Fig. 7-2	Débit de dose ambiante Tchernobyl tranche 4, 1 m au-dessus du sol	75
Fig. 7-3	Contaminations au césium-137 en Ukraine, en Biélorussie et en Russie après l'accident de réacteur de Tchernobyl	77
Fig. 7-4	Étang de refroidissement de la centrale nucléaire de Tchernobyl, avec indication des sédiments	77
Fig. 7-5	Fukushima Dai-ichi: Contamination de l'eau de mer au césium-137	78
Fig. 7-6	Directions de dispersion et évolutions du nuage radioactif de Tchernobyl	80
Fig. 7-7	Contamination des sols (Cs-137 + 134) et doses effectives externes attendues dans la première année associées à l'accident de Fukushima	81

Fukushima

37° 25' 26.57" N, 141° 1' 56.87" E
11.03.2011



10 Références

- 1 Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, 2011-06-18 http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html
- 2 International Atomic Energy Agency (IAEA), INES - The International Nuclear and Radiological Event Scale, User's Manual 2008 Edition, May 2009 http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2009_web.pdf
- 3 International Atomic Energy Agency (IAEA), IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, Tokyo, Fukushima Dai-ichi NPP, Fukushima Dai-ichi NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan, 24 May - 2 June 2011, June 2011 http://www.pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
- 4 Nuclear Safety Commission (NSC), Press Release, Trial estimation of emission of radioactive material (I-131, Cs-137) into the atmosphere from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-04-12 <http://www.nsc.go.jp/NSCenglish/geje/2011%200412%20press.pdf>
- 5 Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), News Release, INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake, 2011-04-12 <http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110412-4.pdf>
- 6 Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO, Progress Status, 2011-08-17 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_nps_02.pdf
- 7 Hideki Masui, TEPCO, ICAPP 2011, Fukushima Dai-ichi Accident Fukushima Dai-ichi Accident, Recovery Action, Organization, Environmental Impact Nice France, 2011-05-03 <https://www.sfen.fr/ICAPP-11>
- 8 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Press Release (Aug 02,2011), Plant Status of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (as of 10:00 am, Aug 2), 2011-08-02 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11080201-e.html>
- 9 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), JAIF Earthquake Report No. 162, 2011-08-03 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1312346723P.pdf
- 10 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen G14, Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung aufgrund von Emissionen radioaktiver Stoffe aus Kernanlagen Ausgabe Februar 2008, Revision 1 vom 21.12.2009
- 11 Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report), September 2011 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html

- 12 Das Eidgenössische Departement des Innern (EDI), SR 817.021.23, Verordnung des EDI über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmittels (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV), vom 26.06.1995 (Stand am 01.06.2011) <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/817.021.23.de.pdf>
- 13 Health Sciences Council, 10th Subcommittee for Environmental Health and Water Supply, The Survey Results of Radioactive Materials in Tap Water, 2011-04-19 <http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/Document2.pdf>
- 14 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Press Release (Jun 18,2011), First Response at Tohoku Chihou Taiheiyoku Oki Earthquake in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-06-18 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061805-e.html>
- 15 Nuklearforum Schweiz, Dossier, Fukushima – Analyse und erste Lehren, Juli 2011 http://www.nuklearforum.ch/_upl/files/110825_Dossier_Fukushima_d_LOWRES.pdf
- 16 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), JAIF Earthquake Report No. 173, 2011-08-14 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1313293033P.pdf
- 17 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Annals of the ICRP Volume 37/2-4, ICRP Publication 103 – Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2, February 2008
- 18 International Commission on Radiological Protection (ICRP), Annals of the ICRP Volume 39 Issue 1, ICRP Publication 109, Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Elsevier, ISBN 978-0-7020-4098-6, November 2009
- 19 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report 2000, ISBN 92-1-142238-8
- 20 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Tschernobyl: Zehn Jahre danach - Der Unfall und die Sicherheit der RBMK-Anlagen GRS-121, Köln, Februar 1996 http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/GRS-121_Deut.pdf
- 21 Datenbank Sarcophagus Safety Status Database (SSSDB), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Projekt TAP-ICC „Fachliche Unterstützung des BMU zum Tschernobyl-Shelter-Fonds - Sicherheitsrelevante Daten, Laufzeit 01.10.2006 – 31.12.2011
- 22 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Assessment on the 66th Day of Projected External Doses for Populations living in the North-West Fallout Zone of the Fukushima Nuclear Accident, Outcome of Population Evacuation Measures Report DRPH/2011-10 <http://www.irsna.fr/EN/news/Documents/RSN-Fukushima-ReportDRPH-23052011.pdf>
- 23 Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus, Chernobyl accident: after-effects and overcoming of them, National report, National Academy of Science of the Republic of Belarus, Baranovichy, 1998 (in russ.)

