Les accidents majeurs du nucléaire civil.

Préambule

Le présent document fait suite à deux exposés traitant des accidents nucléaires majeurs présentés en décembre 2016 et en janvier 2018 dans le cadre des conférences organisées à Montpellier par la Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault.

Si un accident nucléaire majeur est un événement rarissime, en contrepartie, il est d'une gravité exceptionnelle. Les conséquences humaines, sociales, environnementales, économiques et politiques d'une telle catastrophe sont considérables et inacceptables.

La gravité des accidents majeurs exige donc du monde du nucléaire que, dans l'accomplissement de ses tâches, il soit d'une rigueur extrême afin d'éviter leur survenue. Il faut malheureusement le reconnaître, et le dire crument, cette rigueur a manifestement manqué à plusieurs occasions. Le laxisme et l'incompétence de certains exploitants et des autorités chargées de leur surveillance expliquent totalement les désastres passés. Ces accidents ont montré quelles avaient été les défaillances matérielles, mais aussi et surtout, les défaillances humaines et organisationnelles qui en en ont été fondamentalement à l'origine. Ils ont montré les modifications qui devaient être à apportées tant aux installations qu'à la manière dont elles doivent être dorénavant exploitées et contrôlées.

Les grands accidents, notamment celui de Fukushima, démontrent et rappellent également que la rareté d'un accident majeur ne doit jamais être considérée comme une hypothétique éventualité à exclure et que la sûreté nucléaire se doit de prendre en compte les situations les plus extrêmes imaginables jusque, et y compris, le cumul et la simultanéité de plusieurs d'entre elles. L'accident de Fukushima en montre l'impérieuse nécessité. Cet accident est en effet le résultat du cumul de la perte simultanée et totale de toutes les sources froides permettant le refroidissement du combustible et celle de toutes les sources électriques rendant impossible le contrôle et la maîtrise des installations et ce, non pas sur un seul des quatre réacteurs, mais sur simultanément les quatre réacteurs du site… Difficile de trouver situation plus dramatique.

Dans le cas de la France, le document montre comment le niveau de la sûreté des centrales est en permanence réexaminé à la lumière du retour de l'expérience issu de l'exploitation des centrales nucléaires à travers le monde et est en permanence renforcé par la prise en compte des enseignements retirés de cette expérience, notamment de celle retirée des grands accidents.

Sur un tout autre sujet, celui des dommages causés aux population par ces accidents, et au-delà de toute polémique, le premier et principal enseignement retenu des accidents de Tchernobyl et de Fukushima est que les principales répercussions de ces accidents sur les populations affectées ne sont pas directement liées à l'irradiation (comme cela est trop souvent et exclusivement présenté dans nos pays occidentaux), elles sont d'ordre psychologique et social, liées à l'angoisse et au mal être ressentis par des populations évacuées et déracinées ayant souvent tout perdu, dont la vie a été brutalement et irrémédiablement bouleversée. Personne n'avait anticipé l'importance de ces facteurs psychosociaux ni celle des multiples troubles d'origine psychosomatique qui en résultent et

qui affectent gravement la santé de ces populations. Ce point est particulièrement développé au chapitre consacré aux conséquences de l'accident de Tchernobyl.

Le présent document comporte trois grandes parties :

- La première présente la nature du risque nucléaire et les dispositions prises dans les installations civiles de production pour prévenir les accidents et y faire face.

La réglementation spécifique aux installations nucléaires fixe les principes et les dispositions de la sûreté nucléaire, permettant d'élaborer une sorte de « contrat implicite » entre l'exploitant d'une installation nucléaire et la collectivité nationale stipulant que les conséquences d'un accident, quel qu'en soit la nature et l'ampleur, doivent rester strictement circonscrites à l'intérieur du site de la centrale.

- Des accidents nucléaires majeurs ayant eu de graves répercussions hors du site des installations ont cependant eu lieu… il convient évidemment de s'en expliquer.

C'est l'objectif de la seconde partie qui présente le déroulement de ces accidents et qui en analyse les causes profondes. Cette analyse montre clairement les carences, les fautes serait un terme plus approprié, qui en sont à l'origine et montre également que ces accidents auraient parfaitement pu être évités si les principes fondamentaux sur lesquels repose la sûreté nucléaire avaient été respectés et non ignorés, ou pire, violés.

Ces accidents majeurs auraient en effet pu être parfaitement évités si les différents organismes d'états et les exploitants des installations accidentées avaient tenu compte des avertissements que leur avait fait parvenir la communauté internationale des experts nucléaires et s'ils avaient pris en considération les enseignements issus de l'expérience accumulée au cours de l'exploitation des centaines de réacteurs répartis à travers le monde.

- La troisième partie est consacrée à l'aspect sanitaire et social des conséquences de ces grands accidents. C'est la partie la plus délicate à présenter, tant le sujet est l'objet de controverses, et la plus complexe car elle fait appel à des disciplines dont la plupart sont mal appréhendées par le public (physique, chimie, biologie, médecine, mathématiques statistique…). Cette complexité justifie la présence d'une annexe à ce document exposant les grands principes de la radioprotection et la manière dont sont évalués les effets des rayonnements ionisants sur les organismes vivants.

Concernant les données relatives aux effets sanitaires, l'option retenue dans ce document a été de se référer aux données publiées par les organismes onusiens pour l'accident Tchernobyl (OMS, AIEA…), par l'Académie de médecine de Fukushima pour le suivi des populations japonaises et par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (l'IRSN) pour l'impact de l'accident de Tchernobyl en France.

Des organismes dont toute personne de bonne foi ne peut douter de la probité.

Ce document ne comportera volontairement aucune conclusion. Chaque lecteur se forgera son opinion et bâtira lui-même sa conclusion, comme ce fut le cas précédemment pour chaque auditeur lors des deux exposés faits à Montpellier pour la SHHNH.

Le but du document est de répondre aux interrogations du public sur la sûreté des centrales et sur les conséquences des accidents majeurs, d'apporter des réponses attendues - scientifiques et objectives - ce que n'a jamais réellement permis l'incessante polémique entourant ces sujets.

Les éléments présentés – qui sont pour la plupart totalement inconnus du grand public – doivent permettre à chacun de se forger une conviction concernant les accidents nucléaires et permettre de répondre au moins à deux interrogations essentielles. Les accidents majeurs sont-ils inévitables, quoi qu'on fasse, ou au contraire sont-ils parfaitement évitables ? Puis, seconde question, comme on ne peut pas exclure le risque résiduel aussi infime soit-il, est-on toujours certain de pouvoir maitriser une situation accidentelle cumulant les situations les plus extrêmes et certain de pouvoir circonscrire les conséquences de tels accidents au strict périmètre d'une installation accidentée, sans aucune répercussion préjudiciable aux populations et à l'environnement ?

Le risque nucléaire.

L'origine du risque nucléaire.

La fission nucléaire est une réaction au cours de laquelle un neutron entre en collision avec le noyau atomique d'un élément fissile de masse élevée (uranium 235 ou plutonium 239) provoquant l'éclatement de ce noyau : sa *fission*.

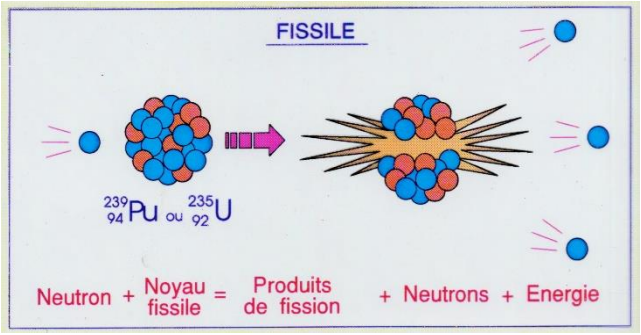


Figure 1. *Schéma de la fission d'un noyau d'uranium 235 ou de plutonium 239 par un neutron incident. Il résulte de cette fission deux noyaux plus légers, dits « produits de fission », et 2 à 3 neutrons dont l'un engendrera une nouvelle réaction de fission d'où l'appellation de réaction de fission en chaîne du processus.*

Plusieurs fragments du noyau initial résultent de cette fission (figure 1) : deux noyaux plus petits, appelés *produits de fission*, ainsi que deux ou trois *neutrons dits prompts*. Un de ces neutrons prompts, après avoir été *modéré* (ralenti) participera à l'entretien de la réaction de fission en chaîne en entrant en collision avec un nouveau noyau fissile… et ainsi de suite.

La réaction de fission dégage une importante quantité d'énergie sous forme d'énergie cinétique des fragments émis et d'énergie de rayonnement (gamma et bêta) provenant des désintégrations radioactives successives des produits de fission. L'ensemble de ces deux formes d'énergie cinétique et de rayonnement est finalement récupéré sous forme de chaleur qui est évacuée du combustible nucléaire par un fluide caloporteur. Pour les réacteurs nucléaires classiques ce fluide est l'eau, ils sont essentiellement de deux types, soit à eau pressurisée (PWR) soit à eau bouillante (BWR).

Le problème majeur posé par le nucléaire, et en réalité le seul vrai problème, provient du fait que les noyaux de tous les produits de fission sont instables, *ils sont radioactifs et émetteurs de rayonnements ionisants, bêta, gamma ou neutronique.* Cette instabilité est due à un nombre trop élevé de neutrons (neutrons excédentaires) contenus dans ces noyaux issus de la fission des noyaux plus lourds.

Progressivement, par une succession de désintégrations radioactives bêta moins (β^-), les neutrons en excédent se transforment en protons, selon le schéma ci-dessous :

neutron → proton + électron + rayon gamma + antineutrino

La cascade de désintégrations β^- se poursuit jusqu'à ce qu'elle aboutisse à un noyau dont la structure est stable, un noyau non radioactif.

Une des cascades de désintégrations parmi les plus fréquentes est celle débutant par un noyau de tellure 137 et aboutissant au final au baryum 137 stable. Les étapes intermédiaires, dont on indique les périodes radioactives variant de 4s à 30,17 ans, sont l'iode (I), le xénon (Xe) et le césium (Cs) :

$$_{137}\mathrm{Te} \xrightarrow[\beta^-]{4\mathrm{s}} {}_{137}\mathrm{I} \xrightarrow[\beta^-]{24{,}5\mathrm{s}} {}_{137}\mathrm{Xe} \xrightarrow[\beta^-]{3{,}84\mathrm{mn}} {}_{137}\mathrm{Cs} \xrightarrow[\beta^-]{30{,}17\ \mathrm{ans}} {}_{137}\mathrm{Ba\ stable}$$

Chaque désintégration β^- s'accompagne de l'émission d'un double rayonnement ionisant dont il convient de se protéger : d'une part un rayonnement bêta moins (β^-) correspondant à l'émission à grande vitesse d'un électron (électriquement chargé négativement) et, d'autre part, un rayonnement électromagnétique gamma (γ) correspondant à une évacuation d'énergie interne excédentaire, à la désexcitation du noyau résultant de la désintégration

L'objectif ultime de la sûreté nucléaire est de faire en sorte que tous les produits de fission, et les radioactivités β^- et γ qui les accompagnent, restent toujours confinés à l'intérieur des barrières successives interposées entre ces produits de fission et le public, afin que le public ne puisse jamais être soumis au rayonnement qu'ils émettent.

Classiquement les barrières de confinement sont au nombre de trois. Successivement, le gainage métallique en alliage de zirconium entourant directement le combustible nucléaire (figure 3), puis la chaudière nucléaire constituée de la cuve du réacteur et du circuit primaire évacuant l'énergie du cœur du réacteur (pompes primaires, pressuriseur, générateurs de vapeur…en jaune figure 2) et, enfin, la plus externe des trois barrières, une enceinte de confinement de l'ensemble constituée par le bâtiment à l'intérieur duquel la chaudière nucléaire est installée.

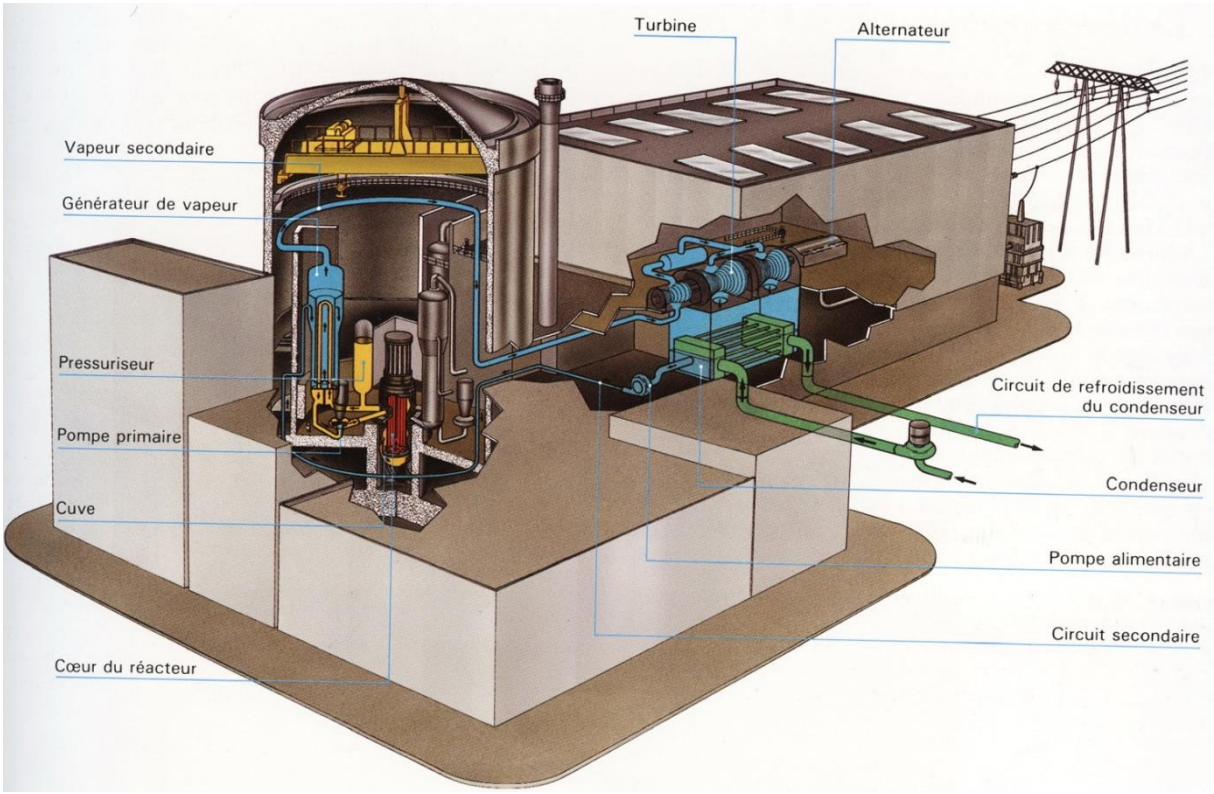
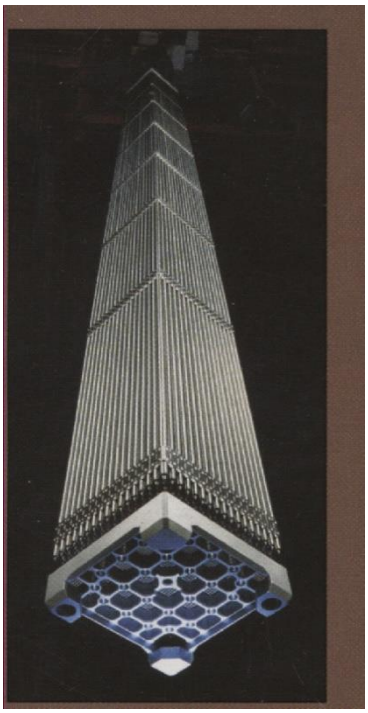


Figure 2. *Schéma de principe d'une centrale PWR (ou REP) à eau pressurisée. Il montre l'ensemble de la seconde barrière de confinement (la cuve du réacteur, le pressuriseur et le circuit primaire permettant l'évacuation de l'énergie produite par le combustible) et la troisième barrière constituée par le bâtiment abritant l'ensemble de la chaudière nucléaire : le circuit primaire et les générateurs de vapeur.*

La partie conventionnelle, non nucléaire, comporte le circuit vapeur secondaire, la turbine entraînant l'alternateur et l'ensemble du système d'alimentation en eau de la chaudière.



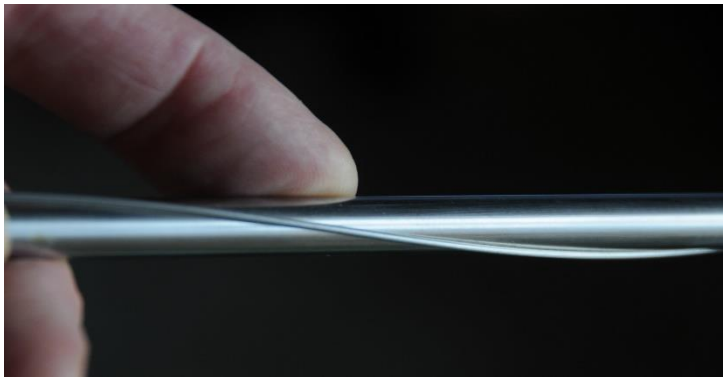


Figure 3. *Le combustible se présente sous forme de pastilles réfractaires d'oxyde d'uranium. Ces pastilles sont empilées dans une gaine métallique, faite d'un alliage à base de zirconium, l'ensemble prenant l'allure d'un crayon d'environ 1 cm de diamètre et de 3,60 m de long. Les crayons sont regroupés en « assemblages » de 264 crayons disposés selon un maillage carré de 17x17, les crayons sont maintenus espacés par un fil enroulé en hélice. Selon sa puissance, un cœur est constitué de 121 à 250 assemblages de 264 crayons de combustible.*

Quoi qu'il arrive, quel que soit l'événement à l'origine d'un accident, un accident ne doit porter atteinte ni à la santé, ni aux biens ou au mode de vie des populations, ni à l'environnement.

Dans le pire des cas, les conséquences d'un accident doivent rester circonscrites à l'intérieur de l'enceinte la plus externe, c'est-à-dire au bâtiment réacteur pour les centrales de type à eau pressurisée (PWR ou REP) du parc français.

L'événement le plus grave, y compris la fusion du cœur – et, suite à l'accident de Fukushima, le percement de la cuve du réacteur provoqué par cette fusion - doit rester un événement tout au plus « profondément regrettable » pour le propriétaire de l'installation (qui perd son investissement !) mais parfaitement neutre et indolore pour les populations proches et lointaines qui ne doivent en subir aucunement les conséquences.

Ces impératifs absolus de confinement nécessitent une surveillance permanente de ces trois barrières et l'existence de dispositifs permettant d'en assurer l'intégrité, notamment l'intégrité de la dernière barrière, le bâtiment réacteur, en cas de défaillance des deux premières.

Différents systèmes de sûreté permettent de préserver leur intégrité. En cas d'accident ou de défaillance de l'une des deux premières barrières, des *systèmes de sauvegarde* pallient leur défaillance tout en préservant la troisième barrière qui assure en dernier ressort le confinement de la radioactivité.

L'ensemble des systèmes de sûreté a pour objectif final de ramener et de conserver l'ensemble de la centrale dans un *état sûr et stable* en arrêtant le réacteur et en le maintenant dans un état sous-critique, en évacuant la puissance résiduelle dégagée par le combustible pour éviter sa fusion -et donc la défaillance de la première barrière de confinement - en assurant sur le long terme la pérennité du confinement de la radioactivité à l'intérieur de l'enceinte.

Est-ce une vision utopique et irréalisable de la sûreté nucléaire, comme certains le prétendent ? Ou est-ce, au contraire, une réalité accessible de manière certaine ?

C'est à ces interrogations que nous tenterons de répondre dans ce document en analysant les causes profondes des trois accidents nucléaires majeurs, ceux de Three Mile Island, de Tchernobyl et de Fukushima, et en présentant les enseignements qui en furent retirés ainsi que la manière dont ces enseignements ont été pris en compte dans le cas du parc des centrales nucléaires françaises.

Les dispositifs de la sûreté nucléaire.

Pour présenter ces dispositifs assurant la sûreté des centrales, partons de la loi et des décrets relatifs à la sûreté nucléaire qui définissent les règles dans lesquelles une centrale nucléaire doit être conçue et le cadre strict dans lequel elle est autorisée à fonctionner.

A chaque installation nucléaire correspond un « *Décret d'autorisation de création* » décrivant sa conception ainsi que des « *Règles générales d'exploitation* » définissant le domaine dans lequel elle est autorisée à fonctionner. Tout écart par rapport à ces règles générales d'exploitation constitue un « *événement significatif* » qui est obligatoirement déclaré à l'autorité de sûreté et auquel l'exploitant de la centrale doit porter remède. Tous les événements dits significatifs sont rendus publics, une tâche dont les médias et diverses associations en relais de l'Autorité de sûreté s'acquittent parfaitement !

La sûreté nucléaire repose sur un principe fondamental dit *de défense en profondeur*. En fonction de l'état de la centrale et de la gravité d'une situation, ce principe consiste à mettre successivement en service divers dispositifs devant assurer en toute circonstance, incidentelle, accidentelle, urgente et celles dites hors dimensionnement, trois fonctions :

- le contrôle et la maîtrise de la réaction en chaîne, dont prioritairement l'arrêt automatique du réacteur par chute de l'ensemble des barres de commande. Deux systèmes indépendants et redondants assurent cette fonction d'arrêt de la réaction nucléaire,
- l'évacuation de la puissance résiduelle dégagée après l'arrêt du réacteur par la radioactivité des produits de fission,
- le confinement des matières radioactives empêchant toute diffusion de la radioactivité vers l'extérieur.

En fonctionnement normal, un système de *régulation générale* agit automatiquement et maintient la centrale à l'intérieur du domaine de fonctionnement autorisé, anticipant toute dérive ou tendance à sortir de ce domaine, empêchant a fortiori d'en sortir.

Le domaine de fonctionnement autorisé est physiquement borné par une « frontière » délimitée par un ensemble de paramètres, température, pression, débit, activité… etc. Le franchissement de cette frontière, suite à une défaillance matérielle ou humaine, entraîne automatiquement la mise en service d'un *système de protection* qui se substitue immédiatement à la régulation générale et aux opérateurs. Ce système de protection met automatiquement en service des *systèmes de sécurité.*

Les deux premiers systèmes à être actionnés sont *l'arrêt automatique du réacteur* et la mise en service des systèmes *d'évacuation de la puissance résiduelle* dégagée par la radioactivité des produits de fission après l'arrêt du réacteur.

L'arrêt du réacteur protège le combustible en évitant tout échauffement anormal qui pourrait conduire à une détérioration et à une rupture de la première barrière de confinement

(le gainage des crayons de combustible). Il protège également la cuve du réacteur et l'ensemble du circuit primaire (la seconde barrière de confinement) contre une surpression qu'engendrerait une augmentation brutale de la température dans le circuit primaire.

En fonction de l'état de la centrale, les autres *systèmes de sauvegarde* ont pour mission de rétablir et de maintenir un état sûr et stable de la chaudière nucléaire, à savoir le maintien de l'état sous-critique du réacteur, l'évacuation de la puissance résiduelle, le maintien de l'intégrité des barrières de confinement de la radioactivité, notamment de la troisième et dernière constituée par le bâtiment réacteur.

Dans les cas extrêmes, les systèmes de sauvegarde auraient pour objectif d'empêcher les rejets de radioactivité vers l'environnement. Ces systèmes sont :

- le système autonome *d'alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur*. Il permet l'évacuation de la puissance résiduelle à l'aide des générateurs de vapeur.

