

NUMERO SPECIAL

L'accident nucléaire de Fukushima : Comprendre ce qui est arrivé

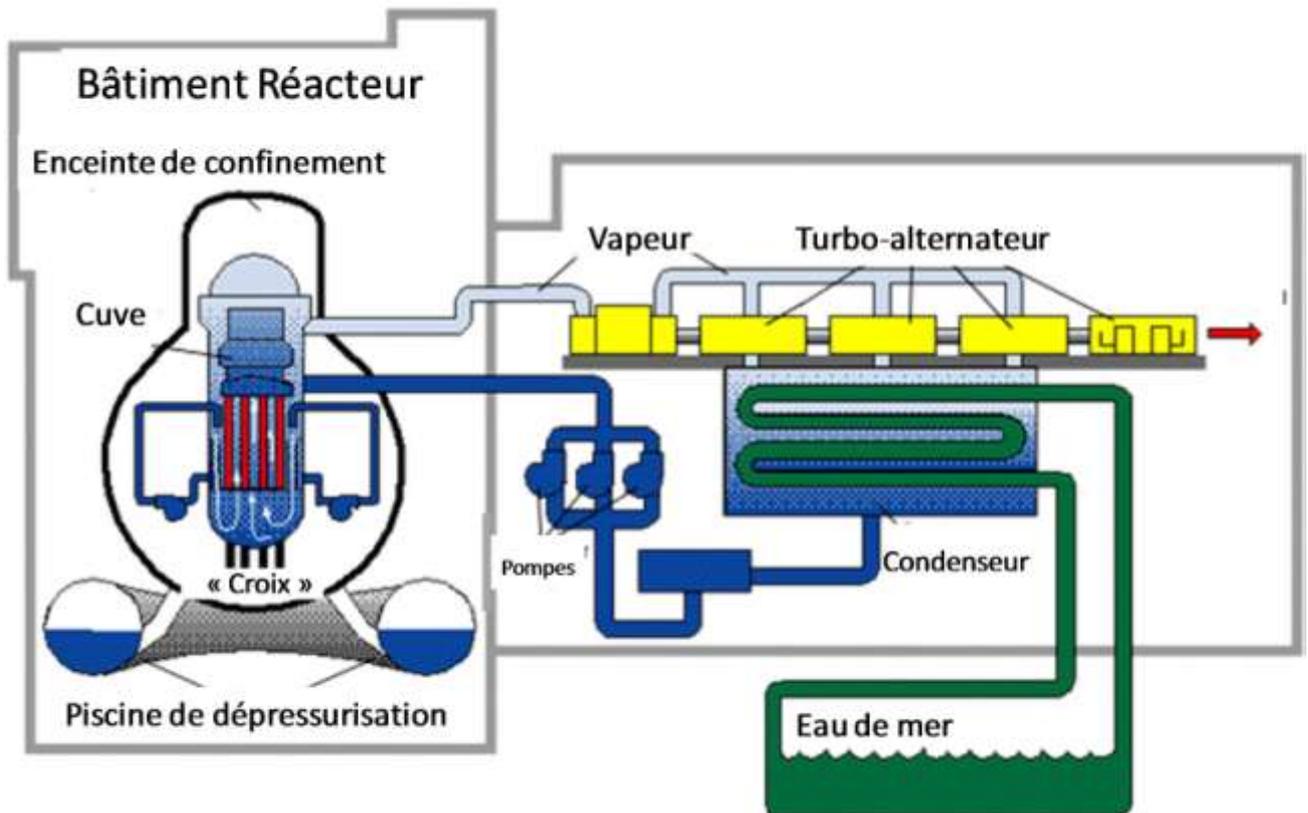
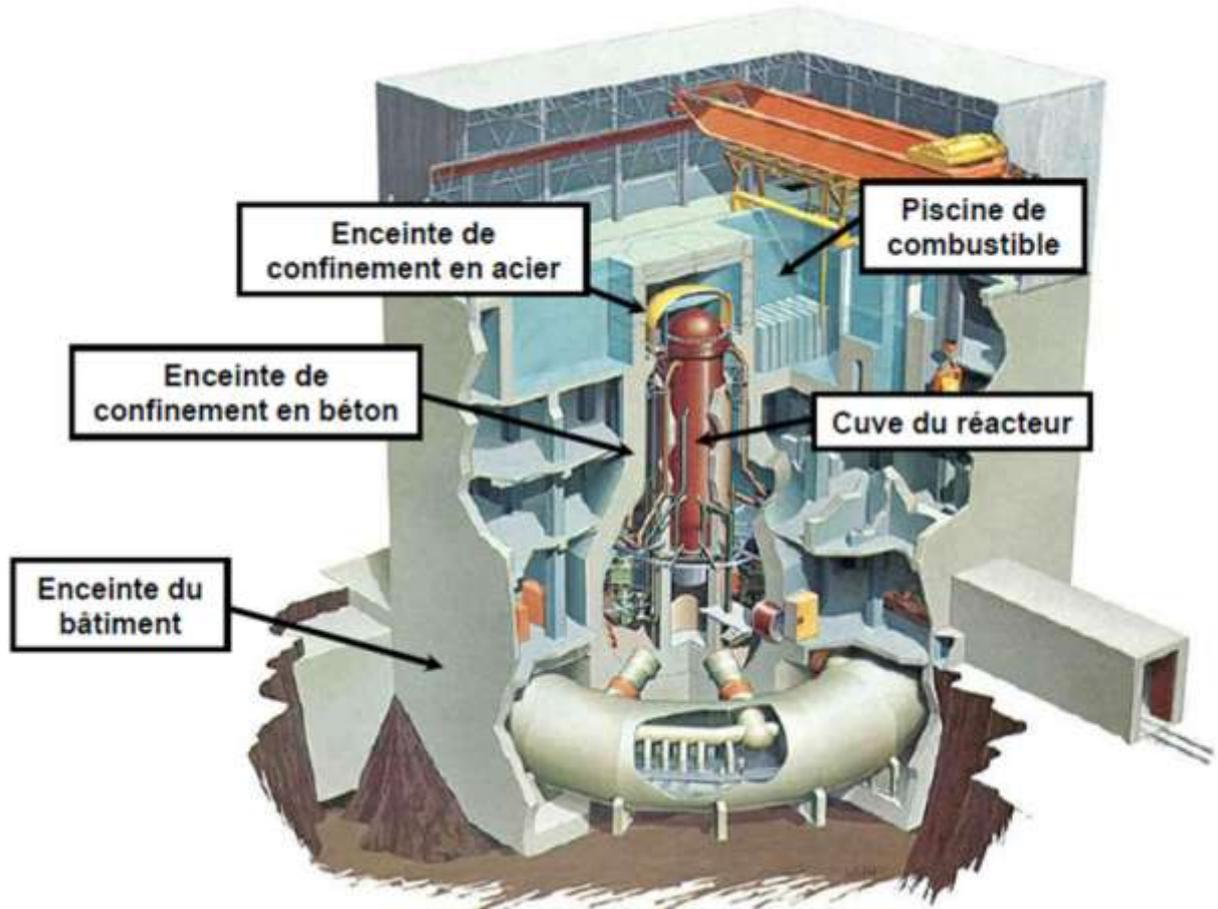
**À CHAQUE ÉNERGIE
SA PLACE !**



