

L'ACCIDENT NUCLÉAIRE DE FUKUSHIMA : DESCRIPTION ET CONSÉQUENCES À COURT TERME

RÉSUMÉ

La centrale de Fukushima Daiichi comporte 6 réacteurs de type REB (Réacteur à eau bouillante) qui ont été mis en service entre 1970 et 1979 ; elle est située sur la côte est de l'île de Honshu, la principale île du Japon.

Le 11 mars 2011 à 14h46 (heure locale) un séisme de magnitude 8,9 s'est produit à 80 km à l'Est de l'île d'Honshu et à 25 km de profondeur, ce qui a déclenché l'arrêt automatique des 3 réacteurs (R1, R2, R3) de la centrale de Fukushima, qui étaient en fonctionnement au moment du tremblement de terre. Les dégâts directs provenant des mouvements du sol sur les installations du site ont été modérés ; toutefois l'alimentation électrique, provenant du réseau extérieur, nécessaire pour assurer les fonctions de sûreté des réacteurs à l'arrêt a été détériorée par le tremblement de terre, et les générateurs diesel de secours, nécessaires pour assurer le refroidissement de secours des réacteurs, ont été mis en service.

À 15h41, le tsunami déclenché par le tremblement de terre atteint le site, et une vague haute de 14 m submerge les parties basses du site. Les générateurs diesel de secours sont rendus inutilisables (sauf celui de R5). L'autonomie des batteries de secours, destinées à faire fonctionner les pompes de refroidissement, n'étant que de 30 minutes, très rapidement les systèmes de contrôle-commande sont inopérants. La station de pompage est touchée, ce qui conduit à la perte de la source froide. Les réacteurs R1, R2, R3 qui étaient en fonctionnement avant le tremblement de terre ne sont plus refroidis, ni les 7 piscines de combustibles usés.

La situation se dégrade alors rapidement, conduisant à une forte augmentation de la température et de la pression dans les circuits primaires des 3 réacteurs, puis à la rupture et à la fusion de certaines gaines de combustibles, puis à une forte production d'hydrogène, qui provoque de fortes explosions détruisant en partie les superstructures des bâtiments, mais pas les structures en béton armé.

La perte d'étanchéité du circuit primaire et la fusion d'une partie des éléments combustibles conduisent à de forts rejets de produits de fission (aérosols et gaz rares) qui contaminent le site lui-même puis s'échappent à l'extérieur du site.

L'analyse réalisée par l'autorité de sûreté japonaise a montré que la conception et la réalisation des réacteurs étaient conformes à la réglementation en matière de tremblement de terre, ce qui a été démontré par la bonne tenue initiale des installations. Toutefois, la survenue d'un tsunami de forte hauteur déclenché par ce tremblement de terre a été sous-évaluée, ce qui a conduit à l'inondation des moyens d'alimentation électrique de secours et la perte totale des moyens de refroidissement. L'absence de dispositifs de fixation de l'hydrogène et la conception des piscines de stockage situées en partie haute des bâtiments sont considérées comme des aggravants majeurs de l'accident.

La situation d'urgence a pu être progressivement stabilisée par un refroidissement massif à l'aide d'eau de mer et la remise en service des alimentations électriques extérieures. Le décision d'évacuer la population dans un rayon de 3, puis 10, puis 20 km, a été prise rapidement à partir du 12 mars. Les rejets ont été estimés à 10 % de ceux de Tchernobyl.

Mais contrairement à la centrale soviétique qui avait subi l'explosion et l'incendie de son cœur dispersant les rejets contaminés en altitude avec des retombées à l'échelle mondiale, les retombées des rejets de la centrale sont restées limitées à l'archipel nippon. Les estimations de l'IRSN conduisent à des niveaux d'irradiation sur la première année de la population impactée de quelques mSv, sans impact détectable sur la santé.

Concernant les travailleurs présents sur le site, aucun décès lié directement à l'accident nucléaire n'a été constaté. Pour les 800 opérateurs de la centrale, aucun n'a été exposé à une dose externe supérieure à 250 mSv corps entier, limite maximale admise en intervention, sauf deux opérateurs accidentellement exposés à une eau très contaminée, à un niveau de 2 à 3 Sv au niveau de la jambe.

1. DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT

1.1. LE DÉCLENCHEMENT DE L'ACCIDENT

La centrale de Fukushima Daiichi comporte 6 réacteurs de type REB (**réacteur à eau bouillante** : voir annexe 1) : R1 de 460 MWe ; R2 à R5 de 784 MWe ; R6 de 1100 MWe.

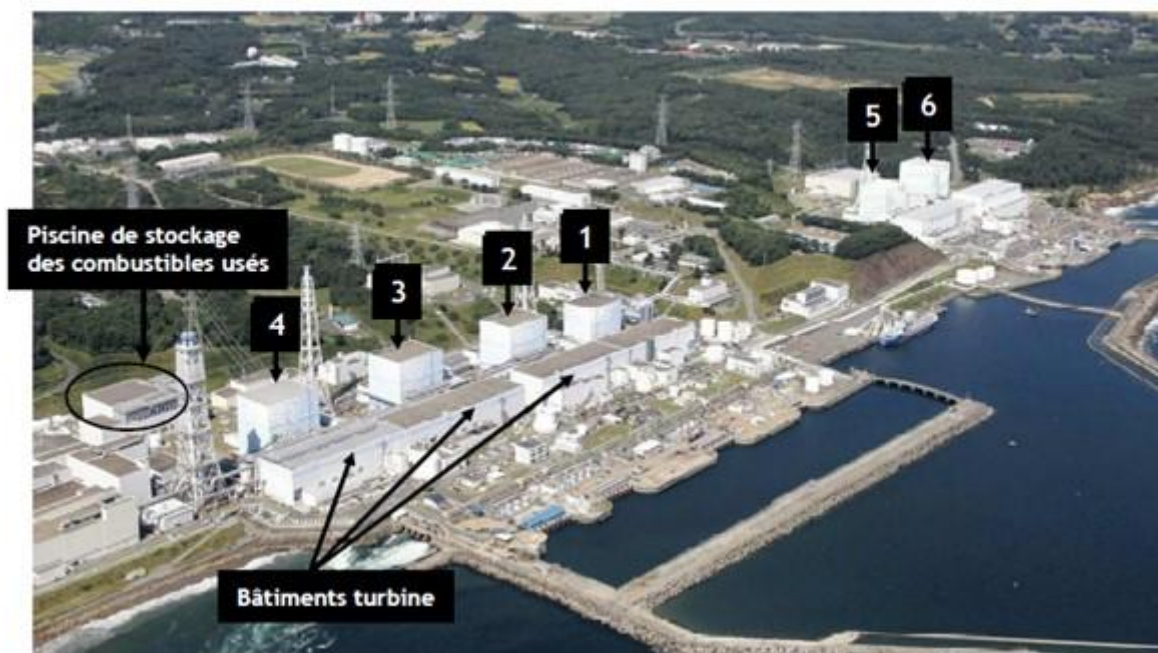


Figure 1: Le site de la centrale de Fukushima Dai-ichi avant le tremblement de terre du 11 mars 2011

Le **11 mars 2011** à 14h46 (dans ce document, toutes les heures sont données en heures locales), un séisme de magnitude 8,9 s'est produit en mer à 80 km à l'Est de l'île d'Hondo au Japon et à 25 km de profondeur. Dans les 4 centrales nucléaires (Du nord au sud : Onagawa (3 réacteurs) ; Fukushima Daiichi (6 réacteurs) ; Fukushima Dai-ni (4 réacteurs) ; Tokai-Mura (1 réacteur), situées à moins de 150 km de l'épicentre, les 11 réacteurs en fonctionnement se sont mis à l'arrêt automatiquement, comme prévu dans ces circonstances.

