

Le contexte général

Si l'on veut faire des accidents nucléaires de **Fukushima Daiichi** une référence mondiale en matière d'accidents nucléaires graves, il faut savoir de quoi l'on parle précisément. Sans cela on ne peut comprendre comment la **France**, pays relativement le plus nucléarisé, n'a pas, jusqu'à présent, connu d'accident du type **TMI** qui reste la référence pour nos réacteurs **REP**, alors que les réacteurs nucléaires de **Tchernobyl** et de **Fukushima Daiichi** sont de types différents.

Et, si l'on considère l'utilisation des accidents nucléaires de **Fukushima Daiichi** comme base d'analyse des dangers du nucléaire électrogène en **France**, il faut bien détailler la nature des risques respectifs, les différences des réacteurs et, élément très important, l'organisation de la **sûreté** pour l'analyse de sûreté, le contrôle des installations et la gestion des accidents graves.

Au début des années **70** les ingénieurs et responsables ont fait, en **France**, le choix de la technique **PWR**, devenue **REP** après une francisation très rapide, plutôt que l'option **BWR**, réacteurs à eau bouillante, type des réacteurs de **Fukushima Daiichi**.

A la lumière des accidents nucléaires au **Japon**, ce choix s'est révélé extrêmement judicieux. Ce n'est pas un hasard. Cela résulte d'un facteur déterminant qui est la **maîtrise des technologies nucléaires** qui s'inscrit, dans notre pays, dans une ligne historique et s'appuie sur de grands organismes d'état, le **CEA**, l'**EDF**, le **CNRS**... C'est un atout majeur pour la **France**, notamment dans le domaine de la sécurité nucléaire. On comprend ainsi pourquoi, dans notre pays, depuis les fusions partielles d'assemblages sur un **Graphite Gaz** de **Saint Laurent des Eaux**, les accidents nucléaires enregistrés n'ont jamais dépassé le niveau **2** sur l'échelle **INES** [de nature logarithmique] qui en comprend **7**

Tchernobyl et **Fukushima Dai-ichi** concrétisent malheureusement ce **niveau 7**.

Les différences des BWR par rapport aux REP

Un premier point de divergence entre **France** et **Japon** concerne donc **les techniques REP/BWR**.

Dans le cas des accidents au **Japon**, les **BWR** ont montré de gros défauts que n'ont pas les **REP** :

* les **REP** ont une véritable **enceinte** [barrière ultime avant l'extérieur], alors que du fait de leur conception, - la vapeur primaire actionne la turbine de l'alternateur-, le bâtiment turbine des **BWR** contient un circuit primaire et en cas de ruptures, enceinte ou circuits, se voit envahi d'eaux primaires radioactives. [Le séisme ayant fissuré les soubassements des bâtiments réacteurs et turbine à **Fukushima Daiichi**, les eaux très radioactives,- les premières semaines on se situait sans doute à 10^9 **Becquerels/Litre** en **Iode 131 équivalent** ce qui se traduisait par un débit de dose de l'ordre de **400 millisieverts/heure** à la surface dans les drains et puits des bâtiments turbine des réacteurs **1,2 et 3-**, ont fuit vers l'espace marin du site]. Les fuites d'eaux radioactives par les fissures des bâtiments réacteurs et turbine des unités **1, 2 et 3** ont donné lieu, jusqu'à fin **mai 2011**, à la majorité de la contamination marine [après des premières retombées atmosphériques sur la mer dans les premiers jours à cause d'une météo favorable du point de vue de la contamination des zones peuplées]. Lorsque les rejets marins ont été très limités, **juin 2011**, la contamination radioactive a été essentiellement due aux **Césiums 134 et 137**.

* Dans les enceintes des **REP**, il y a des pièges à **hydrogène** qui permettraient d'éviter les explosions d'**hydrogène** [jusqu'à **1 tonne d'H2** peut être générée par l'accident extrême sur un **BWR** comme sur un **REP**] qui se sont produites dans les bâtiments réacteurs des unités de **1 à 4** à **Fukushima Daiichi**.

De plus, ces explosions d'**hydrogène** dans les bâtiments réacteurs de la tranche n°1 de cette centrale nucléaire sont à l'origine des grands relâchements, sous forme de pics d'émission, d'aérosols

et de gaz radioactifs dans l'atmosphère, avec un axe majeur de propagation **Nord/Nord-Ouest**, suivant les conditions météo.

* Dans les **BWR**, les piscines de stockage intermédiaire des éléments combustibles, neufs et usés, sont positionnées en altitude, au dernier niveau supérieur, couvertes par une structure qui s'envole à la suite d'une surpression. Dans **l'unité n° 4**, la structure de la piscine, qui avait résisté au séisme a été ébranlée par une explosion d'**hydrogène** (venant de **l'unité 3** par un circuit de ventilation commun) qui s'est produite en dessous d'elle. La structure a été consolidée et a bien tenue lors de répliques sismiques de forte intensité. Par rapport aux **REP**, il y a donc un problème de localisation et de confinement.

* Un dernier point de divergence qui n'a pas eu de conséquences à **Fukushima Daiichi** où les mécanismes de barres de contrôle ont joué leur rôle et stoppé les réactions en chaîne, sur les réacteurs 1,2 et 3, dès la première manifestation du grand séisme du 11 mars 2011, tient au fait que dans un **BWR** les barres de contrôle doivent être remontées dans le cœur, alors que dans un **REP** elles peuvent y compris tomber dans le cœur pour l'arrêt d'urgence.

*Ce premier point montre déjà que la transposition directe des accidents nucléaires de **Fukushima Daiichi** sur une centrale nucléaire de notre pays n'est pas possible.*

Entre autres, du fait d'une meilleure résistance de l'enceinte et d'une **grande probabilité** d'éviter les explosions d'**hydrogène** dans celle-ci [la diffusion de l'**hydrogène** dans le volume de l'enceinte est une question complexe à cause des mouvements de convection et des flux de condensation, donc il faut être prudent sur cette affirmation], les émissions d'aérosols et gaz radioactifs d'un **REP** dans l'environnement dans le cas d'un accident nucléaire grave [fusion du cœur], seraient bien moindre.