UARGA

Union des Associations des anciens et Retraités du Groupe AREVA

REACTEUR A EAU BOUILLANTE DE TYPE FUKUSHIMA



ENERGIES ET MEDIAS N° 35

Juillet 2011

SOMMAIRE

1. Publications coordonnées de l'UARGA sur Fukushima : <i>Energies et Médias et Nucléaire et Energies</i>	3
2. Description globale de l'accident	4
2.1 Un réacteur ne peut devenir une bombe atomique.....	4
2.2 Le séisme	4
2.3 Le tsunami, en français raz de marée	5
2.4 Qu'advient-il d'un combustible non refroidi ?	7
2.4.1 Le cœur d'un réacteur à eau bouillante	7
2.4.2 Si le refroidissement est en panne ou insuffisant	7
2.5 La défense à Fukushima Daiichi	10
2.6 La situation au 15 juillet	12
2.7 Les rejets dans l'environnement	13
2.8 La radioprotection.....	15
2.8.1 Radioprotection de la population	16
2.8.2 Radioprotection du personnel.....	16
2.9 Classement de l'accident dans l'échelle INES.....	17
2.10 Conclusion.....	18

Ce bulletin est l'œuvre collective des retraités de l'UARGA, l'Union des Associations de Retraités du Groupe Areva. Ils souhaitent que la masse de connaissances et l'expérience qu'ils ont accumulées au cours de leur carrière sur des sujets complexes, réalités scientifiques et technologiques, puissent servir à leurs collègues retraités, et aussi à leurs concitoyens, en particulier à ceux qui sont chargés de l'information du public.

Document également consultable sur le site <http://www.uarga.org>

1. Publications coordonnées de l'UARGA sur Fukushima : *Energies et Médias et Nucléaire et Energies*

A l'accident nucléaire de Fukushima les retraités d'Areva ont déjà consacré un chapitre de leur publication *Nucléaire et Energies*, du numéro 56 d'avril 2011. Pour faire un point plus détaillé à la mi-juillet, de l'accident, de ses conséquences et des enseignements qu'on peut déjà en tirer, ils souhaitent utiliser leurs deux publications :

- Ce numéro spécial d'*Energies et Médias* (n° 35) explique ce qui s'est passé, s'adressant surtout *au lecteur qui n'est pas spécialiste du nucléaire*. Il a pu lire au jour le jour les explications des journaux et celles de nombreux sites : beaucoup de renseignements accumulés qui quelquefois se contredisent, une chronologie complexe. Certains sites ont aussi présenté des exposés globaux très techniques. *Energies et Médias*, par souci de simplicité et de clarté, s'est fixé comme objectifs :
 - o *d'expliquer tranquillement, en termes que tout le monde peut comprendre, les phénomènes de l'accident, sans les dates et sans le détail réacteur par réacteur ; on explique l'accident, la nature des problèmes qu'il a posés et des solutions qu'on a essayé d'y apporter, avec les conséquences techniques ;*
 - o *de mettre, au passage, en évidence certaines différences avec les réacteurs français.*
- Parallèlement, un numéro spécial de *Nucléaire et Energies*, analyse les *impacts* de l'accident, régionaux et mondiaux.

Le lecteur intéressé est chaleureusement invité à lire les deux documents, en particulier sur Internet sur le site <http://www.uarga.org>.

Dans les deux publications, ce que nous tenons à exprimer en premier, c'est notre solidarité avec les Japonais et notre admiration pour leur dignité et leur courage. Nous les accompagnons d'autant plus dans leurs dramatiques épreuves qu'un certain nombre d'entre nous ont vécu dans ce pays, ou ont travaillé en étroite collaboration avec des entreprises japonaises.

[Retour sommaire](#)

2. Description globale de l'accident

2.1 Un réacteur ne peut devenir une bombe atomique

Avant d'aborder la description des événements, il n'est pas mauvais de rappeler ceci :

Un réacteur nucléaire tel que ceux qui servent à produire de l'électricité,
même accidenté,
ne peut absolument pas devenir une bombe atomique.
Cela tient aux lois de la physique.
Pour faire une bombe atomique,
il faut de l'uranium enrichi au moins à 90 % d'uranium 235,
alors que les réacteurs de Fukushima contiennent de l'uranium enrichi à environ 4 %.
Le combustible Mox¹ non plus ne peut servir à faire une bombe.

Les explosions qui se sont produites sont des explosions chimiques, comme on le verra plus loin.

2.2 Le séisme

Tout le monde sait que le Japon est une des zones les plus sismiques du globe. Il se trouve au point de convergence de quatre plaques tectoniques qui raclent l'une sur l'autre en se déplaçant lentement tant bien que mal, avec des à-coups. Le pays s'est adapté. On sait construire d'immenses immeubles, ou des réacteurs nucléaires, qui résistent aux secousses les plus fortes qui en résultent.

Le 11 mars 2011 a lieu, avec son épicentre à 180 kilomètres au large des réacteurs de Fukushima, un des quatre séismes les plus violents de l'histoire connue du pays, depuis un millénaire. Il est classé 9,1 sur l'échelle de Richter.

Les trois réacteurs de Fukushima Daiichi en fonctionnement à ce moment-là (3 sur 6)
s'arrêtent automatiquement par insertion complète des barres de contrôle.

Le réseau électrique est rompu.
Les groupes électrogènes de secours sont mis en service sans difficulté.
Les dispositifs de refroidissement des cœurs
et des piscines d'entreposage d'éléments combustibles usés
continuent à fonctionner correctement.
*Il faut, en effet, continuer à refroidir les éléments combustibles
car la radioactivité des matières dégage encore une chaleur importante*

¹ Mox : oxyde mixte d'uranium et de plutonium. Un réacteur de Fukushima Daiichi contenait des éléments combustibles contenant du Mox.

même quand la réaction neutronique en chaîne est arrêtée :
6 % (de la chaleur dégagée en marche) immédiatement après l'arrêt,
1 % après un jour, 0,5 % après 5 jours, 0,2 % après 15 jours.

[Retour sommaire](#)

On va parler du tsunami au paragraphe suivant. Après le tsunami qui a dévasté la région se produisent de très nombreuses répliques encore fortes qui s'échelonnent sur les jours suivants, compliquent la vie des sauveteurs et des habitants et jouent sur le moral.

2.3 Le tsunami, en français raz de marée

En se déplaçant brutalement de plus de deux mètres lors du séisme, l'île de Honshu crée dans la mer une faille monstrueuse de 500 kilomètres de long et l'Océan Pacifique, qui ne porte pas bien son nom, réagit en formant un raz de marée, un tsunami d'amplitude majeure.

Un film où l'on aperçoit (de loin) la vague atteignant les bâtiments de Fukushima Daiichi montre un panache blanc dépassant pendant une ou deux secondes, lors du choc, la hauteur de ces bâtiments !

Il n'y a pas chaque fois, pour chaque séisme, un tsunami significatif, loin s'en faut. C'est sans doute pourquoi, paraît-il, on parle aux petits Japonais des tsunamis comme du croquemitaine, comme de quelque chose qui n'arrive pas vraiment ! Le pays semble avoir pris ce risque moins au sérieux que le risque sismique, malgré l'avertissement du tsunami de Thaïlande et d'Indonésie en 2004. La vague y avait dépassé 10 mètres.