À ce moment, même si les réactions nucléaires sont arrêtées, la puissance thermique produite par les produits de fission contenus dans les gaines des éléments combustibles reste très grande, ce qui impose de disposer de moyens de refroidissement très conséquents. En leur absence, la température des gaines augmente très fortement, ce qui peut conduire à leur fusion, et à la dispersion des matières radioactives qu'elles contiennent dans la cuve puis le circuit primaire : c'est cet enchaînement d'événements qui va se produire.

Lors du tremblement de terre, l'alimentation électrique du site de Fukushima Daiichi est détériorée par le tremblement de terre, et le personnel de l'exploitant TEPCO met en service le refroidissement de secours des réacteurs, comme le prévoient les procédures.

Mais le tsunami, qui résulte de la rupture de la faille en mer sur plusieurs centaines de kilomètres, atteint une heure plus tard (à 15h41) Fukushima Daiichi avec une vague haute de plus de 14 m de haut qui submerge le site, dimensionné pour une vague de 6,5 m. Les générateurs diesel de secours sont rendus inutilisables (sauf celui de R5). L'autonomie des batteries de secours n'est que de 30 minutes : très rapidement les salles de commande ne sont plus éclairées et les systèmes de contrôle-commande sont inopérants. La station de pompage est touchée, ce qui conduit à la perte de la source froide. Les 3 réacteurs du site (R1, R2, R3) qui étaient en fonctionnement ne sont plus refroidis, ni les 7 piscines de combustibles usés.

1.2. LA DÉGRADATION DE LA SITUATION

Les REB sont munis d'une turbine de secours fonctionnant avec la vapeur produite dans le réacteur qui se condense dans le collecteur de décompression à condition que $T < 100^{\circ}\text{C}$. Son fonctionnement s'est arrêté, faute de source froide : le 11 mars à 16h36 dans R1, le 13 mars à 2h44 dans R3 (batteries vides), le 14 mars à 13h25 dans R2.

Le **12 mars**, à 15h36, soit 24 heures après le séisme, une **explosion d'hydrogène intervient dans R1**, causant la destruction de la partie supérieure du bâtiment et l'effondrement du toit. Cet événement est la conséquence de l'arrêt du refroidissement de ce réacteur qui provoque l'augmentation de la pression de la vapeur dans la cuve du réacteur ; pour protéger l'intégrité de la cuve du réacteur, l'opérateur ouvre le 12 mars à 14h30 la vanne de décharge vers le collecteur humide, ce qui provoque la baisse du niveau de l'eau dans le cœur.

Quand le cœur est dénoyé aux 2/3, la température du combustible dépasse 900°C, entraînant la rupture du gainage des crayons combustibles et le relâchement des produits de fission radioactifs dans le circuit primaire.

Quand le cœur est dénoyé aux 3/4, la température du combustible dépasse 1200°C, ce qui provoque une réaction entre le zirconium présent dans les gaines des éléments combustibles et H₂O, produisant de l'hydrogène (la réaction est exothermique et s'auto-entretient). L'hydrogène est alors poussé par la pression à travers le collecteur humide jusqu'à l'enceinte étanche. Dans R1, on estime à 300 - 600 kg la quantité d'hydrogène produite, or il n'y a pas de ventilation (faute d'électricité) permettant de l'évacuer au fur et à mesure. La présence de telles quantités d'hydrogène dans un volume désormais non étanche, et comportant de l'oxygène conduit inexorablement à la forte explosion de 15h36.

Les valeurs maximales de débit de dose sont à ce moment de l'ordre de 1 mSv/h dans l'environnement à proximité de la centrale. La population est évacuée dans un rayon de 20 km.

Cinq heures après l'explosion, à 20h20, (soit après un délai de 27h sans eau), l'exploitant arrive à installer une injection d'eau de mer chargée en acide borique dans le R1.

Le 13 mars, l'exploitant dépressurise le circuit primaire de R3 à 8h41 et branche le refroidissement à l'eau de mer boratée (pour éviter tout risque de reprise des réactions nucléaires) à 9h38 (le cœur est resté 7h sans eau). Le porte-parole du gouvernement évoque la possibilité d'une défaillance d'une vanne du réacteur n°3, ce qui pourrait expliquer que le niveau de l'eau ne remonte pas comme prévu malgré l'injection d'eau de mer.

Le 14 mars à 11 h, une explosion hydrogène dans R3 entraîne des dégâts considérables. On évalue à 300 – 1000 kg la quantité d'hydrogène produite. Des camions citernes, qui fournissaient de l'eau de refroidissement (bien qu'en quantités insuffisantes) sont endommagés, et il n'est plus possible d'injecter de l'eau de mer dans les 3 réacteurs simultanément. La salle de contrôle reste opérationnelle, mais on annonce 11 blessés. À noter que ces explosions, qui détruisent les toits en tôle, sont spectaculaires mais n'ont heureusement qu'un faible impact sur la tenue du bâtiment réacteur en béton armé. Une balise située au nord-ouest du site affiche un débit de dose de 230 µSv/h le 14 mars à 14h30.

Sur **R2**, la dépressurisation de la cuve primaire est effectuée dès le 13 mars à 0h00. Le toit est percé le 14 mars pour éviter une explosion. Il se produit une combustion de l'hydrogène dans le bâtiment réacteur endommageant le collecteur de condensation, conduisant à des rejets radioactifs de produits de fission (on note des pics locaux de radioactivité de 400 mSv/h, qui conduisent à une évacuation momentanée du site. L'eau de mer est branchée le 14 mars à 16h34 (7h sans eau).

Le **15 mars**, les autorités informent l'AIEA d'une explosion vers 6h20 et d'une perte de la pression dans le tore de R2, indiquant une **perte d'étanchéité du circuit primaire**. Le **15 mars à 6h**, une explosion survient dans le réacteur R4, pourtant à l'arrêt, qui endommage le toit, suivie le 16 mars d'incendies, éteints à 12h25. Il est possible qu'un flux d'hydrogène ait été injecté dans ce bâtiment, via des circuits communs avec les autres réacteurs et à cause de la destruction de certaines vannes. Le cœur de ce réacteur était déchargé, tout le combustible étant dans la piscine. La radioactivité est relâchée directement dans l'atmosphère.

Ce sont ces rejets des 15 et 16 mars qui ont conduit aux émissions de produits radioactifs contaminants qui impacteront le plus les populations avoisinantes (voir § 6.1).

Les nouvelles secousses sismiques de magnitude 6,6 enregistrées le 11 avril à 8h16 GMT et le 12 avril à 5h07 créent une rupture momentanée de l'alimentation électrique mais pas de dommage supplémentaire important.