Cette alimentation en eau de refroidissement est assurée par plusieurs systèmes eux-mêmes redondants et électriquement secourus ainsi que par une turbopompe autonome dont la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les générateurs de vapeur par la puissance résiduelle du cœur. Cette turbopompe ne nécessite donc pas de disposer de sources électriques de puissance.

Les ressources en eau d'alimentation de ces générateurs de vapeur sont obligatoirement diversifiées : outre des réserves d'eau importantes internes à la centrale, d'autres sources sont exploitables en secours dont un puisage dans la nappe phréatique, un pompage d'eau brute directement depuis une rivière, la mer ou un bassin de réfrigération et, en ultime secours, par des apports extérieurs.

- en cas de fuite ou de rupture du circuit primaire, les systèmes *d'injection de sécurité haute et basse pression* injectent de l'eau et des poisons neutroniques (acide borique) dans le circuit primaire afin d'assurer le refroidissement du combustible et le maintien du réacteur dans un état sous-critique.

- suite à une dépressurisation du circuit primaire et à l'envahissement de l'enceinte du bâtiment réacteur (la troisième enceinte de confinement) par la vapeur s'échappant du circuit primaire, des systèmes assurent l'isolement de l'enceinte par rapport à l'extérieur et la baisse de la pression à l'intérieur de l'enceinte par condensation de la vapeur par aspersion d'eau froide, cette eau étant recyclée après refroidissement.

- en cas de fusion du cœur, des dispositifs catalytiques recombinent l'hydrogène qui se formerait lors de la réaction à très haute température entre le zirconium des gaines entourant le combustible et l'eau primaire. La réaction de recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène de l'atmosphère pour former de l'eau évite l'accumulation de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement et les risques d'explosion violente associés à cette accumulation.

Suite à une rupture du circuit primaire suivi d'une éventuelle fusion du cœur, un autre dispositif permettrait de décomprimer progressivement la troisième barrière de confinement (le bâtiment réacteur) à travers d'imposants filtres retenant la radioactivité (figure 2). Ce dernier dispositif a été ajouté à la conception initiale des centrales françaises suite à l'accident de Three Mile Island (voir à ce sujet les chapitres consacrés à cet accident et à celui de Fukushima).

- les alimentations électriques secourues. En cas d'isolement de la centrale du réseau électrique général, ces alimentations sont indispensables pour assurer le contrôle commande de la centrale (mesures des paramètres nécessaires à la conduite et au fonctionnement des automatismes, des ordinateurs…) ainsi que l'alimentation en puissance des différents

actionneurs des systèmes de sûreté et de sauvegarde (vannes, moteurs, pompes, compresseurs…).

Les sources électriques secourues redondantes sont de deux sortes. Tout d'abord un réseau extérieur haute tension différent du réseau normalement utilisé lors du fonctionnement pour l'évacuation de l'électricité produite, puis, en interne au site, une alimentation de secours assurée par plusieurs groupes diesel (2 diesels indépendants plus un troisième diesel d'ultime secours) ainsi que par des batteries de grande capacité fournissant un courant continu sans coupure pour l'alimentation des ordinateurs et des mesures essentielles à la conduite de la centrale.

En plus des systèmes propres à chaque centrale, le parc EDF dispose de groupes de secours mobiles pouvant être rapidement acheminés et mis en service sur un site accidenté par des équipes nationales spécifiques d'assistance (Les FARN).

Tous ces systèmes son redondants, la redondance étant au minimum d'ordre 2.

Des accidents nucléaires majeurs ont cependant eu lieu…

Malgré les dispositions décrites précédemment, des accidents nucléaires majeurs ont eu lieu dans des centrales : Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima.

Pour chacun, il convient d'en rechercher les causes profondes et d'en retirer tous les enseignements afin de mettre en œuvre les actions correctives destinées à empêcher qu'ils puissent se reproduire.

Les accidents majeurs, tout comme chaque événement survenant dans une installation nucléaire dès lors qu'il est jugé significatif du point de vue de la sûreté, sont l'occasion d'analyses qui conduisent à une révision de la conception de certains systèmes ou à une révision de la manière d'exploiter les centrales. C'est du moins la conception française conduisant à l'amélioration constante de la sûreté nucléaire, une amélioration qui repose sur l'analyse des événements significatifs survenant à travers le monde, analyse suivie si nécessaire par la prise en compte du retour d'expérience que ces événements génèrent.

En 2018, « l'âge moyen » des 58 réacteurs des centrales du parc nucléaire français étant de 35 ans, le retour d'expérience acquis par ce seul parc porte aujourd'hui sur un fonctionnement cumulé de plus de 2 000 années. A cette importante et considérable expérience nationale, s'ajoute celle acquise au niveau mondial - et maintenant librement échangée à travers divers organismes internationaux tels l'AIEA, WANO et l'INPO - par l'exploitation de plus de 400 installations nucléaires à travers le monde.

Notons que pour être certain d'avoir retiré tous les enseignements d'un incident ou d'un accident, on ne doit pas se contenter des seuls rapports officiels dans lesquels, parfois, les gouvernants ou les exploitants cherchent à atténuer leurs responsabilités comme ce fut manifestement le cas après l'accident de Tchernobyl et, au moins dans un premier temps, après celui de Fukushima. Les échanges d'information les plus fructueux s'effectuent sans aucun doute entre exploitants au cours d'échanges directs, soit au sein des organismes cités précédemment soit au cours d'inspections poussées effectués entre pairs de différents pays (OSART) sur les sites mêmes des centrales.

Précisons d'entrée que les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont eu des répercussions tragiques sur les populations. Les conséquences de l'accident de la centrale PWR de Three Mile Island en 1979 ayant entraîné la fusion du cœur du réacteur ont par contre été nulles pour les populations et l'environnement, montrant la pertinence du principe de défense en profondeur retenu pour la conception des centrales à eau pressurisée PWR constituant le parc nucléaire français.

Précisons également que l'on ignore les conséquences qu'ont eu d'autres accidents, notamment ceux tenus secrets par l'ex-URSS et qui eurent lieu dans le complexe militaire de Mayak-Kystim dans les années 1950. Notons qu'à la même époque, lors de la folle course à l'armement nucléaire, les Etats-Unis n'ont guère été plus transparents dans l'exploitation de leurs installations militaires, notamment celle du stockage des déchets nucléaire du site de Hanford où fut produit le plutonium de la seconde bombe atomique lancée sur Nagasaki.

Il est évidemment impensable que, dans le futur, l'industrie nucléaire fasse planer sur les populations et l'environnement la menace de nouveaux accidents de type Tchernobyl ou Fukushima dont les conséquences ont affecté, dans le premier cas, des millions de personnes, et dans le second, deux centaines de milliers de personnes.

Par contre (mais à la limite !), l'accident de Three Mile Island, dont les conséquences extérieures au site ont été nulles, reste un accident « tolérable » à la condition que, sur le long terme, on puisse garantir la pérennité du confinement de la radioactivité à l'intérieur de l'enceinte de confinement. Ce qui fut le cas. Aujourd'hui on accède à l'intérieur de cette enceinte sans précaution autre que celle, classique, d'un accès dans une installation nucléaire classique.

Aujourd'hui, pour la communauté internationale, la seule question qui vaille pourrait se résumer ainsi : compte tenu des conséquences des accidents majeurs de Tchernobyl et de Fukushima, peut-on et doit-on poursuivre l'utilisation de l'énergie atomique ?

Ne convient-il pas de sortir au plus vite de ce mode de production ? La balance entre les avantages de ce mode de production et ses inconvénients n'est-elle pas fortement déséquilibrée, penchant nettement du côté des inconvénients ?

Pour certains la réponse est évidente, immédiate : « il faut arrêter au plus vite ».

Mais, avant de trancher, on se doit d'identifier et d'analyser attentivement et objectivement les causes profondes qui ont conduit à de tels accidents puis, en connaissance de cause, répondre à la question suivante : ces causes sont-elles, ou non, fondamentalement inhérentes à l'énergie nucléaire ?

En d'autres termes, est-ce les lois de la physique ou les incertitudes inhérentes à toute technologie qui rendraient les accidents nucléaires de grande ampleur inévitables ?

La survenue d'un nouvel accident majeur, avec des conséquences aussi dramatiques, est-elle inévitable selon les lois de la physique et inhérentes à la technologie ou, au contraire, les causes de ces accidents n'ont-elles pas eu pour origine la défaillance, l'arrogance ou la cupidité des sociétés et des organismes qui ont eu la responsabilité de successivement concevoir, construire et exploiter ces installations et de contrôler à chaque étape l'application rigoureuse des règles de la sûreté nucléaire.

Si les causes profondes devaient s'avérer inhérentes, consubstantielles à la physique et à la technologie et si la survenue d'un nouvel accident nucléaire majeur – *majeur signifiant ayant des conséquences humaines hors du site de la centrale* – était inévitable, devant l'ampleur des désastres, la communauté serait en droit d'exiger l'arrêt des centrales nucléaires.

Cependant, lorsqu'on se penche objectivement sur l'enchaînement des faits qui ont conduit aux accidents et aux catastrophes passés, l'analyse des causes profondes de leur survenue montre clairement que ces *catastrophes auraient parfaitement pu être évitées* si les gouvernants et les exploitants avaient, chacun dans le domaine de ses compétences et de ses responsabilités, correctement effectué les tâches qui lui incombaient dans le respect des règles de la sûreté nucléaire. C'est la conviction profonde que j'ai acquise.

Cette conviction est fondée sur les multiples études, analyses et publications parues suite à ces divers accidents et sur les diverses missions que j'ai effectuées en URSS (à Tchernobyl pour l'AIEA) au Japon et aux Etats Unis.

L'ensemble de ces études et analyses constitue la base des informations et des réflexions que je vous soumets dans le présent document.

Les accidents, leur déroulement leurs causes

L'accident de la centrale de Three Mile Island, USA le 28 mars 1979.

C'est le premier accident majeur du nucléaire civil. Majeur non pas tant par ses conséquences mais par l'ampleur des enseignements qui en ont été retirés et l'importance des modifications qu'il a fallu apporter aux installations et à la manière de les exploiter.

Vu aujourd'hui, et pour la filière des centrales à eau pressurisée exploitée en France, cet accident a permis d'atteindre un niveau de sûreté réellement mature en obligeant à prendre en compte l'accident de fusion du cœur, non plus comme étant un accident hypothétique, certes pris en compte mais situé dans un domaine « hors dimensionnement », mais comme un *accident auquel il doit être fait face avec des systèmes spécifiquement prévus à cet effet*.

L'accident de Three Mile Island (TMI) qui a conduit à la fusion du cœur du réacteur n'a eu aucune conséquence radiologique à l'extérieur du site. Le seul trouble à l'ordre public, mais il est de taille, fut de créer une panique bien compréhensible et de provoquer une fuite incontrôlable par les pouvoirs publics des populations voisines de la centrale. Cette panique est née d'une discordance entre les informations transmises au public par l'exploitant de la centrale et celles émanant des autorités. L'adage est bien connu, « *quand il y a un flou, il y a un loup…* » d'où cette panique.

Un des premiers enseignements à retirer de l'accident concerne la manière dont les populations doivent être tenues informées de l'évolution d'une situation accidentelle et dont les pouvoirs publics et la sécurité civile s'organisent pour la gérer.

En France, suite à TMI, l'organisation spécifique à une crise nucléaire a été largement révisée. Localement, l'organisation repose sur l'équipe de crise locale de l'exploitant mise en place pour la conduite des opérations internes au site et sur l'organisation mise en place par la sécurité civile sous l'autorité du Préfet pour les opérations extérieures au site de la centrale.

Au niveau national, EDF active une équipe de crise nationale qui s'appuie sur l'expertise de ses services centraux et éventuellement sur ceux du constructeur de la chaudière. Cette équipe vient en support à l'équipe de la centrale. En lien avec cette équipe EDF nationale, l'Autorité de sûreté active également sa propre équipe de crise, les deux équipes étant en lien étroit avec les ministères concernés (Intérieur, Environnement, Santé…) qui coordonnent l'action de la sécurité civile et les moyens matériels et humains à déployer hors du site.

EDF, l'Autorité de sûreté et le Gouvernement coordonnent l'information à destination du public et des médias.

Des exercices périodiques de crise permettent de tester cette organisation et d'en améliorer le fonctionnement.

Sur un plan technologique, l'accident de Three Mile Island résulte de la conjonction d'une défaillance matérielle relativement mineure (la non fermeture d'une vanne de décharge du pressuriseur) suivie de manœuvres inappropriées effectuées par des opérateurs qui n'ont pas pu ni su établir un diagnostic correct de la situation créée par cette défaillance.

Schématiquement le scénario ayant conduit à l'accident est le suivant.

Il débute par une perturbation dans l'alimentation en eau des générateurs de vapeur. Cette perturbation conduit naturellement à l'arrêt automatique du réacteur.

Lorsque, en partant d'un fonctionnement en puissance, un réacteur est arrêté automatiquement, donc très rapidement, son arrêt génère un transitoire dans le circuit primaire qui se traduit par un pic de pression. Pour protéger le circuit primaire, ce pic de pression est atténué, « absorbé », par l'ouverture automatique d'une vanne dite de décharge située en partie supérieure du pressuriseur (figure 4 où la vanne est très schématiquement représentée). L'ouverture de cette vanne permet de décharger une certaine quantité de vapeur vers un réservoir de décharge (non représenté) où cette vapeur est condensée.

Une fois le pic de pression absorbé, la vanne de décharge reçoit un ordre automatique de fermeture or, et c'est présentement l'événement initiateur de l'accident, la vanne de décharge est restée coincée ouverte malgré l'ordre de fermeture qui lui a été donné.

La chaudière d'une centrale nucléaire à eau pressurisée est constituée de la cuve du réacteur et d'un circuit d'évacuation de la puissance produite dans le cœur du réacteur. Les pompes primaires assurent la circulation de l'eau primaire entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur où cette eau circulant dans une multitude de tubes en forme de U renversé (figurés en jaune) vaporise l'eau du circuit secondaire (en bleu). La vapeur produite s'échappe par le haut du générateur et est acheminée vers la turbine du groupe turbo alternateur produisant l'électricité qu'elle entraîne.

Le pressuriseur permet de régler la pression dans le circuit primaire. Il est relié à l'une des branches du circuit primaire. Sa partie inférieure est en eau tandis que sa partie supérieure, appelée « bulle », est en phase vapeur.

On augmente la pression dans le circuit primaire en augmentant la température de l'eau en bas du pressuriseur à l'aide de chaufferettes électriques. On diminue la pression du circuit primaire en injectant de l'eau froide en partie supérieure du pressuriseur ce qui a pour effet de condenser la vapeur de la « bulle » ou en ouvrant une vanne de décharge. L'existence d'une « bulle » de vapeur est absolument indispensable au contrôle de la pression dans l'ensemble du circuit primaire.

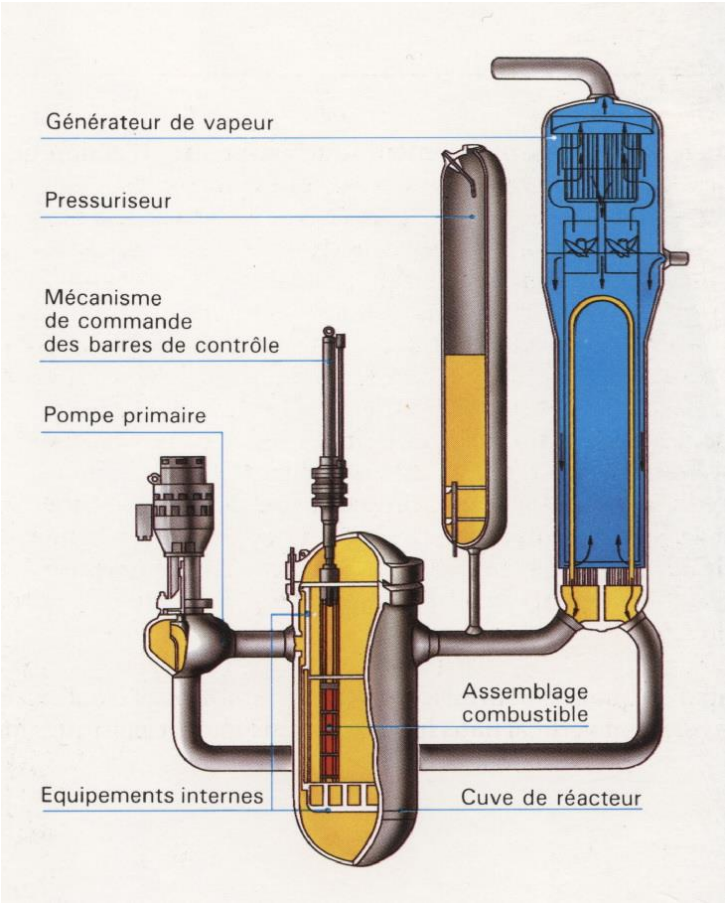


Figure 4. *Schéma de la chaudière nucléaire à eau pressurisée*

La vanne de décharge du pressuriseur étant restée ouverte, le circuit primaire continue de se dépressuriser et à se vider de sa phase vapeur vers le réservoir de décharge.

Lorsque la pression du circuit primaire atteint un seuil de pression anormalement bas, la chute de la pression dans le circuit primaire est interprétée par les automatismes comme une brèche s'étant ouverte dans le circuit.

Afin de maintenir le cœur du réacteur en eau et continuer à évacuer la puissance résiduelle. Le système de sécurité d'injection haute pression d'eau et d'acide borique est alors

automatiquement mis en service pour compenser la perte de vapeur et d'eau s'échappant du circuit primaire par la vanne de décharge restée ouverte

Jusqu'à présent (hormis la vanne restée coincée ouverte !) tout se déroule « normalement », c'est-à-dire conformément à l'évolution de la pression dans le circuit primaire et au déroulement automatique de la procédure d'injection de sécurité haute pression activée en cas de dépressurisation du circuit primaire.

A cette époque, en 1979, en salle de commande, les informations dont les opérateurs disposent leur indiquent que l'ordre de fermeture de la vanne de décharge a bien été donné mais *ne leur indiquent pas si cet ordre a, ou n'a pas, été correctement exécuté…* Ne disposant d'aucune information sur la position réelle, ouverte ou fermée, de la vanne de décharge, ils considèrent implicitement que, l'ordre de fermeture ayant été donné, la vanne de décharge s'est correctement refermée.

Cette « croyance » ne leur permet évidemment pas d'établir un diagnostic correct de la situation, de comprendre son évolution et surtout de comprendre pourquoi le système d'injection de sécurité s'est automatiquement mis en service.

Selon leur logique, le circuit primaire est intègre, il n'existe pas de brèche et l'injection de sécurité haute pression s'est intempestivement mise en service. Ce qu'ils redoutent alors est que le pressuriseur se remplisse entièrement d'eau et que la « bulle » de vapeur disparaisse rendant le contrôle de la pression dans le circuit primaire totalement impossible.

Une telle situation est évidemment à proscrire absolument car elle pourrait mettre gravement en danger l'intégrité de la seconde barrière de confinement. Cette crainte des opérateurs de voir le pressuriseur entièrement en eau devient une obsession et, obnubilés par ce risque et suivant leur logique, ils arrêtent l'injection de sécurité haute pression…

Cet arrêt de l'injection haute pression a pour conséquence immédiate de provoquer une baisse brutale de pression dans le circuit primaire et d'entraîner une ébullition généralisée de l'eau dans l'ensemble du circuit. Cette ébullition provoque la cavitation des pompes primaires qui se mettent à vibrer obligeant les opérateurs à les arrêter et à arrêter par la même occasion toute circulation d'eau dans le circuit primaire et par là même le refroidissement du combustible.

L'arrêt total du refroidissement entraîne la fusion généralisée du combustible.

Ce n'est que 3 h 20 après le début de la séquence accidentelle que l'équipe de conduite s'apercevra de sa méprise et que l'injection de sécurité sera remise en service. Une situation très dégradée mais stable est enfin rétablie.

Cependant le mal est déjà fait, le cœur du réacteur a fondu, les gaines (la première barrière) entourant le combustible se sont rompues laissant échapper des produits de fission qui ont contaminé les importantes quantités d'eau et de vapeur mélangées qui se sont répandues dans tout le bâtiment réacteur à travers la vanne de décharge restée coincée ouverte.

La situation est certes stabilisée mais deux interrogations préoccupent fortement les esprits.

La première, immédiate et la plus angoissante, concerne la quantité, sans nul doute importante, d'hydrogène qui s'est formée suite à la fusion du cœur. Aux très hautes températures atteintes lors de la fusion du combustible (entre 1 500 et 2 000°C) le zirconium du gainage du combustible « brûle » dans l'eau du circuit primaire, « empruntant » l'oxygène des molécules d'eau pour former un oxyde de zirconium tout en « libérant » l'hydrogène de ces molécules d'eau.

Quelle est la quantité d'hydrogène formée ? Où se trouve cet hydrogène ? S'est-il accumulé sous forme de bulles dans la cuve même du réacteur ou s'est-il répandu dans tout le bâtiment réacteur ? Dans tous les cas le risque d'une déflagration extrêmement violente de cet hydrogène est réel, comme le montreront plus tard les explosions lors des accidents de Tchernobyl et de Fukushima.

La seconde préoccupation est à plus long terme. Elle concerne la tenue de l'étanchéité de la troisième et dernière barrière de confinement (le bâtiment réacteur) compte tenu des pressions et des températures qui y règnent. Il est évidemment exclu de dépressuriser cette enceinte en procédant à des rejets directs vers l'extérieur compte tenu de la haute radioactivité régnant à l'intérieur du bâtiment.

Grâce aux différents systèmes de sauvegarde, ceux destinés à faire baisser la température et la pression dans l'enceinte (par condensation de la vapeur grâce à un système d'aspersion d'eau froide) et ceux injectant de l'eau borée dans le réacteur pour assurer dans le même temps le refroidissement du cœur fondu et son maintien à l'état sous-critique, les risques d'explosion et de rejet dans l'environnement ont progressivement disparu… au terme cependant d'une interminable période d'incertitude

S'il n'y eut ni explosion d'hydrogène ni fuite de radioactivité vers l'extérieur, si personne ne fut soumis à une irradiation significative, il n'en reste pas moins que l'alerte fut sérieuse !

L'aspect positif - si l'on peut dire - de cet accident fut la démonstration de la pertinence du principe de défense en profondeur, de l'aptitude des systèmes de sauvegarde des centrales à eau pressurisée de type PWR à faire face à une situation gravissime bien que cette situation n'ait pas été explicitement prise en compte dans la conception initiale de ce type de centrales.

L'accident a également montré l'avantage de disposer d'une enceinte de confinement de grande dimension limitant la montée en pression à l'intérieur de cette enceinte en cas de dépressurisation du circuit primaire ce qui évite d'avoir à décompresser rapidement l'enceinte comme ce sera le cas à Fukushima.

Néanmoins, d'importantes modifications ont dû été apportées à la conception initiale des centrales à eau pressurisée. Les deux principales sont :

- une augmentation du nombre des dispositifs catalytiques de recombinaison de l'hydrogène, pour éviter son accumulation et les risques d'explosion,
- l'installation d'un dispositif de « filtres à sable » permettant de dépressuriser à terme l'enceinte de confinement vers l'extérieur en retenant la quasi-totalité des produits de fission volatils, halogènes et aérosols, tels les iodes et les césiums (figure 5).

Ces modifications ont été rapidement apportées à toutes les centrales du parc nucléaire français. Malheureusement il ne semble pas qu'il en ait été ainsi, et systématiquement, pour les autres parcs nucléaires, notamment le parc japonais où les explosions dues à l'hydrogène ont été à l'origine de la destruction de trois bâtiments réacteur à la centrale de Fukushima, et sans doute de l'incendie du quatrième.