Tepco a conçu les installations pour un tsunami de 6,5 mètres seulement,
et aucune autorité ne semble lui avoir imposé de faire mieux.
*Sans cette erreur majeure, y aurait-il eu un accident grave ? Non, sans doute !
Les matériels vulnérables ne devraient-ils pas être placés
dans des blockhaus résistant à tout ?
ou suffisamment haut pour être à l'abri, et pas dans des sous-sols inondables ?*

Fukushima Daiichi veut dire Fukushima numéro 1, la première centrale de la région, comprenant 6 réacteurs à eau bouillante. On l'a dit, 3 sont en fonctionnement au moment des événements, les 3 autres sont à l'arrêt. La centrale de Fukushima Daiini (numéro 2), à 10 kilomètres de là, comprenant des réacteurs plus modernes et plus puissants, a eu aussi des difficultés, mais le refroidissement des réacteurs a été maintenu et les réacteurs, très probablement, seraient capables de redémarrer lorsqu'on aura tiré tous les enseignements de Fukushima Daiichi.

Le tsunami à Daiichi, en se retirant des terres, a eu raison des prises d'eau de mer. Pour un réacteur, cette prise d'eau est la « source froide », le point où l'on pompe l'eau dans la mer pour l'envoyer dans l'échangeur de chaleur appelé condenseur. Cet échangeur, le condenseur, *refroidit l'eau* sortant du dernier étage des turbines et condense les dernières traces de vapeur, *avant que cette eau soit renvoyée vers le cœur du réacteur*. Celle-ci est de l'eau douce. Si l'on avait pris au sérieux l'hypothèse d'un fort tsunami, sans doute aurait-on su concevoir la prise d'eau de mer de telle sorte qu'elle ne soit pas en défaut dans de telles circonstances : par exemple en allant chercher l'eau un peu plus loin du rivage. Ce sera en tout cas un enseignement de Fukushima.

Sur 4 des 6 réacteurs (les 5^{ème} et 6^{ème} étant placés quelques mètres plus haut), le tsunami a eu raison aussi des groupes électrogènes diesel destinés à prendre le relais du réseau si celui-ci est en panne ;

ces groupes, on l'a vu, avaient bien résisté au séisme. Ils étaient protégés pour résister à un tsunami de 6,5 mètres, alors que la vague est montée beaucoup plus haut que cela. 15 mètres ? Peu important les chiffres, cela dépend visiblement des obstacles qu'elle rencontre sur son chemin.

Les batteries de secours n'ont fourni du courant que pendant une heure sur un des réacteurs, environ deux jours pour les trois autres. On se demande pourquoi la centrale ne disposait pas de matériels capables d'amener de l'électricité plus longtemps aux organes vitaux de la centrale.

Sans groupes électrogènes et sans source froide,
impossible de refroidir les cœurs des réacteurs !
Impossible aussi de refroidir les piscines d'entreposage d'éléments combustibles usés,
ce qui s'est avéré très inquiétant pour l'une d'elles : au moment de l'accident,
on venait de dépasser 1500 assemblages combustibles entreposés,
dont beaucoup fraîchement déchargés du réacteur,
dégageant encore beaucoup de chaleur.

[Retour sommaire](#)

Faute de courant, les salles de contrôle sont devenues inutilisables ; même après la réparation de leur alimentation électrique, les instruments qui envoient leur mesure à la salle de contrôle, secoués par le séisme et le tsunami, n'étaient pas tous intacts. (On n'a pas eu d'informations détaillées à ce sujet.) Le personnel a donc certainement dû faire face aux conséquences de l'accident sans être sûr des rares indications qu'il parvenait à obtenir. C'est souvent par le raisonnement qu'on pouvait déterminer ou essayer d'imaginer quel était l'état des organes dans la centrale.

Quant au personnel, il aura dû faire son travail dans des conditions extrêmement difficiles (sans même parler des soucis qu'il a dû se faire, comme tout le monde, quant à sa famille et à ses biens). Il aura dû faire face à des urgences multiples en des lieux où, on le verra, la radioactivité l'empêchait de séjourner.

Le lecteur trouvera dans le numéro spécial de *Nucléaire et Energies*, l'autre publication des retraités d'Areva, une description fine de l'esprit japonais : on y comprend l'importance de la recherche du consensus, souvent sur un compromis. Mais devant une montagne de difficultés simultanées auxquelles il faut faire face, le temps peut manquer pour contacter et convaincre toutes les parties prenantes, surtout quand certaines décisions à prendre sont très graves de conséquences. On verra plus loin qu'il y a eu en particulier deux actions déterminantes sur lesquelles, peut-être, du temps a été perdu. Mais, dans l'ensemble, vu les circonstances, on peut admirer la détermination, le courage et l'efficacité des personnels qui ont pris part, et prennent part encore, à la stabilisation de la situation.

Les responsables ont, semble-t-il, réussi à limiter la dose reçue par chaque individu pour qu'il n'y ait pas, comme à Tchernobyl, des sacrifiés appelés à mourir rapidement par irradiation ou à vivre handicapés le restant de leurs jours.

Le Japon a fini par accepter les robots que lui proposaient la France et les Etats-Unis, permettant d'aller voir sur place et réaliser certaines opérations sans exposer le personnel. On a découvert ainsi, par exemple, que certains niveaux d'eau étaient plus bas qu'on ne pensait dans des cuves, ou plus hauts dans des couloirs inondés. La France disposait de tels robots car, après Tchernobyl, elle a étudié et mis sur pied toutes sortes de matériels télécommandés prêts à intervenir dans de telles circonstances, étudiés spécialement pour résister aux forts rayonnements.

2.4 Qu'advient-il d'un combustible non refroidi ?

2.4.1 Le cœur d'un réacteur à eau bouillante

Presque comme dans nos réacteurs à eau pressurisée, le cœur, contenu dans une cuve métallique cylindrique à axe vertical, est composé d'éléments combustibles juxtaposés. Chaque élément combustible, ou assemblage combustible, est un faisceau de tubes verticaux de plusieurs mètres de long, de haut, tenus ensemble par des grilles horizontales (très élaborées) de forme carrée. Chaque tube vertical a un diamètre de l'ordre de celui d'un doigt. Il est composé d'une gaine mince mais solide en alliage de zirconium, avec des embouts soudés, contenant la matière fissile sous forme de petits cylindres céramiques empilés : de l'oxyde d'uranium UO_2 ou de l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (Mox). La gaine est la première barrière de protection contre la dissémination de la matière radioactive.

La réaction neutronique en chaîne dégage une forte chaleur dans les cylindres combustibles à l'intérieur de la gaine.

Ces assemblages baignent dans un courant ascendant d'eau sous pression, tant que les pompes fonctionnent, bien sûr ! Cette eau est en particulier chargée de recueillir la chaleur. Donc elle s'échauffe en montant.

Dans les cuves des *réacteurs à eau bouillante (REB)*, la pression (de l'ordre de 70 bars) est réglée pour que l'eau, au sommet du cœur, soit en ébullition (vers $325^{\circ}C$). La vapeur est envoyée, par une canalisation qui traverse la paroi de la cuve et l'enceinte de confinement, directement vers les turbines qui entraînent sur leur arbre l'alternateur pour fabriquer l'électricité. Il en va différemment dans nos *réacteurs à eau pressurisée (REP)* : d'une part, la pression est plus élevée, de l'ordre du double, l'eau reste liquide (vers $350^{\circ}C$) ; d'autre part de gigantesques échangeurs de chaleur, appelés générateurs de vapeur, comme leur nom l'indique, produisent dans la boucle secondaire la vapeur qui est envoyée aux turbines.