2. LES DÉGÂTS CAUSÉS AUX INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Au 24 mars, la situation peut être considérée comme stabilisée, sans qu'à ce stade la contamination de l'environnement n'ait pu être stoppée, ni que tout risque de nouveaux événements graves (incendie, explosion, fusion d'éléments combustibles faute de refroidissement) n'ait pu être écarté. Les dégâts apparents sont alors les suivants :

Réacteur n°4	Réacteur n°3	Réacteur n°2	Réacteur n°1
Son cœur est endommagé. Crainte d'un incendie dans la piscine qui contient du combustible MOX.	Le bâtiment est endommagé. Une 1 ^{ère} ébullition de la piscine a été stoppée.	33 % du cœur du réacteur est détérioré. L'enceinte de confinement est endommagée mais toujours étanche. La piscine est en ébullition.	Le cœur est endommagé à 70 %, mais son refroidissement est toujours assuré et l'enceinte de confinement résiste. Fuite probable de la piscine de stockage du combustible.

Dans les salles de commande, le niveau de radiations est très important, limitant le temps de présence des intervenants.



Figure 2 : Etat extérieur des réacteurs 1 à 4 le 18 mars 2011

3. LES CAUSES DE L'ACCIDENT

L'analyse menée par l'autorité de sûreté nucléaire japonaise a permis d'identifier très vite les causes de cet accident. Elles se répartissent en 3 domaines :

- **Une protection insuffisante contre les tsunamis**

La réglementation japonaise prévoit que le radier d'un réacteur nucléaire repose sur la roche ; de ce fait, les fondations des 4 premiers réacteurs de Dai-ichi sont pratiquement au niveau de la mer. La plate-forme est surélevée à 6,5 m, le tsunami qui a été pris comme référence étant celui du Chili de 1960 (consécutif à un séisme de magnitude 9,5). Or le tsunami de 2011 a atteint une hauteur de 14,5 m, alors que la magnitude du tremblement de terre associé n'a été "que de 8,9".

Certains spécialistes japonais considèrent que les 4 premiers réacteurs du site, qui ont été construits pendant une période de faible sismicité, n'ont pas bénéficié d'une réévaluation du séisme et du tsunami de référence. Or la situation a évolué à partir de 1995 (tremblement de terre de Kobé) : ainsi les réacteurs N°5 et 6 ont été construits plus en hauteur, et le générateur diesel de R5 a résisté à la vague.

- **L'absence de moyens de protection contre l'accumulation d'hydrogène**

Lors d'un accident provoquant une forte élévation de température des gaines des éléments combustible (le plus souvent constituées par un alliage de zirconium), une réaction chimique violente entre l'eau du circuit primaire et ces gaines produit de grande quantité d'hydrogène qui peut s'échapper dans l'enceinte de confinement, voire à l'extérieur, en cas de perte de confinement du circuit primaire ou de relâchement volontaire pour préserver l'intégrité mécanique de ce circuit. En présence d'oxygène, ces accumulations d'hydrogène peuvent conduire à de violentes explosions (de nature chimique donc) qui peuvent endommager les installations nucléaires à proximité et aggraver la situation de la sûreté nucléaire.

Suite à l'accident de Three Miles Island en 1979 où ce phénomène est apparu (mais sans explosion d'hydrogène), les REP français ont été munis de recombineurs d'hydrogène destinés à limiter ces risques d'explosion. Cette mise à niveau de la sûreté ne semble pas avoir fait partie des pratiques japonaises, tout comme d'ailleurs aux Etats-Unis qui ne réalisaient pas, à l'époque, de ré-évaluation périodique de la sûreté.

De la même manière, les dommages collatéraux entre les bâtiments réacteurs n'ont pas été considérés : ainsi les projectiles issus de l'explosion d'hydrogène de R1 ont endommagé R3, qui a subi ultérieurement le même type d'explosion et d'incendies : l'exploitant ne semble pas avoir tiré de leçon de l'explosion de R1, ou n'avoir pas eu les moyens de le faire compte tenu de la situation. Cette remarque est à modérer par le fait que pour R2, dont le toit a été percé préventivement, les dégâts causés par l'incendie semblent in fine avoir eu des conséquences radiologiques aussi pénalisantes pour ce qui est des rejets.

- **La conception des piscines**

Le fait d'équiper chaque réacteur d'une piscine de stockage du combustible en partie supérieure, spécifique de ce modèle de REB, facilite l'exploitation du réacteur mais a gravement compliqué la gestion de l'accident.

La perte d'étanchéité des piscines, causée probablement par les effets directs et indirects du tremblement de terre, n'a pas pu être compensée par des apports suffisants en eau, du fait de la perte des alimentations électriques de secours.

De manière transverse il est apparu que les équipes d'exploitation de TEPCO n'étaient pas préparées à gérer ce type de situation, avec la perte totale des alimentations électriques et des informations concernant l'état des installations, et des dégâts collatéraux entre les réacteurs voisins.

4. LA SÉQUENCE ACCIDENTELLE DU 25 MARS AU 17 AVRIL

Le 25 mars, TEPCO a annoncé la présence d'eau contaminée dans les sous-sols des bâtiments des turbines. Cette eau, sans doute en partie présente depuis le tsunami, a été contaminée par de l'eau en provenance directe des enceintes de confinement qui ont perdu leur intégrité au cours de l'accident. L'eau très fortement contaminée présente dans le bâtiment de la turbine du réacteur n°2 provient très certainement de la chambre de condensation endommagée par l'explosion du 15 mars. Cette contamination témoigne de l'efficacité de rétention des chambres de condensation vis-à-vis des rejets aériens.

L'intégrité des enceintes de confinement des réacteurs n°1, 2 et 3 étant perdue, l'eau contaminée répandue d'abord dans les bâtiments des réacteurs puis dans les bâtiments des turbines s'est écoulée dans les galeries techniques.

La gestion des effluents et des rejets liquides radioactifs est alors devenue un enjeu majeur de la gestion du site accidenté. TEPCO a dû procéder à des rejets « volontaires » d'effluents (eau faiblement contaminée) pour libérer des capacités de stockage. Des fuites d'eau très fortement contaminée ont par ailleurs eu lieu dans la mer fin mars, pendant quelques jours. L'IRSN a pu déterminer la quantité globale de césium 137 rejetée dans l'eau de mer jusqu'à mi-juillet. La valeur estimée est de l'ordre de $27 \cdot 10^{15}$ Bq. L'essentiel des rejets ont eu lieu avant le 8 avril, les rejets estimés après cette date ne représentant que 18 % du total des rejets.

Différentes tentatives de mise en place de moyens de refroidissement et rétablissement des alimentations électriques de secours ont eu lieu, entre le 17 mars et le 22 avril, et ont permis d'aboutir à une situation stabilisée pour ces 2 paramètres à la mi-avril..

5. LA SÉQUENCE DE REPRISE PROGRESSIVE DU CONTRÔLE DES INSTALLATIONS

5.1. COURT TERME

À partir du 17 avril, l'exploitant TEPCO et le gouvernement japonais ont mis en oeuvre dans l'urgence et dans un environnement très dégradé (incendie, risque d'explosion, site encombré par des débris, niveaux de contamination et d'irradiation élevés) un ensemble de mesures destinées essentiellement à rétablir l'alimentation électrique de secours, et à mettre en place des moyens suffisants de refroidissement.