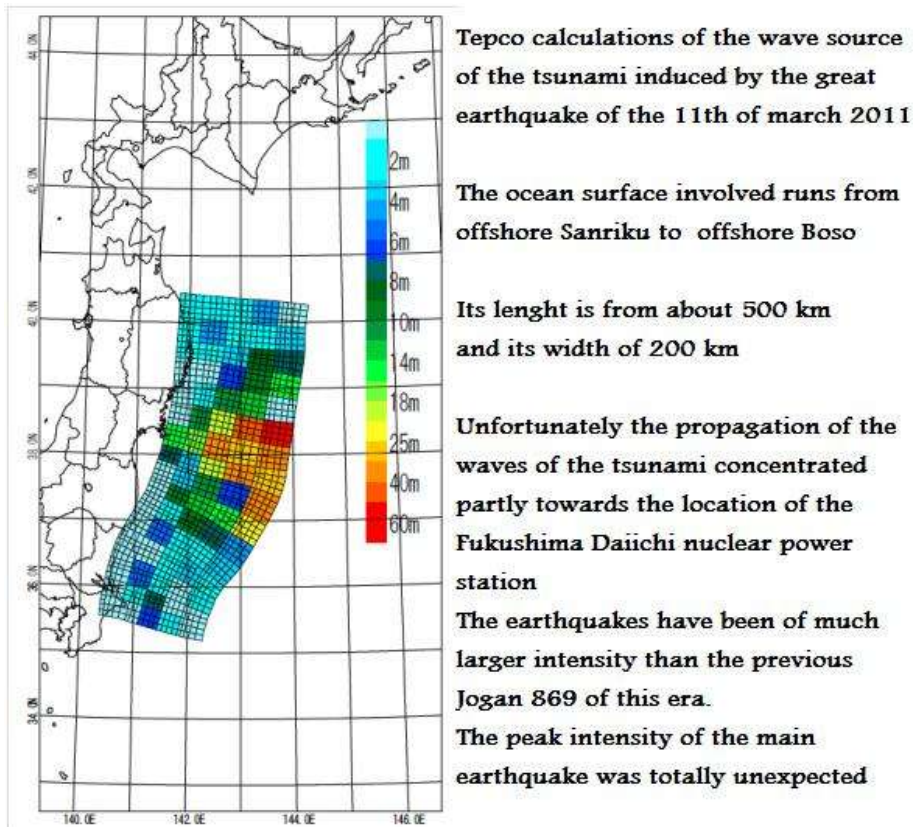
Pour les **REP**, l'accident grave de référence est toujours **TMI, Three Miles Island**, où le tiers du cœur a fondu, une partie du **corium** étant tombée sur le fond de la cuve primaire, sans qu'il y ait eu de rejets notables dans l'environnement.

On peut même affirmer qu'un **EPR**, correctement dimensionné vis-à-vis du risque sismique, avec ses diesels de secours sécurisés, aurait résisté aux conditions extrêmes rencontrées à **Fukushima Daiichi** le 11 mars 2011.

Les cataclysmes naturels au Japon n'ont pas d'équivalents en France.

Du point de vue sismique déjà, le tiers du **Japon** est soumis aux risques de séismes d'intensité importante. Non loin de ses côtes, se situent des lignes d'affrontement de plaques continentales et tectoniques sur des milliers de kilomètres. Les secousses rapprochées du grand séisme du **11 mars 2011** résultent de la déformation d'une zone sous marine de 200 par 500 **kilomètres**.

Séisme du 11 mars 2011 et hauteur vagues sources du tsunami



L'intensité de ce séisme, à l'épicentre situé à 180 kms au large de **Fukushima Daiichi**, a été estimée à **9**. A cet endroit d'origine, il a été calculé qu'une vague de 60 mètres de haut environ s'était formée. Les ondes du séisme qui ont touché ce site nucléaire [ainsi que les centrales nucléaires d'**Onagawa** et de **Fukushima Daini**] ont provoqué à la base des bâtiments des accélérations du niveau du **Séisme de sécurité, Ss**, considéré comme base de calcul de la résistance au séisme des réacteurs.

Le séisme lui-même a coupé l'alimentation électrique extérieure du site et provoqué quelques problèmes de fonctionnement sur des circuits, notamment sur le **réacteur n° 1**, mais il a été montré que c'est bien l'inondation venant des vagues du **tsunami** qui a conduit aux accidents nucléaires graves. Particulièrement en noyant les diesels pour l'alimentation électrique de secours, en dehors d'un seul concernant les réacteurs 5 et 6, et des tableaux électriques.

[Si le séisme avait été la cause de la fusion des cœurs, les événements accidentels auraient été plus rapides sur les réacteurs **2** et **3**. **Le seul soupçon se focalise sur le réacteur n°1, où en fait une erreur humaine a été admise par la Tepco**]

Au **Japon**, dans une perspective de redémarrage de l'électronucléaire, seul les réacteurs implantés sur une faille sismique jugée active seront déclassés. En dehors de ce cas très défavorable, on estime que les réacteurs nucléaires peuvent être conçus pour résister aux séismes les plus forts.



Prototype rapide à sodium de **Monju**

(Pour lequel se pose précisément le cas d'une faille sismique sous le site peut-être encore active)

Des défaillances et inerties des acteurs en charge des questions nucléaires au Japon ont abouti aux accidents nucléaires de Fukushima Daiichi.

On peut d'ailleurs dire la même chose pour **Tchernobyl**.