Sur le plan de l'exploitation, l'enseignement important de TMI a été de confirmer le caractère « pardonnant » de ce type de centrales vis-à-vis des défaillance matérielles (vanne coincée provoquant une brèche du circuit primaire) et des erreurs humaines (erreurs de diagnostic de la part des opérateurs, manœuvres totalement inappropriées).

Outre les modifications de l'installation, suite à l'accident, la réflexion a essentiellement porté sur l'amélioration des informations mises à la disposition des opérateurs et sur

l'assistance à leur fournir pour qu'ils puissent établir plus facilement et rapidement un diagnostic fiable dans des situations perturbées ou accidentelles particulièrement stressantes.

Cette réflexion a conduit à élaborer une méthode d'approche de ces situations, dite « *approche par état* », où l'objectif n'est plus d'entrer immédiatement et de manière automatique - au risque de se tromper d'entrée - dans une procédure préétablie et de la suivre mécaniquement mais, tel l'urgentiste se préoccupant prioritairement du rétablissement des fonctions vitales d'un accidenté, d'établir un état général de l'installation et, à partir d'un nombre limité de paramètres essentiels, d'élaborer avec les moyens restés disponibles la meilleure stratégie permettant de retrouver un état sûr et stable dans les meilleurs délais.

Pour ce faire un panneau dit de sûreté spécifique regroupant toutes les paramètres et les informations essentielles à l'établissement de l'état de la centrale a été installé dans chaque salle de commande. Les informations de ce panneau sont retranscrites à l'identique au niveau national dans les salles des équipes de crise d'EDF et de l'Autorité de sûreté permettant, le point est essentiel, le dialogue entre les différents acteurs locaux et nationaux sur la base d'informations fiables, identiques et surtout transmises en temps réel.

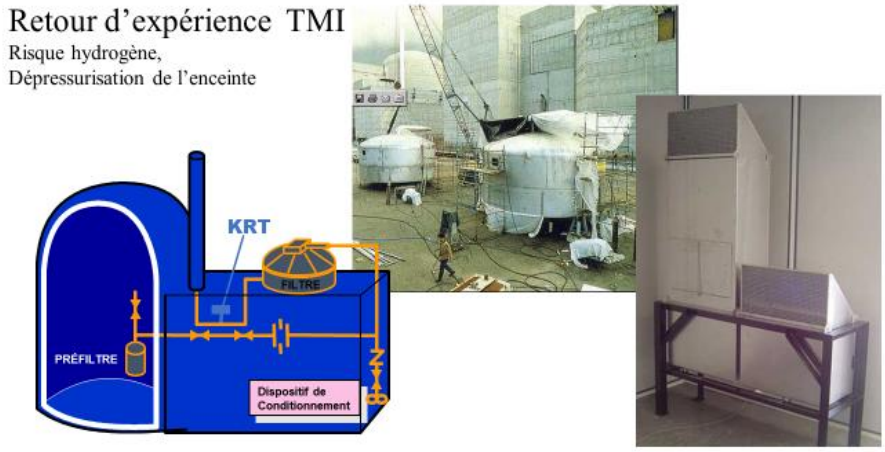


Figure 5. *Schéma de principe de la dépressurisation de l'enceinte de confinement à travers un système de filtration retenant les produits de fission volatils. La figure centrale montre l'imposante taille du filtre principal du système de dépressurisation en cours d'installation. La figure de droite montre un des multiples systèmes catalytiques de recombinaison de l'hydrogène installé à l'intérieur des bâtiments réacteur afin d'éviter l'accumulation d'hydrogène et les risques d'explosion.*

Enfin, concernant l'erreur commise par les opérateurs de TMI, celle d'arrêter intempestivement l'injection d'eau dans le cœur du réacteur, désormais un verrouillage empêche (un certain temps, au moins celui de la réflexion !) les opérateurs d'inhiber ou d'arrêter un système de sécurité ou de sauvegarde lorsque ce système a été automatiquement mis en service. Mentionnons dès à présent au sujet des intervention intempestive sur des systèmes de sécurité, que l'accident de Tchernobyl a pour origine (une des origines parmi d'autres…) l'inhibition d'une sécurité interdisant d'extraire les barres de commande du réacteur au-delà d'une hauteur limite. Si cette sécurité avait été opérationnelle, à travers le monde on ignorerait encore l'existence de cette centrale ukrainienne…

A la suite à l'accident de TMI fut créé l'INPO, un institut international consacré à la formation et à l'entraînement des personnels de conduite et de maintenance des centrales nucléaires. Au sein de l'INPO les opérateurs des différents pays nucléarisés échangent leurs expériences d'exploitant, leur savoir-faire et leurs bonnes pratiques.

L'accident de Tchernobyl, URSS le 26 avril 1986

Fondamentalement, la cause première de l'accident de Tchernobyl est à rechercher dans le contexte tendu de la guerre froide qui a prévalu au lendemain de la seconde guerre mondiale et qui voit les USA et l'URSS se livrer à une course folle à l'armement nucléaire.

La priorité absolue accordée par l'URSS à la production en grande quantité de plutonium 239 de qualité militaire pour fournir son arsenal nucléaire l'a conduite à concevoir des centrales plutonigènes, les RBMK, « optimisées » pour produire tout à la fois de l'électricité et ce type de plutonium à usage militaire.

En complète contradiction avec les règles fondamentales de sûreté nucléaire relatives à la conception de toute centrale nucléaire, la conception très particulière des centrales RBMK a pour singularité de présenter un risque potentiel – hélas devenu certain - de perte du contrôle de la réaction en chaîne dans certaines circonstances bien précises. C'est cette perte de contrôle qui s'est traduite à 1h26 le matin du 26 avril 1986 à la centrale de Tchernobyl par une montée brutale et totalement incontrôlée de la puissance du réacteur provoquant sa destruction et celle de son confinement, entraînant par là même une importante dissémination de la radioactivité sur de très vastes régions, à l'échelle de l'Europe.

La cause première de l'accident est donc à rechercher dans la conception de ce type de centrale, dans l'instabilité intrinsèque de leur fonctionnement.

La cause de la catastrophe est avant tout une déficience propre au fonctionnement de l'ex-URSS. Il est en effet difficilement supportable d'apprendre a postériori que ce risque d'emballement était parfaitement connu des concepteurs des RBMK, mais que, contrairement à une règle élémentaire et à un impératif absolu, aucune disposition interdisant la survenue d'un tel emballement n'avait été prise et que les opérateurs de ces centrales étaient insuffisamment avertis de ce risque.

A ce sujet, il faut rapporter qu'un accident similaire à celui survenu à Tchernobyl en avril 1986 avait été évité de justesse dans une autre centrale RBMK, celle de Léningrad en 1971. Cependant, afin « *de ne pas porter atteinte à la réputation de la science et de la technologie soviétique* », ce presque accident évité de justesse n'avait fait l'objet d'aucune information auprès des autres centrales de même type. Malgré le sévère avertissement de la centrale de Léningrad, aucun retour d'expérience ni aucune formation spécifique du personnel ne furent faits, aucune modification ne fut apportée à la conception de ce type de réacteurs.

Chacune des actions correctives ou préventives qui auraient pu être apportées auraient, chacune à elle seule, permis d'éviter l'accident de Tchernobyl.

D'où la terrible accusation portée contre le système de l'époque émanant d'une victime de l'accident : « *Ils savaient, ils connaissaient le risque et cependant ils n'ont rien fait* » (rapporté par Svetlana Alexievitch, Prix Nobel de littérature 2015 dans son livre La Supplication).

On n'entrera pas dans le détail du scénario qui a conduit en quelques secondes à porter la puissance du réacteur à une centaine de fois celle de sa puissance nominale. Ce scénario a été très clairement et parfaitement expliqué et a été fidèlement reproduit par simulation numérique. Point n'est nécessaire (comme l'a fait Michael Gorbatchev au cours de conférences données en Occident) d'invoquer de mystérieuses forces ou d'hypothétiques monopoles magnétiques pour expliquer l'accident ! Quant à ceux qui affirment qu'un cœur peu réactif arrivé en fin de cycle ne peut pas s'emballer, ils ne font qu'affirmer leur méconnaissance de la physique des réacteurs.

Figure 3. *Vue aérienne du réacteur n°4 accidenté de la centrale de Tchernobyl. Au premier plan, les fondations du premier sarcophage (les fameux murs des Héros et des Pionniers) sont déjà réalisées. En 2017 un nouveau sarcophage englobant le premier sarcophage a été mis en place. Il permettra de réellement confiner l'ensemble du réacteur et du premier sarcophage et d'entreprendre réellement les opérations de démantèlement et d'assainissement.*

Notons seulement que l'explosion du réacteur a pour origine, non pas une « explosion nucléaire » comme l'accident fut souvent présenté, mais une suite de deux explosions. L'une de vapeur et une seconde très vraisemblablement due à l'hydrogène provenant de la fusion du cœur de la réaction à haute température entre le zirconium des gaines du combustible et l'eau. Phénomène déjà rencontré à Three Mile Island et que l'on retrouvera à Fukushima.

Les enseignements de l'accident

Sur le plan technologique et sur celui de la sûreté nucléaire, peu d'enseignements peuvent être retirés de l'accident de Tchernobyl, hormis la certitude qu'une catastrophe devient inévitable lorsque la conception d'une centrale contrevient aux règles de la sûreté nucléaire les plus élémentaires - qui doivent assurer de manière intrinsèque la stabilité d'un réacteur - et lorsqu'une centrale est exploitée en violation flagrante des consignes d'exploitation.

Le seul garde-fou contre le risque de la perte du contrôle de la réaction nucléaire consistait en un dispositif - hélas violable par un système de clefs – qui fut volontairement inhibé et une simple consigne qui, en l'occurrence, ne fut pas respectée.

Il existait en effet un dispositif destiné à prévenir le risque d'emballement, une sécurité interdisant la sortie des barres de commande du cœur du réacteur au-delà d'une certaine hauteur, mais cette sécurité avait été sciemment inhibée pour permettre la réalisation d'un essai à partir d'une situation connue comme étant à risque. Quant à la consigne interdisant de placer le réacteur dans la situation dans laquelle il se trouvait avant l'essai (empoisonnement du réacteur par le xénon suite à un fonctionnement prolongé à très faible puissance) elle a été violée, l'essai devant absolument être réalisé avant les célébrations du 1er mai... célébration à laquelle devait sans doute participer les commanditaires de l'essai venus spécialement de Moscou et pressés d'y retourner.

Bref, pour résumer, fin 1986, lors de la présentation du déroulement de l'accident à l'Agence internationale de l'énergie atomique (l'AIEA) à Vienne, le Professeur Valery Legasov directeur adjoint du célèbre Institut Kurchatov à Moscou, déclara « *A partir de 1h00 ce 26 avril, le réacteur fait ce qu'il veut et les opérateurs n'importe quoi.* ». Il est difficile d'être plus concis et plus clair !

Notons que l'accident aurait pu avoir des conséquences encore plus catastrophiques… Assez rapidement après les explosions initiales et du fait des températures très élevées atteintes, un amalgame en fusion (appelé corium) composé de combustible fondu et de matériaux divers, acier des structures, zirconium, graphite, béton… s'est écoulé dans la partie inférieure du puits à l'intérieur duquel était situé le réacteur et en a attaqué le béton.

Empruntant des tuyauteries de liaison et des gaines de ventilation raccordées à ce puits, le corium s'est répandu vers les parties basses de l'installation. Le risque était alors que ce corium atteigne les piscines remplies d'eau situées sous le réacteur. Dans ce cas l'effet dévastateur du contact entre l'eau de ces piscines et le corium à très haute température aurait été une catastrophe beaucoup plus importante que celle provoquée par les deux explosions initiales et les rejets qui s'en sont suivis.

Il faut rendre hommage à ceux qui, parfaitement conscients des risques qu'ils prenaient, sont intervenus entre le 26 avril et le 5 mai dans des conditions invraisemblables sous le réacteur accidenté pour qu'un tel cataclysme ne puisse pas se produire. Certains l'ont payé de leur vie.

Les vrais enseignements de l'accident de Tchernobyl sont ceux que l'on a acquis dans le domaine de la santé publique et celui de l'environnement (traités aux chapitres correspondants ci-après). Dans ces deux domaines, l'accident constitue « l'enveloppe » de ce qui peut survenir de pire dans le cas d'un accident nucléaire civil dans la mesure où, suite à la destruction du réacteur et du confinement de la radioactivité qu'il renfermait, l'incendie de l'empilement de graphite qui fit rage pendant plus de deux semaines (du 26 avril au 15 mai) et les températures atteintes ont rendu volatils la plupart des produits de fission radioactifs (iode, césium…) contenus dans le cœur du réacteur. Le pire inventaire radioactif que l'on puisse imaginer a ainsi pu librement s'échapper. Entraînés à haute altitude par les courants ascendants générés par l'incendie et poussés par les vents, les rejets de la centrale accidentée sont venus contaminer l'ensemble du continent européen.

L'accident de Fukushima mars 2011

Le 11 mars 2011 à 14h46 un séisme de magnitude 9 se produit au large des côtes orientales japonaises. Il entraîne l'arrêt automatique de tous les réacteurs nucléaires de la côte pacifique de l'est du Japon. Les réacteurs n°1, 2 et 3 de la centrale de Fukushima en fonctionnement sont automatiquement mis à l'arrêt. Le réacteur n°4 est arrêté pour rechargement, son cœur est déchargé et placé dans une piscine de stockage sous eau contiguë au réacteur.

Suite au séisme, différents défauts sur le réseau électrique général haute tension et sur le réseau secouru ont rendu ces réseaux indisponibles. La centrale s'est ainsi retrouvée électriquement isolée du monde extérieur, cet isolement entraînant la mise en service automatique des groupes électrogènes diesel assurant l'alimentation interne secourue de la centrale.

A 15h27 un tsunami dont la hauteur est comprise entre 10 et 15 m submerge les tranches 1 à 4 de la centrale de Fukushima Daichi, inondant les locaux des groupes diesel et ravageant la station de pompage de l'eau dans l'océan, privant ainsi la centrale de sa source froide.

Les groupes d'alimentation de secours et l'ensemble des pompes de la station de pompage sont définitivement hors service sans aucun espoir de pouvoir les remettre en service.

Privée d'électricité, et les batteries se déchargeant sans possibilité d'être rechargées par une source secourue, la centrale va se trouver très rapidement privée de tous les moyens nécessaires non seulement à l'obtention d'informations fiables sur l'état des réacteurs (mesures de température, de pression, de débit…) mais aussi privée de la possibilité de faire fonctionner les différents actionneurs (vannes, pompes, moteurs, compresseurs…).

Devant une commission d'enquête parlementaire le directeur de la centrale, Masado Yoshima décrira ainsi la situation : « *Nous étions comme dans un avion où tous les voyants s'éteignent et où plus aucune commande ne réagit… nous étions anéantis.* ».

Les salles de commande sont plongées dans le noir et deviennent rapidement inopérantes. Il devient impossible d'effectuer la moindre opération à partir de ces salles de commande, toutes les manœuvres devront désormais être effectuées manuellement et localement dans des conditions qui deviendront rapidement dantesques avec d'énormes risques pris par les intervenants, le risque permanent d'explosions d'hydrogène – à l'origine de la destruction des quatre bâtiments réacteur du site - et le risque lié aux niveaux très élevés de la radioactivité sur le site.

Le 11 mars au soir la situation apparaît très rapidement dramatique pour le réacteur n°1 en raison de l'impossibilité de mettre en service son système d'évacuation de la puissance résiduelle faute d'alimentation électrique.

En l'absence de source électrique de puissance, le seul moyen disponible pour tenter d'injecter de l'eau dans un réacteur afin d'en évacuer la puissance résiduelle est de recourir à… des camions de pompiers. Malheureusement ces camions ne peuvent refouler l'eau dans les réacteurs qu'à une pression maximale voisine de 10 bar alors que la pression à l'intérieur des réacteurs est de 70 bars…

Aussi pour ne pas dépasser la pression de calcul des réacteurs et pouvoir, malgré tout, tenter d'y injecter de l'eau à l'aide de camions de pompiers… la seule solution consiste à baisser la pression à l'intérieur des réacteurs en déchargeant la vapeur produite par la puissance résiduelle dans l'enceinte métallique de confinement entourant chaque réacteur.

Mais, contrairement aux centrales PWR, le volume des enceintes de confinement des centrales BWR à eau bouillante étant relativement faible, pour ne pas dépasser la pression de calcul des enceintes (8 bar), l'exploitant est conduit à décompresser, à son tour, ces enceintes en procédant à des rejets (des « éventages ») de vapeur à l'extérieur, en réalité directement dans l'environnement via une ligne de secours improvisée.

Malheureusement le cœur du réacteur n° 1 étant déjà partiellement en fusion, les rejets sont radioactifs. De ce fait, et lorsque cela a été possible, les éventages ont été effectués en concertation avec les autorités.

Une première évacuation des populations a eu lieu dès le 11 mars au soir dans un rayon de 2 km. Devant l'aggravation de la situation, ce périmètre a été étendu à 10 km le 12 au matin.

Les rejets effectués sont non seulement contaminés par les produits de fission mais contiennent de plus une importante quantité d'hydrogène résultant de la combustion du zirconium des gaines du combustible dans la vapeur d'eau. C'est un scénario identique à celui rencontré lors de l'accident de Three Mile Island, à une énorme différence près cependant, car à Fukushima, compte tenu du faible volume de l'enceinte de confinement et de l'impossibilité d'évacuer d'une manière ou d'une autre la puissance résiduelle, les rejets ont été effectués directement dans l'environnement.

Dès le lendemain de l'arrivée du tsunami, le 12 mars à 15h36, le haut du bâtiment du réacteur n°1 est soufflé par une violente explosion due à l'hydrogène qui s'y était accumulé. Cinq exploitants sont blessés et l'alimentation de fortune en eau du réacteur n°2, hâtivement mise en place, est détruite.

Fondamentalement, à quelques variantes près, le scénario de l'explosion du bâtiment du réacteur n°1 due à l'hydrogène va se reproduire pour les bâtiments des tranches n°2 et 3.

L'épuisement des batteries (malgré des branchements improvisés réalisés à l'aide de batteries prélevées sur les véhicules présents sur le site !) entraîne successivement l'arrêt des systèmes autonomes d'injection d'eau par les turbopompes dans les réacteurs n°2 et 3. Par ailleurs l'épuisement des réserves d'eau douce disponibles sur le site contraint l'exploitant à aller puiser de l'eau… de mer (!) pour l'injecter directement dans les réacteurs, et ce malgré l'interdiction qui lui est faite par la direction de la TEPCO et par le Premier Ministre en personne.

Compte tenu des conditions extrêmes rencontrées, les risques encourus par les intervenant en local (risque d'explosion, radioactivité allant en croissant…) et les multiples difficultés qu'il est aisé d'imaginer, les injections d'eau de mer par les camions de pompiers s'avèrent peu efficaces. Il faut sans cesse décompresser les réacteurs dans les enceintes de confinement puis éventer celles-ci à leur tour pour en faire baisser la pression. Toutes ces

opérations sont réalisées manuellement in situ, outre qu'elles sont extrêmement risquées, elles sont physiquement épuisantes car effectuées avec des combinaisons intégrales munies de masque respiratoire.

Finalement les cœurs des réacteurs n°2 et 3 mal refroidis entrent à leur tour en fusion.

Pour les mêmes raisons que précédemment, le 14 mars à 11h01 une très violente explosion due à l'hydrogène détruit le bâtiment du réacteur n°3 (figure 6).

Cette explosion endommage par la même occasion le bâtiment du réacteur n°4 voisin et ébranle fortement la structure supportant la piscine dans laquelle le cœur du réacteur n°4 a été déchargé. Une grande incertitude règne alors au sujet de l'intégrité et de la tenue de cette piscine sachant que sa structure fragilisée est soumise aux multiples répliques sismiques qui se succèdent depuis le séisme initial du 11 mars. Dans les 15 jours suivant le séisme du 11 mars, on en comptera 7 importants de magnitude voisine de 7.

Au cours de l'explosion du bâtiment du réacteur n°3 sept personnes sont blessées et toutes les alimentations provisoires en eau de mer péniblement installées depuis le 11 mars sont détruites. En dépit des énormes risques qu'il prend et de l'importante radioactivité régnant sur le site, le personnel parviendra cependant à rétablir les alimentations en eau de mer le soir même.

Le 15 mars, malgré leurs efforts, les intervenants ne parviennent pas à éventer l'enceinte de confinement du réacteur n°2. A 6h14 une violente détonation suivie d'une chute brutale de la pression dans l'enceinte de confinement de ce réacteur indique clairement que l'enceinte du réacteur n°2 est endommagée et vient de perdre son étanchéité.

Peu de temps après cette détonation une nouvelle détonation est entendue entre les réacteurs 3 et 4 suivie d'un incendie qui éclate dans le bâtiment du réacteur n°4 pour des raisons restées en grande partie inexpliquées. Cet incendie détruit la partie supérieure du bâtiment du réacteur 4 mettant à l'air libre la piscine de stockage de son combustible.

Figure 6. *Etat du bâtiment du réacteur 3 après l'explosion d'hydrogène ayant complètement détruit sa partie supérieure.*

A ce moment, au début de l'incendie de la tranche n°4, on ne connaît rien de l'état dans lequel se trouve le combustible du réacteur n°4 entreposé dans la piscine. La seule certitude est que, depuis l'arrivée du tsunami et le black-out électrique du site, la piscine de stockage du combustible n'est pas refroidie…

Quelle est la température de l'eau ? Est-elle entrée en ébullition ? Le combustible est-il toujours sous eau ? N'est-il pas lui aussi partiellement en fusion ? Si cela était le cas les conséquences de la fusion de ce cœur s'effectuant à l'air libre et les rejets qui l'accompagneraient pourraient être du même ordre de grandeur que celles de la catastrophe de Tchernobyl avec, à un peu plus de 200 km, l'immense agglomération de Tokyo et ses 38 millions d'habitants…

Par « chance », en détruisant le toit du bâtiment du réacteur n°4, l'incendie a permis d'arroser directement en eau de mer cette piscine depuis le sol à l'aide de lances à incendie. Une opération quelque peu dérisoire, qualifiée « Pschitt-Pschitt » par le directeur de la centrale Masado Yoshida.

Par la suite la piscine sera alimentée en eau de mer, toujours par le dessus, mais de manière plus efficace à l'aide d'une gigantesque pompe à béton spécialement amenée sur le site. Après l'opération Pschitt-Pschitt, l'opération « girafe ». Le pire put ainsi être évité.

Après l'explosion du bâtiment du réacteur n°1 le 12 mars, celle du bâtiment du réacteur n°3 le 14 mars, puis l'explosion qui endommage l'enceinte de confinement du réacteur n°2 et les deux incendies qui éclatent successivement dans le bâtiment du réacteur n°4, les 15 et 16 mars on atteint le paroxysme de la crise.

A partir du 17 mars, grâce au rétablissement partiel de certains réseaux électriques qui avaient été endommagés par le tsunami et par les explosions des bâtiments, il devient possible de rétablir progressivement une situation moins précaire.

Les conditions de vie sur le site restent cependant toujours aussi dantesques. De nouvelles explosions d'hydrogène ne sont pas à écarter, le personnel est constamment en danger de mort, physiquement et psychologiquement épuisé. La radioactivité sur le site reste élevée.