Ainsi TEPCO a présenté le 17 avril un plan de sortie de crise, distinguant deux grandes phases à engager à court terme. La première phase visait à réduire les rejets radioactifs, toujours en cours bien que très faibles par rapport à ceux observés en début d'accident, à fiabiliser le refroidissement des réacteurs et des piscines et à sécuriser les stockages d'eau contaminée. Cette première phase, dont la durée avait été estimée à 3 mois, a été finalisée par TEPCO le 19 juillet.

À partir du mois de juin, le système de pompage, de décontamination et de désalinisation de l'eau présente dans les bâtiments des turbines a été mis en service. Des usines de décontamination ont été construites en un temps record sur le site avec l'aide d'entreprises étrangères dont VEOLIA et AREVA pour la France. L'eau décontaminée était stockée dans des réservoirs mis en place à cet effet puis réinjectée dans les cuves.

La seconde phase, d'une durée prévisionnelle de 3 à 6 mois, avait pour objectif de sécuriser les bâtiments afin de maîtriser les rejets radioactifs, de refroidir de façon pérenne les réacteurs (température de l'eau inférieure à 100°C après passage dans le cœur, évitant ainsi la production de vapeur) et de diminuer la quantité d'eau contaminée présente sur le site. Six mois après l'accident, l'objectif de stabilisation de la température dans les cuves à une valeur inférieure à 100°C était atteint.

La feuille de route de l'exploitant TEPCO prévoyait également la pose d'une superstructure sur les bâtiments des réacteurs 1, 3 et 4 afin de limiter les rejets atmosphériques. La possibilité de construction d'une barrière hydrogéologique au droit du site pour limiter la contamination de l'océan par voie souterraine était également envisagée ; elle fut effectivement réalisée ultérieurement sous la forme d'une barrière de sol congelé en profondeur. Des travaux de protection du site par l'édification de digues supplémentaires ont été rapidement engagés et terminés en 2012.

5.2. MOYEN-LONG TERME

Le 23 janvier 2012, un plan de gestion du site à moyen et long terme pour le démantèlement des réacteurs 1 à 4 de la centrale de Fukushima Dai-ichi a été adopté. Il comporte trois phases principales :

- Phase 1 : retrait des assemblages combustibles des piscines de désactivation. TEPCO estime pouvoir débuter cette opération dans un délai de 2 ans ;
- Phase 2 : retrait du combustible fondu des cœurs des réacteurs. Le délai visé pour les démarrer est de l'ordre de 10 ans. Des travaux de renforcement des cuves des réacteurs seront également menés dans cette période.
- Phase 3 : phase de démantèlement de l'installation, estimée à 30-40 ans.

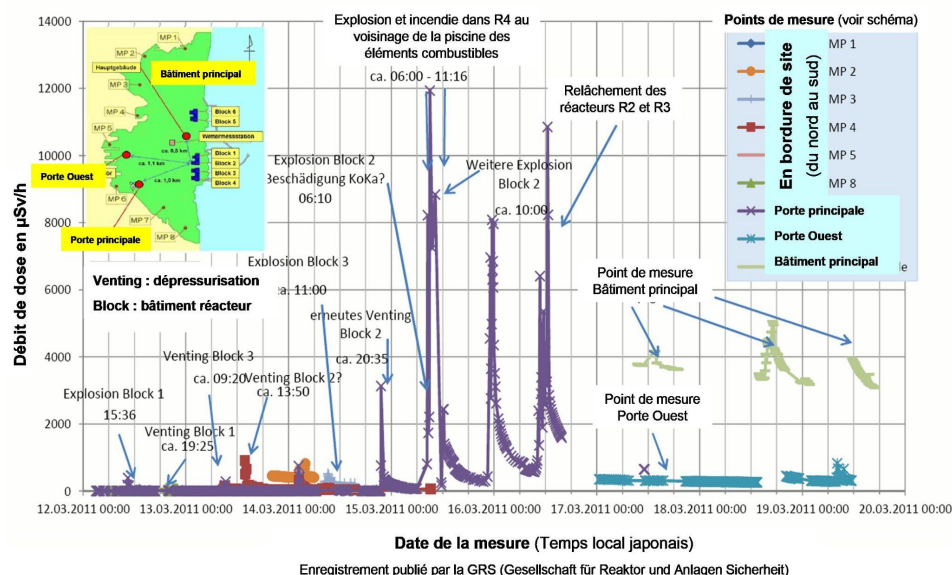
La description détaillée de ces phases et de leur mise en œuvre fait l'objet d'une autre fiche du GAENA.

6. LA CONTAMINATION DES MILIEUX

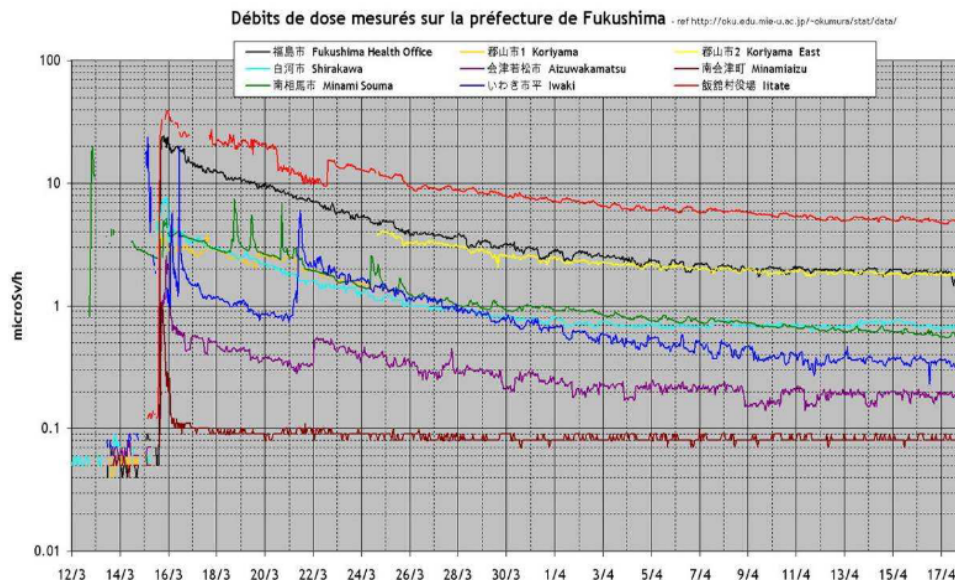
Des rejets de substances radioactives dans l'environnement ont eu lieu lors de l'accident du 11 mars et les jours suivants. Ils sont constitués de gaz ou de très fines particules radioactives dispersées dans l'air (aérosols), dont une partie est retombée sur les surfaces au sol au Japon pour former des dépôts radioactifs persistants, et une autre dans le milieu marin, directement sous forme de rejets liquides en mer et indirectement du fait des retombées sur la surface de la mer d'une partie des aérosols radioactifs dispersés au-dessus de l'océan.

6.1. EVALUATION DES REJETS

Une mesure partielle des rejets atmosphériques a été rapidement disponible grâce aux balises de mesures fonctionnant sur le site :



D'autres mesures sont disponibles en plusieurs points situés dans la préfecture de Fukushima :



Des évaluations beaucoup plus fines ont été lancées dans le monde entier, et notamment par l'IRSN (dont proviennent l'essentiel des informations ci-dessous). Elles ont débuté dès les premiers jours de l'accident, notamment pour déterminer les zones devant faire l'objet de mesures d'évacuation immédiate des populations, et de restrictions pour la commercialisation et la consommation de certains aliments. Elles dépendent beaucoup du terme source (les quantités et la composition des rejets) et des conditions météorologiques locales et à plus grande distance. Ainsi ces évaluations ont beaucoup évolué et se sont affinées au fil du temps.