C'est ainsi qu'à la suite du rapport d'une commission d'enquête parlementaire, ces accidents nucléaires majeurs, du niveau de **Tchernobyl**, ont été qualifiés de **manmade disaster**.

Il y a eu des défaillances au niveau du gouvernement **japonais**, dans la gestion des questions de sûreté nucléaire et dans celle des premiers instants des accidents nucléaires, notamment pour les évacuations des populations et leur information.

Il y a eu une incapacité complète de l'autorité de **sûreté japonaise** à gérer les problèmes majeurs de sûreté, -les risques de séisme et de tsunami associé-, au niveau de leurs évaluations et sur le plan de l'exigence de les faire correctement prendre en compte par la **Teppo**. Lors du déroulement des accidents nucléaires, la **sûreté japonaise** n'a pas été capable de contrôler l'action de la **Teppo** qui d'ailleurs a été prise en main par les responsables du site de **Fukushima Daiichi**, qui ont ainsi décidé de l'injection d'eau de mer dans les réacteurs sans l'accord gouvernemental [incroyable pour des **japonais**, mais salvateur].

Des calculs de dispersion des aérosols radioactifs et de retombées suivant les conditions météo, Code **SPEEDI**, envoyés par mail à la Préfecture de **Fukushima** ont été ignorés...

La compagnie privée [depuis elle a été quasi nationalisée] **Teppo** où existait la pleine connaissance de deux problèmes majeurs de sûreté qui allaient se révéler fatals le 11 **mars** 2011, soient la possibilité d'inondation des diesels de secours et la hauteur potentielle de la vague d'un tsunami provenant de la zone d'où il a été propulsé par le grand séisme du **11 mars 2011**, a fait preuve d'une désorganisation et d'un laxisme extrême vis-à-vis de ces dangers établis. [Le site d'**Onagawa** avait été conçu par un ingénieur qui s'était préoccupé d'évaluer la hauteur de vague d'un tsunami en se référant au tsunami **Jogan** du 9^{ème} siècle, précisément originaire de la même zone de frontière de plaques continentales et tectoniques. En conséquence ce site n'a pas été inondé le **11 mars 2011**].

Depuis un **méa culpa**, dont les **japonais** sont capables, a conduit à une profonde réorganisation de la sûreté, - où le modèle français a servi de référence-, ainsi qu'à une grande remise en cause au sein de la **Teppo**. A l'initiative de cette société maintenant sous le contrôle de l'Etat, un comité piloté par des personnalités extérieures, un ancien responsable de l'**US-DOE**, sûreté fédérale américaine, le **Dr Klein**, et une ancienne responsable de la sûreté nucléaire britannique, Lady **Barbara Judge**, a analysé la gestion des accidents nucléaires par la **Teppo**, et proposé une réorganisation interne, ainsi qu'une évolution des mentalités

[Ce qui est intéressant c'est qu'ils ont suggéré que la structure hiérarchique laisse la place à la réflexion et à l'initiative personnelle. Effectivement une révolution pour des **japonais**, mais qui met en évidence un aspect méconnu du nucléaire, c'est-à-dire que contrairement à la propagande, il n'y a pas de **nucléaire sûr** sans l'application d'une certaine démocratie dans les organismes en charge de ce domaine].

Un point très important de leurs conclusions est qu'ils ont estimé, après une analyse de fond, qu'il était possible d'éviter les accidents graves sur les réacteurs nucléaires. **Un accident maximum sur un réacteur nucléaire n'est donc pas une fatalité.** La clé réside dans une bonne organisation de la sûreté, au niveau de l'analyse et des contrôles particulièrement. On ajoutera qu'une maîtrise publique du domaine est indispensable.

La gestion des accidents nucléaires et le retour à une situation contrôlée, le « coldshutdown ».

Ce qu'il faut bien voir d'abord, est que devant l'évolution dramatique des accidents nucléaires dans un contexte de chaos mortel provoqué par le tsunami, la haute direction de la **Tepeco** a envisagé le retrait total de ses personnels du site de **Fukushima Daiichi**. Mais sous la direction du super intendant du site **Masao Yoshida**, un noyau de 100 à 150 ingénieurs et techniciens, assistés de pompiers et de policiers, s'est acharné sur les multiples tâches nécessaires afin de limiter les accidents sur **6** réacteurs nucléaires, dont **3 + 1** avaient de très gros problèmes. Ils ont d'abord réussi à refroidir correctement les réacteurs **5** et **6** à partir d'un diésel de sauvegarde épargné par le tsunami.

Et il s'en est fallu de peu qu'ils ne réussissent également à sauver la situation sur les réacteurs **2** et **3** [par le rétablissement de circuits électrique pour l'alimentation des matériels, instrumentations et circuits à partir de générateurs électriques qui allaient arriver sur le site sur des camions].

Les interventions étaient rendues très difficiles par l'absence d'éclairage, la disparition de l'instrumentation et les difficultés de communications, notamment entre le quartier général et les salles de contrôles. C'est ainsi que les choses ont mal tournées sur le **réacteur n°1** où il y avait des dysfonctionnements sur les circuits principaux de refroidissement. Ce dernier étant assuré automatiquement par un circuit de sauvegarde. Malheureusement, dans ces conditions extrêmes, une erreur humaine a été commise qui s'est conclue par l'arrêt malencontreux du système de refroidissement de secours.

L'enchaînement de l'accident grave s'est alors déclenché au bout de quelques heures sur le **réacteur n°1**: dégradation du cœur et génération d'**hydrogène**, fusion du cœur et formation du **corium**. Le **corium** tombe ensuite sur le fond de la cuve primaire et la transperce partiellement, ce qui fait qu'une partie du **corium** se retrouve sur le fond de l'enceinte. Cette dernière se rompt plutôt par surpression interne. L'**hydrogène** et les radionucléides relâchés par le combustible sortent alors dans le bâtiment réacteur. Des explosions d'**hydrogène** font voler la superstructure du bâtiment réacteur et projettent également dans l'atmosphère des aérosols et gaz radioactifs. Il y a également des explosions de vapeur lorsque l'on envoie de l'eau sur des cœurs dénoyés et surchauffés. Ceci est à des nuances près, le scénario que l'on a retrouvé sur les réacteurs **1**, puis **3** et **2**. L'**unité 4** comme on l'a vu, a reçu de l'**hydrogène** et des **radionucléides** en provenance du **réacteur n° 3**.