[Retour sommaire](#)

Dans les REB, c'est la boucle primaire qui traverse l'enceinte de confinement, et on a vu qu'elle peut contenir de l'eau très contaminée en particulier en cas d'accident.
Dans les REP, c'est la canalisation d'eau propre venant des générateurs de vapeur.
C'est un avantage important des REP.

2.4.2 Si le refroidissement est en panne ou insuffisant

Si le refroidissement est en panne,
l'eau ne circule plus le long des faisceaux de tubes des éléments combustibles.
Elle ne circule plus, elle bout plus fort
comme dans notre bouilloire électrique avant que le thermocouple
n'arrête l'alimentation électrique parce que la résistance, mal refroidie, s'échauffe.
Dans la cuve du réacteur, les éléments combustibles, eux aussi, s'échauffent.
L'eau s'évapore davantage, *la pression monte.*
Or on ne peut pas beaucoup la laisser monter.
En effet la cuve des réacteurs à eau bouillante
est en acier moins épais que dans les réacteurs à eau pressurisée
où la pression est deux fois plus élevée.

On est donc obligé de laisser échapper de la vapeur de la cuve vers l'enceinte de confinement qui l'entoure, remplie en principe² d'azote.

Celle-ci est double, acier et béton, et d'une forme, un genre de poire, peu favorable pour résister à une forte surpression.

Pour limiter beaucoup cette surpression dans l'enceinte de confinement, les réacteurs à eau bouillante sont équipés d'un dispositif permettant, en cas de fuite de la cuve, de condenser la vapeur pour former de l'eau liquide. Dans les réacteurs de Fukushima qui ont subi l'accident, ce dispositif consiste en un *anneau froid* de grand volume, appelé *tore*, contenant une certaine quantité d'eau, placé juste sous l'enceinte de confinement. Grâce à cette condensation, la pression dans l'enceinte de confinement ne devrait pas dépasser, en principe³, 3 à 4 bars. C'est d'ailleurs pour cela que l'épaisseur de la partie métallique de l'enceinte de confinement n'est que de 3 centimètres.

Si ce dispositif s'avère insuffisant en raison de la quantité de vapeur relâchée de la cuve, on est aussi obligé de laisser échapper de la vapeur de l'enceinte de confinement pour ne pas risquer de la faire éclater.

[Retour sommaire](#)

Il semble que l'évacuation de vapeur se fasse alors « normalement » directement vers l'atmosphère extérieure. Mais, pour des raisons qui restent à établir, certaines des vannes nécessaires pour ce faire semblent avoir été endommagées, peut-être en raison du séisme, et dans deux des réacteurs, la vapeur s'est en fait évacuée vers l'intérieur du « bâtiment réacteur » (non étanche), celui qui inclut : la cuve et l'enceinte de confinement dont on vient de parler, avec son *tore*, la piscine d'entreposage d'éléments combustibles usés, un grand hall de manutention, et la salle de contrôle.

Les réacteurs de Fukushima Daiichi ne sont pas équipés de filtres tels que les filtres à sable de nos centrales.

Donc la vapeur qu'on laisse échapper de l'enceinte de confinement emporte avec elle une bonne part de la contamination qu'elle contient :
directement dans l'atmosphère extérieure dans le cas « normal » ;
si, en fait, elle est arrivée dans le « bâtiment réacteur »,
elle s'en échappe aussi vers l'atmosphère extérieure,
lentement si le bâtiment est encore en bon état, vu qu'il n'est pas étanche,
très rapidement si le bâtiment a perdu son intégrité par suite d'une explosion
ou si l'on y a ménagé des ouvertures,

De toute façon,
la contamination se répand à l'extérieur, dans l'atmosphère, dans l'environnement.

Or, en l'absence de refroidissement, ou si les moyens de fortune qu'on parvient à mettre en place sont insuffisants, il va y en avoir, de la contamination !... Voici ce qui se passe :

² « en principe », car ce n'est plus vraiment le cas si l'enceinte de confinement, endommagée, n'est plus étanche.

³ « en principe », car il est arrivé qu'elle atteigne 8 bars, en raison de l'ébullition accélérée de l'eau, et peut-être d'une réaction trop tardive.

Beaucoup d'eau s'évapore dans la cuve. *Le niveau d'eau (bouillonnante sur toute la hauteur en l'absence de circulation) baisse et le combustible vient à se découvrir.* Alors qu'il est normalement noyé dans l'eau, on dit alors qu'il est « dénoyé » : d'abord le haut, puis une hauteur plus grande (à moins qu'on parvienne à rajouter de l'eau de l'extérieur en quantité suffisante). Or *un tube de combustible, lorsqu'il n'est pas refroidi par l'eau, s'échauffe considérablement.*

En premier lieu, lorsque le sommet des gaines atteint 900°C,
la gaine métallique se fissure et
les produits de fission volatils à la température du combustible s'échappent.
Ce sont essentiellement l'iode et le césium.

On en reparlera plus loin.

[Retour sommaire](#)

S'ils viennent à sortir de la cuve, puis de l'enceinte de confinement, puis du bâtiment, l'iode et le césium vont se condenser sur les parois froides ou simplement dans l'air, et seront alors emportés par l'air ambiant, dans les bâtiments, puis au gré des vents. Ils seront piégés par les gouttes de pluie ou les flocons de neige s'ils en rencontrent, et vont alors tomber au sol.

On a vu ce qui se passe quand les gaines se fissurent. Les choses ne s'arrêtent pas là...

Lorsque les gaines atteignent 1200°C,
la vapeur réagit avec le zirconium de la gaine, donnant de l'oxyde de zirconium et
de l'hydrogène qui ne demande qu'à exploser
si sa concentration dans l'air est suffisante (4 %).

Pour éviter de telles explosions d'hydrogène, il y a trois moyens :

- *Disposer dans les volumes concernés par ce risque d'explosion des « recombineurs d'hydrogène », c'est-à-dire des catalyseurs de mousse de platine. Ceux-ci ont pour objectif, avant que cet hydrogène ait atteint la concentration explosive, de le faire réagir sans explosion avec l'oxygène de l'air, redonnant de l'eau. Depuis que de telles explosions avaient eu lieu à Tchernobyl, la France a équipé ses réacteurs de recombineurs, mais pas le Japon...*
- *Ménager de larges ouvertures dans les volumes concernés pour y faire entrer de l'air et diluer l'hydrogène avant qu'il atteigne la teneur explosive. Tepco l'a fait pour un bâtiment après avoir subi sur d'autres plusieurs explosions qui avaient causé d'importants dégâts.*
- *Introduire dans le cœur des réacteurs de l'azote afin de diminuer dès l'origine la concentration d'hydrogène ; Tepco a aussi décidé d'adopter cette solution. Au 15 juillet, les trois réacteurs sont maintenant équipés.*

Si une explosion d'hydrogène se produit
à proximité ou à l'intérieur de l'enceinte de confinement,
celle-ci peut être endommagée, ainsi que le tore,
et il est difficile, si les instruments de mesure ne sont pas fiables,
de savoir si leur étanchéité a souffert.