Dès la mi-2011, les différentes estimations de rejets atmosphériques donnent des résultats qui, tout en présentant des écarts, se situent dans les mêmes gammes de valeurs. Ainsi, on tire de ces estimations les grandes tendances suivantes :

- les rejets de gaz rares radioactifs, dont le principal est le xénon 133 (période radioactive de 5,3 jours) sont estimés entre 6 500 et moins de 20 000 PBq (1 pétabecquerels = 10^{15} Bq, soit 27 000 curies). Parmi ceux-ci, c'est le krypton 85 qui a la période radioactive la plus longue (10,8 ans). Ce radionucléide étant uniquement à l'état gazeux et chimiquement peu réactif, il restera uniquement dans l'atmosphère (pas de dépôt) et sera dilué dans l'air à l'échelle planétaire. Les rejets d'iodes radioactifs sont estimés de l'ordre de quelques centaines de PBq, c'est-à-dire environ dix fois moins que pour l'accident de Tchernobyl.
- les rejets de césiums radioactifs sont estimés de l'ordre de quelques dizaines de PBq. Ils sont majoritairement constitués de césium 137 et de césium 134, à parts égales, et dans une moindre mesure de césium 136 (rejet estimé à 9,8 PBq) dont la période radioactive est courte (13,2 jours). S'agissant plus spécifiquement du césium 137, qui sera le plus persistant dans l'environnement japonais (période radioactive de 30,1 ans), il représente environ un quart des rejets de césium 137 de l'accident de Tchernobyl.
- concernant les transuraniens (notamment uranium, plutonium, américium, neptunium), l'absence de destructions majeures des cuves a empêché la dissémination massive de ces éléments (contrairement à Tchernobyl). Ainsi les différentes études réalisées n'ont pas pris en compte ce type de rejets.

6.2. EVALUATION DES NIVEAUX DE CONTAMINATION ET DES DÉBITS DE DOSE AU JAPON

6.2.1. Contamination fixée au niveau du sol

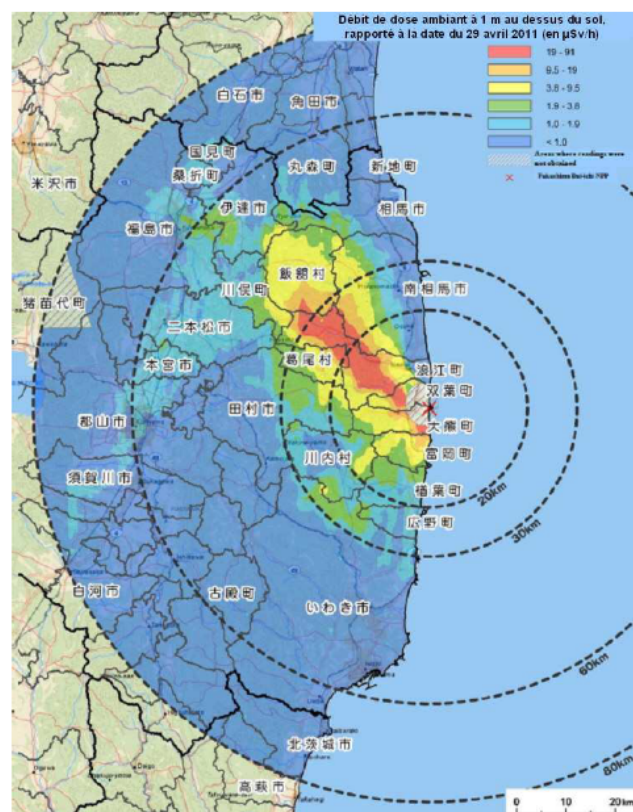
Des campagnes de mesures héliportées ont été réalisées, d'abord au voisinage de la centrale, puis sur une grande partie du territoire japonais pour évaluer les débits de dose rapportés à 1 m du sol.

Elles mettent en évidence une répartition inhomogène des débits de dose, traduisant des situations météorologiques différentes durant les différents épisodes de rejet.

La situation radiologique mesurée le 29 avril dans un rayon de 80 km autour de la centrale est la suivante : voir la figure ci-contre provenant d'un document du MEXT - le Ministère japonais de l'Éducation, de la Culture, des Sports, des Sciences et de la Technologie - repris dans un rapport de l'IRSN.

Le MEXT indique que les débits de dose "naturels" (d'origine terrestre ou cosmique) sont de l'ordre de 0,1 à 0,2 $\mu\text{Sv/h}$ dans cette zone.

Ce niveau est donc potentiellement dépassé dans la zone en bleu sombre, qui correspond à un débit inférieur à 1,0 $\mu\text{Sv/h}$, et traduit donc une probable contamination provenant de l'accident de Fukushima..



Une autre campagne de mesure réalisée durant l'été 2011 a permis d'établir une nouvelle cartographie des débits de dose rapportée au 01 novembre 2011 et à 1m du sol, sur tout le nord de l'île de Honjo (jusqu'à 450 km de la centrale de Fukushima Dai-Ichi) : voir la figure ci-contre provenant d'un document du MEXT, repris dans un rapport de l'IRSN.

Le MEXT indique que les débits de dose "naturels" (d'origine terrestre ou cosmique) sont de l'ordre de 0,1 à 0,5 µSv/h dans cette zone, compte-tenu de la présence de zones montagneuses. Ce niveau est donc potentiellement dépassé dans la zone en bleu ciel, qui correspond à un débit supérieur à 0,2 µSv/h, et traduit donc une probable contamination provenant de l'accident de Fukushima.

En terme d'activité massique dans le sol ou les produits agricoles, de nombreuses mesures ont été réalisées à partir du 15 mars. Elles mettent en évidence, comme attendu, une prédominance de la présence d'iode 131 durant les premiers jours, qui a complètement disparu vers le mois de juin 2011 du fait de sa courte période (8 jours). L'élément contaminant majeur est alors devenu de césium 137, ce qui conduit alors à des niveaux d'activité surfacique notables de 10 000 à plus de 1 million de Bq/m² dans certains endroits.

Une évaluation des surfaces contaminées a été réalisée par l'IRSN à partir des données du MEXT et aboutit aux résultats suivants :

Accident de Tchernobyl		Accident de Fukushima	
Dépôts de ¹³⁷ Cs mesurés en 1986	Superficie du Pays	Dépôts de ¹³⁷ Cs mesurés en 2011	Superficie du Pays
Zone d'exclusion		Zone d'exclusion (20 km)	
Cercle de rayon 30 km	Environ 2 800 km²	Demi-cercle de rayon 20 km	Environ 600 km³
Hors zone d'exclusion		Hors zone d'exclusion (20 km)	
Supérieurs à 1 480 kBq/m³	Russie : 300 km² Biélorussie : 2 200 km² Ukraine : 60 km² Autres pays : /	Supérieurs à 1 000 kBq/m³	Japon : 170 km²
De 555 à 1 480 kBq/m³	Russie : 2 000 km² Biélorussie : 4 000 km² Ukraine : 1 000 km² Autres pays : /	De 600 à 1 000 kBq/m³	Japon : 150 kBq/m³
De 37 à 555 kBq/m³	Russie : 56 000 km² Biélorussie : 40 000 km² Ukraine : 40 000 km² Autres pays : 45 000 km²	De 30 à 600 kBq/m³	Japon : 8 200 kBq/m³

Il apparaît qu'à niveau d'activité surfacique comparable, les zones affectées par l'accident de Tchernobyl sont au moins 20 fois plus étendues que celles affectées par l'accident de Fukushima.