La lutte pour le contrôle des **réacteurs 2** et **3**, qui a été rendue encore plus difficile par l'accident du **réacteur n° 1** [les responsables ont toujours eu le souci d'épargner à leurs techniciens l'intégration de trop fortes doses de rayonnement], s'est concentrée sur deux axes : le rétablissement d'une alimentation électrique et l'injection d'eau de mer dans les réacteurs.

A ce propos, le **Superintendant** du site a déclaré lors de son départ, qu'il avait été lui-même stupéfié de la vitesse à laquelle ses techniciens avaient mis en place un système de pompage et des tuyaux, puis un raccordement avec les circuits des réacteurs, ligne d'aspersion et ligne d'alimentation normale, pour l'injection d'eau de mer.

Il s'en est fallu de peu que l'opération réussisse sur ces deux réacteurs [il y avait aussi le problème de la forte pression du circuit primaire qui bloquait l'injection]. Lorsque les injections d'eau de mer ont pu être mises en œuvre les cœurs des réacteurs étaient déjà très dégradés. Et il y avait des ruptures de cuves.

Mais il faut souligner que ces injections ont permis d'éviter sur les trois réacteurs, que le **corium** perce l'enceinte et entame sérieusement le béton du radier. Ce qui était fondamental du point de vue de la contamination, - l'interaction massive du **corium** et du béton génère des **aérosols**-, et pour le contrôle ultérieur du **corium**, notamment son refroidissement.

Il n'y a qu'en **France** que ceux qui ont réalisé cela ne sont pas considérés comme des héros.

Les ingénieurs et techniciens de **Fukushima Daiichi** ont ensuite été confrontés à deux importants défis : la gestion des eaux radioactives et le contrôle du réacteur vis-à-vis des relâchements d'hydrogène et de la réactivité, - en effet des conditions de criticité à partir des **corium** et de l'eau de refroidissement injectée, peuvent être réunies. De même dans les piscines de stockage-

* Une injection régulière dans les réacteurs d'un absorbant neutronique permet d'éviter l'excursion critique. Un prélèvement gazeux du primaire dans lequel on recherche la présence d'un radionucléide, le **Xe 135**, typique de l'emballement des fissions, permet de contrôler un éventuel accident de ce type.

* De l'**azote** est également injecté régulièrement dans l'enceinte des réacteurs afin d'empêcher l'**hydrogène** encore piégé ou créé par radiolyse, de sortir.

* le problème des eaux radioactives est énorme. D'ailleurs sur le site de **Fukushima Daiichi**, il y a un total d'environ 280.000 tonnes d'eaux stockées, transférées, ou bien en circulation dans les réacteurs et l'usine de traitement des eaux qui ont circulé dans le réacteur.

Dès le départ, immédiatement après les accidents nucléaires, la question de la gestion des quantités d'eaux pompées dans la mer et des eaux très radioactives qui résultaient des fuites et condensations de vapeurs venant du circuit primaire, s'est posée. Des stockages ont été installés sur le site, on a même utilisé une barge de l'armée américaine accostée dans l'espace marin. Et la **Tepeco** a obtenu l'autorisation de déverser dans la mer près de 11.000 tonnes d'eaux faiblement radioactives. Ce qui a occasionné de telles protestations que l'interdiction définitive de tout rejet liquide en mer lui a été signifiée par l'autorité de sûreté. Pour éliminer les fuites vers l'espace marin du site, la **Tepeco** a implanté dans le sol, devant celui-ci, un mur d'acier vertical.

Cela a aussi eu l'effet d'empêcher les eaux de pluie de s'évacuer dans la mer. Ces eaux de pluies se chargent d'une radioactivité faible, en lessivant les sols du site, elles peuvent aussi pénétrer dans les bâtiments.

Les eaux en provenance du circuit primaire, qui véhiculent des radionucléides, envahissent depuis les accidents graves les sols et sous-sols des bâtiments réacteurs et turbine des unités de **1, 2 et 3**.

Afin qu'elles ne se déversent pas en masse à l'extérieur, il faut les maintenir en dessous d'un certain **niveau**. La très haute radioactivité initiale était due pratiquement à l'**Iode 131** et au **Césium 134** et **137**. Néanmoins d'autres radionucléides sont présents dans ces eaux et en dehors du **Césium**, celui qui va ressortir au niveau de la toxicité est le **Strontium**, un produit de fission, avec ses isotopes radioactifs **89** et **90**.

Pour fixer les idées, on évaluera la radioactivité de ces eaux en **Iode 131** équivalent, à de l'ordre de 10^9 **Becquerels/Litre** pendant au moins la première semaine. Cela se traduisait par un débit de dose à la surface de ces eaux de plus de 400 **millisieverts/heure**.

Pour des interventions et pour la mise en place des dispositifs de pompage, les techniciens ont du patauger dans ces eaux. Et il est clair que quelques uns ont été soumis aux conditions, surtout d'irradiations externes, pouvant amener à des problèmes de santé futurs, exactement des **Leucémies** qui peuvent se révéler des années et même des dizaines d'années plus tard.