Quoi qu'il en soit, si l'on ne parvient pas à maintenir assez d'eau dans la cuve, les gaines peuvent fondre, ainsi que les éléments de structure qui tiennent les éléments combustibles, et même la céramique combustible peut fondre. Il se forme une matière qu'on appelle « corium ».

Elle se solidifiera au pied de la cuve s'il y reste un certain niveau d'eau.
(Il semble que c'était bien le cas tant que cette matière produisait un fort dégagement de chaleur.)

Il faut encore parler des *piscines d'entreposage des éléments combustibles*. Dans les réacteurs de Fukushima Daiichi, elles se trouvent dans le bâtiment réacteur juste à côté du sommet de l'enceinte de confinement, mais *en dehors de celle-ci*. Elles peuvent être endommagées en cas d'explosion dans le bâtiment du réacteur (ou dans celui du réacteur voisin).

[Retour sommaire](#)

Même des combustibles usés des piscines ont besoin longtemps d'être refroidis pour évacuer la chaleur résultant de leur radioactivité. Le dégagement de chaleur décroît avec le temps, mais il faut veiller à ce que les éléments combustibles restent noyés dans l'eau. Sinon, la même réaction qu'on a décrite pour les réacteurs peut se produire avec une piscine : dégagement d'hydrogène, explosion - ou incendie. Le risque est un peu le même si la piscine fuit ou risque de fuir, ce qui semble avoir été le cas de la piscine n° 4, avant réparation.

2.5 La défense à Fukushima Daiichi

Après le tsunami, la vapeur produite par la puissance résiduelle actionne encore une turbopompe qui active le seul système de refroidissement capable de fonctionner. Il est commandé par des batteries, ultime source d'électricité. Mais ce dernier recours ne dure que tant que les batteries fonctionnent et tant que l'eau dans le tore de décompression est capable de condenser la vapeur. Il cesse de fonctionner quand cette eau se met à bouillir. Au total, il n'a fonctionné que quelques heures pour un des trois réacteurs, moins de trois jours pour les deux autres.

Il existe des circuits de secours pour refroidir les réacteurs. Tepco a réuni des *groupes électrogènes de fortune*, certes trop faibles, mais c'était mieux que rien, pour envoyer de l'eau là où cela lui apparaissait le plus urgent.

Il restait une *réserve d'eau douce pour quelques heures*, on s'en est servi. Mais il a fallu une quinzaine de jours pour en faire parvenir de Tokyo par barges, les routes étant très détériorées par le séisme et le tsunami.

Entre-temps, manquant d'eau douce, restait une solution, *employer de l'eau de mer*. Décision majeure, car *cela interdit aux réacteurs de fonctionner à nouveau un jour*. L'eau salée corrode. Et quand elle s'évapore, elle *laisse des masses de sel* susceptibles d'obturer des canalisations et autres écoulements. On a sans doute perdu du temps avant que soit prise la décision d'utiliser de l'eau de mer. Les niveaux d'eau dans les cœurs ont baissé, et l'on reconnaît aujourd'hui que, par défaut de refroidissement, toutes les étapes décrites au paragraphe 2.4.2, jusqu'à la formation de corium au fond des cuves, ont été franchies dans les premiers jours après le tsunami.

L'autre décision difficile à prendre était de relâcher de la vapeur des enceintes de confinement vers les « bâtiments réacteurs » et, de là, vers l'environnement. *Energies et Médias* n'a pas le détail des informations pour pouvoir l'affirmer, mais il se peut qu'on ait tardé à prendre cette décision, que la pression dans une enceinte de confinement soit montée trop haut, et qu'il en soit résulté une « explosion de vapeur ».

Des *explosions d'hydrogène* se sont produites sur plusieurs réacteurs. On notera qu'elles n'étaient pas inattendues pour le personnel, et aux moments où il savait que le risque était grand, il s'est intelligemment mis à l'abri, ce qui explique que les explosions n'aient produit ni morts, ni blessés. A la piscine très chargée d'un réacteur à l'arrêt est survenu un incendie d'hydrogène. Explosions et incendies ont conduit à des émissions de radioactivité dans l'atmosphère (cf. § 2.7) et, dans la centrale, à des dommages importants, très visibles quand il s'agit du bardage des bâtiments, moins faciles à appréhender lorsqu'il s'agit d'endroits qu'on ne peut aller voir du fait de la radioactivité.

Il apparaît aujourd'hui que
les trois réacteurs qui étaient en fonctionnement avant l'accident
ont vu leur *enceinte de confinement* perdre son étanchéité,
et même, à l'intérieur de l'enceinte de confinement,
il semble que les cuves aient aussi perdu leur étanchéité.

On peut s'en apercevoir par une perte de la pression (si les instruments fonctionnent), et, pour ce qui est de la cuve, par le fait que l'eau qui s'en échappe contient des éléments radioactifs autres que les produits de fission volatils dont on a parlé.

[Retour sommaire](#)

Revenons à l'*alimentation en eau*.

Pour refroidir à tout prix les réacteurs et les piscines, Tepco a d'abord essayé de faire *larguer de l'eau de mer par des hélicoptères*, mais une faible proportion parvenait à toucher leur cible. Avec de l'eau de mer additionnée de bore (sous forme d'acide borique), on a utilisé des camions pompes pour refroidir les cœurs, puis une lance à incendie de très grande puissance pour refroidir la piscine très chargée qu'on avait omis, un temps, de refroidir. On a poursuivi de même avec de l'eau douce quand on en a reçu. Mais, on a trouvé finalement une autre solution pour les piscines : utiliser des canalisations et pompes à très haute pression servant à la construction des très hauts bâtiments à Tokyo. C'est ce dispositif qui maintenant fonctionne en continu.

Pendant ce temps, l'objectif majeur était

- de ramener aussitôt que possible le courant électrique du réseau dans les bâtiments,
- de remettre en service les salles de contrôle pour qu'on puisse de nouveau appréhender l'état des matériels ; encore fallait-il ne pas mettre ceux-ci en court-circuit ! Chaque organe devait donc être sondé et, le cas échéant, réparé, avant qu'on puisse remettre en service la salle de commande ;
- de remettre en service le refroidissement des cœurs et des piscines par de l'eau douce en circuit fermé.

Parallèlement, *la contamination des locaux de travail*, suite aux relâchements de vapeur contaminée et aux explosions, est devenue *presque prohibitive*. Les membres du personnel se relaient pour ne pas recevoir de doses trop élevées lors de leurs interventions. On fait le maximum, avec un résultat positif, pour réduire ou, au moins, fixer la contamination au sol par des résines.

Tepco a compris, après un certain temps, l'intérêt de la proposition faite par Areva (pour le compte du Groupement d'Intérêt Economique INTRA (EDF, Areva, CEA), de fournir des *robots*, comme on l'a dit au paragraphe 2.3. Précieux outils pour parvenir à prendre des photographies et des mesures dans des installations remplies d'eau contaminée ou soumises à un fort rayonnement, afin de comprendre comment il faut agir, et pour réaliser certains travaux.

L'eau très contaminée s'écoulant des locaux qu'on avait cherché à refroidir s'est retrouvée *aux parties inférieures des bâtiments*, empêchant certaines interventions des opérateurs. On est parvenu à obturer certaines fissures par où s'étaient échappés vers la mer quelques centaines de mètres cubes.