Un premier bilan montre que l'intégrité des enceintes de confinement des réacteurs n°1, 3 et 4 a pu être préservée, un miracle réalisé grâce à l'abnégation des équipes sur le terrain, à leur connaissance des installations, à leur expérience passée et à leur ingéniosité.

Soulignons que selon les propres déclarations du directeur Masano Yoshida, sans cette connaissance et cette expérience que possédaient les anciens ce miracle n'aurait pas pu avoir lieu. Ce qui nous amènera dans les conclusions à insister sur l'importance pour la sûreté de la manière dont sont transmis la connaissance, le savoir-faire et l'expérience acquise.

Par contre, force est de constater que l'enceinte de confinement du réacteur n°2 est détériorée et laisse s'échapper une eau fortement contaminée.

Dans les premiers temps, à l'aide d'installations de fortune, de camions de pompiers ou de pompes à béton on continue à injecter de l'eau de mer dans les réacteurs et dans la piscine à raison de plusieurs centaines de tonnes par jour. Cette eau contaminée envahit tous les locaux de la centrale situés en points bas dans lesquels elle s'accumule avant de déborder et d'entraîner une contamination radioactive de l'ensemble du site, de la nappe phréatique et de l'océan dans lequel cette eau finit par se déverser.

Dans les premiers mois, le problème posé par l'eau contaminée dont le volume n'a cessé d'augmenter au fil des jours était devenu un problème majeur. Dans les mois qui suivront il sera enfin porté remède à cette pollution.

Actuellement l'eau douce, et non plus de mer, est utilisée pour le refroidissement des réacteurs. Après usage, cette eau est collectée, traitée et décontaminée avant d'être recyclée. Quant aux énormes quantités d'eaux radioactives produites au cours des premiers temps (soit environ un million de mètres cube) elles ont été pompées depuis les endroits où elles s'étaient accumulées et stockées dans l'attente de la validation de procédés de traitement efficaces.

Pour mettre définitivement fin aux rejets d'eau contaminée vers l'océan, la partie du site sur laquelle les réacteurs sont implantés a été entièrement isolée de la nappe phréatique et de l'océan par une barrière étanche réalisée par congélation du sol.

Les causes immédiates et profondes de l'accident de Fukushima

Lors de ma mission à Tchernobyl, un chef de quart de la centrale qui avait vécu la nuit tragique de l'accident sur une tranche voisine de celle accidentée, m'avait déclaré, avec ce sens typiquement soviétique de l'auto-dérision, « *qu'avant d'être un accident nucléaire, l'accident de Tchernobyl était avant tout un accident soviétique* ».

Avec la condescendance bien connue du monde occidental à l'égard de l'ex-URSS, le monde occidental a bien évidemment fait sien cet adage, estimant que la supériorité de sa technologie et sa conception a priori irréprochable de la sûreté nucléaire le mettaient à l'abri d'accidents majeurs de type Tchernobyl.

L'histoire montre qu'il n'en fut rien, et qu'il a bien fallu déchanter : la crédibilité du monde occidental en matière de nucléaire a été cruellement mise à mal par l'accident japonais.

Comment expliquer Fukushima ? Pour l'ex-URSS, admettons que l'origine de l'accident soit due à l'incurie d'un système peu scrupuleux, obnubilé par la course à l'armements nucléaire construisant des centrales mal conçues dont on pouvait perdre le contrôle, à l'incurie d'un système laxiste tolérant une exploitation hasardeuse en totale violation des procédures… etc.

Mais le Japon ! Comment expliquer Fukushima ? Qui et quoi mettre en cause ?

a) Intéressons-nous en premier à la cause physique, évidente, de la catastrophe : le tsunami.

La catastrophe a clairement eu pour origine une protection insuffisante de la centrale contre un tsunami dont l'amplitude a été estimée à une quinzaine de mètres au droit de la centrale.

Par construction la centrale était protégée contre des tsunamis d'une amplitude de 5,70 m et ce conformément aux prévisions officielles, conformément *à la réglementation en vigueur en 2011*. L'erreur, un manque au minimum de 10 m dans la protection, ne provient donc pas d'une négligence coupable du propriétaire de la centrale qui, par mercantilisme, aurait mal calé le niveau de son site, mais provient d'une réglementation inadaptée à la réalité, à l'amplitude des tsunamis générés par un séisme de magnitude 9.

Explication. Avant 2011, la réglementation japonaise reposait sur une étude statistique des séismes recensés au cours du XXème siècle, une période qui s'avéra finalement bien insuffisante pour être représentative des séismes pouvant réellement se produire dans la région. Ainsi, la réglementation estimait une magnitude des séismes de 7,5 au droit de la centrale conduisant à des tsunamis de seulement 4 à 5 m d'amplitude.

Il s'agit là non pas d'une erreur mais d'une faute car en 2011 on savait que cette réglementation sous-estimait la magnitude des séismes probables sur la côte est du Japon et, en conséquence, l'amplitude des tsunamis engendrés par ces séismes.

Depuis le séisme qui détruisit Kobe en 1995 (7 à 8 000 morts) et la mise en place d'un réseau de géodésie par GPS, un certain nombre de géophysiciens, se basant sur leurs mesures

et celles de ce réseau, critiquaient la validité des règles sismiques. Ils soutenaient que la vitesse de subduction de la plaque Pacifique sous le Japon étant de 9 à 10 cm par an, les séismes correspondant à cette vitesse de subduction devaient pouvoir atteindre une magnitude de l'ordre de 9, soit une énergie 30 fois supérieure à celle d'un séisme de magnitude 8 seulement envisagé par la réglementation. I

Ces scientifiques contestataires appuyaient leur affirmation sur l'observation de séismes de magnitude 9 ou légèrement supérieure récemment survenus sur le pourtour du Pacifique pour des vitesses de subduction similaires : au Kamchatka (en 1952), au Chili (en 1960) et en Alaska (en 1964).

Par ailleurs, des écrits anciens datant de l'ère de Jôgan montraient qu'un séisme de magnitude 9 s'était très vraisemblablement produit en 829 dans la région de Sendai. Plus récemment, en 1896, dans la région de la centrale un tsunami avait eu des conséquences identiques à celui que connut le Japon en 2011 (20 000 morts et disparus).

Dans le cas de Fukushima appartenant à la société TEPCO, on peut donc légitimement s'interroger sur la non prise en compte des avertissements des scientifiques et des données historiques. On peut d'autant plus s'en étonner que, pour la centrale nucléaire d'ONAGAWA - située sur la côte Pacifique à 100 km au nord de Fukushima et donc située à la même distance de l'épicentre du séisme que celle de Fukushima – la compagnie TOHOKU de SendaÏ, propriétaire de la centrale, avait fait le choix de l'implanter sa centrale sur une falaise à 16 au-dessus du niveau de l'océan. Cette centrale a résisté au séisme et n'a pas été atteinte par le tsunami.

Le choix de la TEPCO de caler le niveau général de sa centrale à seulement 5,70 mètre au-dessus de l'océan ne peut s'expliquer que par des raisons économiques, celles de minimiser la dépense d'énergie nécessaire au pompage de l'eau de mer pour le refroidissement des condenseurs de la centrale (élever plusieurs dizaines de m^3 d'eau de 5,7 m au lieu de 16m ou plus).

Ce choix n'a pas pu se faire sans un accord, au sein du METI, entre le ministère, l'autorité de sûreté et la TEPCO. La responsabilité est dans ce cas collective.

Aussi, suite au séisme et au tsunami de mars 2011 (26 500 morts et disparus), la réglementation sismique japonaise a été profondément révisée en élargissant considérablement (à 400 000 ans !) la période sur laquelle devait porter le recensement des séismes. La révision a également modifié la manière d'évaluer l'amplitude d'un tsunami associé à un séisme, en prenant en compte, outre la magnitude du séisme (l'énergie mise en jeu), l'amplitude des déplacements relatifs des plaques au moment du séisme. Ces déplacements pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres.

b) La seconde faute expliquant la gravité de l'accident est tout aussi lourde, c'est la submersion des groupes électrogènes de secours.

Au sujet de la submersion des groupes électrogènes de secours par le tsunami, le résultat de l'enquête qui a succédé à l'accident est accablant. Elle a mis en évidence que, par le passé, ces groupes électrogènes de secours avaient déjà été inondés mais que, suite à leur inondation, aucune modification n'avait été apportée, ni à leur implantation ni à leur protection contre une nouvelle submersion.

Rétrospectivement, la non prise en compte de cette première inondation, pourtant un événement précurseur d'une importance capitale, apparaît aujourd'hui comme une faute gravissime tant de la part de l'exploitant qui n'a apparemment rien fait pour les protéger, que des autorités chargées du contrôle de cette centrale qui auraient dû s'assurer de la bonne prise en compte par l'exploitant du retour d'expérience du premier incident et s'assurer de la réalisation des modifications qui s'imposaient.

Si, après le passage du tsunami, ces générateurs de secours étaient restés opérationnels, nous n'aurions jamais entendu parler d'un accident majeur à la centrale de Fukushima Dai Ichi !

c) Les insuffisances de l'exploitant TEPCO et des organismes de contrôle de la sûreté**.**

Le désastre de Fukushima ne fut pas simplement le résultat d'une sous-estimation de l'ampleur du tsunami. Dans la survenue de ce désastre, les gouvernements successifs, les diverses autorités contrôlant l'industrie nucléaire et la société TEPCO propriétaire et exploitant de la centrale portent une lourde responsabilité.

- La réluctance des autorités au changement de la réglementation sismique

Dans les années 1970-1980, lorsque les quatre réacteurs de la centrale de Dai Ichi furent construits, l'état des connaissances ne permettait pas d'évaluer et donc d'anticiper correctement l'ampleur du tsunami qui a submergé le site de la centrale en 2011. Cependant, depuis la fin des années 1990 les connaissances ayant évolué, des réserves sérieuses étaient émises sur la validité des prévisions. Ces réserves n'avaient cependant pas conduit les autorités à réviser et à modifier la réglementation.

Un exemple de cette réluctance est donné par la centrale de Hamaoka sur la côte Pacifique sud. Bien que des géophysiciens aient affirmé que cette centrale était insuffisamment protégée contre les séismes et les tsunamis, en 2003 un tribunal administratif déboute les associations qui en demandaient la fermeture. Motif invoqué : la centrale est conforme à la réglementation en vigueur.

Suite à la catastrophe de la centrale de Fukushima le gouverneur de la région ordonnera la fermeture définitive de la centrale de Hamaoka…

- Opacité et repli

Suite aux accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl, la communauté des exploitants nucléaires avait décidé de créer deux organismes internationaux, l'INPO en 1979 pour traiter des questions liées à la formation et à l'entraînement des personnels d'exploitation et de maintenance et l'association WANO en 1989 pour traiter des questions liées à l'exploitation des centrales (conduite, maintenance, environnement, radioprotection…). Au sein de ces organismes, les exploitants échangent librement leurs expériences et leurs bonnes pratiques.

Concrètement, cette collaboration internationale se traduit par des évaluations réciproques, appelées OSART (pour Operational Safety Review Team), effectuées au cours de missions d'inspection dont les inspecteurs sont eux-mêmes des exploitants de centrales nucléaires mais en provenance de pays autres que celui de la centrale inspectée. Mentionnons que ces inspections s'avèrent parfois rugueuses car effectuées par des personnes, des pairs, à qui la centrale inspectée a évidemment des difficultés à dissimuler ses faiblesses ! C'est une saine règle du jeu.

Bien qu'elles soient généralement très appréciées, car très instructives, au Japon les inspections effectuées dans le cadre des OSART se sont souvent déroulées dans un climat peu propice à l'acceptation par les « inspectés » des appréciations et recommandations émises par leurs pairs. De manière générale les opérateurs japonais se sont montrés peu coopératifs et peu enclins à se laisser inspecter par des experts étrangers.

Au niveau international, les relations entre l'industrie nucléaire et les sociétés productrices d'électricité nipponnes d'une part et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, l'INPO ou WANO d'autre part ont été pour le moins ombrageuses, voire inexistantes.

Le même repli a été constaté au niveau des gouvernements et des autorités chargées de la sûreté nucléaire et du contrôle de sa mise en œuvre.

Pendant un quart de siècle une vingtaine d'incidents ont été jugés « critiques » par l'autorité japonaise de sûreté nucléaire, la NISA. Ces incidents, certains très surprenants, avaient amené l'AIEA à critiquer la NISA et les sociétés productrices japonaises soit pour leur imprévoyance soit pour leur réticence à prendre en compte les mises en garde, parfois pressantes, des experts et de la communauté nucléaire internationale.

En particulier, la non prise en compte de l'avertissement lancé en 2008 par l'AIEA lors d'une réunion du G8 tenue à Tokyo alertant le Japon sur le caractère sous-estimé de ses normes sismiques.

Comment expliquer ce repli et ce peu d'empressement à coopérer ? Ceux qui connaissent la culture japonaise auraient tendance à imputer ce comportement à une incompréhension culturelle et à une réticence des Japonais face à l'impatience et à la pression exercée par la communauté internationale et par l'AIEA devant leur manque de réactivité. Une impatience et une pression ressenties au Japon comme une attitude arrogante et blessante, typiquement occidentale, qui vient heurter un sentiment de fierté teinté de nationalisme que l'histoire du siècle passé, encore présente dans beaucoup d'esprits, peut en partie expliquer.

- Non intégration du retour d'expérience

Le résultat le plus tangible de ce renfermement vis-à-vis de l'expérience acquise à travers le monde a été la non prise en compte par la TEPCO des modifications qui s'avéraient nécessaires et qui s'imposaient sur ses installations dont la conception, pour certaines, remontait aux années 1960.

Parmi les modifications qui s'imposaient à Fukushima, figurent celles qui auraient permis d'assurer l'autonomie complète de l'alimentation secourue en eau de refroidissement des réacteurs.

L'impossibilité de mettre en service le système d'évacuation de la puissance résiduelle du réacteur n°1 en l'absence de source électrique de puissance illustre la mauvaise conception de ce système de sauvegarde dont le fonctionnement autonome ne doit en principe ne requérir aucune source électrique. Il en est de même des systèmes de sauvegarde d'alimentation en eau des réacteurs n°2 et 3, pourtant plus récents, qui se sont révélés rapidement défaillants lorsque les dernières batteries en fonctionnement se trouvèrent déchargées au bout de 48 h.

Le second train de modifications qu'il aurait été nécessaire d'entreprendre à Fukushima résulte de l'expérience acquise lors de l'accident de Three Mile Island.

En l'absence de toute source froide et dans l'impossibilité d'évacuer la puissance résiduelle et de contrôler la pression à l'intérieur d'un réacteur, la solution ultime retenue par l'exploitant a consisté à décharger la vapeur produite par la puissance résiduelle directement dans l'enceinte de confinement. Puis, compte tenu du volume relativement faible de cette enceinte, et surtout de l'impossibilité de refroidir la réserve d'eau de condensation de la vapeur, cette enceinte a dû à son tour être décompressée au cours d'éventages totalement improvisés, des éventages rejetant directement la vapeur contaminée et l'hydrogène à l'intérieur des bâtiments des réacteurs.

L'hydrogène accumulé entraînant la destruction par explosion de ces bâtiments 1,2 et 3 et l'incendie du quatrième.

L'expérience acquise lors de l'accident de Three Mile Island de 1979 avait clairement montré que pour faire face à une fusion du combustible du cœur d'un réacteur et éviter l'accumulation de l'hydrogène dans les enceintes de confinement, il fallait préventivement

installer des dispositifs catalytiques de recombinaison de l'hydrogène pour éviter son accumulation et a postériori installer des dispositifs filtrants permettant de décompresser l'enceinte de confinement tout en évitant les rejets d'aérosols radioactifs dans l'environnement.

Aucune de ces deux dispositions n'a été retenue par la TEPCO – et ne lui a été imposée par l'autorité de sûreté ! - le dispositif de filtration des rejets existant n'étant pas prévu pour supporter les pressions élevées atteintes dans les enceintes de confinement. Les pressions élevées atteintes étant dues à l'impossibilité de refroidir sur le long terme la réserve d'eau de ces enceintes portées à ébullition par la dépressurisation des réacteurs (rappelons que les sources froides des réacteurs avaient été détruites par le tsunami).

Un tel manquement est symptomatique d'une défaillance plus générale de l'ensemble du système de contrôle de la sûreté nucléaire au Japon et de la mansuétude dont a pu bénéficier la TEPCO.

- La réforme du système japonais de contrôle de la sûreté nucléaire

Dès août 2011 le gouvernement japonais décide de réformer complètement l'organisation jusqu'alors en charge de la sûreté nucléaire, la NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency) et la NSC (Nuclear Safety Commission).

Les anciennes structures sont remplacées en Juin 2012 par la NRA (National Regulation Authority). Après audit la NRA est officiellement reconnue par l'AIEA en janvier 2016.

Parallèlement, depuis 2011, plusieurs conventions de coopération bilatérale ont été signées entre le Japon et les principaux pays utilisant l'énergie nucléaire (USA, France, Russie, Chine et Corée, UK…). Parmi ces conventions, celles portant sur la notification des accidents nucléaires ou radiologiques et sur l'assistance mutuelle.

Ces conventions marquent le retour du Japon dans le cénacle nucléaire mondial.

Les conséquences des grands accidents nucléaires

Comment aborder le sujet ?

Le sujet des conséquences des accidents nucléaires majeurs est un sujet difficile à aborder tant il est sensible et tant il déchaîne les passions. Impossible de présenter sereinement le sujet et d'apaiser les polémiques et controverses qui l'entourent, a fortiori d'y mettre fin.

La complexité du sujet contribue peu il est vrai à en favoriser une présentation compréhensible par le grand public.

Le sujet est fort complexe car il fait appel à des domaines peu connus du public, la physique nucléaire, la chimie, la biologie spécifique aux rayonnements ionisants, la radioprotection, ainsi qu'à des domaines tout aussi complexes, mais plus difficilement quantifiables, tels que la santé publique, l'économie, la politique, le débat philosophique sur les choix de sociétés... etc. L'intrication de tous ces domaines, certains « solides » et consistants, car quantifiables, les autres prêtant beaucoup plus à interprétation en fonction de la perception que chacun a du risque, rend l'ensemble du débat sur le sujet des conséquences sanitaires des accidents nucléaires confus et incompréhensible.

Dans ces conditions, le public qui, à juste titre, a horreur de ce qu'il ne comprend pas, surtout lorsqu'il s'agit de sa santé, est suspicieux : « *là où il y a du flou il y a un loup* ». Il est d'autant plus suspicieux que sa suspicion est abondamment alimentée et entretenue par ce qu'aujourd'hui on appelle le « buzz » et les « fake news ».

Ma conviction profonde est cependant qu'il est possible de se forger une opinion sur les conséquences des accidents nucléaires majeurs en se tenant scrupuleusement aux faits avérés et aux données qui ont été recueillies et analysées dans des conditions que je considère comme difficilement contestables sur le plan de la probité.

Par la suite, ce chapitre s'appuiera essentiellement sur les trois sources suivantes :

- Les données et les conclusions du rapport final du Forum Tchernobyl, « L'héritage de Tchernobyl », présentant avec un recul très significatif de vingt années l'ensemble des travaux accomplis sous l'égide des Nations Unies entre 2000 et 2005 par plusieurs centaines d'experts provenant de 12 pays différents et des représentants des trois pays les plus touchés, la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie. Ces experts ont été réunis par l'ONU au sein du Forum Tchernobyl pour évaluer les conséquences sanitaires, environnementales et socio-économiques de l'accident. Presque 20 ans après l'accident, l'objectif du Forum a été de mettre à disposition de la communauté internationale des données et des analyses objectives sur les conséquences de l'accident avec l'ambition de mettre un terme aux controverses.

Deux groupes de travail ont été formés, le premier, piloté par l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO), fut chargé de l'étude des conséquences sanitaires de l'accident. Le second, piloté par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA), en a étudié les conséquences environnementales.

Tous les experts de ces groupes de travail appartenaient à des organismes onusiens indépendants du monde nucléaire dont le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le Bureau de la

coordination des affaires humanitaires (OCHA), le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) et la Banque mondiale.

- la seconde source de données est l'Académie de Médecine de Fukushima officiellement chargée du suivi sanitaire des populations concernées par les retombées de l'accident. Compte tenu des particularités de l'accident et des expériences passées, en 2017, on dispose déjà avec ces données d'un recul suffisant pour établir un premier bilan des conséquences de l'accident et pour se projeter dans le futur.

- Enfin, pour la France, ce chapitre se réfère aux études et synthèses réalisées par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (l'IRSN) organisme d'Etat placé sous la tutelle conjointe des différents ministères chargés de l'écologie, de la recherche, de l'énergie, de la santé et de la défense.

Les notes jointes en annexe 1 sont destinées à faciliter la compréhension de la manière dont sont évaluées les conséquences sanitaires des rayonnements ionisants. Y sont présentées les principales bases de la radioprotection et les méthodes d'évaluation des conséquences sanitaires de l'exposition aux rayonnements ionisants. On y présente en particulier la *relation linéaire sans seuil* (RLSS) dont l'interprétation dans le domaine des faibles doses est à l'origine des polémiques qui agitent les débats autour des conséquences sanitaires des accidents.

Quelques repères et remarques sur les rejets radioactifs accidentels ou militaires

Depuis les années 1950 des quantités importantes d'éléments radioactifs ont été rejetés dans l'atmosphère. Elles proviennent essentiellement des essais militaires aériens (américains, soviétiques, anglais jusqu'en 1962, français jusqu'en 1974 et chinois jusqu'à la fin des années soixante-dix) et des accidents nucléaires.

Le bilan de ces rejets est exprimé en curies (Ci), un curie étant une activité équivalente à 37 milliards de becquerels (désintégrations radioactives par seconde) :

Ensemble des essais d'armes nucléaires	20 à 24 milliards de Ci
Tchernobyl, 26 avril 1986	de 50 à 150 millions de Ci
Rejets de l'accident en Oural 1956	1 milliard de Ci
Kystim en URSS, 29 septembre 1957	20 millions de Ci
Fukushima 11 mars 2011	5 à 10 millions de Ci
Windscale, 1957	20 à 30 000 Ci
Three Mile Island, avril 1979	15 à 20 Ci

Ces informations brutes n'ont guère de signification par elles-mêmes, elles doivent être accompagnées des commentaires ci-après.

La contamination des sols par les essais nucléaires aériens est assez uniformément répartie, au moins à l'échelle d'un hémisphère, elle provient de la retombée des radioéléments qui ont été projetés dans la très haute atmosphère par les explosions. La lenteur de ces retombées fait que les radioéléments de courte période qu'elles contenaient initialement – c'est-à-dire les éléments les plus actifs donc les plus nocifs quand on est à leur contact - ont pour la plupart disparu lorsque ces retombées arrivent au niveau du sol. Seuls subsistent de manière prépondérante les césiums 134 et 137 dont les périodes sont respectivement de 2 et 30 ans. Ces césiums sont les marqueurs de la radioactivité répandue sur les sols, on les utilise pour établir une cartographie des contaminations mais également pour dater les dépôts (par le rapport Cs 134 / Cs 137).

Contrairement aux retombées lentes et différées des essais militaires aériens, les rejets provenant des accidents sur les installations nucléaires ont un impact immédiat beaucoup plus important sur le plan sanitaire. Cette différence tient à la présence dans les rejets d'une centrale accidentée de radioéléments de période très courte, et donc très actifs, de période allant de quelques heures à quelques jours.

Ainsi, au moment de l'accident de Tchernobyl ce sont essentiellement les rayonnements émis par les radionucléides à vie très courte (par exemple le tellure et l'iode 132 de la figure 5) qui ont été déterminants dans les irradiations aiguës ayant entraîné le décès des premiers intervenants.