Un objectif prioritaire de la **Tepeco** a été de construire une usine, avec plusieurs unités, de traitement des eaux radioactives, avec dans un premier temps les objectifs de dessalement et de décontamination **Césium**. Cette usine avec un étage **Kurion**, américain, pour le dessalement et le piégeage **Césium** et l'étage **Areva** également pour la décontamination **Césium**, puis complétée par un étage **Toshiba**, a été construite en un temps record. En fait, littéralement bluffant selon les dires d'un représentant d'**Areva** sur place. Cela n'a pas été sans problèmes de fonctionnement et de fuites, mais à la fin **juin 2011** l'usine fonctionnait. Ce printemps **2013**, un nouvel étage destiné à la décontamination des autres radionucléides, particulièrement les **strontiums 89** et **90**, qui est développé au **Japon**, est en cours de tests.

Cela a permis d'établir **un cycle fermé** [en fait ouvert, si l'on se réfère au cycle fermé du circuit primaire antérieur] où les eaux venant du primaire étaient traitées, puis renvoyées dans le circuit primaire des **réacteurs 1 2 et 3** pour le refroidissement des **corium**.

Aux tous premiers temps, pour refroidir les **corium**, les débits d'eaux par les deux lignes d'injection étaient de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{heure}$. Avec le déclin de la puissance résiduelle, on se situe maintenant avec des variations à moins de $5 \text{ m}^3/\text{heure}$.

Le critère utilisé pour juger de l'efficacité de ce refroidissement concerne les températures mesurées en bas de la cuve primaire, côté enceinte. Ce critère a été fixé à moins de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est aujourd'hui très largement satisfait.

Ce que l'on appelle le **coldshutdown**, l'arrêt froid, correspond donc aux trois éléments principaux suivants :

- * la prévention contre les **accidents de criticité**, dans les réacteurs et les piscines de stockage.
- * la prévention du risque **hydrogène** par l'injection d'azote dans les enceintes
- * le refroidissement des **corium** en boucle fermée avec le traitement,- dessalement et décontamination-, des eaux circulant dans le circuit primaire. Avec le critère de températures inférieures à $100 \text{ }^\circ\text{C}$ sous la cuve primaire.

On y ajoutera un retour à une ambiance générale de radioactivité sur le site inférieure au **microsievert/heure**.

Cet état d'arrêt froid a été officiellement reconnu par le **gouvernement japonais** et confirmé par la **sûreté américaine** à la fin 2011.

Il reste que la question de la gestion des eaux contaminées et des résidus extrêmement radioactifs qui résultent de la décontamination [boues pour le dispositif **Areva** et capsules pour l'installation américaine **Kurion**] est une question très tendue sur le site de **Fukushima Daiichi**.

Ainsi des fuites viennent de se produire sur trois stockages souterrains d'une capacité d'environ 11.000 tonnes chacun. Même si la radioactivité de ces eaux n'a rien à voir avec ce qu'elle était au départ, [Ces eaux ont été décontaminées en **Césium** et l'activité en **Iode 131** est maintenant très faible. Il reste une activité de l'ordre de $10^3 \text{ Becquerels/cm}^3$ en rayonnement **béta**, venant des **strontiums 89 et 90**, l'activité **gamma** étant négligeable] cela nécessite tout de même un transfert vers des capacités métalliques hors sol.

L'aspect sanitaire

Il faut d'abord rappeler des éléments qui sont ignorés ou bien passés opportunément sous silence, lorsque l'on parle des effets biologiques des rayons ionisants.

Pour le nucléaire, la référence sont les conséquences de la Bombe d'**Hiroshima**, où les humains ont été exposés généralement à de fortes doses de rayonnement, dont d'importants flux de neutrons qui causent de gros dommages. La transposition avec les conséquences d'un accident nucléaire, en dehors des accidents de criticité qui émettent des forts **flux de neutrons, n'est pas directe**, justement parce que dans ce dernier cas l'irradiation est plutôt due à des rayons **gamma**, dans le cas d'irradiation externe, et à **gamma plus béta** pour les irradiations internes, n'est pas directe.

Pour les accidents nucléaires de **Fukushima Daiichi**, les irradiations sont quasiment exclusivement dues, en dehors d'une possibilité non avouée d'accident de criticité sur un réacteur ou une piscine de stockage [mais les techniciens n'étaient de toute façon pas directement exposés à ce moment là], à des rayons **gamma** principalement et **béta**. Cela a aussi été plutôt le cas à **Tchernobyl**, bien qu'il y ait eu un emballement du réacteur, parce que les premiers courageux intervenants ont agi après cette

excursion neutronique. Il y a donc des enseignements à tirer de **Tchernobyl** du point de vue de l'effet des irradiations qui sont directement applicables à **Fukushima Daiichi**.

Naturellement les règles édictées par la **CIPR**, comité internationale pour la radioprotection, sont conservatives. Les appliquer pour tirer des conclusions définitives comme la **LLSS**, loi linéaire sans seuil, n'est pas scientifiquement fondé.

Qu'est ce que l'on sait aujourd'hui dans ce domaine des effets biologiques des rayonnements ?

La séparation de deux domaines majeurs reconnus, celui des faibles doses et celui des effets dits **déterministes** où les dommages biologiques sont proportionnels à la dose biologique intégrée, est toujours présente dans les modélisations.

Le **Sievert** est l'unité de dose biologique intégrée qui tient compte de l'effet réel, c'est-à-dire avec un coefficient relatif à l'organe, au tissu... qui est le lieu d'un dépôt d'énergie du au rayonnement, **-neutrons, gamma, béta...** -, dont l'unité est le **Gray**, soit un **Joule par Kilo**.

La frontière entre ce domaine déterministe où l'on peut clairement relier les dommages aux effets des rayonnements et le domaine des faibles doses est évaluée à 100 **millisieverts**.

Dans le domaine des faibles doses les effets biologiques sont aléatoires, le domaine est dit **stochastique**, et on peut les quantifier en termes de probabilités. Dans la pratique ces probabilités sont très faibles, mais il est plus prudent de les considérer.