Le problème essentiel pour poursuivre le travail est devenu d'*évacuer cette eau très contaminée sans naturellement la rejeter à la mer (il s'agit de plus de 100 000 mètres cubes)*, et d'abord, pour cela, de *trouver des volumes susceptibles de les recevoir* ! Or les seuls existant sur le site étaient déjà pleins d'eau faiblement contaminée. Il a fallu se résoudre, pour les libérer, à en *évacuer le contenu vers la mer, de l'eau faiblement contaminée*. Ces volumes « disponibles » sur place étant insuffisants, on a parallèlement amené par mer des barges vides de grande dimension.

[Retour sommaire](#)

On va continuer pendant des mois
à amener de l'eau de refroidissement pour garder assez froids
les restes de combustible et le corium.
Cette eau, très contaminée par le contact avec le combustible sorti de sa gaine,
va continuer à s'écouler vers les niveaux inférieurs.

C'est pour la décontaminer et pouvoir la recycler
que Tepco a commandé à Areva et l'américain Kurion
une *installation de décontamination de ces eaux, qui sont salées*,
installation capable de diviser par 10 000 la contamination à un débit de *1200 m³/jour*,
enlevant l'huile, le césium, le strontium et le sel.
Cette installation vitale est en service depuis le 16 juin.

On utilise ce procédé Veolia Eau/Areva
à La Hague dans les stations de traitement des effluents radioactifs.

L'eau ainsi décontaminée peut être recyclée pour refroidir cœurs et piscines,
en lieu et place du circuit ouvert utilisé jusque là,
sans créer de nouveaux effluents radioactifs.
L'installation a été construite en un temps record,
et malgré le milieu très difficile, mise en service de façon efficace.
Depuis fin juin, elle débite assez pour fournir l'eau le refroidissement dont on a besoin.

2.6 La situation au 15 juillet

Au 15 juillet, on peut considérer que des étapes essentielles ont été franchies :

- la température de l'eau dans les cuves des trois réacteurs est stable avec une injection d'eau recyclée, donc les restes de combustibles sont refroidis en tant que de besoin,
- de l'azote est de nouveau injectée dans les enceintes de confinement des trois réacteurs : garantie qu'il n'y aura plus d'explosions d'hydrogène,
- la température de l'eau dans les piscines est stable et inférieure à 100°C avec un refroidissement de l'eau en circuit fermé,

- de premières dispositions ont été prises pour consolider la protection contre de nouveaux séismes et contre un nouveau tsunami (en particulier mettre en position élevée les groupes électrogènes, et consolider l'assise de la piscine n° 4),
- l'installation de décontamination des eaux très radioactives fonctionne à un débit suffisant pour que les volumes n'augmentent plus, au contraire.

Energies et Médias n'entrera pas dans les détails des mesures qui permettront progressivement d'atteindre une situation tout-à-fait sûre et stable. Il s'agit essentiellement de créer ou de conforter les circuits fermés de refroidissement, d'augmenter la redondance des circuits et des mesures de sécurité, afin qu'on ne soit pas à la merci d'une panne. On se préoccupe aussi naturellement d'améliorer les conditions de travail des personnels sur le site, et de réparer les bâtiments soufflés par les explosions. Ensuite on retirera les éléments combustibles des piscines et, bien plus tard, on devra retirer ce qu'il reste de combustible des cuves des réacteurs.

2.7 Les rejets dans l'environnement

(Des chiffres précis et des cartes sont fournis dans le numéro spécial de *Nucléaire et Energies*. On s'en tient ici, dans *Energies et Médias*, à des explications qualitatives.)

Naturellement les rejets dans l'environnement sont ceux qui vraiment concernent le public. Tout le pays s'en est inquiété, et les habitants des zones voisines de Fukushima en souffrent et vont continuer longtemps à en souffrir. Qu'en est-il de leur maison, de leurs écoles, de leurs champs et de leurs lieux de pêche, de leur alimentation, et même de leur santé ?

On va d'abord évoquer l'environnement, puis les conséquences de la contamination pour les personnes, ce qu'on appelle la radioprotection.

Les relâchements de vapeur et les explosions d'hydrogène, on l'a vu, ont eu lieu dans les premiers jours, lorsque, les dégagements de chaleur étant importants, l'ébullition de l'eau faisait rapidement monter la pression dans les cuves, puis dans les enceintes de confinement ; il fallait d'urgence la faire baisser. Les niveaux d'eau baissaient autour des assemblages combustibles, et de l'hydrogène se formait et explosait.

[Retour sommaire](#)

De tels dégagements importants peuvent-ils survenir encore dans le futur ? On a vu au chapitre 2.6 que la situation a fait de gros progrès et qu'on peut être relativement optimiste : des dégagements importants de radioactivité dans l'atmosphère sont devenus improbables.

*Les dégagements qui ont eu lieu, même avec les explosions d'hydrogène,
ne sont pas montés très haut en altitude,
contrairement aux gigantesques explosions survenues à Tchernobyl
où l'ensemble du cœur avait subi une explosion et où le graphite était en feu.
La matière fissile et les produits de fission étaient montés
à des milliers de mètres d'altitude.*

A Fukushima, au total, une quantité importante de matière radioactive est sortie des réacteurs. La chance a voulu que, dans les premiers jours après l'accident, les vents soient favorables, soufflant vers le Pacifique. La vapeur contaminée est allée se perdre au-dessus de l'océan, et s'y diluer dans l'atmosphère et dans l'eau de façon telle qu'elle n'a sans doute causé aucun dommage. On en détecte des traces dans l'atmosphère de l'hémisphère nord. Tous les pays s'accordent à dire que, en Europe

par exemple, il ne s'agit que de traces. Mais le 15 mars, lors de la dernière explosion d'hydrogène, malheureusement le vent avait tourné vers le nord-ouest, et il a plu et neigé. La contamination alors est tombée au sol, parfois en des endroits éloignés de la centrale, et s'est fixée sur les terres, les cultures, les routes, les bâtiments. L'iode à vie très courte et courte disparaît rapidement par décroissance naturelle. Le césium reste présent longtemps. A Tchernobyl il ne s'enfonce dans la terre que de quelques centimètres par an, mais qu'en est-il avec les terrains de la région, essentiellement des terres maraîchères, qui peuvent être de nature différente ?

Des cartes ont déjà été dressées (voir le numéro spécial de *Nucléaire et Energies*). Il faudra les mettre à jour quand on sera sûr d'avoir définitivement maîtrisé la situation. On n'est pas surpris que la contamination au sol ne dépende pas que de la distance à partir de la centrale accidentée. En effet, il va de soi que la direction du vent joue un rôle important, et aussi la pluie et la neige. Les particules radioactives très fines poursuivent leur migration dans l'air jusqu'à ce que de la pluie ou de la neige les fassent tomber au sol.

Quant aux *rejets en mer*, on en a parlé. Les fruits de mer et poissons proches de la côte sont à coup sûr contaminés et, tout près du lieu de rejet, ne sont pas comestibles. Jusqu'à quelle distance en est-il ainsi, et comment cela évoluera-t-il dans le futur ? C'est une question grave pour un pays où le poisson est un élément majeur de l'alimentation, et où la pêche est donc une activité essentielle. On a vu que Tepco est maintenant en mesure de traiter l'eau contaminée pour ne plus devoir en rejeter en mer. On traite même de l'eau de mer dans le port pour en absorber la contamination.