La prévision de l'évolution de cette contamination dans le temps du fait des décroissances radioactives conduit à confirmer que les enjeux de radioprotection au Japon se sont concentrés sur le premier mois suivant l'accident, tant à cause des doses potentiellement reçues par l'exposition externe au dépôt qu'à cause du risque de contamination des denrées végétales (légumes à feuilles) et animales (lait) produites dans les zones ayant reçu les dépôts radioactifs.

Après la phase de rejets atmosphériques importants du mois de mars, à l'origine de l'essentiel des dépôts radioactifs présents sur le territoire japonais, une surveillance des flux de dépôts s'est poursuivie au cours des mois suivants. Ils ont permis d'observer la persistance de faibles retombées atmosphériques, probablement dues

à la poursuite de rejets de faible ampleur de la centrale et, éventuellement, à la remise en suspension dans l'air de la contamination surfacique antérieurement déposée. Mais les mesures réalisées en continu depuis mars 2011 indiquent que ces dépôts supplémentaires sont très faibles, de l'ordre de 100 Bq/m²/jour lors d'événements ponctuels qui semblent avoir disparu à partir de 2012.

6.2.2. Contamination du milieu marin

Le milieu marin a été touché lors de l'accident et des jours qui ont suivi par des retombées d'aérosols émis dans l'atmosphère, lors de leur dispersion au-dessus de l'océan ainsi que par des rejets liquides très contaminés directement en mer. Ces rejets ont été effectués dans les premiers jours de l'accident. Ils provenaient notamment de l'évacuation des galeries et locaux techniques envahis par de l'eau ayant transité par le circuit primaire ou l'enclaustration de confinement, puis par l'eau injectée en grande quantité pour refroidir les installations, alors que leur étanchéité n'était pas encore assurée. Ils ont cessé à l'automne 2011 quand TEPCO a mis en place des moyens de stockage provisoire (près de 1000 citernes) ainsi que des moyens de décontamination de l'eau.

Ainsi, des niveaux de contamination très élevés, jusqu'à 100 000 Bq/litre, ont été mesurés à la fin mars à proximité immédiate de la centrale, dans l'eau de mer et les espèces végétales et animales vivant dans le milieu. Ces niveaux ont fortement baissé dans les semaines suivantes, du fait de la diminution des rejets surtout liquides, de la décroissance radioactive des isotopes les plus présents, et surtout de la forte dilution dans l'océan résultant des vents, des marées et surtout des courants. Dès la mi-2011, les niveaux de contamination mesurés en mer à plus de 500m de la centrale étaient inférieurs à 100 Bq/litre. Une analyse fine des mesures a montré que l'apport des retombées atmosphériques sur les surfaces marines ne représenterait qu'une fraction très faible de l'activité globale de césium 137 rejetée directement en mer par la centrale.

La contamination présente dans l'eau de mer peut également se fixer dans les sédiments. Des mesures réalisées dès la fin mars 2011 ont montré des niveaux de contamination des sédiments de plus de 10 000 Bq/kg à proximité immédiate de la centrale ; au-delà de quelques km, elle baissait à moins de 1000 Bq/kg sur des épaisseurs de quelques cm. L'expérience acquise en mer d'Irlande (à la suite de l'immersion de fûts de déchets non étanches dans les années 1960-1970) montre qu'une partie de cette contamination peut être relarguée dans l'eau de mer, mais que cet ajout de contamination est très faible, de l'ordre de quelques 10 mBq/l, sans conséquences pour les espèces pélagiques vivant dans ce milieu.

6.3. IMPACT DE LA CONTAMINATION À L'ÉCHELLE MONDIALE

À compter du 12 mars 2011, le panache radioactif résultant des rejets des réacteurs nucléaires accidentés s'est déplacé, tout en se diluant, dans les courants atmosphériques de l'hémisphère nord. Entre le 19 mars et le 8 avril 2011, l'IRSN a réalisé, avec l'aide de Météo France, plusieurs évaluations de l'impact à très grande distance de ces rejets radioactifs dans l'air. Les différentes modélisations réalisées ont fourni une prévision au niveau mondial des concentrations de césium 137 attendues dans l'air au niveau du sol. Le césium 137 a été choisi comme élément représentatif des rejets radioactifs en raison de sa période radioactive longue (30 ans). Il est accompagné des autres radionucléides volatils rejetés par la centrale accidentée, notamment l'iode 131, mais qui a disparu au bout de quelques semaines du fait de sa période radioactive courte (7 jours).

Ces évaluations ont permis de prévoir le délai d'arrivée des masses d'air contaminées sur les différents continents et l'évolution des concentrations dans l'air. La situation météorologique globale a conduit à une dispersion générale vers l'Est : le continent nord-américain a donc été le premier touché à partir du 16 ou 17 mars, puis c'est l'Europe du Nord et du Nord-est à partir du 22 mars. Enfin, l'Asie a été impactée au cours de la dernière semaine de mars.

Au bout de quelques semaines, le niveau de contamination en Cs 137 dans l'air s'est homogénéisé à l'échelle de l'hémisphère Nord, pour atteindre des valeurs de l'ordre de 1 mBq/m³. Les niveaux de contamination prévus au niveau du sol peuvent fluctuer dans de grandes proportions du fait de la quantité des précipitations et des conditions géologiques locales. Ainsi, l'IRSN a estimé que, pour la France et pendant les premières semaines après l'accident, le niveau de contamination des sols a été très localement de l'ordre de quelques dizaines de Bq/m², et de l'ordre de quelques Bq/kg de matière comestible. Ailleurs, les niveaux de contamination sont restés quasi indétectables, même avec des moyens de mesure sophistiqués.

L'IRSN considère que ces niveaux de contamination dans l'air, sur les sols et dans les aliments conduisent à des doses insignifiantes en termes de risque pour la santé, notamment en comparaison des doses, elles-mêmes faibles, reçues du fait de l'exposition aux radionucléides naturels présents en permanence dans l'air. Concernant la contamination des océans, elle est totalement indétectable au-delà de quelques centaines de km à l'est des côtes japonaises, c'est-à-dire dans l'océan Pacifique ; elle est encore plus faible à l'ouest du Japon.

7. LES MESURES DE PROTECTION

7.1. LES ACTIONS DE PROTECTION D'URGENCE

Le 11 mars 2011, compte-tenu des dommages provoqués par le tsunami, notamment sur la centrale de Fukushima Dai-ichi, le Premier ministre décrète la situation d'urgence nucléaire à 19h03 et demande la mise en place d'une organisation de crise. Le même jour à 20h50, le gouverneur de la préfecture de Fukushima ordonne l'évacuation des habitants des villes de Futaba et d'Okuma dans un rayon de 2 km autour de la centrale de Fukushima Dai-ichi. À 21h23, le Premier ministre donne instruction aux autorités locales concernées d'évacuer la population vivant dans un rayon de 3 km autour de l'installation et de mettre à l'abri celle qui se trouve au-delà, dans un rayon de 10 km. Le 12 mars à 5h44, l'évacuation est étendue à 10 km.