Pour réaliser des évaluations une loi conservative, la **LLSS**, a été considérée à partir de **zéro**, on considère que les problèmes commencent dès zéro, - ce qui pris à la lettre signifie que toute l'humanité a un problème puisqu'elle subit la radioactivité naturelle, les rayons cosmiques, les ondes radio, les scanners et radiographies.. - [d'ailleurs il y a des régions du monde où des populations intègrent de l'ordre de 11 **millisieverts** par an. Sans avoir plus de problèmes de santé, il faut le noter] jusqu'aux dommages évalués pour le cas d'**Hiroshima**.

Cette loi est très conservative pour deux raisons :

* on a vu la première au sujet des flux neutroniques générés par la bombe d'**Hiroshima**.

* la seconde est relative à des études qui se sont déroulées pendant des années et ont donné lieu à des rapports [notamment un rapport de l'**Académie de médecine** de **2005** des Professeurs **Aurengo** et **Tubiana** et des études de médecins du nucléaire de **Montpellier...**] menées en **France**, aux **USA...** et qui ont conclu à l'existence d'un **seuil** qui pourrait quantifier la capacité d'auto réparation de l'organisme.

Donc, les dommages irréversibles ne partent pas de **zéro** et les probabilités de dommages biologiques définitifs dans ce domaine des 100 **millisieverts** sont très faibles.

[La prochaine étape est évidemment de distinguer spécifiquement les cancers **radio induits**. Ce qui semble avoir été réalisé par des équipes françaises sur les cancers radio induits de la **thyroïde**]

Tchernobyl fournit donc un certain nombre de renseignements.

Pour les fortes doses d'abord. Les premiers intervenants, - plongeurs, pilotes d'hélicoptère, pompiers... -, ont subi de très forts débits de doses de rayonnements **gamma**. A ce niveau très élevé on raisonne en **Gray/heure**. Environ **200** ont ainsi intégré plusieurs **Gray**, jusqu'à **40 Gray**, et seulement de l'ordre de 25% d'entre eux sont mort dans les délais déduits d'**Hiroshima**.

* Dans le modèle classique les gros problèmes commencent à **5 Gray** et au-dessus de **10 Gray** la mort est considérée comme certaine dans un délai de l'ordre du mois.

* Malheureusement les données de **Tchernobyl** ne sont pas d'une grande fiabilité, en dehors de la réalité précédente, mais il semble que les techniciens qui se sont trouvés dans une ambiance de débit de dose biologique de l'ordre du **Sievert/heure**, tout en intégrant des faibles doses, aient été victimes de **Leucémies** dans des délais qui se chiffrent en groupe de **5/10** années. Donc cela peut être 30 ans après l'irradiation.

Cette donnée est très importante pour les techniciens de **Fukushima Daiichi** où aucun d'entre eux n'a subi de dose de rayonnement au-delà du **Gray/heure**, mais certains, peu nombreux, ont certainement réunis ces conditions.

Un médecin très connus de la mouvance anti nucléaire, **Youri Bandajevski**, a mis en avant le fait que de faibles doses d'irradiations, dues par exemple à la présence de **Cs 137** dans l'organisme [qui s'y comporte sans doute comme le **Potassium**] peuvent entrainer de graves conséquences au niveau **cardiovasculaire**, mais aussi sur des **organes vitaux**, par altération de gènes. Pour lui ces conséquences peuvent se révéler très longtemps après, **30 ans** par exemple.

A l'inverse des assertions des frères **Nesterenko** qui sont/étaient des techniciens de la radioprotection, on ne peut écarter ses conclusions et les effets **cardio vasculaires** des rayonnements ne sont plus considérés comme impossibles. Comme ce l'était au moment de **Tchernobyl**.

Ce n'est donc pas un effet à négliger, mais il n'y a pas eu à **Fukushima Daiichi** de vague d'accidents cardiovasculaires, malgré les très importants rejets de **Cs 134** et **137**.

Les conséquences sanitaires des accidents nucléaires de Fukushima Daiichi

C'est donc sur ces bases qu'il faut analyser les conséquences sanitaires de la radioactivité relâchées par les installations nucléaires accidentées à **Fukushima Daiichi**.

Ce qu'il faut souligner à ce niveau, c'est qu'autant les informations sur les accidents nucléaires eux-mêmes et l'évolution de la situation sur le site des accidents graves sont dépendantes des informations données par la **Teppo**, autant les **données extérieures**, -répartitions de la radioactivité et débits de doses, contamination radioactive de l'océan, doses biologiques intégrées par les personnes touchées par les retombées d'aérosols et de gaz radioactifs...-, mettent en jeu beaucoup d'organismes y compris étrangers. Les mesures de radioactivité terrestres dans la zone des 60 kms ont été réalisées par l'**US-DOE**, et par le grand Ministère japonais du commerce, de la jeunesse... qui a aussi effectué des mesures dans l'espace marin côtier. Au-delà des 60 kms l'**AIEA** a également relevé quelques débits de dose.

Pendant les premières semaines néanmoins, un ensemble de défaillances, mettant en cause la responsabilité du gouvernement et de son organisme de sûreté, a conduit à des mesures insuffisantes des dépôts radioactifs et à une très mauvaise prise en compte des calculs de propagation et de dépôts des aérosols et gaz radioactifs, code **SPEEDI**, d'où malheureusement avec une certaine logique, des problèmes sur l'évacuation et l'information des populations.

D'autant qu'après une météo favorable, est venu le moment d'une propagation concentrée sur l'axe terrestre **Nord/Nord Ouest** qui a entraîné des contaminations fortes jusqu'à 60 kms de **Fukushima Daiichi**. Le cas de **Litate Village**, le village désert décrit par le cinéaste **Wim Wenders**, est bien connu.