Par la suite, c'est l'activité de l'iode 131, de période 8 jours, qui deviendra prépondérante.

Puis, sur le plus long terme, ce sont les activités des césiums 134 et 137 qui prévalent mais l'activité de ces radionucléides est beaucoup plus faible (sinon ils auraient très vite disparu comme les tellures !) et leur radiotoxicité est de ce fait beaucoup plus faible.

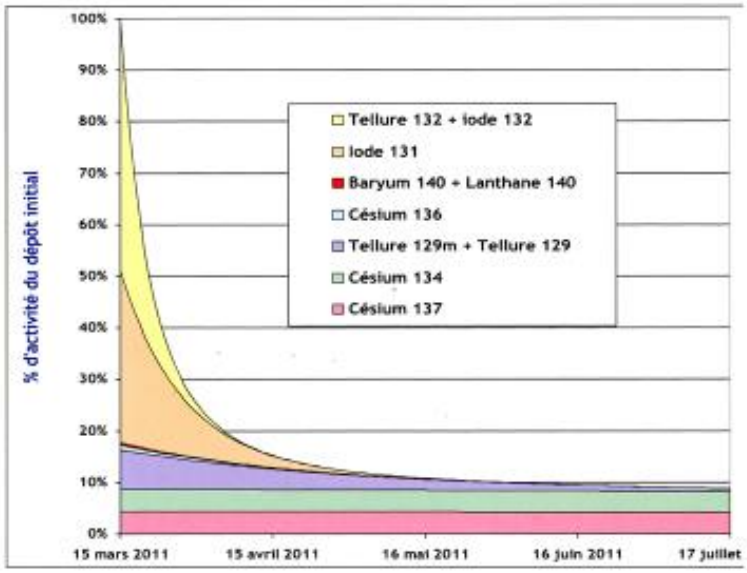


Figure 5. *Activité relative des radionucléides émis lors de l'accident de Fukushima en fonction du temps*.

Ces remarques préliminaires montrent que, suite à un accident, la préoccupation des pouvoirs publics doit se porter prioritairement sur la présence dans les rejets des éléments volatils et des aérosols à courte et très courte durée de vie et sur leur impact sanitaire.

La première priorité est donc de mettre les populations à l'abri lors du passage du nuage pour éviter l'irradiation externe par les tellures, les iodes et par les gaz (Xénon et Krypton) présents en abondance, mais heureusement chimiquement inertes.

La seconde priorité est la surveillance immédiate de la chaîne alimentaire pour éviter la contamination interne par l'ingestion notamment des iodes directement assimilables par la thyroïde. La surveillance doit principalement porter sur les laitages, compte tenu de la réceptivité et de la fixation de l'iode par la thyroïde des jeunes enfants.

Ce n'est que sur un plus long terme que les dépôts sur les sols résultant essentiellement du lessivage des nuages radioactifs deviennent des sources prépondérantes d'irradiation externe. Ce sont ces dépôts, majoritairement de césium 134 et 137, qui serviront à établir la cartographie des zones contaminées et à classer ces zones en vue d'une éventuelle réutilisation des sols et d'un possible retour des populations déplacées.

Les conséquences de l'accident de Tchernobyl

Les personnes directement intervenues au moment de l'accident

Dans un premier temps, selon les témoignages directs que j'ai pu recueillir, les personnes présentes sur le site la nuit de l'accident n'ont pas immédiatement perçu l'ampleur de l'accident qui venait de se produire ni l'extrême gravité de la situation. Ce qu'elles voyaient dépassait tellement l'entendement et leur stupéfaction était telle (aujourd'hui on parlerait de sidération…) qu'elles n'ont pris conscience de la réalité du désastre qu'au lever du jour.

Durant toute la nuit leur préoccupation a été de combattre dans des conditions effroyables la multitude des incendies allumés par des débris incandescents projetés lors de l'explosion du réacteur et qui menaçaient les trois autres réacteurs voisins.

A proximité du réacteur accidenté, le débit de dose atteignait plusieurs centaines de sieverts par heure (dose mortelle), dose d'ailleurs impossible à mesurer, les dosimètres dont disposaient les intervenants étant totalement saturés, devenus inutilisables.

Beaucoup des personnes intervenues cette nuit-là, essentiellement des pompiers, ont été de ce fait gravement irradiés par le contact direct sur la peau, par inhalation et par ingestion de radioéléments très radioactifs à vie très courte.

En l'absence de mesure valide, les doses reçues par ces premiers intervenants n'ont été estimées qu'a posteriori, par dosimétrie biologique ou examen post mortem. Elles s'échelonnent de plusieurs centaines de mSv à plus de 10 Sv.

Le bilan des victimes immédiates de l'accident :

Trois personnes ont péri lors de l'explosion. Elles sont portées disparues, ensevelies sous les décombres.

Sur les 600 personnes intervenues durant la nuit, toutes ont reçu des doses d'irradiation élevées et à fort débit, 237 ont été hospitalisées et parmi elles, 134 ont immédiatement présenté un syndrome d'irradiation aiguë. L'évaluation des doses reçues et les décès se répartissent selon le tableau ci-dessous.

Nb de personnes	dose en Sv	nb de décès
21	6-16	20
22	4-6	7
50	2-4	1
41	1-2	0

Entre le 4 mai et le 31 août 1986, 28 pompiers sont décédés. Entre 1987 et 2004, dix-neuf autres personnes sont décédées, pour la moitié d'entre elles un lien a été établi entre leur irradiation et leur décès.

Les liquidateurs

(Se référer à l'annexe pour les définitions des unités utilisées en radioprotection)

Ce sont les personnes qui sont intervenues sur le site ou à proximité du site après l'accident. A été officiellement considéré comme liquidateur « *toute personne ayant travaillé dans un rayon de 30 km autour de la centrale* ». Cet espace correspond à la *zone d'exclusion*

en principe d'accès interdit sauf aux personnes travaillant sur le site de la centrale ou à ses abords.

Les liquidateurs ont été employés entre 1986 et 1990 à des tâches très diverses : déblayer et dégager les décombres, enfouir les débris projetés lors de l'accident, décontaminer le site, construire et consolider le premier sarcophage, etc. Parmi eux :

- 21 500 personnes ont participé à la construction du sarcophage. Elles ont reçu de ce fait des doses plus importantes que les autres liquidateurs pouvant atteindre 500 mSv. D'où, dans la plus pure tradition soviétique, le nom (non usurpé !) donné aux murs de fondation du sarcophage que ces intervenants ont construits dans des conditions très risquées, « mur des Héros », « mur des Pionniers », etc.
- 1 125 pilotes d'hélicoptère ont largué des matériaux pour éteindre l'incendie, ils ont reçu une dose moyenne de 260 mSv.
- 762 personnes de l'Institut Kourtchatov disposant d'une dosimétrie adaptée ont examiné les restes du réacteur, elles ont reçu des doses qui ont atteint jusqu'à 1 720 mSv.

Certaines personnes, plus chanceuses (ou petits profiteurs) ont acquis le titre de liquidateur en accomplissant des tâches beaucoup moins exposées ou même sans avoir été soumises à la moindre irradiation (tâches administratives…).

Au total, environ 200.000 personnes ont été officiellement reconnues comme ayant participé après l'accident à des travaux dans un rayon de 30 km autour du site.

Le chiffre de 600.000 liquidateurs parfois avancé inclurait les 386.000 civils déplacés. En toute rigueur il est inexact.

Evaluation des doses reçues par les liquidateurs

Les liquidateurs ont été soumis à des expositions moins importantes que celles auxquelles les premiers intervenants ont été soumis. Cependant, comme précédemment en l'absence de dosimétrie systématique et rigoureuse, les doses reçues par les liquidateurs ne sont qu'estimées et n'ont pu l'être qu'a posteriori en fonction du lieu et de la durée de chaque intervention. Autant dire qu'elles sont inconnues individuellement.

Le suivi médical des liquidateurs s'avère donc difficile, voire impossible, du fait d'une dosimétrie initiale approximative mais surtout du fait de l'éclatement de l'URSS en 1990 et de la dispersion des liquidateurs dans les différentes républiques de la CEI devenues indépendantes. Les conflits qui ont par la suite éclaté entre elles ont encore compliqué un peu plus le suivi de cette population.

Cependant, grâce à un meilleur suivi de certaines populations de liquidateurs par leur Etat (Estoniens, Ukrainiens et certains Russes), une dose moyenne a pu être globalement évaluée, elle est d'environ 107 mSv. Malgré toutes les incertitudes précédemment évoquées, elle a pu être validée a posteriori par des indicateurs biologiques issus des études épidémiologiques effectuées par l'OMS, par le Centre International de Recherche sur le Cancer et le National Cancer Institute aux USA en vue de déterminer (entre autres conséquences sanitaires) les risques de leucémie et de cancers de la thyroïde parmi cette population.

Il est possible de préciser ce que sont devenues certaines populations de liquidateurs :

- pour les liquidateurs Estoniens, les évaluations « officielles » de la dose moyenne reçue est de 109 mSv. Une étude ultérieure basée sur des bioindicateurs sanguins donne une valeur moyenne légèrement supérieure à 100 mSv. D'autres études par fluorescence in situ

par hybridation auraient tendance à conclure que les doses officielles sont surestimées. Pour les doses reçues les plus importantes, 1,4% des liquidateurs estoniens auraient reçu une dose supérieure à 250 mSv, la dose la plus importante relevée est de 605 mSv.

Entre 1986 et 1993, et pour cette population estonienne correctement suivie, on ne décèle statistiquement aucune augmentation ni de la mortalité ni de la fréquence des cancers *directement* imputable à l'exposition qu'elle a subie. On constate en revanche un fort excès de suicides (+50% par rapport à la population), les suicides devenant la troisième cause de mortalité après les accidents et les maladies respiratoires.

- Pour les Russes et les Ukrainiens, l'étude porte sur 66.000 liquidateurs russes et indique des doses comprises entre 50 et 250 mSv. Pour cette population, la dose moyenne officielle est de 108 mSv. Pour les plus fortes doses, 4,2% des personnes ont reçu des doses supérieures à 250 mSv.

Cette étude conclut à un excès relatif du nombre des cancers supérieur d'un facteur 2 à celui résultant des études Hiroshima-Nagasaki. Mais les modes d'irradiation étant totalement différents – flash très bref de rayons γ et de neutrons à Hiroshima et Nagasaki, irradiation diffuse étalée dans le temps et inhalation à Tchernobyl - il est difficile d'en retirer des conclusions.

Lors de la conférence internationale de 2005 sur les conséquences sanitaires et environnementales de l'accident en Biélorussie, en Russie et en Ukraine, en utilisant la relation dose-effets linéaire sans seuil, l'OMS estime par calcul que *l'excès des décès* imputables aux cancers induits par l'exposition aux rayonnements sur la durée de vie des 200 000 liquidateurs serait de l'ordre de 2 200.

Cette estimation de *l'excès des décès* est à rapprocher du nombre prévisible et certain de décès sur la durée de vie d'une population témoin de 200 000 personnes n'ayant jamais été exposées aux rayonnements ionisants. Statistiquement ce nombre prévisible et certain est de 41 500 pour les cancers solides et de 800 pour les leucémies.

Si on se réfère aux 61 000 liquidateurs les mieux suivis on a constaté que les leucémies radio induites surviennent dans les 10 années suivant l'irradiation, leur apparition devenant improbable au-delà. Pour cette population *l'excès de décès réellement constaté* par leucémie, cancers solides et maladies cardiovasculaires était de 230 en 1998.

Pour l'essentiel, les enseignements relatifs à l'état sanitaire des liquidateurs sont les suivants :

- premier enseignement : durant la période 1990-2000, soit les premières années après l'accident considérées comme étant les plus critiques, on a constaté parmi les liquidateurs les plus exposés un taux de mortalité et un taux de cancers et de leucémies croissant en fonction de la dose reçue.

En extrapolant à l'ensemble des liquidateurs le constat ci-dessus effectué sur les liquidateurs les mieux suivis, on aboutirait à un taux de mortalité global de 4,6% dont 2% sont dus aux cancers et 0,3% aux leucémies (au total 2,3%) soit la moitié du taux de mortalité global de 4,6%.

- second enseignement, sans doute le plus important : les 2,3% de taux de mortalité qui ne sont pas directement liés à l'irradiation sont imputés à la *morbidité* de cette population, parmi laquelle on relève un taux très élevé de *maladies psychosomatiques*.

Ces maladies sont étroitement liées à l'angoisse de ces personnes persuadées que l'exposition aux rayonnements qu'elle ont subie lors de leur intervention les condamne

irrémédiablement. Pour cette population il en résulte une tendance forte à l'adoption de comportements violents (dont les suicides évoqués précédemment) ou à risque, et en premier lieu la consommation d'alcool.

Cette morbidité est fortement aggravée par l'effondrement du régime soviétique et la protection sociale que ce régime assurait et par le sentiment d'abandon qu'éprouvent les liquidateurs, ces « héros » jadis glorifiés, à qui, au cours de ronflants discours officiels, on demandait d'aller « *combattre à main nue* » un « *ennemi* » (le réacteur) comme, par le passé, lors du siège de Stalingrad, d'autres héros avaient combattu un ennemi tout aussi redoutable, le nazisme… (propos rapportés par Svetlana Alexievitch, dans son ouvrage sur Tchernobyl, la « Supplication »).

Quoique moins sombre, l'OMS a établi un constat similaire (à celui effectué pour les liquidateurs) relativement à la morbidité de l'ensemble des populations déplacées en raison de la contamination des lieux où elles résidaient et travaillaient.

Les conséquences de l'accident sur les populations de l'ex-URSS

Deux relations simples pour se repérer sans trop de difficulté dans le maquis des chiffres et des correspondances entre la contamination des sols et les doses reçues par les populations. Nota : L'activité du césium 137 est le marqueur ayant servi à élaborer la cartographie de la contamination des sols :

- une contamination des sols de 37 000 Bq/m^2 (becquerel par mètre carré) correspond à une contamination de 1 Ci/km^2 (curie par kilomètre carré). Par la suite on privilégiera les Ci/km^2, une grandeur mieux adaptée à l'établissement de la correspondance entre activité des sols et dose reçue par la population,

- une contamination de 1 Ci/km^2 génère une dose annuelle d'irradiation de 1 mSv ce qui correspond à la limite de dose fixée en 1990 par la CIPR pour le public et pour l'irradiation du corps entier due aux seules activités humaines.

A titre indicatif, cette dose correspond à la moitié de la dose annuellement due à la radioactivité naturelle en France (cette dose est de 2,4 mSv/an au niveau de la mer).

Avant 1986 la limite de dose fixée par la CIPR pour la population du fait des activités humaines (nucléaires) était de 5 mSv, suite à l'accident de Tchernobyl elle a été réduite à 1 mSv.

Reconstitution des dépôts en Biélorussie, en Ukraine et en Russie

Remarque préliminaire : les zones les plus contaminées ne sont pas obligatoirement les zones les plus proches de la centrale : en un lieu, la contamination du sol dépend essentiellement de l'importance des précipitations (de la pluie) qui, en ce lieu, ont lessivé le nuage radioactif au moment de son passage.

Une cartographie des dépôts sur le territoire de l'ex-URSS a été établie. Il est le résultat d'un travail considérable de mesures sur le terrain, de reconstitution de données météorologiques (précipitations, vitesse et orientation des vents…) et de calculs destinés à établir l'inventaire des radionucléides présents dans le cœur au moment de l'accident et de ceux qui s'en sont échappés.

La cartographie initiale a été mise à jour en 1997 (soit onze ans après l'accident) pour les principaux indicateurs rémanents (Césium 137 et Strontium 90) et en l'an 2000 pour les différents isotopes du plutonium répartis dans une zone beaucoup plus réduite autour du site de la centrale.

Une dizaine d'organisations biélorusses, ukrainiennes et russes ainsi que la communauté internationale ont œuvré à l'établissement de cette cartographie. Une bonne correspondance (confiance à 92%) entre les retombées radioactives calculées et celles mesurées sur le terrain, valide les modèles mathématiques et physiques utilisés.

Ces travaux ont conclu que 4% de l'inventaire des éléments les plus volatils présents dans le cœur au moment de l'accident se sont échappés et se sont *propagés au-delà des environs immédiats* de la centrale.

La répartition de la contamination des sols apparaît sous forme de taches de forme et de répartition aléatoires, telles celles de la peau d'un léopard (figure 6).

Dans les trois pays, Biélorussie, Ukraine et Russie, la superficie totale des zones où la contamination est supérieure à 5 Ci km^2 est de 30 000 km^2.

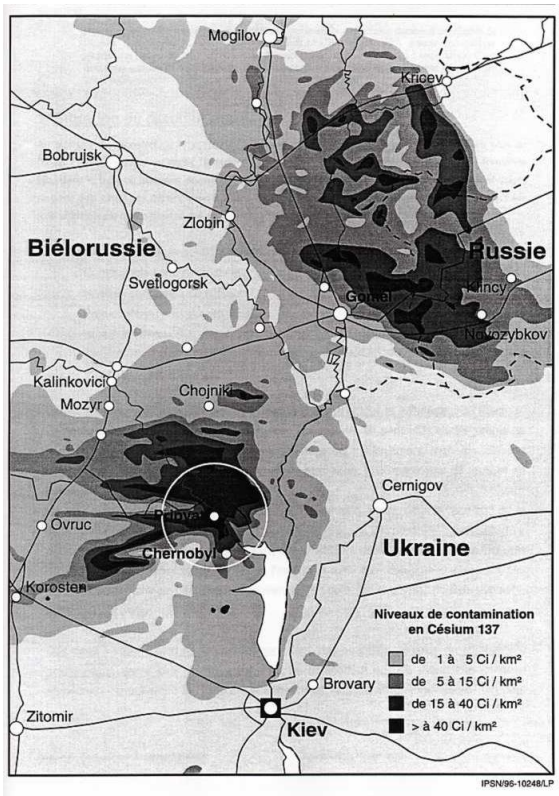


Figure 6. Répartition de la contamination en Ukraine et Biélorussie de 1 à plus de 40 Ci / km^2.

Le classement des différentes zones contaminées

a) Les zones d'exclusion

Ce sont les zones les plus contaminées où la contamination est *supérieure à 40 Ci/km^2*. Leur superficie totale est de 8 200 km^2.

Ces zones d'exclusion sont situées à l'ouest et au nord du site à l'intérieur d'un cercle de 30 km de rayon autour de la centrale et, plus loin, en Biélorussie dans la région de Gomel. En surface et en nombre d'habitants évacués, les zones interdites représentent :

	Surfaces contaminées	Nb d'habitants
Zone 30 km autour du site	700 km^2	135 000
Belarus (Gomel)	5 300 km^2	24 000
Ukraine	2 044 km^2	92 000
Russie	170 km^2	

A l'exception des 50 000 habitants de la ville de Pripiat située à moins de 2 km de la centrale qui ont été évacués en moins de 48 h, les 251 000 personnes évacuées de ces zones ne l'ont pas été immédiatement mais au cours des semaines qui ont suivi l'accident.

Dans l'attente de leur évacuation, l'irradiation de ces personnes a été importante. Les premiers jours par inhalation de radio-isotopes à vie très courte extrêmement radioactifs

(tellure, xénon, iode…) puis, dans les semaines qui ont suivi l'accident, par irradiation externe (dépôts sur les sols, objets contaminés) et par contamination interne suite à l'ingestion d'aliments contaminés, principalement par l'iode.

La dose moyenne reçue par inhalation par la population a été évaluée à 10 mSv par calcul.

Nota. Bien que le site de la centrale soit situé à l'intérieur de la zone d'exclusion, plusieurs milliers de personnes continuent à y travailler depuis l'accident pour sécuriser et assainir le site, construire le nouveau sarcophage et, jusqu'en 2001… pour continuer l'exploitation des trois autres tranches du site.

Sur le site et aux alentours immédiats les sols ont été décapés ou recouverts d'une épaisseur de terre et de béton suffisante pour rendre le rayonnement ambiant acceptable y compris pour les femmes et les hommes en âge de procréer. La majorité des personnes travaillant sur le site de la centrale réside à Slavutich, ville nouvelle située hors de la zone d'exclusion et reliée par une liaison ferroviaire à la centrale.

En 1996, 34 000 personnes, âgées pour la plupart, habitaient de nouveau la zone d'exclusion.

b) Les zones d'accès contrôlé, SCZ

Dans ces zones, la contamination est comprise *entre 15 et 40 Ci/km^2*. Ces zones ont une étendue de 10 000 km^2.

Dans les trois mois qui ont suivi l'accident il a été décidé d'en évacuer la population soit 270 000 personnes.

c) Les autres zones contaminées

Elles regroupent environ 3,7 millions d'habitants. Elles n'ont pas été évacuées.

- 1,4 million d'habitants vivent dans des zones où la contamination est comprise entre 5 et 15 Ci/km^2,
- 2,5 millions d'habitants vivent dans des zones où la contamination est comprise entre 1 et 5 Ci/km^2

Dans ces zones les habitants sont donc soumis à une irradiation externe continue comprise entre 1 et 15 mSv/an en provenance des sols et, dans une moindre mesure, une irradiation interne par contamination alimentaire et inhalation de poussières.

d) Les autres territoires de l'ex-URSS

Le reste de la population de l'ex-URSS (Ukraine, Biélorussie et Russie) vit sur un territoire où la contamination due à l'accident est inférieure à 1 Ci/km^2. Dans ces territoires la dose d'irradiation additionnelle annuellement reçue par la population est au plus de l'ordre de grandeur de la radioactivité naturelle.

Les effets sanitaires de l'accident sur les populations

a) Les cancers de la thyroïde et les leucémies. Le cas des enfants.

Ce paragraphe fait référence à des articles rédigés par Mr. Yvon Grall ex-chef du service de médecine nucléaire à l'Hôpital Lariboisière à Paris.

Compte tenu de l'usage fait de l'iode 131 en médecine en tant que traceur radioactif et élément utilisé en radiothérapie, les effets de l'iode sur l'organisme et sur la thyroïde sont particulièrement bien connus. Cette connaissance provient des nombreuses études réalisées sur les effets de l'iode radioactif, de l'expérience hospitalière et des statistiques que ces études et que cette expérience ont permis d'accumuler depuis de nombreuses décennies.

Qu'il s'agisse d'iode radioactif ou non, l'iode se concentre dans la thyroïde, il en résulte que, suite à une contamination de l'organisme par les isotopes radioactifs 129 ou 131de l'iode, la thyroïde reçoit une dose environ 2 000 fois plus élevée que tout le reste de l'organisme (précisément, 350 mGy par million de becquerels d'iode absorbé par la thyroïde).

Chez l'enfant dont la thyroïde est en cours de développement, relativement au poids de la glande thyroïde, l'absorption d'iode est beaucoup plus importante que chez les adultes. Chez un *nouveau-né* elle est 10 fois plus importante que chez un adulte.

Il faut souligner que pour le *fœtus,* à partir du 3ème mois lorsque la thyroïde devient fonctionnelle, la dose est encore beaucoup plus élevée, soit 1Gy par million de becquerels *absorbé par la mère*.

Hormis le décès des premiers intervenants, les cancers de la thyroïde des enfants sont l'aspect le plus visible et le plus dramatique de l'exposition des populations aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl.

Dans les zones les plus contaminées de la Biélorussie, les enfants ont reçu en moyenne des doses à la thyroïde comprises entre 0,5 et 1,3 Gy. Dans la zone de Gomel en Biélorussie, 80 % des doses reçues par les enfants se situent dans un intervalle de 0,18 à 5,4 Gray, avec un maximum de 57 Gray atteint dans un village non évacué.