Le 12 mars à 18h25, après l'explosion survenue dans le bâtiment du réacteur n°1, la zone d'évacuation autour du site de Fukushima Dai-ichi est étendue à 20 km (environ 78 200 personnes concernées, puis une zone de mise à l'abri dans un rayon de 20 à 30 km autour de ce site est instaurée le 15 mars à 11h (environ 62 400 personnes concernées).

Le 15 mars à 23h30, le gouvernement régional annonce que l'évacuation des habitants dans un rayon de 20 km autour de Fukushima Dai-ichi est effective depuis le même jour à 19h.

7.2. LES ACTION DE PROTECTION COMPLÉMENTAIRES MISES EN OEUVRE À PARTIR D'AVRIL 2011

Fin mars, alors que les importants rejets atmosphériques survenus entre le 12 et le 25 mars se sont dissipés, les résultats des premières campagnes de mesure révèlent d'importants débits de dose, au-delà de la zone d'évacuation des 20 km, notamment en direction du nord-ouest. Ceci conduit le gouvernement à définir une « Zone d'évacuation élargie » autour de ces points, qui concerne quelques centaines de personnes. Le 18 août, l'évacuation des résidents de la zone d'évacuation élargie est presque totalement effective.

Au début avril la zone d'évacuation des 20 km autour de la centrale devient une "zone interdite".

Par ailleurs, certains habitants situés entre 20 et 30 km, où l'instruction de mise à l'abri est toujours en vigueur en raison de la situation précaire des installations accidentées de Fukushima Dai-ichi, commencent à évacuer volontairement cette zone, où la vie économique et sociale est de plus en plus difficile à maintenir. Dans ce contexte, des initiatives locales et de nouvelles décisions des autorités gouvernementales sont prises pour compléter les actions de protection mises en place en urgence en mars.

7.3. LA GESTION DES DENRÉES ALIMENTAIRES AU JAPON

Pour ce qui concerne le dispositif de contrôle des denrées alimentaires, le Japon s'est appuyé sur des normes de commercialisation ou de consommation définies par le MHLW (Le ministère de la Santé, du Travail et des Affaires sociales) le 17 mars 2011 et validées par la FSC (Commission de sécurité alimentaire japonaise) le 29 mars. Leur dépassement conduit à la mise en place d'interdictions.

Ce dispositif ne s'apparente pas à un zonage. En effet, au Japon, il ne se traduit pas par la définition d'un périmètre où s'appliquent des actions. Les contrôles et les interdictions sont appliqués au cas par cas en fonction de la stratégie propre mise en place par chaque préfecture concernée par les retombées de l'accident. Le MEXT a cependant édicté certaines règles générales :

- la mise sur le marché est autorisée a priori ; les restrictions ne sont mises en place que si des analyses révèlent a posteriori un dépassement des normes ;
- les contrôles sont effectués par échantillonnage ; il subsiste ainsi un doute sur la représentativité des prélèvements à l'échelle des exploitations, des communes, voire des préfectures concernées ;
- la procédure de levée des interdictions est en apparence stricte ;

Ce dispositif de gestion a concerné de nombreuses catégories de produits au Japon, mais à des dates, sur des durées et sur des territoires qui ont été variables.

8. LES CONSÉQUENCES SANITAIRES À COURT TERME

Les niveaux de contamination atmosphérique, des sols et des aliments en dehors du périmètre de la centrale a permis d'exclure des impacts sanitaires immédiats par irradiation pour la population environnante. Concernant les salariés travaillant sur le site, ainsi que ceux qui sont intervenus dans l'urgence pour rétablir la situation, un suivi médical basé sur les relevés des dosimètres individuels et des balises installées dans les locaux, ainsi que par des examens médicaux réguliers, a été réalisé.

À la fin 2011, cinq décès de travailleurs (affectés en permanence à la centrale, ou intervenant spécifiquement pour les travaux de nettoyage et de stabilisation de la situation) ont été enregistrés, parmi lesquels aucun ne serait attribuable à une exposition aux rayonnements ionisants, selon les indications des autorités japonaises :

- deux travailleurs sont décédés le 11 mars 2011 des conséquences directes du tsunami et du tremblement de terre (noyade et écrasement par une grue)
- un travailleur est décédé d'un arrêt cardiaque survenu le 14 mai 2011
- un travailleur est décédé d'une leucémie aiguë au mois d'août 2011
- un travailleur est décédé d'un choc septique le 6 octobre 2011

Par ailleurs, des phénomènes d'hyperthermie (augmentation de la température corporelle) ont été observés chez 43 travailleurs, probablement en raison de tenues de travail insuffisamment réfrigérées.

Pour les 800 salariés de la centrale, la situation mesurée par dosimètre individuel au 29 avril était la suivante : 29 (dont 3 sous-traitants) ont été exposés à une dose supérieure à 100 mSv. Aucun n'a été exposé à une dose externe supérieure à 250 mSv corps entier, limite maximale admise en intervention, sauf deux opérateurs accidentellement exposés à une eau très contaminée, à un niveau de 2 à 3 Sv au niveau de la jambe, sans conséquences médicales graves.

À la mi-juin 2011 ont été publiés les résultats concernant les prises de sang : sur 2367 travailleurs examinés (sur un total de 3726, incluant donc les intervenants ayant travaillé pour nettoyer le site et stabiliser la situation), 8 ont été exposés à une dose comprise entre 250 et 680 mSv (au dosimètre : seulement 2 dépassaient 250 mSv), en raison de l'exposition interne (masque mal ajusté) que le dosimètre ne mesure pas. Deux opérateurs ont été contaminés au niveau de la thyroïde par l'iode-131 : leur exposition est de 580 mSv. Les impacts sanitaires à court terme (quelques mois) sont considérés comme nuls au Japon et en dehors du Japon.

Des programmes de suivi médical des populations concernées par les rejets radioactifs de la centrale ont été mis en place, notamment pour les populations les plus sensibles, notamment les enfants. Ils devront être poursuivis pendant plusieurs dizaines d'années pour qu'un éventuel impact sanitaire puisse être détecté.

9. IMPACTS À COURT TERME SUR LES PROGRAMMES NUCLÉAIRES

Dès mars 2011, le Japon a mis à l'arrêt les 33 réacteurs de son parc nucléaire. Les réacteurs respectant les nouvelles prescriptions de sécurité ont été progressivement remis en service à partir de 2015. Puis en mai 2011, le Japon a annoncé une réorientation de sa politique énergétique vers une plus grande sécurité des centrales et un développement accru des énergies renouvelables pour diminuer la part du nucléaire. L'Agence de sûreté nucléaire et industrielle (NISA), était, au Japon, une subdivision du ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI) chargée de superviser le respect de la réglementation dans le domaine de la sûreté nucléaire. Elle a été critiquée, notamment après l'accident nucléaire de Fukushima, pour avoir des conflits d'intérêts avec le METI qui faisait la promotion du nucléaire. Le 20 juin 2012, le gouvernement japonais a donc décidé de la dissoudre et de la remplacer par une Commission de réglementation de l'énergie nucléaire (NRA), une autorité administrative indépendante qui est rattachée au ministère de l'Environnement (MOE).