- 24 Ministry of Russian Federation on Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Chernobyl Accident: Ten Years On, Problems and Results of Elimination of the Consequences of the Accident in Russia, Russian National Report, Moscow, 1996 http://chernobyl.undp.org/english/docs/rus_natrep_1996_eng.pdf
- 25 Ministry of Emergencies of Ukraine, Ten years following the Chernobyl accident. National report of Ukraine, Ministry of Emergencies of Ukraine, Kyiv, 1996 (in ukr.)
- 26 European Commission, Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident, ISBN 92-828-3140-X, Luxembourg, 1998
- 27 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Radioaktive Kontamination des Grundwassers und Strahlensituation am Standort des Objekts Einschluss und in der 30 km Zone des KKW Tschernobyl, GRS-A-2812 Köln, Dezember 2000
- 28 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Informationen zu den radiologischen Folgen des Erdbebens vom 11. März 2011 in Japan und dem kerntechnischen Unfall am Standort Fukushima Dai-ichi, Zusammenfassung der radiologischen Situation 13.05.2011
- 29 Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Enhancing controls of internal exposures at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-08-31 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110831e13.pdf
- 30 World Health Organisation (WHO), Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group „Health“ EGH, Working draft August 31, 2005 http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/WHO%20Report%20on%20Chernobyl%20Health%20Effects%20July%2006.pdf
- 31 Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Readings of Radioactive strontium in land soil and plant of Fukushima Dai-ichi NPP, Chart: Readings of Radioactives in soil and plants, 2011-04-12 http://radioactivity.mext.go.jp/en/1260/2011/03/1305074_0412.pdf
- 32 Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Readings of Pu & U at Monitoring Post out of 20&30 Km Zone of Fukushima Dai-ichi NPP, 2011-04-01 http://radioactivity.mext.go.jp/en/1250/2011/04/1305381_0401.pdf
- 33 International Atomic Energy Agency (IAEA), Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident Safety Series No. 75-INSAG-1, Vienna, 1986
- 34 Pretzsch, G. (GRS), Evaluation of the Radionuclide Release of the Chernobyl Accident (Orrest Calculation), Workshop on Dose Reconstruction GSF/CEC/IAEA/GAST, Bad Honnef, Jun 6-9, 1994
- 35 International Commission on Radiological Protection (ICRP) 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), superseded ICRP Publication 103

- 36 Ministry of Health, Labour and Welfare (MHLW), The damage situation of and measures taken for the Great East Japan Earthquake (80th announcement), 2011-06-21 http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/110628_02.pdf
- 37 Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO), Press Release (May 25,2011), Receipt of Instruction from NISA regarding report on investigation of cause and development of preventive measures regarding exposure exceeding dose limit to radiation dose engaged person at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-05-25 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11052511-e.html>
- 38 Feickert, Chanlett-Avery - Congressional Research Service, Japan 2011 Earthquake: U.S. Department of Defense (DOD) Response, 2011-03-22 <http://fpc.state.gov/documents/organization/159781.pdf>
- 39 Ministry of Labour, Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards, Ordinance No. 41 of September 30, 1972; Latest Amendments: Ministry of Health, Labour and Welfare Ordinance No. 172 of July 16, 2001 <http://www.jniosh.go.jp/icpro/jicosh-old/english/law/IonizingRadiationHazards/index.html>
- 40 Nuclear Emergency Response Headquarters, Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Nuclear Sufferers, May 17, 2011 http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf
- 41 Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO), Report on investigations of cause and development of preventive measures regarding exposure exceeding dose limits to radiation dose engaged person at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, 2011-05-02 <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11050211-e.html>
- 42 Japan Atomic Industrial Forum, Inc. (JAIF), Status of countermeasures for restoring from the accident at Fukushima Dai-ichi Unit 1 through 4. as of October 7th, 2011 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1317958363P.pdf
- 43 Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl, Teil 2 Radiologische Auswirkungen in der Bundesrepublik Deutschland und im europäischen Ausland, GRS-S-40 (Februar 1987)
- 44 Deutsches Atomforum e.V., Der Reaktorunfall in Tschernobyl, April 2011 http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/025reaktorunfall_tschernobyl2011.pdf
- 45 J. Magill, G. Pfennig, J. Galy, European Commission – Joint Research Centre – Institute for Transuranium Elements, Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruher Nuklidkarte, 7. Auflage 2006
- 46 Bundesamt für Gesundheit (BAG), 20 Jahre seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl, Die Auswirkungen auf die Schweiz, April 2006

- 47 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Ablauf Fukushima 11032011, Ereignisabläufe Fukushima Dai-ichi und Dai-ni infolge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011, August 2011
http://static.ensi.ch/1314627152/ensi_ablauf_260811_web.pdf
- 48 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Analyse Fukushima 11032011, Vertiefende Analyse des Unfalls in Fukushima am 11. März 2011 unter besonderer Berücksichtigung der menschlichen und organisatorischen Faktoren, August 2011 http://static.ensi.ch/1314626452/ensi_analyse_290811_web.pdf
- 49 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Lessons Fukushima 11032011, Lessons Learned und Prüfpunkte aus den kerntechnischen Unfällen in Fukushima, Oktober 2011
http://static.ensi.ch/1320054384/fukushima_lessons-learned.pdf



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN

Swiss Confederation

Editeur

Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Service d'information
CH-5200 Brugg
Téléphone 0041 (0)56 460 84 00
Téléfax 0041 (0)56 460 84 99
info@ensi.ch
www.ensi.ch

ENSI-AN-7998
Publié le 16.12.2011