Au total, les estimations indiquent que, jusqu'ici,
les rejets dans l'environnement ont été à Fukushima
de l'ordre de 15 % de ceux de Tchernobyl.
Mais au voisinage de la centrale et en certains points précis plus éloignés,
les contaminations sont de l'ordre de grandeur de celles qu'on a mesurées à Tchernobyl.

[Retour sommaire](#)

Il faut parler, au moins rapidement, de la *décontamination*. Il est intéressant de savoir que, suite à l'accident de Tchernobyl, la France a beaucoup étudié la décontamination des terrains, des routes, des bâtiments, ainsi que les possibilités de culture. Il semble que cela intéresse beaucoup les Japonais.

Pour les bâtiments, on peut, dans une certaine mesure, les lessiver.

Les surfaces sur lesquelles on marche et roule, également, mais on peut à court terme les recouvrir de résines qui fixent la contamination, empêchant sa dissémination.

Les terrains réguliers, on peut, s'ils s'y prêtent, en couper horizontalement les quelques centimètres de surface comme des plaques de gazon. Cette épaisseur contaminée serait un déchet qu'on pourrait rassembler et stocker en un lieu connu (pour éventuellement le traiter), le substrat partout ailleurs étant sain pour les cultures.

Quant aux cultures, on peut chercher soit à produire des plantes comestibles saines sur des sols contaminés, soit au contraire à absorber la contamination des sols pour les décontaminer. Le CEA et l'IPSN⁴ ont construit à Cadarache des stalles d'étude prêtes à recevoir des échantillons des terres de

⁴ IPSN : Institut de Protection et de Sécurité Nucléaires, devenu aujourd'hui l'IRSN, Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire.

culture réelles, pour y expérimenter la culture de diverses plantes dans des conditions climatiques proches de celles du lieu considéré.

On peut espérer que, autour de Fukushima, de telles techniques pourront servir. Mais il faudra beaucoup d'argent, et du temps avant que les habitants, les agriculteurs, puissent retrouver leurs logements et leurs terres. Il faudra aussi longtemps pour que, sur tous les territoires recouverts par la vague, disparaisse la salinité des sols.

2.8 La radioprotection

(Pour ce sujet aussi, des chiffres précis et des cartes sont fournis dans le numéro spécial de *Nucléaire et Energies*. Ce numéro d'*Energies et Médias* s'en tient à donner des explications générales.)

On a vu que les relâchements de vapeur sous pression et les explosions d'hydrogène sont survenus essentiellement dans les jours qui ont suivi le début de l'accident, et que les contaminants dispersés à l'extérieur du site de Fukushima (et, bien sûr, aussi à l'intérieur) étaient essentiellement l'iode et le césium.

L'iode, par ses isotopes à vie très courte : iode 132 (période⁵ 2,4 heures), iode 133 (20,8 heures) et à un moindre degré par son isotope à vie courte, l'iode 131 (8 jours), peut causer chez l'enfant des cancers de la thyroïde. Aux personnes qui vont se trouver obligées de respirer de l'air contenant cet iode, on conseille, *préventivement et au signal des autorités*, l'absorption de comprimés d'iode stable qui saturera leur thyroïde. Par précaution, on en distribue non seulement pour les enfants, mais aussi pour les adultes. A Tchernobyl, on en avait distribué quand il était trop tard.

Il est intéressant de signaler un élément favorable pour les Japonais : leur alimentation très riche en iode. On lit que cela peut protéger leur thyroïde et rendre pratiquement inutile l'absorption de pastilles d'iode.

Le césium se comporte vis-à-vis de l'organisme un peu comme le potassium.

Tout ceci concerne la population et, naturellement, le personnel intervenant sur les installations.

Sur le site de Fukushima Daiichi, *le personnel intervenant sur les installations accidentées* a pu être exposé, en plus de l'iode et du césium, à la radioactivité d'autres contaminants venant des cœurs et des piscines, et aux rayonnements gamma.

Tous les journaux font référence aux normes sanitaires fixant la limite annuelle d'équivalent de dose :

- pour le personnel des entreprises et organisations travaillant en milieu radioactif : 20 millisieverts par an, 20 mSv/an (plus précisément 100 mSv sur 5 ans, avec un maximum de 50 mSv sur un an),
- pour le public : 1 mSv/an.

[Retour sommaire](#)

Ce que peu de gens savent, en dehors des spécialistes, c'est que, *en cas d'accident*, il est logique et reconnu légitime d'admettre temporairement des chiffres plus élevés. En effet les normes pour les temps normaux sont calculées avec de grandes marges de sécurité. Dans les situations de drame, il peut être beaucoup plus grave d'appliquer strictement ces normes et de subir des conséquences sur d'autres plans.

⁵ La période d'un élément radioactif est le temps au bout duquel la quantité d'atomes présents s'est réduite naturellement d'un facteur 2. Chaque fois qu'une désintégration radioactive a lieu, un atome disparaît.

Par exemple, évacuer des habitants comporte des conséquences majeures pour leur vie future. Pour vouloir éviter le risque (statistique) de vivre quelques heures de moins suite à une exposition à un niveau de radioactivité un peu plus élevé que la norme, il n'est pas forcément justifié de traumatiser les gens pour la vie en les déracinant. Et où aller, dans ce pays surpeuplé qu'est le Japon ?

[Retour sommaire](#)

On va maintenant voir comment cela se traduit pour la population, puis pour le personnel intervenant.

2.8.1 Radioprotection de la population

Les autorités japonaises ont rapidement réagi : elles ont fait évacuer la population dans un rayon de 20 kilomètres, et elles ont demandé à ceux qui se trouvaient entre 20 et 30 kilomètres, de se calfeutrer dans leur logement. Ainsi des dizaines de milliers de personnes ont été déplacées. Les habitants des régions voisines ont vécu dans une grande inquiétude.

On sait que la limite recommandée par la Commission Internationale de Protection Radiologique, la CIPR, pour la population est 1 millisievert (1 mSv) par an. C'est le chiffre dû à la radioactivité artificielle, s'ajoutant donc à la dose venant de la radioactivité naturelle qui est variable d'un lieu à l'autre. Il semble que les autorités aient fait leur calcul en raisonnant comme il est expliqué en 2.8, en prenant pour limite non pas 1mSv/an, norme pour les temps normaux de la vie entière, mais 20 mSv/an, et en prenant en compte la baisse à venir des doses.

On a expliqué, au chapitre 2.7, que la contamination au sol n'est en fait pas simplement fonction de la distance à la centrale accidentée. Il existe des lieux où la contamination est plus élevée que la limite que l'on s'est fixée, même au-delà de 30 kilomètres (dans la direction nord-ouest). La population en a été prévenue. On lui a alors donné un mois environ pour quitter les lieux.

On envisage de déplacer encore davantage de gens, en réfléchissant à minimiser la dose que recevrait leur corps sur plusieurs années.

2.8.2 Radioprotection du personnel

La CIPR, on l'a dit, préconise pour le personnel des entreprises et organisations travaillant en milieu radioactif un maximum de 20 mSv par an (plus précisément 100 mSv sur 5 ans, avec un maximum de 50 mSv sur un an).