Un des problèmes majeurs des défaillances au niveau des mesures réside dans le fait qu'une proportion notable des rejets en **Iode 131** a eu lieu sous forme gazeuse **I2**, dit **Iode** moléculaire, et **HI**. L'**Iode** sous forme gazeuse et l'**Iode** combiné au **Césium** par exemple sous forme d'aérosols, ont eu des dispersions géographiques différentes ce dont témoigne la dispersion des rapports **Iode/Césium** qui ont pu être mesurés.

Il y a donc une incertitude sur la répartition de la contamination environnementale en **Iode 131**. Et donc dans les évaluations des irradiations au niveau des glandes thyroïdes des populations sensibles sur ce plan, soient les jeunes de 0-18 ans au **Japon** (en **France** on considère plutôt 0-24 ans).

Cela ne remet pas fondamentalement en cause les conclusions sur l'aspect sanitaire, concernant la glande thyroïde des jeunes, parce que l'erreur ne peut pas être de cette ampleur, mais cela incite à la prudence et à la vigilance.

Par contre, sur l'aspect alimentaire et la distribution d'**Iode**, les mesures prises rapidement ont eu une grande efficacité sur un point très sensible. Une des conclusions de **Tchernobyl** est que la grande

majorité des cancers de la thyroïde qui se sont déclarés chez les jeunes (il y en a eu des milliers malheureusement, mais guéris pour la grande majorité) proviennent de la consommation de lait contaminé.

Il y a eu des restrictions et des contrôles sur les aliments, ainsi que sur les liquides, lait et eau principalement. Assez rapidement, des normes très basses 100 **Becquerels/kg** pour les aliments, - viandes, poissons,...-, et 100 **Bq/Litre** pour les liquides ont été imposées. Elle était de 500 **Bq/L** précédemment.

Parallèlement, contrôles et surveillances médicaux ont été mis en place. Des études et examens notamment sur les thyroïdes de cohortes de jeunes,- il s'agit d'évaluer les irradiations subies par plusieurs millions de personnes-, aboutissent tous à la même conclusion. Les doses intégrées par les populations ne sortent pas du domaine des faibles doses.

Par exemple une étude médicale de **février 2012** portant sur 10.000 personnes de la population de la Préfecture de **Fukushima**, montre qu'en dépit de mauvaises conditions d'évacuation, seulement 42% des personnes étudiées ont dépassé une **dose intégrée de 1 millisievert**. Dont seulement **71** d'entre elles ont reçu des doses supérieure à **10 millisieverts**. Le maximum est de **23 millisieverts** pour une femme.

Pour les jeunes de moins de **20 ans** l'irradiation suit le même schéma avec un maximum de **18 millisieverts**.

Et début mars 2012, les scientifiques de l'université d'**Hirosaki**, Préfecture d'**Aomori**, ont publié les résultats de leurs examens de la **thyroïde** effectués sur **65** personnes résidents près de **Fukushima Daiichi** au moment des accidents nucléaires.

La présence d'**Iode** radioactif a été mise en évidence pour **50** d'entre elles.

Les doses d'irradiation pour chaque personne ont été calculées. La plupart ont intégré une dose inférieure à **10 millisieverts**. **Mais 5 sont à plus de 50 millisieverts**.

Le cas le plus élevé **87 millisieverts** concerne une personne habitant à **30 kms** du site accidenté et qui est restée chez elle pendant les deux semaines qui ont suivi les accidents.

Le professeur **Shinji Tokonami** qui supervisait ces examens a manifesté son étonnement devant le niveau relativement bas des irradiations compte tenu de l'ampleur des accidents nucléaires.

A noter que ces données ont été révisées à la baisse par ces mêmes auteurs en **septembre 2012** à la suite de précisions améliorées sur les cartes de débits de doses de rayonnements.

C'est en effet la conclusion, étonnante au premier abord compte tenu du niveau des accidents nucléaires de Fukushima Daiichi, pratiquement 30% des émissions en Césium radioactif de Tchernobyl et sans doute aussi en Iode 131 si l'on prend en compte les incertitudes, avec une dispersion bien moindre dans l'environnement, qui fait l'unanimité des organismes experts internationaux.

Cet impact sanitaire très limité sur les populations touchées, qui résulte aussi de la carte des doses biologiques intégrées annuelles établie par l'IRSN à partir des mesures, a d'abord été annoncé officiellement aux USA par l'US-DOE et le MIT.

C'est aussi une affirmation de l'OMS dans un rapport officiel.

Pour l'instant, il n'y a aucun cas de maladie clairement liée aux irradiations interne ou externe parmi les populations.

La situation de l'espace marin

Plusieurs évaluations des rejets radioactifs dans le pacifique ont été réalisées : par l'**IRSN** notamment et d'autres Laboratoires. Elles ne contredisent pas ce qu'avance la **Tepco** ci-dessous :

Rejets dans l'océan pacifique [du 12 au 31 mars 2011]

Iodine 131: Approx. 1.1×10^{16} Bq
Cesium 134: Approx. 3.5×10^{15} Bq
Cesium 137: Approx. 3.6×10^{15} Bq

Il reste maintenant principalement du **Césium radioactif** qui s'est fixé dans les sols marins. Les mesures de contamination des poissons à quelques exceptions notables mais ponctuelles dans la zone marine des 20 kms autour de **Fukushima Daiichi**, montrent que les transferts aux crustacés, coquillages, poissons sont très faibles. **En dehors de cette zone, la pêche a maintenant repris sans problème.**

La situation sanitaire des techniciens

Au niveau des techniciens et travailleurs du site de **Fukushima Daiichi**, la situation est moins rassurante pour une faible proportion d'entre eux si l'on veut bien considérer que, jusqu'à présent, plus de 20.000 travailleurs ont séjourné dans l'enceinte de la centrale nucléaire accidentée et que l'on a maintenant en permanence nettement plus de 10.000 d'entre eux présents sur le site.