Un relatif consensus parmi les scientifiques et le corps médical conduit à penser qu'entre 3 000 et 17 000 enfants ont reçu une dose supérieure à 1 Gy à la thyroïde et qu'entre 500 et 4 000 enfants ont reçu une dose supérieure à 10 Gy.

La carence chronique de l'alimentation en iode des habitants de ces régions rend la thyroïde des enfants encore plus réceptive, ce qui a incontestablement constitué un facteur aggravant. En Pologne où une distribution préventive d'iode a été organisée dès l'annonce de l'accident (par les pays occidentaux !) aucune augmentation du taux de cancers de la thyroïde n'a été notée malgré une importante contamination du territoire polonais.

Le cancer spontané de la thyroïde chez l'enfant est extrêmement rare, normalement on ne rencontre que de 1 à 2 cas par million d'enfants.

Dès 1990 les premiers cas sont détectés chez les jeunes enfants au sud de la Biélorussie dans la région la plus touchée s'étendant autour de Gomel, au nord de l'Ukraine, et de Briansk en Russie. Par rapport aux prévisions, la précocité de cette détection seulement quatre ans après l'accident a été une surprise.

Le nombre de cancers de la thyroïde chez les enfants de l'ex-URSS a été en forte augmentation entre 1990 et 1996 puis, à partir de cette époque soit dix ans après l'accident, le nombre de nouveaux cas diagnostiqués est allé en diminuant. Vingt ans après l'accident le nombre de cas détectés est revenu à un niveau très faible, identique à celui qu'il était avant l'accident.

En 2006, au total 4 000 cas de cancers de la thyroïde avaient été diagnostiqués, principalement chez les enfants âgés de moins de 5 ans au moment de l'accident.

Plus une population est jeune, plus elle est touchée. Sur les 4 000 cas diagnostiqués, 98% des enfants atteints d'un cancer de la thyroïde avaient moins de 10 ans au moment de l'accident et 80% avaient moins de 5 ans.

Le pronostic quant aux chances de survie de ces enfants est très bon à condition que la détection soit précoce. Dans ce cas la thérapie est efficace et le taux de survie est alors voisin de 98 ou 99%. En 2006, vingt ans après l'accident, 9 décès ont été constatés.

Par contre ces enfants devront suivre un traitement tout au long de leur vie. Ce qui constitue une très lourde contrainte.

Il n'a pas été observé de cancer thyroïdien pour les enfants conçus et nés *après* l'accident (après 1986). De même qu'il n'a pas été constaté d'augmentation du taux de cancer de la thyroïde chez les adultes d'Ukraine ou de Biélorussie.

En dehors des cancers thyroïdiens, d'autres affections thyroïdiennes sont apparues chez les enfants. Il a été observé une fréquence accrue d'affections thyroïdiennes telles que les thyroïdites (affection inflammatoire) et les hypothyroïdies. Ce type d'affection est étudié par l'Association Japonaise Sasakawa en collaboration avec la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie sur un groupe de 120 000 enfants.

Concernant les leucémies, d'une manière générale les études descriptives ne montrent pas d'augmentation statistique significative du nombre de cas chez les enfants par rapport aux périodes ayant précédé l'accident : 2 à 7 cas pour 100 000 enfants, soit un nombre similaire à celui couramment rencontré dans les registres français. Deux régions font cependant exception et présenteraient un excès de leucémies, Rovno et Zhytomir, sans qu'on puisse fournir une explication claire de ces écarts en l'absence de références passées et compte tenu des nombreux biais engendrés par la mauvaise situation sanitaire générale du pays depuis l'effondrement de l'empire soviétique.

b) Les conséquences sanitaires pour la population en général.

Contrairement à l'idée communément répandue dans notre pays, et hormis le cas des cancers de la thyroïde des enfants et les décès des premiers intervenants lors de l'accident, les conséquences les plus dramatiques de l'accident de Tchernobyl ne sont pas imputables aux effets de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Les conclusions du rapport du Forum Tchernobyl de l'ONU sont extrêmement claires : « *la pauvreté, les maladies liées au mode de vie qui se généralisent dans l'ex-Union soviétique et les troubles mentaux constituent pour les populations* [concernées par l'accident] *une menace beaucoup plus grave que l'exposition aux rayonnements* ».

« … La persistance de mythes et d'idées fausses sur le risque d'irradiation ont provoqué chez les habitants des zones touchées un fatalisme paralysant. Les habitants des zones touchées ont une perception négative de leur état de santé et de leur situation, perception exacerbée par un sens exagéré du risque sanitaire que la radioexposition leur fait courir et par la conviction que leur espérance de vie est réduite.

Rien n'indique que leur anxiété concernant les effets sanitaires des rayonnements diminue avec le temps. Au contraire. »

Ces populations sont d'autant plus confortées dans leur pessimisme que les statistiques leur montrent que, de manière générale, l'espérance de vie diminue dans les pays de l'ex-empire soviétique alors que partout ailleurs dans le monde elle est en augmentation.

Les effets de ce mauvais état psychologique général sont très visibles, ils se traduisent par une forte morbidité (maladies cardio-vasculaires et pulmonaires, diabète…) et des comportements à risque, surtout chez les hommes, alcoolisme, tabagisme, sida, violence, suicides… et, plus globalement, une baisse notoire de l'espérance de vie, celle-ci passant de 63 ans en 1975 à 59 ans en 2009.

c) Les conditions du relogement des personnes déplacées.

Selon les conclusions du Forum, « *L'évacuation de quelques 350 000 personnes hors des zones touchées et leur relogement se sont avérés être une expérience extrêmement traumatisante* ».

Malgré les indemnisations, un logement gratuit et parfois le choix de leur nouveau domicile, les populations déplacées vivent une expérience traumatisante, se retrouvant souvent sans travail et ayant le sentiment de ne plus avoir leur place dans la société. Inévitablement, dans les villages, des tensions sont apparues entre la population d'origine et les nouveaux arrivants.

Il faut enfin noter que les programmes de relogement et de réhabilitation lancés à l'époque de l'Union soviétique n'ont pas été poursuivis après 1991 faute de financement. De nombreux projets sont restés inachevés, d'autres ont été purement et simplement abandonnés.

Le manque de financement se fait d'autant plus ressentir que des indemnisations et des avantages ont été alloués à des catégories très élargies de « victimes ». Au total plus de 7 millions de personnes perçoivent déjà (ou percevront) des retraites, des primes spéciales ou bénéficieront de prestations gratuites (médicales, vacances …). Ces prestations, dont certaines sont manifestement indues, privent d'autant des secteurs de dépenses publiques qui devraient profiter aux « vraies victimes » de l'accident.

Le Forum Tchernobyl préconise qu'une profonde réforme soit apportée à la manière dont l'assistance est fournie à ceux qui doivent réellement en bénéficier… point n'est besoin d'insister sur l'impopularité d'une telle réforme et sur les risques politiques que prendraient ceux qui s'y lanceraient. Une réforme du système n'a donc que peu de chance de voir le jour.

d) Le niveau de vie dans les zones contaminées.

Les régions touchées par la contamination étaient pour la plupart des régions agricoles. Suite à l'accident, plus de 780 000 hectares de terre ont été interdits à la production et la production de bois a été stoppée sur 700 000 hectares de forêt. Ces restrictions de production ont entraîné une énorme chute des revenus agricoles.

Les mesures qui ont dû être prises pour produire une alimentation « propre » sont à l'origine d'une augmentation importante des coûts de production. Ces mesures ne sont cependant pas suffisantes à elles seules, la connotation négative de l'ensemble de la région fait que les revenus de l'agriculture sont toujours en baisse, même là où la production agricole et l'élevage sont reconnus comme étant sans risque.

Si l'on ajoute à l'ensemble de ces handicaps les effets des bouleversements dus à l'effondrement de l'URSS, ceux provenant de la récession et ceux imputables aux nouveaux

mécanismes du marché, on obtient une image vraiment très sombre de la situation économique de la région.

Le rapport du Forum note que dans les zones contaminées, la pauvreté est particulièrement aiguë, que les salaires sont bas et qu'en dehors de l'agriculture les possibilités d'emplois sont limitées.

Il en résulte une fuite des jeunes et des personnes les plus qualifiées et les plus diplômées, ce qui n'est évidemment guère propice à la création d'entreprises et au renouveau de l'économie.

La population est vieillissante, le nombre des décès dépasse maintenant celui des naissances, ce qui conforte encore un peu plus chacun dans ses convictions morbides et dans son profond pessimisme quant à l'avenir.

Nota : pour ceux désireux d'acquérir une idée plus précise et plus juste de ce que furent et sont encore les suites dramatiques de l'accident de Tchernobyl, une référence est sans conteste le livre « La supplication. Tchernobyl, une chronique après l'apocalypse » dans lequel Svetlana Alexievitch, Prix Nobel de littérature 2015, a transcrit les entretiens qu'elle eut avec un large éventail de personnes concernées par l'accident et ses suites : de l'académicien à la plus humble des grands-mères revenue en catimini vivre dans la zone interdite, également l'épouse d'un pompier irradié décédé quelques jours après l'accident, la multitude des liquidateurs, des miliciens, des responsable politiques nationaux ou locaux de l'époque ainsi que des écrivains, des philosophes, des poètes…

e) Les estimations du nombre d'excès de décès par cancer dans la population.

Les évaluations du Forum Tchernobyl fournissent une évaluation du nombre maximum de cancers mortels que l'on pourrait voir apparaître *en excès* par rapport aux cancers spontanés (non radio induits) parmi les populations les plus exposées.

Hors des personnes étant intervenues directement sur le site, soit les 1 000 intervenants des premiers jours et les 200 000 liquidateurs, les populations prises en considération par le Forum sont celles qui, à un moment où à un autre, ont travaillé ou séjourné dans les zones d'exclusion ou à accès contrôlé, c'est-à-dire dans les zones où l'activité des sols a été supérieure à 15 Ci / km^2 et dans lesquelles la dose annuelle est supérieure à 15 mSv / an.

À ces populations a été systématiquement ajoutée celle des enfants de la Biélorussie, de l'Ukraine et de la Russie, quel qu'ait été le degré de contamination des zones dans lesquelles ces enfants ont vécu ou séjourné, soit au total un million d'enfants.

Ce sont finalement :

- les 251 000 personnes assez rapidement évacuées des zones d'exclusion en 1986,
- les 270 000 personnes évacuées dans les trois mois des zones d'accès contrôlé,
- 1 000 000 d'enfants censés avoir été contaminés par ingestion d'iode.

A partir de la relation linéaire sans seuil et les coefficients de risque relatif associés aux cancers et aux leucémies les *décès en excès* se répartiraient respectivement, pour les cancers et pour les leucémies, en :

- 280 et 20 décès en excès pour les 135 000 personnes des zones d'exclusion évacuées dès 1986 (pour 40 000 et 270 décès spontanés attendus)
- Plus de 1 500 et 100 décès en excès pour les 270 000 personnes évacuées plus tardivement des zones d'accès contrôlé (pour 43 500 et 1 000 décès spontanés attendus)
- Entre 200 et 800 décès par cancers de la thyroïde (pour 10 à 40 attendus) concernent le million d'enfants pris en considération (âgés de 0 à 14 ans en 1986), quel qu'ait pu être leur résidence au moment de l'accident. Ce dernier résultat semble très excessif compte tenu des

constats effectués 30 ans après l'accident (une dizaine de décès pour la plupart des enfants dont les parents n'avaient pas accepté que leur enfant soit traité ou opéré) et du taux de rémission très élevé de ce type de cancer chez les enfants.

On notera évidemment que les 3 700 000 personnes qui résident ou ont résidé dans les zones moins contaminées (contamination comprise entre 1 et 15 Ci /km^2) ne font pas partie des populations prises en compte par le forum pour évaluer le nombre des décès en excès.

Les spécialistes du Forum ont en effet estimé que la relation linéaire dose-effets sans seuil (RLSS) utilisée pour évaluer les excès de décès n'a plus de signification aux doses inférieures à 15 mSv / an.

Cet avis du Forum est évidemment contesté, mais pour le justifier le Forum se fonde sur plusieurs faits.

Le premier est que, de par le monde, de nombreuses populations vivent et ont toujours vécu dans des zones où la radioactivité est au moins aussi élevée, et parfois même plus, sans qu'un effet nocif quelconque ait pu être observé.

Le second argument est que la relation linéaire sans seuil - qui n'est pas une loi biologique établie mais une règle de calcul statistique que l'on s'est fixée de manière très conservatrice (voir annexe) – aboutirait dans le cas de cette population de 3,7 millions à une estimation du nombre de cancers en excès inférieure à l'incertitude que l'on peut avoir sur le nombre de cancers spontanés et statistiquement certains qui apparaîtront parmi cette population.

Si on se livre au calcul que le Forum s'est refusé de faire, pour ces 3,7 millions de personnes, l'estimation de l'excès des décès serait de 2500 alors que pour cette population statistiquement 433 000 cancers et 1300 leucémies mortels apparaîtront spontanément. L'excès calculé « imputable » à l'accident de Tchernobyl serait de 0,6% soit un pourcentage très largement inférieur à l'incertitude statistique sur l'évaluation des 433 000 cancers spontanés qui apparaîtront de manière certaine parmi ces 3,7 millions de personnes.

Malgré la contestation de son avis, le Forum maintient sa position en insistant sur le côté fortement négatif et totalement contre-productif d'un tel calcul et des prédictions qui en résultent. Selon le Forum, ces prédictions sont dénuées de toute signification, sont inutilement alarmistes et leurs effets sur les populations ne font que participer à l'entretien de leur morbidité.

Toujours selon le Forum, les vrais problèmes sont ailleurs que dans une polémique sans fin et sans issue autour de l'estimation des effets hypothétiques des faibles doses. Il est beaucoup plus important de se focaliser sur la morbidité et la pauvreté de cette population dont la vie a été totalement bouleversée plutôt que de la conforter dans son misérabilisme par des calculs sans signification réelle.

Les retombées de l'accident de Tchernobyl hors de l'ex-URSS

Entre l'explosion du réacteur le 26 avril et le 5 mai, date à laquelle l'incendie de l'empilement de graphite du réacteur a pu être maîtrisé, les différents produits de fission radioactifs gazeux (xénon, krypton) et les plus volatils (tellure, iode, césium, ruthénium…) ont été au fil des jours transportés par différents panaches sur de longues distances recouvrant l'ensemble de l'Europe. Les produits de fission moins volatils et ceux projetés hors du réacteur sont restés à proximité du site (strontium, baryum, neptunium, plutonium...).

Le passage du panache a deux effets : l'irradiation externe des personnes lors de son passage et la contamination des sols et des denrées alimentaires par des dépôts radioactifs (iode, césium) qu'il laisse sur les arbres, les feuilles et les plantes…

En un lieu, l'importance de cette contamination par le dépôt de radioéléments est fonction de l'intensité des précipitations ayant lessivé le panache lors de son passage au droit de ce lieu. La cartographie des contaminations des sols en Europe (figure 7) montre la corrélation entre la contamination d'un sol par le césium, en becquerel par mètre carré (Bq / m^2), et la hauteur des précipitations qui eurent lieu lors du passage du panache.

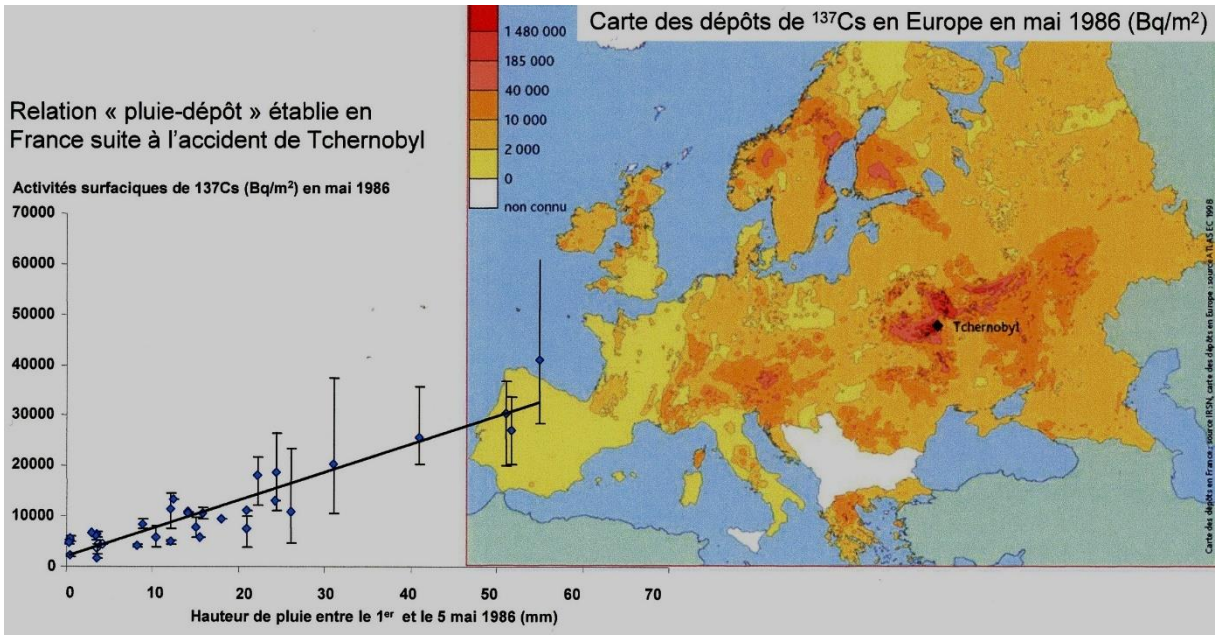


Figure 7. *Cartographie des contaminations des sols par le césium 137 en Europe et relation entre cette contamination et les précipitations ayant lessivé le panache radioactif pendant son passage*.

Plus de la moitié de l'activité relâchée par l'accident de Tchernobyl l'a été au tout début juste après l'explosion du réacteur, durant la journée du 26 avril. Les premiers rejets émis le 26 avril (panache rouge sur la figure 8) se sont tout d'abord dirigés vers le Nord-Est et ont atteint la Suède le 27 avril au matin. Bloqués par un anticyclone régnant sur l'Europe de l'Ouest, ils ont ensuite obliqué vers l'est, se sont dirigés vers la Finlande et les Pays Baltes avant de s'orienter plein sud les jours suivants, revenir sur l'Ukraine et finir par se dissiper sur l'Asie mineure

Le 27 avril au matin, à l'arrivée sur son sol du panache émis le 26, les autorités Suédoises donnent l'alerte à leurs homologues européens sans pouvoir fournir d'autres

précisions en l'absence de toute information émanant des autorités soviétiques : « *quelque part en URSS un accident nucléaire a eu lieu, on n'en connaît ni l'origine ni la nature* ». L'URSS restera muette et ne dévoilera la nature et le lieu de l'accident qu'au début mai… après la fin des célébrations du 1er mai à Moscou. En attendant, l'URSS qualifie cette alerte de rumeur infondée et de propagande occidentale malveillante.

Alerté par ses homologues suédois, le soir du 27 avril, en France, le professeur Pellerin, le directeur du Service Central de Protection contre les Rayonnement Ionisants (SCPRI), fait procéder à l'aéroport d'Orly à des frottis sur la carlingue des avions en provenance des pays du nord et de l'est de l'Europe. Le résultat de l'analyse de ces frottis est sans appel, il révèle la présence de nombreux produits de fission et confirme sans aucun doute possible qu'un accident nucléaire majeur vient d'avoir lieu dans une centrale… « *quelque part à l'Est* », toujours sans autre précision.

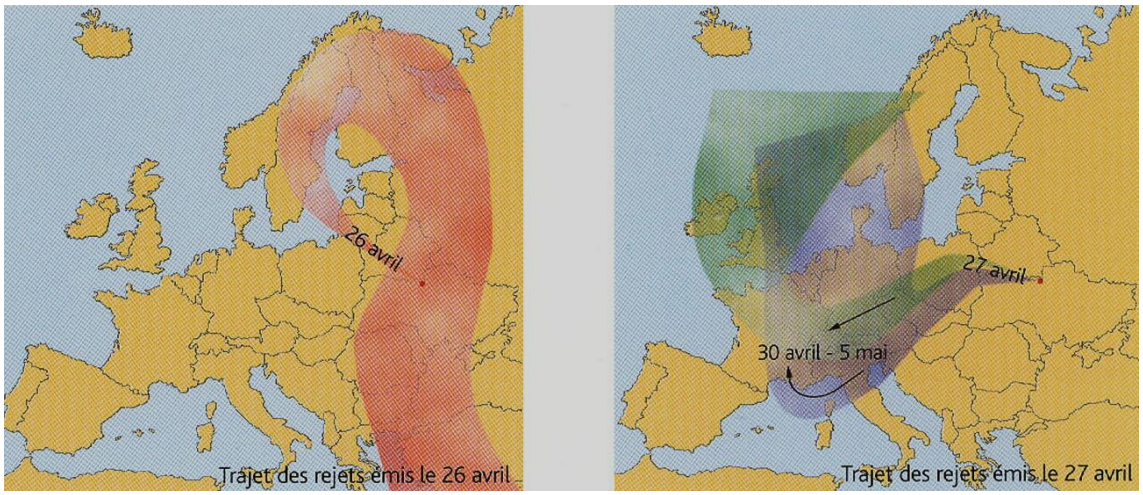


Figure 8. *Trajets en Europe occidentale des panaches émis par la centrale accidentée les 26 et 27 avril. Après le 27 avril les panaches s'orienteront vers l'est et le sud sans survoler l'Europe occidentale.*

Sur l'ensemble du territoire, en plus des stations de surveillance propres au SCPRI, et bien avant l'arrivée du panache sur la France le 29 avril au soir, toutes les installations nucléaires (les centres du CEA et de l'armée, les centrales d'EDF) qui toutes procèdent en permanence à des mesures de surveillance de la radioactivité, sont immédiatement placées en état d'alerte. Sont également mis en état d'alerte les services vétérinaires et les laboratoires de la répression des fraudes chargés du contrôle de la chaîne alimentaire, viande, laitages, légumes... (La répression des fraudes dépendant évidemment du Ministère… des finances, est-ce toujours le cas ?)

Toutes les mesures de la contamination atmosphérique et des produits agricoles (dont la présence d'iode dans le lait) sont transmises au SCPRI qui assurera de manière centralisée la surveillance de la radioactivité en France.

La synthèse de ces mesures est diffusée régulièrement deux fois par jour aux ministères concernés (intérieur, santé, agriculture…) ainsi qu'à toutes les agences de presse et directement aux médias écrits et audiovisuels… qui ne s'en feront guère l'écho : « *Trop technique !* »

Le 27 avril la situation météorologique au-dessus de Tchernobyl n'évolue pas. Les rejets continuent de se diriger vers le nord-ouest tandis que ceux du 26 continuent de s'étendre sur le Sud de la Scandinavie et le Nord de la Sibérie.

Le 28 avril la situation météorologique générale évolue. A partir de la fin de l'après-midi, l'anticyclone qui persistait sur l'Europe occidentale se décale et permet aux rejets effectués le 27 de s'orienter vers le Sud-Ouest. Ils envahissent la Pologne (figure 8 de droite).

A partir des 27-28 avril les rejets depuis la centrale s'orientent, selon les vents, soit vers l'Est soit vers le Sud. En conséquence, plus aucun rejet postérieur au 27 avril n'atteindra l'Europe de l'Ouest. A fortiori la France.