Pour les raisons expliquées au paragraphe 2.8, Tepco a établi l'organisation des travaux consécutifs à l'accident en fixant pour chaque membre du personnel appelé à exécuter des travaux en milieu très radioactif une limite non pas de 50 mSv/an, mais de 250 mSv sur l'ensemble des travaux consécutifs à l'accident.

Il faut savoir que la dose presque à coup sûr mortelle est de l'ordre de 6000 mSv, et que, à 300 mSv, on a encore un risque très faible de développer un cancer (augmentation de l'ordre de 1 %). A titre de comparaison : un scanner du corps entier représente 150 mSv, un scanner du crâne 25 mSv (peut-être fait-on mieux aujourd'hui avec les matériels les plus modernes ?).

Bien entendu, il faut que les personnels d'intervention disposent d'instruments de mesure de la dose instantanée dans les lieux où ils vont se rendre. Cette discipline semble avoir été respectée, et les moyens techniques pour le faire, améliorés au fil des semaines.

Trois personnes, à un moment où l'on n'avait pas encore compris que de l'eau inondant certains locaux était très contaminée, ont marché dans cette eau. Il en est résulté une forte irritation de la peau de leurs pieds et de leurs chevilles. Mais une décontamination superficielle et un traitement approprié sont venus à bout de l'irritation, et la dose reçue était, semble-t-il, assez loin d'avoir atteint la limite fixée.

Cependant les informations récentes indiquent que les tenues de protection du personnel intervenant dans la centrale, en l'occurrence, certains masques sans doute mal ajustés dans les premiers jours, ont laissé passer de l'air contaminé que les opérateurs ont inhalé. Il en est résulté pour certains intervenants une contamination *interne*. C'est la raison pour laquelle les chiffres annoncés par Tepco pour la dosimétrie du personnel sont moins favorables qu'ils ne l'ont été dans les estimations antérieures. On s'en est aperçu en découvrant d'abord chez deux intervenants une teneur élevée en iode radioactif dans leur thyroïde. On a alors décidé de faire systématiquement une mesure de la contamination interne sur tous les intervenants. Sur 3514 personnes, 9 ont dépassé 250 mSv. Les 2 doses les plus élevées sont de l'ordre de 650 mSv. Ces personnes aujourd'hui ne ressentent pas de maladie ou de handicap. On estime que, par rapport à une vie sans cette exposition-là, où le risque de contracter un cancer est de 25 à 30 %, l'augmentation du risque statistique de contracter à terme un cancer, pour une personne ayant été exposée à 600 mSv, est de 3 %.

[Retour sommaire](#)

Donc non, on n'aura pas à Fukushima envoyé au sacrifice certains hommes,
comme cela a été fait dans les premiers jours à Tchernobyl,
d'une part sur le toit du réacteur,
d'autre part sous le réacteur pour consolider le radier de béton
attaqué par le corium chaud.

2.9 Classement de l'accident dans l'échelle INES

L'échelle INES, International Nuclear Event Scale, classe de 1 à 7 les événements nucléaires quant à leur gravité du point de vue de la sûreté. Le Japon a fini par classer l'accident de Fukushima (pour les réacteurs 1 à 3) au niveau 7, le plus élevé :

Accident majeur.

Incidence hors site : Rejet majeur. Incidence sur la santé et l'environnement.

C'est l'AIEA, réunissant les experts internationaux compétents, qui s'était chargée de préciser le niveau d'activité émise, au-delà duquel un accident n'est pas du niveau 6, mais du niveau 7. Vu les activités importantes relâchées en particulier dans la mer, celui de Fukushima *est* de niveau 7.

Beaucoup de gens se sont empressés de conclure que Fukushima égale Tchernobyl. Non ! Les rejets à Fukushima hors du site, on l'a dit, sont de l'ordre de 15 % de ceux qui sont survenus suite à Tchernobyl. Et surtout, du point de vue de la radioprotection, les dispositions prises sagement et en bon ordre par les autorités autour de Fukushima, et la gestion très ordonnée des travaux par le personnel en fonction de la radioactivité, font qu'*il n'y aura sans doute aucun mort dû à l'accident nucléaire*. Il y a eu lors du tsunami trois morts, écrasés, mais aucun décès dû à des phénomènes nucléaires.

L'échelle INES actuelle n'est peut-être pas assez progressive.
Certains envisagent de décomposer le niveau 7 en deux catégories :
niveau 7 et

niveau 8, où l'on classerait Tchernobyl.

Energies et Médias ne prend pas parti.

[Retour sommaire](#)

Rappelons que le tsunami aura fait de l'ordre de 28 000 victimes.

2.10 Conclusion

Cette conclusion ne concerne que le déroulement de l'accident.

Dans une situation de cataclysme naturel et de difficulté extrême, les responsables et le personnel de Fukushima Daiichi ont fait le maximum pour comprendre ce qui se passait en même temps dans 4 réacteurs gravement accidentés, et pour tenter, par des palliatifs, de maîtriser ce qui pouvait encore l'être.

Bien que trois réacteurs soient définitivement perdus, et que leur cœur ait (partiellement) fondu dans leur cuve comme cela était arrivé aux Etats-Unis à Three Mile Island en 1979, il semble qu'on soit parvenu à mettre en place, pendant suffisamment de temps après l'arrêt des réacteurs, et encore maintenant, un apport d'eau tel que le corium formé ne puisse définitivement plus s'échauffer assez pour devenir dangereux comme il l'a été à Tchernobyl⁶.

Quand on s'attache à comprendre comment on en est arrivé là, on voit bien que de tels réacteurs n'avaient pas été modernisés pour tenir compte des enseignements du passé. Il aurait suffi sans doute de travaux limités pour élever et protéger les groupes électrogènes de secours assez pour résister aux tsunamis même très hauts. Des recombineurs d'hydrogène auraient évité sans doute les explosions qui ont détérioré les enceintes de confinement, les cuves et des piscines d'entreposage d'éléments combustibles.

Deux des choses essentielles qui ont été bien faites, c'est l'évacuation des populations avant qu'on doive relâcher dans l'atmosphère de la vapeur contaminée, et l'organisation de roulements pour éviter que les membres des équipes d'intervention reçoivent des doses de rayonnements gravement préjudiciables à leur santé.

Lors de la Conférence ministérielle qui a eu lieu fin juin à Vienne sous l'égide de l'AIEA, le Japon a courageusement présenté une analyse très longue de ce qui n'a pas bien marché, pour conduire à la catastrophe, ce qu'on appelle en français le « retour d'expérience ». Les deux derniers enseignements cités sont généraux. Les paragraphes sont intitulés :

- Renforcement de l'infrastructure de sûreté, avec en particulier celui des autorités de sûreté.
- Instillation en profondeur de la culture de sûreté.

Les lecteurs intéressés peuvent lire le détail sur le site suivant :

http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/pdf/chapter_xii.pdf

Il n'est pas fait état d'une conclusion indéniable : La liste des fautes graves commises par des chefs et des grands chefs est extrêmement lourde.

[Retour sommaire](#)

⁶ A Tchernobyl, où tout est survenu très vite, où il n'y avait pas de cuve (c'est une caractéristique des réacteurs RBMK) ni d'enceinte de confinement, le corium s'est rassemblé très chaud à la surface du béton sous-jacent et a commencé à l'attaquer. Parmi les « liquidateurs » les plus exposés ont figuré ceux qui ont creusé un tunnel pour accéder sous le béton et renforcer celui-ci.