À partir de juin 2011, des « tests de résistance » ont été réalisés dans de nombreux pays et dans toute l'Europe, destinés à évaluer le comportement des installations et des exploitants en cas d'agressions globales et inattendues. L'objectif était d'analyser la robustesse des réacteurs face à de tels événements et, si nécessaire, d'accroître. Les marges ont été analysées et les améliorations possibles ont été recensées. Les tests de résistance, réalisés sous la responsabilité des États Membres, ont donné lieu à de nombreuses améliorations de la conception et de l'exploitation des réacteurs nucléaires en Europe.

Les conséquences de l'accident de Fukushima sur l'industrie nucléaire dans le monde ont conduit de nombreux pays à reconsidérer la part voire l'existence même du nucléaire dans leur production énergétique nationale, ainsi que la fiabilité des équipements en cas d'accident. Le débat sur l'utilisation de l'énergie nucléaire a été ainsi relancé dans de nombreux pays européens. Si certains pays dont les États-Unis, la Russie, la Chine, l'Inde, la Finlande, la France, le Royaume-Uni, la Pologne et la Suède affichent un maintien de l'option nucléaire, d'autres dont l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, l'Italie et la Suisse ont décidé d'abandonner la filière ou confirment de ne pas s'y engager.

Durant et après l'accident, de nombreux experts ont analysé ses causes et ses conséquences. Ceci a contribué au retour d'expérience, important pour la conception et l'exploitation des installations nucléaires, notamment en termes de renforcement de la robustesse et de redondance des équipements, en termes de formation des intervenants à des situations inhabituelles et extrêmes. Ce retour d'expérience a aussi conduit les autorités de radioprotection et de sûreté européennes à considérer qu'il fallait améliorer leur coordination en situations d'urgence, en particulier transfrontalières.

Elles ont aussi considéré qu'il fallait se préparer à la gestion de situations extrêmes pour lesquelles peu d'informations seraient disponibles. Enfin, le rôle dans la prévention comme dans la gestion de l'urgence, des

différents acteurs ou différents groupes d'acteurs tels que les exploitants, l'autorité de sûreté, le Gouvernement, les médias et les citoyens et de leurs interactions doit aussi être analysé à la lumière de cet accident.

Les impacts à moyen et long terme de l'accident de Fukushima sont analysés dans la [fiche argumentaire GAENA "L'accident de Fukushima : situation actuelle et conséquences à moyen-long terme"](#).

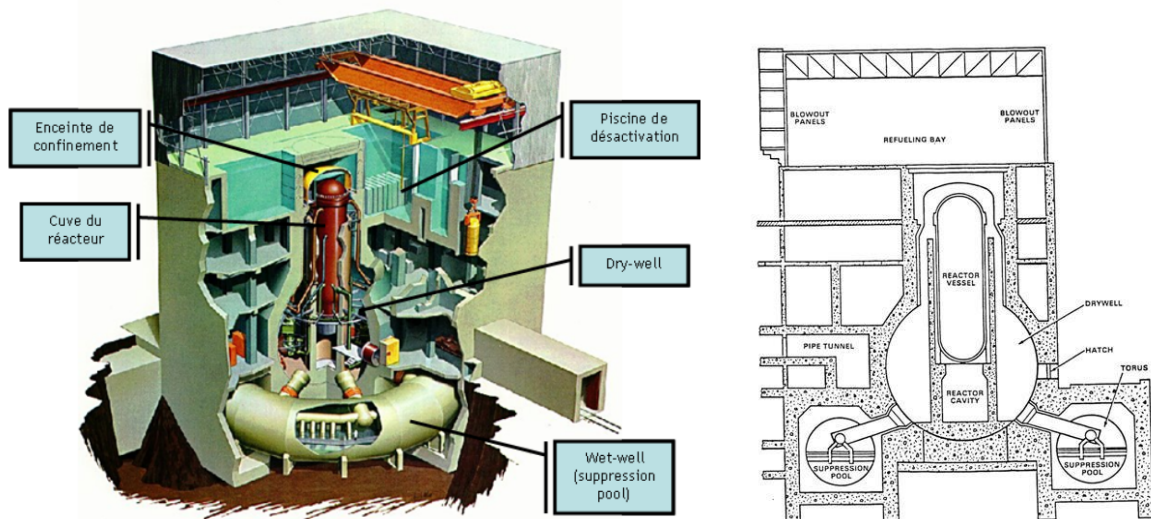
Le retour d'expérience et les dispositions prises en France à la suite de cet accident sont analysés dans la [fiche argumentaire GAENA "Qu'avons nous appris en France des accidents de réacteurs dans le monde ?"](#).

10. RÉFÉRENCES

- IRSN : diverses publications (www.irsn.fr) – d'où sont tirées notamment les figures présentées
- AIEA : communiqués de presse émis en 2011-2012
- Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) : "The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs" April, 2011 ; Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES)
- Roland MASSE : « Fukushima, quels risques sanitaires ? » ; Risques N°86, juin 2011
- RGN N°2 Mars-Avril 2011, notamment : Luc Oursel, « Fukushima, premiers regards sur l'accident »
- SFEN Bulletin de liaison N°373 (juillet 2011)
- B. Barré, présentation du 27 avril 2011 à ICSM (Marcoule)
- B. Bigot, entretien au Midi Libre du 8 avril 2011

Annexe 1

Les REB (réacteur à eau bouillante) ou BWR (boiling water reactor)



REACTOR VESSEL : cuve primaire ; DRYWELL = enceinte de confinement
SUPPRESSION POOL = collecteur (torique) de décompression

Lors d'un éventuel accident faisant croître la pression dans l'enceinte (DRYWELL), les gaz incondensables sont prélevés dans la chambre torique de décompression (SUPPRESSION POOL) dont l'eau joue le rôle de pré-filtre intérieur (piégeage par barbotage). Ce système ne nécessite aucune action humaine, ni aucune énergie externe pour fonctionner en cas d'accident, mais son autonomie est limitée à quelques heures (turbopompe alimentée par la vapeur produite dans le cœur, tant que la température du collecteur n'atteint pas les 100°C. Au-delà, il est possible de procéder à un rejet contrôlé à travers un filtre dédié (HATCH) de façon à limiter la montée en pression dans l'enceinte étanche.

Les réacteurs du site de Fukushima Dai-ichi sont des REB Mark 1 sauf R6 qui est du modèle Mark 2. En France, lors du choix de la filière de réacteur devant succéder aux UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) au début des années 1970, les REB n'ont pas été retenus pour les raisons suivantes :

- pression plus basse donc rendement thermodynamique moindre,
- absence de circuit secondaire, conduisant à une irradiation accrue du personnel,
- grappes de contrôle de la réactivité poussées de bas en haut par des vérins, ce qui ne constitue pas un dispositif intrinsèquement sûr en cas de perte de l'alimentation électrique
- pas de contrôle de la réactivité par eau borée à cause de la turbine (sauf urgence).

Comme fait aggravant dans le cas des réacteurs japonais, les piscines de stockage de combustible sont placées dans le bâtiment réacteur au-dessus de l'enceinte étanche, ce qui les rend sensibles à d'éventuels dégâts affectant les réacteurs situés en dessous.

Contrairement aux REP, les REB ont dû beaucoup évoluer pour se mettre au niveau des normes de sûreté de la génération 3 ; sur 61 réacteurs en construction en 2011, 53 étaient des REP.