Pour les techniciens qui travaillent en zone radioactive contrôlée, en situation normale la limite de dose biologique intégrée autorisée sur l'année se situe à 20 **millisieverts**. **Il faut aussi savoir qu'ils sont suivis médicalement régulièrement, notamment leur contamination radioactive interne est évaluée** [un individu normal a une radioactivité interne de **8.000 à 10.000 Becquerels**].

Dans des cas extrêmes, la limite de **dose biologique intégrée** pendant l'intervention pour les techniciens spécialistes, est de 100 **millisieverts**. A **Fukushima Daiichi** cette limite a été portée par le **gouvernement japonais** à 250 **millisieverts** pendant la période cruciale de retour au contrôle de la situation sur tous les réacteurs. La norme de 100 **millisieverts** a été assez rapidement rétablie ensuite.

Pour fixer les idées, pendant le déroulement des accidents nucléaires il a été mesuré un débit de dose de l'ordre de 400 **millisieverts/heure** au pied d'un bâtiment réacteur à l'extérieur. L'ambiance générale du site était sans doute montée jusqu'à quelques dizaines de **microsieverts/heure**. Elle est aujourd'hui presque normale, soit inférieure au **microsievert/heure**.

Il reste des points chauds à l'extérieur, notamment ce coude de tuyauterie conduisant à la cheminée de rejets atmosphériques des unités **3** et **4**, où un débit de dose de près de 1 **Sievert/heure** a été mesuré résultant de dépôts internes ponctuels d'aérosols radioactifs.

Et puis il y a les fuites, assez nombreuses, d'eaux radioactives sur les installations de traitement, les dispositifs de transfert et les stockages souterrains. Mais la radioactivité de ces eaux y compris celles qui viennent directement du primaire, a beaucoup diminué.

Les bâtiments réacteurs **1**, **2** et **3** restent donc les lieux où l'ambiance générale de radioactivité, de l'ordre de 50 **millisieverts/heure** dans les zones où l'on envoie des techniciens pour une courte durée d'intervention, fait que l'on peut rencontrer des cas de surexposition chez les techniciens.

Cet ensemble de données justifie le fait que les plus fortes doses biologiques intégrées par les techniciens de **Fukushima Daiichi**, l'ont été pendant les premières semaines qui ont suivi les accidents nucléaires.

Il y un bilan officiel qui est tout à fait cohérent avec le fait qu'aucun problème de santé relevant d'une irradiation n'a été enregistré dans la population des intervenants de la première heure.

* Deux techniciens ont intégré une dose biologique un peu supérieure à 600 **millisieverts**.

* Au total seulement 6 sont au-dessus de 250 **millisieverts** et 9 à plus de 200.

* De l'ordre de 160 travailleurs ont été exposés à une dose biologique supérieure à 100 **mSv** Dont 3 travailleurs sous-traitants ont été exposés à des doses corps entier allant de 170 à 180 **mSv** ((2 à 3 Sv à la peau sur les jambes, à la suite d'une « douche » d'eau très radioactive à la suite d'une fuite sur un circuit).

Donc la grande majorité est sous les 100 **millisieverts** et même sous les 10 **millisieverts**.

Cela s'explique par le fait que l'ambiance de radioactivité générale du site est faible et que les travaux dans les zones très actives demandent une grande qualification, donc cela met en jeu un nombre restreint de techniciens. Ce qui pose un problème parce les limites de doses peuvent épuiser ce contingent de techniciens d'élite.

Les inquiétudes sur de futurs ennuis de santé se concentrent donc sur cette population de techniciens. C'est à ce niveau que peut intervenir la surestimation des effets des doses biologiques dans ce domaine élevé à partir de l'expérience d'**Hiroshima**, qui a été évoquée plus haut.

C'est à partir de ces considérations que de nombreux organismes experts ont donc conclu que les conséquences sanitaires globales des accidents nucléaires de **Fukushima Daiichi** seraient très limitées. Une conclusion très peu médiatisée en **France**.

Les problèmes majeurs à résoudre

La maîtrise des accidents, environ deux mois, puis la stabilisation de la situation dans un **coldshutdown** à la définition adaptée au cycle de refroidissement « ouvert » dans le courant de l'été 2011, ont finalement été rapides par rapport aux problèmes qui sont maintenant posés.

Le premier est celui de la décontamination des territoires qui n'avance pas très vite, au point qu'un niveau de 10 à 20% effectué a récemment été cité par un ministre en charge de la question. A ce niveau le plus gros problème réside dans la gestion des eaux, des déchets et résidus radioactifs qui représentent des milliers de tonnes. Trouver des lieux de stockage permanents est une tâche, avant tout politique, très difficile.

Le second concerne le démantèlement des réacteurs accidentés, ceux de la tranche n° 1 à **Fukushima Daiichi**, pour un retour à un état qui est en cours de définition. C'est une demande de l'**AIEA** à la **Tepco**. On utilise généralement le terme retour à la pelouse, mais cela demande d'être défini précisément.

La première action de démantèlement avant la fin de l'année **2013** sera l'extraction de tous les éléments combustibles de la piscine de stockage de l'**unité n° 4**. La manœuvre identique s'annonce déjà beaucoup plus ardue sur le réacteur n° 3.



unité 4 superstructure métallique en construction

Il est clair que la récupération et le conditionnement des **corium**, dont l'état exact et la répartition restent à démontrer, est en soi un projet d'une grande complexité technologique. Cela nécessite même d'analyser les propriétés des **corium** qui ont interagi avec l'eau salée. Et il faut développer toute une gamme de robots pour des interventions et actions complexes.

Enfin le problème de la gestion des résidus très radioactifs de l'usine de traitement des eaux, ainsi que ceux provenant directement du découpage des réacteurs se posera également.

Il est clair que l'utilisation à grande échelle du nucléaire n'est pas possible sans retraitement et gestion des déchets en vue de leur élimination par des techniques dont on connaît le principe mais qui restent à mettre au point.