Le 29 avril la Pologne est entièrement recouverte par le panache émis le 27 avril. L'activité de ce panache est comprise entre 10 et 100 Bq /m3. A midi il atteint la Tchécoslovaquie, l'Autriche puis, en soirée, l'Europe Occidentale dans la partie centrale de l'arc Alpin.

- l*e 30 avril* le panache (qui correspond toujours aux rejets du 27 avril) arrive en début d'après-midi sur les Alpes suisses et l'Italie du Nord, franchit les Alpes et arrive en France par l'extrême Sud-Est (Monaco) à partir de 18h.

La première détection du panache est effectuée en début de soirée par le Laboratoire International de Radioactivité Marine de Monaco. Notons qu'aucune installation nucléaire n'étant localisée en Corse, le passage du panache sur l'île n'a pas pu être détecté faute de moyen de détection installé à demeure.

A 23h le panache a déjà recouvert le quart Sud-Est de la France. L'activité en Cs 137 du panache est faible < 0,1 Bq/m^3.

- *Le 1er mai* à 9h les trois quarts du pays dont la Corse sont recouverts, l'activité du césium reste faible, moins de 1 Bq/m3.

En soirée de nouvelles masses d'air plus contaminées (activité de 10 Bq/m3 de Césium), correspondant aux rejets du 27 avril matin, arrivent par la Suisse et l'Allemagne du Sud au niveau du Jura. Elles recouvrent le quart Nord-Est de la France, le Jura, les Vosges, la Lorraine, la Champagne, les Ardennes et le Nord.

- *le 3 mai* les Alpes, le Jura et la Corse sont de nouveau envahis par des masses d'air contaminées dont l'activité diminue rapidement, ces masses stagnent avant de s'évacuer définitivement vers l'Est à partir du 4 mai.

- *Le 5 mai* il ne subsiste plus aucun vestige (aérien) des panaches. Le Jura a été la dernière région à s'en être débarrassée.

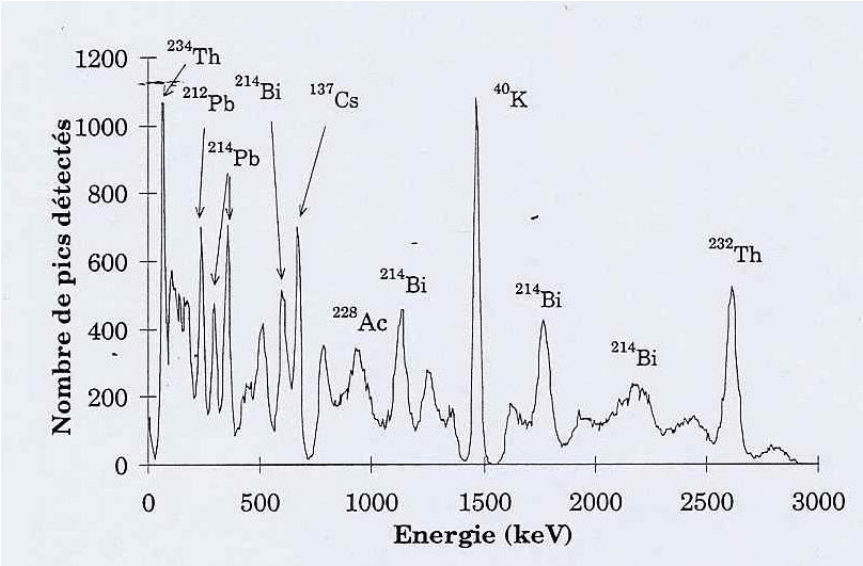
A titre de comparaison, l'activité mesurée dans les premiers kilomètres autour de la centrale de Tchernobyl au cours des jours suivant l'accident de Tchernobyl dépassait 100 000 Bq/m3. Elle était de l'ordre de 100 à 1000 Bq/m3 dans les pays les plus touchés par le panache radioactif (Ukraine, Biélorussie), variant de 1 à 10 Bq/m3 dans l'Est de la France lors du passage du panache entre 1er et le 3 mai 1986.

C'est dans les massifs montagneux du Jura, des Vosges, du Mercantour, de Corse et aux points les plus élevés de ces massifs que l'on trouve les dépôts de césium témoins de la contamination des sols les plus importants.

Les *contaminations réparties* (et non la contamination très concentrée souvent citée mais sans signification sur le plan sanitaire général) les plus importantes relevées par la CRIIRAD une dizaine d'années après l'accident étaient de 34 900 Bq/m^2 à Clairvaux les Lacs dans le Jura, de 31 760 Bq/m^2 à Ghisonaccia au Sud-Est de la Corse et de 30 000 Bq/m^2 sur les bords du Lac du Rotondo en Corse à 2 300 m d'altitude.

En conclusion, dix ans après l'accident, hors des points très particuliers évoqués ci-dessus, en France les activités des dépôts de césium au sol engendrent - par irradiation externe – des doses annuelles toutes inférieures à 1 mSv /an.

Aujourd'hui, une faible activité due au césium 137 subsiste dans l'air, de l'ordre du micro becquerel/m^3. Seule l'irradiation par les sols contaminés par le césium est restée perceptible. Dix ans après l'accident l'activité du césium est noyée dans l'activité naturelle des sols parmi, parmi celles du potassium 40, de l'uranium naturel et de ses descendants comme le montrent les deux figures 9 et 10 ci-dessous (mesures faites en 1996).



La figure 9. Ci-contre montre, en valeur relative, l'importance de l'activité des radioéléments naturellement présents en 1996, soit dix ans après l'accident de Tchernobyl, dans les sols autour de la centrale de Creys-Malville située en Isère, région affectée par le passage du nuage de Tchernobyl.

Les activités des radioéléments détectés sont représentées par des pics. Les pics correspondant à des radioéléments naturels présents dans le sol sont celui du potassium 40 (^{40}K) et ceux des descendants des familles de l'uranium et du thorium (bismuth, actinium, plomb…)

Noyé parmi ces pics, apparaît celui - non naturel en provenance soit des essais militaires soit de Tchernobyl - du césium 137. En 1996, le pic du césium 134 associé au césium 137, qui permettrait de dater le dépôt ayant déjà disparu, il n'est plus possible d'en déterminer de manière certaine l'origine. Si on admet de manière conservatrice que tout le césium provient de Tchernobyl, au moment de son dépôt en 1986, son activité aurait été au maximum équivalent à celle naturelle du potassium 40.

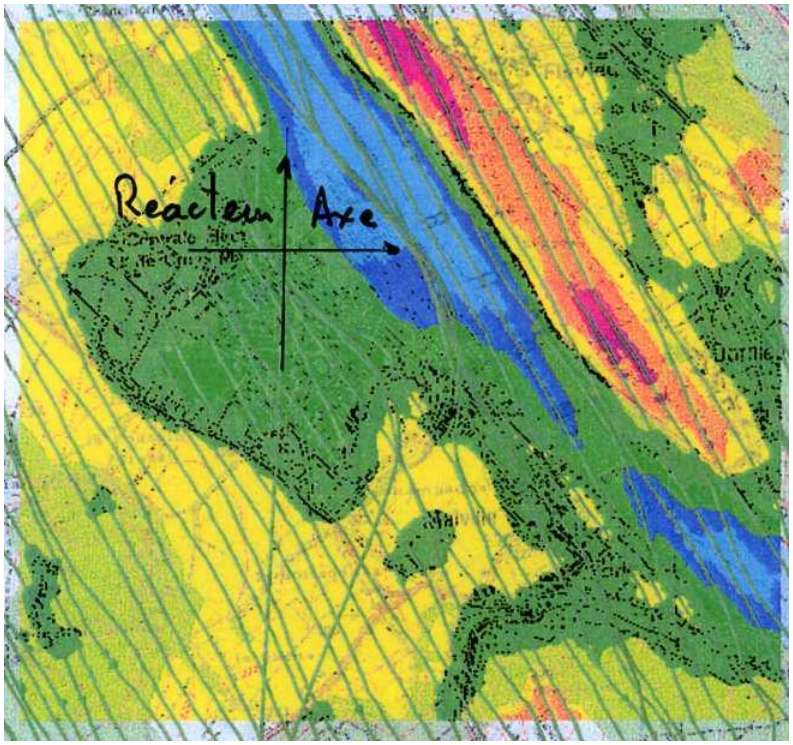


Figure 10. Répartition de la radioactivité naturelle dans les sols autour de la centrale de Creys Maville (1996).

Nota relatif à la figure 10. La répartition de la radioactivité autour de la centrale a été obtenue en balayant par hélicoptère une zone de deux kilomètres de côté centrée sur la centrale dont on a représenté l'axe du réacteur. La cartographie en fausses couleurs montre, par ordre croissant, l'activité en bleu de l'eau du Rhône, une radioactivité moindre que celle des sols, puis la radioactivité des sols, les sols les moins radioactifs sont en vert (dont ceux de la centrale et des bois environnants), puis, de plus en plus radioactifs, les sols récemment labourés en jaune (dégazage du radon) et, en rouge et violet, de l'autre côté du Rhône… un champ de maïs non encore moissonné dont la radioactivité relativement élevée par rapport aux autres zones s'explique par la présence d'engrais phosphatés dont la radioactivité (bien connue) peut se compter en milliers de becquerels par kilogramme selon leur provenance !

Par contre la contamination a été plus importante en Allemagne, en Autriche, en Suisse et dans les Alpes italiennes où le panache a stagné plus longtemps qu'en France et alors qu'il était moins dispersé et dilué que lorsqu'il est finalement arrivé dans nos contrées.

La CRIIRAD a relevé par exemple une contamination de 78 000 Bq/m^2 dans les environs de Salzburg en Autriche.

A propos du « mensonge » de « L'arrêt du nuage de Tchernobyl aux frontières »

Avant d'aborder les conséquences de l'accident de Tchernobyl en France, qu'en est-il de cette fameuse phrase qui aurait été prononcée (par qui, où et quand ?) et qui est devenue depuis maintenant plus de 30 ans l'adage couramment utilisé par les médias « *c'est comme le nuage de Tchernobyl*… » pour alerter de manière imagée leurs lecteurs ou auditeurs sur le fait qu'une information est grossièrement fausse, complètement « bidonnée » (version française autrement parlante de fake news !).

Depuis plus de 30 ans cette phrase mythique serait selon les médias la preuve du « *mensonge des autorités* » sur l'accident de Tchernobyl, en réalité le « mensonge » du directeur du SCPRI (le Service Central de Protection contre les Rayonnement Ionisants), le professeur Pellerin, qui selon les médias et la CRIIRAD aurait dissimulé le passage du nuage de Tchernobyl en soutenant qu'il s'était arrêté aux frontières, que la France avait de ce fait été épargnée.

La réalité des faits est notoirement différente et le mensonge n'est pas là où très généralement on le situe.

Comme indiqué précédemment, l'anticyclone a dans un premier temps empêché les rejets des 26 et 27 avril de parvenir jusqu'à la partie la plus occidentale de l'Europe. Il a également été indiqué qu'à partir du 28 avril, l'anticyclone se décalant, le panache de Tchernobyl a atteint la France par le sud le 30 avril au soir et s'est étendu sur l'ensemble du territoire entre le 1er et le 4 mai.

Le soir du 1er mai (jour férié) à 24h, le directeur du SCPRI, le professeur Pellerin, fait parvenir aux ministères – totalement désertés depuis la veille, le mercredi 30 avril jour de l'arrivée du panache de Tchernobyl, pour cause de grand pont du 1er mai - et aux agences de presse un communiqué qui sera repris le lendemain matin 2 mai par l'ensemble des médias, dont Libération qui en page 4 rend compte de ce communiqué : « *Le professeur Pellerin directeur du SCPRI a annoncé hier* [donc le 1er mai] *que l'augmentation de la radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire français* ». Soit l'exact opposé du propos mensonger qui est attribué au professeur Pellerin depuis plus de 30 ans, malgré une multitude

de démentis dont certains, courageux… autant qu'inutiles, émanent des ministres mêmes devant l'Assemblée nationale (Roger Faurroux…).

En réalité, ni le professeur Pellerin ni aucune autorité n'a prononcé une telle contre vérité. En fouillant dans les archives audio-visuelles, nul n'est capable aujourd'hui de montrer qu'elle a été prononcée ni de savoir dans quelles conditions la rumeur est née et a prospéré.

Mentionnons pour conclure sur cette lamentable affaire, qu'en 2002, soit seize ans après l'accident, quand l'idée du « mensonge » a été définitivement gravée dans tous les esprits, en préambule à son Atlas sur les « Contaminations radioactives en France et en Europe », en page 9, la CRIIRAD - créée en 1986 précisément en réaction contre cette prétendue désinformation officielle - apporte quelques précisions bien nécessaires, reportées en italiques ci-après :

« *Imaginons que lors de sa conférence de presse le directeur du SCPRI* [le professeur Pellerin] *annonce solennellement « le nuage de Tchernobyl s'est arrêté aux frontières », qui peut croire que de tels propos n'aient pas déclenché les rires et les huées. C'est grotesque.*

L'image du douanier intimant au nuage de Tchernobyl de stopper à la frontière appartient à l'univers des humoristes ».

Il est très intéressant d'apprendre par la CRIIRAD elle-même que « *l'arrêt du nuage de Tchernobyl aux frontières* » n'est pas un mensonge du professeur Pellerin mais seulement un trait d'humour. Mais qui aujourd'hui se soucie d'apprendre que ce n'est qu'un trait d'humour !

« *Le trait est évidemment un peu forcé* [pour sûr !] *mais n'est-ce pas le propre d'une caricature réussie de rendre compte, avec pertinence* [?...]*, d'une réalité nécessairement plus complexe.* ».

Continuons la lecture et arrivons à la conclusion qui traduit ce qui manifestement importe le plus pour la CRIIRAD : « *Seules persistent dans la mémoire collective l'idée du mensonge et l'image de la frontière* ».

C'est bien là que réside l'important pour la CRIIRAD : que l'ensemble des acteurs qui ont eu à gérer la situation lors du passage du nuage soient, à travers leur prétendu « *mensonge* », totalement et durablement discrédités aux yeux du public.

Une seconde précision doit être apportée sur les autres « mensonges » dont les autorités se seraient également rendues coupables. Elle concerne l'ensemble des mesures portant sur la contamination de la chaîne alimentaire et sur les estimations de doses réalisées sous l'égide du SCPRI pendant le passage du panache en mai 1986 et durant les mois qui ont suivi. L'ensemble de ces mesures a été violemment contesté, au point qu'en avril 2006 lors de la « commémoration » du 20ème anniversaire de l'accident et suite à la mise en examen du professeur Pellerin pour « *tromperie aggravée* », le Monde, reprenant cette contestation, titrait en sa Une que les mesures officielles avaient été « *sous évaluées d'un facteur 1 000* » ! L'énormité de la tromperie dévoilée par Le Monde a laissé le lecteur sans voix !

Il n'en est évidemment rien. Dans son rapport du 30 mars 2006 le Conseil scientifique de l'IRSN clôt définitivement l'interminable polémique sur la probité et l'exactitude des mesures réalisées en 1986 : « *Les estimations de doses faites à partir des mesures* [de contamination] *sur les aliments au moment du dépôt et à partir de leur taux de consommation sont bien entendu les plus fiables* ». Notons que ces mesures ont toujours été accessibles au public à travers les rapports mensuels, consultables, du SCPRI.

En 2011, devant le vide du dossier d'accusation de tromperie aggravée portée à l'encontre du directeur du SCPRI, la justice a prononcé un non-lieu dans cette affaire.

Les doses reçues par la population en France.

Pour revenir à l'essentiel du sujet concernant les conséquences en France de l'accident de Tchernobyl, la conclusion générale de l'IPSN émise vingt ans après l'accident est que l'évaluation des doses reçues constitue le seul paramètre significatif des risques sanitaires encourus par la population et que « *une personne habitant dans la partie la plus contaminée, c'est à dire dans l'Est de la France, a reçu une dose comprise entre 0,1 et 0,4 millisievert en un an entre mai 1986 et mai 1987 et une dose totale de 0,3 à 1,2 millisievert sur dix ans entre 1987 et 1996.* Ce qui signifie qu'en général, et au maximum, la population française a été soumise à une exposition bien inférieure celle à laquelle elle est exposée du fait de la radioactivité naturelle au niveau de la mer (2,4 millisievert par an).

L'IPSN s'est cependant penché sur des situations particulières, sur des cas extrêmes, dont celui hypothétique d'une personne isolée vivant en totale autarcie dans une des zones les plus contaminées (forêts et montagnes) et ne consommant que ce qu'elle produit localement : « *Si on considère le cas extrême d'un garde forestier ne mangeant que des champignons et du gibier, l'IPSN a calculé une dose au maximum de 1,5 milli Sievert en 1986 et 1 milli Sievert entre 1986 et 1997 »*.

Toutes ces doses sont à comparer à la limite de dose annuelle de 5 milli sievert qui était fixée en 1986 par la Commission Internationale de Protection contre les rayonnements ionisants pour la population en général.

Les doses dues au césium

Immédiatement après l'accident, et pendant les trois ans qui ont suivi l'accident, des examens ont été pratiqués systématiquement sur les 60 000 personnes travaillant sur les sites nucléaires d'EDF de la Cogema ou du CEA (examens anthropogammamétriques du corps entier et de la thyroïde, analyse de sang et d'urine…).

La plupart de ces sites nucléaires étant situés dans la partie est du pays, soit la partie du territoire la plus contaminée par le passage du panache de Tchernobyl, ces examens sont représentatifs de la population française la plus exposée.

Parmi ces sites, à la fin de l'été 1986, l'examen du personnel du CEA Grenoble a montré une contamination maximale de 550 Bq par le césium 137. Cette activité est à comparer à l'activité naturelle du potassium 40 dans le corps humain (une centaine de becquerels par kilo de tissu soit 5 à 7 000 Bq pour le corps entier) et à l'activité au moins équivalente des autres radionucléides naturels, le carbone 14 et les descendants de l'uranium. Cette contamination par le césium, quoique non nulle, n'est pas significative.

Par ailleurs, ces examens n'ont mis en évidence aucune contamination thyroïdienne par l'iode, ni pendant ni après le passage du panache, toutes les mesures effectuées restant inférieures au bruit de fond des appareils de mesure.

Il est à noter que ces examens ont montré que, globalement, l'activité des radio éléments mesurée sur les personnes était 5 à 10 fois plus faible que celle obtenue par calcul à l'aide de modèles théoriques de transfert alors utilisés pour évaluer les conséquences radiologiques des contaminations.

Aujourd'hui l'irradiation due au rayonnement gamma émis par le césium est uniquement une irradiation externe noyée au milieu des autres rayonnement naturels comme indiqué précédemment (figure 9 et commentaires).

Les doses dues à l'iode en France.

Pendant le passage du panache, et durant les mois qui ont suivi, l'urgence n'était pas de battre la campagne en tous sens, kilomètre carré par kilomètre carré, pour établir une

cartographie de la contamination des sols. La priorité était de mobiliser l'ensemble des moyens de contrôle et de mesure pour prélever le maximum d'échantillons représentatifs de la chaîne alimentaire et mesurer leur contamination.

C'est à partir de ces mesures que furent calculées les doses auxquelles la population était soumise et que fut décidé s'il était ou non nécessaire de prendre des mesures de restriction alimentaire en se basant sur les normes et recommandations de la CIPR en vigueur en 1986.

Compte tenu de la composition du panache (composition connue avant son arrivée en France grâce aux mesures réalisées par les pays situés plus à l'est) on savait que l'élément prépondérant à surveiller, en réalité le seul, était l'iode source d'irradiation par contamination interne de la thyroïde via l'ingestion de produits laitiers, de viande et de légumes à feuille. Outre les prélèvements directs et quotidiens de lait dans les fermes, le moyen le plus efficace de contrôler la contamination de la chaîne alimentaire par l'iode a consisté à faire prélever par les services vétérinaires dans les abattoirs les thyroïdes de bovins, d'ovins ou de caprins et de mesurer l'activité de l'iode qui s'y était concentré.

Les contaminations observées, tant dans le lait que dans les thyroïdes prélevées, n'ont pas atteint les seuils à partir desquels des mesures de restriction devaient être prises.

Les cancers de la thyroïde chez les enfants en France

Comme dans les territoires de l'ex-URSS touchés par les retombées de l'accident, si un dommage aux populations doit apparaître c'est d'abord chez les enfants qu'il apparaîtra et sous la forme de troubles thyroïdiens et, à plus long terme, de cancers de la thyroïde.

Peut-on extrapoler le cas des enfants de l'ex-URSS à celui des enfants français ?

La réponse est non car il existe une différence fondamentale entre les deux cas.

L'iode émis au moment de l'accident est un mélange de plusieurs isotopes d'iode, tous radioactifs : l'iode 123 (utilisée en scintigraphie) de période 13 heures, l'iode 132 de période 2,3 heures, l'iode 133 de période 20 heures et l'iode 131de période 8 jours.

Lorsque le panache arrive sur la France c'est essentiellement l'iode 131 de période 8 jours qui subsiste, les autres isotopes ont, soit en grande partie soit totalement, disparu.

Il n'en a pas été de même aux environs de la centrale, dans les zones d'exclusion ou à accès surveillés avant qu'ils soient évacués plusieurs semaines après l'accident. Ces enfants habitant dans ces zones ont été contaminés par un panache alors que les isotopes de l'iode de courte période, les plus actifs, étaient encore présents.

En URSS l'accident a donc eu un effet sur la thyroïde des enfants beaucoup plus important que celui qu'il a pu avoir sur les enfants en France.

A partir des mesures réalisées en temps réel pendant le passage du panache et du contrôle de la chaîne alimentaire, une évaluation de la dose maximale à la thyroïde chez l'enfant a pu être calculée pour les enfants de moins de 15 ans résidant dans l'Est de la France en 1986, soit au total pour 2,27 millions d'enfants.

La dose maximale calculée est de 9,8 mSv pour un enfant âgé de un an, c'est une dose 100 fois moindre que celles estimées pour les enfants de Biélorussie. Pour ce niveau de dose, de l'ordre de 10 mSv à la thyroïde, on ne dispose pas d'observations épidémiologiques montrant un excès de cancer.

Une évaluation maximaliste a été effectuée pour des cas très particuliers, extrêmes. Suite à des mesures réalisées en juillet 1986 sur la thyroïde d'un enfant vivant en Corse dans la région la plus contaminée, la Balagne, et se nourrissant exclusivement de produits provenant de lait de chèvre (la chèvre coupant l'herbe plus ras et mangeant les feuilles des

arbres fournit un lait plus contaminé que celui d'une vache), pour cet enfant, la dose à la thyroïde a été estimée à 18,5 ± 8,5 mSv, soit le double de la dose maximale précédente.

A partir de ces doses, le nombre de cancers de la thyroïde en excès par rapport au nombre de cancers spontanés chez l'enfant a été calculé par extrapolation à partir des connaissances sur les effets aux doses beaucoup plus fortes et selon l'hypothèse majorante de la relation linéaire dose-effet sans seuil.

Ces calculs ont été réalisés en 2001 conjointement par l'IPSN et l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) en utilisant 6 modèles différents de risque avec, entre autres objectifs, de déterminer l'influence de ces divers modèles sur le résultat des calculs d'excès de risque.

Dans un premier temps, pour le groupe des 2,27 millions d'enfants, on a calculé le nombre de cancers de la thyroïde apparaissant *spontanément* dans une population d'enfants non soumis à une irradiation de la thyroïde à partir des données des registres des cancers disponibles sur la période 1982-1992. Cette période a été choisie car aucun des cancers apparus antérieurement à 1992 ne peut être imputé à Tchernobyl compte tenu du temps de latence de 5 ans précédant l'apparition de ce type de cancer. Ces données ont permis de quantifier un *risque d'apparition spontanée* (en cent millième) pour ce type de cancer chez l'enfant.

Dans une seconde étape, et pour tenir également compte de cette période de latence, le *calcul du nombre de cancers de la thyroïde en excès* chez l'enfant a été réalisé à partir de 1991 sur une période de 10 ans (1991-2000) sur les 2,27 millions d'enfants âgés de moins de 15 ans en 1986.

Pour le modèle le plus pessimiste quant à l'impact de l'accident de Tchernobyl, le calcul donne 97 cancers de la thyroïde *spontanés* (soit 4 cas pour 100 000 enfants) avec une incertitude de plus ou moins 20 et, pour le nombre de *cancers en excès dus à l'accident*, un nombre compris entre 0,5 et 22. Soit un nombre au maximum de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur le nombre de cancers apparaissant spontanément.

En conclusion, le résultat du calcul majorant le plus pessimiste (22 cas en excès pour 2,27 millions d'enfants) montre que la fréquence des cancers dus aux retombées de Tchernobyl est et restera trop faible pour être mis en évidence par une étude épidémiologique.

Si on se réfère au registre des cancers de la région Champagne Ardennes le plus ancien et surtout le mieux renseigné de tous les registres français (établi à l'origine par le Dr Delisle de Reims), ce registre montre que le nombre des cancers de la thyroïde chez les enfants de cette région, pourtant assez contaminée, n'a pas varié entre 1986 et 1998, oscillant systématiquement entre 0 et 1 cas par an.

En Franche Comté (la Franche Comté et la Corse ayant été les régions habitées les plus contaminées par le panache), une étude épidémiologique a été conduite par le Pr Viel avec le concours des médecins libéraux de la région et des universitaires. Pour les enfants âgés de 0 à 14 ans entre 1980 et 1998, cette étude a permis d'établir de manière quasi exhaustive un recueil des pathologies thyroïdiennes de la région avec le taux record de 96% de réponse de la part des praticiens interrogés. Cette étude épidémiologique a conduit à la même conclusion que celle de la région Champagne Ardennes.

La constatation d'un effet non observable pour les enfants est a fortiori valable pour les adultes dont la thyroïde est beaucoup moins sensible à l'irradiation que celle des enfants.

Les cancers de la thyroïde chez les adultes. Y a-t-il eu un effet Tchernobyl ?

En 2005, 50 spécialistes (endocrinologues, radiothérapeutes…) regroupés au sein d'un Groupe de Recherche en Radiotoxicologie ont signé un message adressé aux malades de la

thyroïde persuadés de l'existence d'un lien entre leur maladie et l'accident de Tchernobyl. Ce message a été publié dans l'édition du 19 novembre 2005 du journal Libération.

Ces spécialistes affirment qu'un lien entre l'accident de Tchernobyl et les cancers thyroïdiens apparaît comme indémontrable et plus certainement comme inexistant. Ce qui les amène à exprimer leur intime conviction relative à ce type de cancer « Il n'y a pas d'effet Tchernobyl en France ».

Mais alors comment expliquer l'augmentation – non contestable - du nombre de *cancers détectés* de la thyroïde parmi la population ? Cette augmentation est-elle ou non imputable à l'accident de Tchernobyl ?

Le premier élément de réponse est d'ordre statistique. Le cancer de la thyroïde étant rare, compte tenu du faible nombre de cas observés on constate une grande variabilité de l'incidence entre les départements français. Ce que l'on constate surtout ce sont des incohérences qui ôtent toute validité à des conclusions trop hâtives. Par exemple on trouve les taux de cancers les plus élevés dans le Tarn (où la contamination moyenne est de 234 Bq/m^2) et le Calvados, c'est-à-dire dans les départements les moins contaminés, et les taux de cancers les plus bas dans les départements les plus contaminés comme la Somme ou le Doubs (dont la contamination moyenne des sols est, selon les mesures de la CRIIRAD, de 8 000 à 10 000 Bq/m^2 avec un maximum de 15 400 Bq/m^2 à Leschère dans le massif du Jura.

Second constat. Dans nos pays européens, en vingt ans entre 1975 et 1995, l'incidence des cancers de la thyroïde est passée de 0,6 à 3,1 pour 100 000 habitants chez les hommes et de 2,1 à 5,7 pour 100 000 habitants chez les femmes. Une évolution similaire est constatée aux USA ou au Canada, contrées qui ont été très peu, ou non, affectées par les retombées de Tchernobyl. Dans l'ensemble du monde occidental l'augmentation des cancers thyroïdiens est observée de manière continue depuis le début des années 1970, soit avant l'accident de Tchernobyl, et se poursuit régulièrement depuis lors.

Le point important à noter au sujet de cette augmentation est qu'elle est *très régulière et ne marque aucune rupture ou variation brutale suite à l'accident de Tchernobyl* en 1986, comme cela aurait dû être le cas au début des années 1990 si l'augmentation du nombre de cancers *détectés* (insistons sur ce qualificatif détecté) était imputable aux retombées de Tchernobyl.

La cause principale de l'augmentation du *nombre de cancers détectés* doit donc être recherchée ailleurs. Mais où ?

C'est dans la signification du qualificatif « *détectés* » que réside la réponse à cette réelle interrogation. Il convient en effet de faire la distinction entre les cancers qui - *à un moment donné et avec les moyens de détection disponibles à ce moment* - sont *observables, observés et comptabilisés*, ce sont les cancers *détectés* et les autres cancers qui, au même moment, *existent mais ne sont pas observables* par les moyens disponibles à ce moment. Ils ne sont ni détectés ni comptabilisés.

Supposons qu'à ce même moment on puisse subitement, et par miracle, se projeter dans le futur et disposer des moyens dont on disposera dans ce futur, dans 10 ou 20 ans… On serait alors instantanément en mesure de détecter ce qui ne l'était pas et placé devant un brusque accroissement du nombre de cas *détectés*, devant une « épidémie » de cancers, qui n'aurait d'autre cause que la mise à disposition de nouveaux moyens de détection plus performants, plus sensibles.

Le Groupe de Recherche sur la Thyroïde de la Société Française d'Endocrinologie qui rassemble des médecins et chercheurs français spécialistes de la thyroïde s'est précisément intéressé aux causes de l'augmentation constatée depuis plusieurs décennies. Leur réponse est double : les causes de l'augmentation des cas *détectés* tiennent, d'une part, aux progrès réalisés dans le *dépistage* et, d'autre part, aux examens de la thyroïde *plus fréquents et plus systématiques* prescrits par les médecins suite aux demandes de leurs patients, demandes ayant précisément pour origine… les débats polémiques existant sur les conséquences de l'accident de Tchernobyl.

Quelques mots enfin sur les progrès réalisés en matière de détection. Autrefois le dépistage se faisait par palpation et n'étaient perçus que les cancers atteignant le centimètre de diamètre. Les progrès récents, l'échographie Doppler et les techniques d'imagerie, permettent aujourd'hui de détecter précocement des nodules de l'ordre du millimètre.

C'est ainsi qu'une détection plus fine et précise des cancers thyroïdiens aux USA a fait passer le taux de ces cancers de 3,6 en 1973 à 8,7 pour 100 000 habitants en 2002.

Une autre conséquence des progrès de la détection a été la mise en évidence d'une nouvelle pathologie cancéreuse de type nodulaire qui concerne environ 40% des adultes chez qui, au-delà de 40 ans (et 50% au-delà de 60 ans), on détecte des nodules thyroïdiens suspects dont la plupart ne se développeront jamais. Les progrès de la détection permettent également de mettre en évidence une multitude de petits cancers thyroïdiens restés *occultes* qui n'ont, eux non plus, aucune tendance à se développer. Selon les modes de vie, ces cancers occultes concernent entre 6 et 28% d'une population.

Nombre de cancers ou précurseurs de cancer ont aujourd'hui changé de statut passant de non observables à celui de *détectables* grâce aux progrès de l'imagerie et à la généralisation des examens entraînant une augmentation spectaculaire des cas détectés.

Si l'on ne prend pas en compte ces faits, il est possible faire dire aux statistiques ce que l'on souhaite qu'elles disent en fonction des besoins d'une démonstration avec un résultat certain, celui d'inquiéter inutilement les populations.

Les conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima

Le contexte de l'accident de Fukushima est très différent de celui de Tchernobyl.

Globalement les rejets radioactifs furent moins importants, environ dix fois moindres que ceux de Tchernobyl : 5 à 10 millions de curies au lieu de 50 à 150 millions.

Mais là ne réside pas l'essentiel de la différence entre les deux accidents.

Tout d'abord les rejets radioactifs de l'accident de Fukushima n'ont pas été émis en continu pendant plus de deux semaines comme le furent ceux de Tchernobyl. Les rejets de Fukushima ont été émis par bouffées de courte durée et sur une période beaucoup plus courte, entre le 12 et le 16 mars 2011 (figure 11).

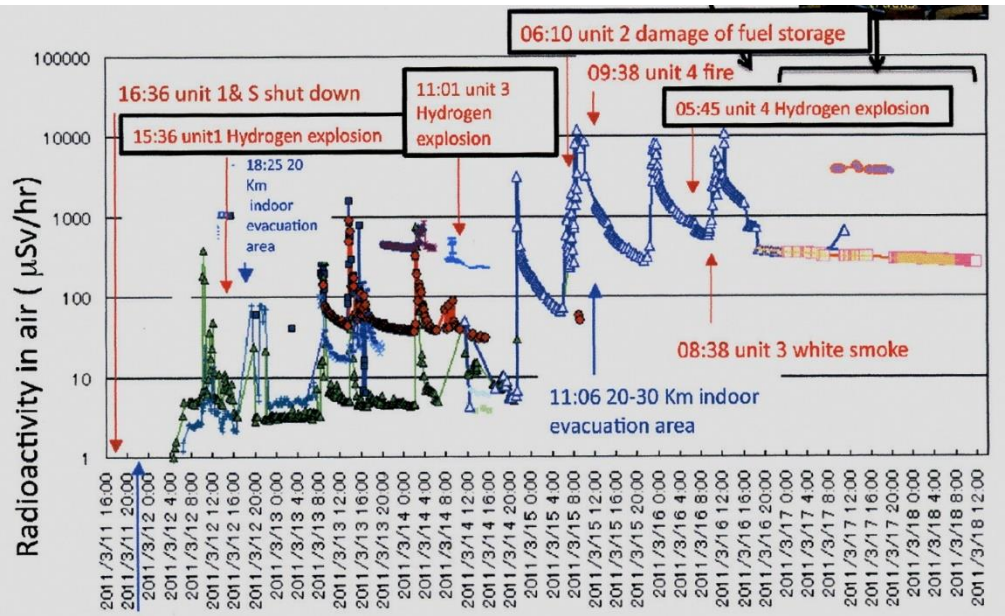


Figure11. *Mesure de la radioactivité atmosphérique sur le site de la centrale (échelle logarithmique).*

A chaque pic de radioactivité correspond une bouffée émise lors d'un événement : une opération d'éventage d'une enceinte de confinement, l'explosion d'un bâtiment réacteur, n°1 ou 3, la défaillance de l'enceinte de confinement du réacteur n°2 ou les explosions et incendies du bâtiment du réacteur 4.

Seconde différence essentielle, dès les premiers éventages du réacteur n°1, les rejets ont été effectués de manière concertée avec les autorités, ce qui a permis d'évacuer ou de mettre à l'abri de manière préventive les populations concernées par ces rejets. Il en fut de même des rejets émis lors des violentes explosions d'hydrogène ayant détruit les bâtiments, l'exploitant ayant su et pu les anticiper.

Les rejets atmosphériques étaient composés de gaz inertes (xénon, krypton…) qui sont irradiants uniquement durant leur passage et d'éléments émis sous forme d'aérosols (tellures, iodes, césiums…). Par rapport aux rejets de Tchernobyl, une nouvelle différence importante apparaît : avant de rejeter ces aérosols dans l'environnement, la vapeur radioactive provenant de la dépressurisation des réacteurs transitait et « barbotait » dans l'importante réserve d'eau contenue dans la chambre humide des enceintes de confinement. Ce barbotage a eu pour effet de retenir une partie importante des aérosols, ce qui a limité la quantité de radioactivité rejetée.

Finalement, grâce aux équipes sur le terrain, à la connaissance qu'elles avaient des installations, à leur inventivité et à leur incroyable courage, le pire a pu être évité. Pour l'essentiel, la radioactivité est restée sur le site, plus ou moins bien confinée, mais il y est resté.

Hormis le cas des équipes d'intervention, l'exposition des populations a ainsi pu être limitée. Elle fut en moyenne de 1,4 mSv pour les populations situées au nord-ouest de la centrale, dans la zone où le panache fut le plus important.

En général les doses reçues par la population sont restées inférieure au millisievert (voir figure 12).

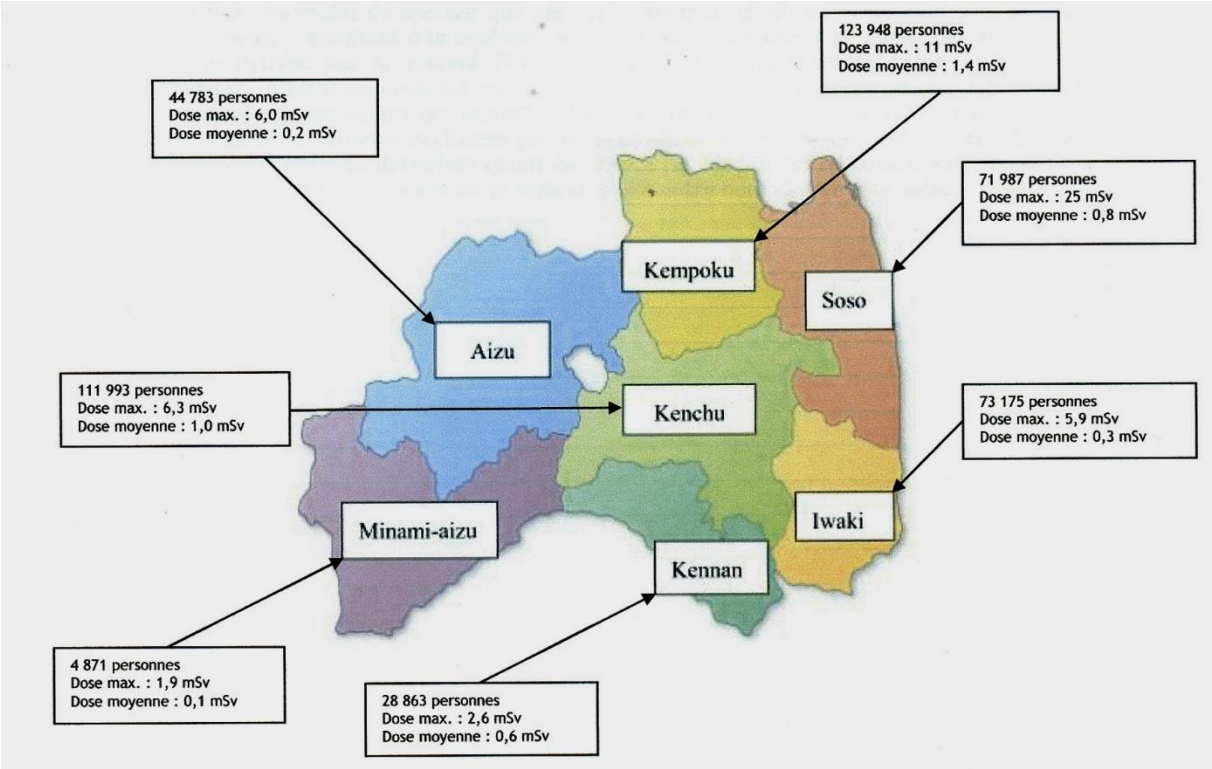


Figure 12. *Doses moyennes et maximales reçues par la population dans les districts voisins de la centrale. Les maximas étant atteints au nord-ouest du site dans la région sous les vents soufflant au moment des explosions.*

Les conséquences pour les intervenants sur le site

Cinq ans après l'accident survenu en 2011, un bilan dosimétrique a été établi pour les 4 687 salariés de la compagnie TEPCO (propriétaire de la centrale) et les 41 803 salariés des sociétés contractantes qui sont intervenus sur le site depuis l'accident. Ce bilan est établi à partir de la mesure des *doses individuelles* reçues par chaque intervenant. A Fukushima il s'agit donc d'une comptabilité individuelle rigoureuse et non d'une estimation partielle et reconstituée a posteriori comme ce fut le cas pour Tchernobyl.

Au moment de l'accident, la limite d'exposition des travailleurs du nucléaire était fixée par la CIPR à 50 mSv/an sans pouvoir dépasser 100 mSv sur une période de 5 ans, soit, dans la pratique, une limite moyenne de 20 mSv/ an.

Par nécessité, cette limite a dû être portée à 100 mSv au début de l'accident puis, lors de la phase la plus critique (paroxysme des 14 et 15 mars) à 250 mSv.

Cette limite de 250 mSv a été maintenue jusqu'en avril 2012, pendant la première année ayant suivi l'accident, pour les personnels intervenant sur le terrain assurant le refroidissement

des réacteurs, le confinement de la radioactivité et devant, en cas de nécessité, porter secours aux personnes disséminées sur les installations.

La dose maximale enregistrée a été de 679 mSv pour un intervenant de la TEPCO. Six autres intervenants de la TEPCO ont reçu des doses supérieures à la limite de 250 mSv et 174 une dose supérieure à 100 mSv.

Les autres intervenants au nombre de 40 300 ont reçu des doses inférieures à 100 mSv, dont, pour 8 000 d'entre eux, des doses comprises entre 20 et 100 mSv.

Les effets observés sur les intervenants.

Cinq ans après l'accident, en mars 2016, une dizaine de décès étaient enregistrés parmi les personnes étant intervenues sur le site. Cependant aucun de ces décès n'est attribuable aux rayonnements ionisants : 2 personnes sont portées disparues lors de l'arrivée du tsunami, 3 sont décédées par arrêt cardiaque, 2 par chute ou ensevelissement, 1 suite à une leucémie aiguë sans que cette personne ait été exposée au rayonnement ionisant, 2 sont décédées sans cause précise.

Huit demandes d'indemnisation évoquant des pathologies attribuables à une exposition aux rayonnements ionisants ont été déposées. Trois ont été rejetées, une a été abandonnée par le demandeur lui-même, les autres sont en cours d'instruction.

Aucun signe d'irradiation aiguë n'a été observé.

Les effets potentiels à long terme.

Les conséquences sur le long terme de l'exposition des intervenants ont été estimées par l'OMS :

- ceux qui ont vécu les conditions extrêmes des deux premières semaines de l'accident, l'arrivée du tsunami, la confrontation à une situation désespérée, l'isolement, les explosions, les incendies, le côtoiement permanent avec le risque mortel des explosions d'hydrogène, le niveau très élevé de la radioactivité… ont été victimes de troubles engendrés par un stress post-traumatique très important. Le risque de maladie psychosomatique chez ces personnes est élevé,
- pour les travailleurs ayant reçu une dose supérieure à 500 mSv, il existe un risque accru de maladies cardiovasculaires à long terme,
- pour le moins de 1% de ceux ayant reçu les doses les plus élevées, le risque d'augmentation de la probabilité de leucémie est de 28% pour les plus jeunes (attention, 28% n'est pas la probabilité d'occurrence d'une leucémie mais seulement l'augmentation par rapport à la probabilité d'apparition spontanée d'une leucémie),
- pour les 2 000 personnes ayant reçu une dose à la thyroïde supérieure à 100 mGy (la moyenne pour cette population étant de 400 mGy), l'augmentation de la probabilité de cancers thyroïdiens radio-induits pour les plus jeunes est de 20% (même remarque que précédemment),
- pour les deux tiers des travailleurs ayant reçu des doses faibles, inférieures à 100 mSv, les probabilités d'apparition de cancer sont identiques à celles d'une population non soumise à un rayonnement ionisant. Il n'est donc pas attendu de cancers en excès par rapport à une population non soumise à une irradiation.

Les conséquences pour les populations

Trois zones différentes ont été instituées au moment de l'accident et dans les mois qui ont suivi (figure 13) :

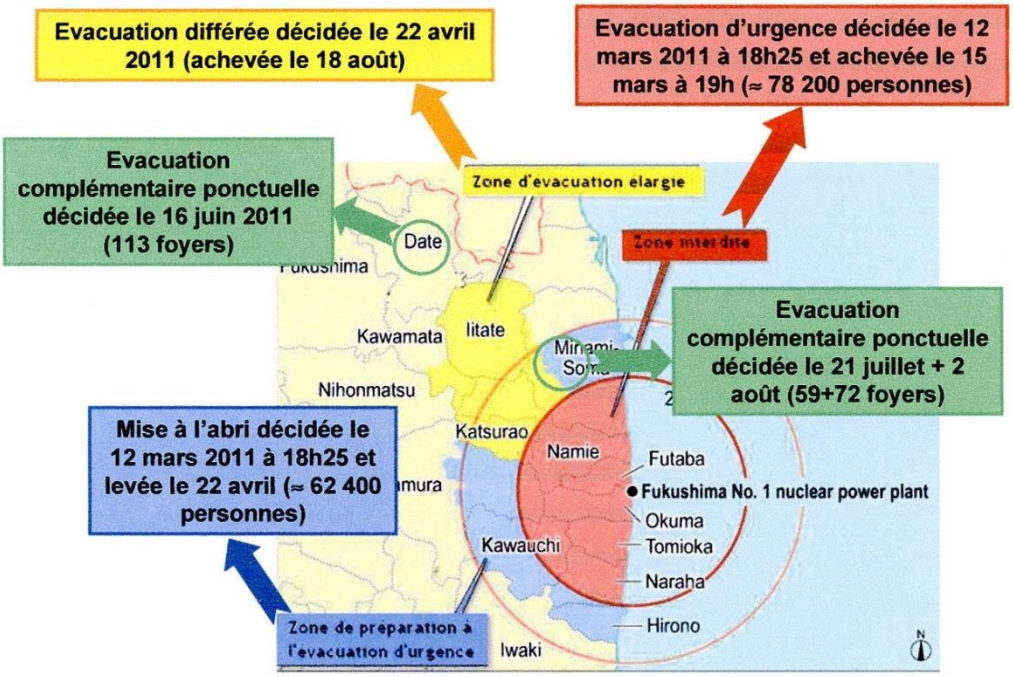


Figure 13. *Les différentes zones d'évacuation ou de mise à l'abri des populations.*

- Les *zones interdites* (en rouge). Dans ces zones l'évacuation d'urgence des personnes (soit 78 200 personnes) a été décidée dès le 12 mars, avant le premier éventage, dans un rayon de 10 puis de 20 km de manière préventive pour éviter l'exposition des populations à des rejets atmosphériques réels ou potentiellement redoutés (éventages et explosions d'hydrogène).

Les zones *d'évacuation complémentaire* (en jaune) où l'évacuation a été décidée entre avril et août 2011en fonction des mesures de la contamination radioactive rémanente des sols.

Les zones *de mise à l'abri* (en bleu) créées le 12 mars avec préparation des populations à une éventuelle évacuation d'urgence. Cette dernière zone était comprise entre deux cercles de 20 et 30 km de rayon. L'état d'alerte dans cette zone a été levé entre avril et septembre 2011.

Depuis 2011, le Japon a entrepris un gigantesque chantier de décontamination des sols avec une ambition affichée (mais qui semble difficilement atteignable…) de faire descendre la radioactivité ambiante en dessous du seuil de 1 millisievert pour l'exposition des populations.

Les opérations de réduction de la contamination étant toujours en cours, le retour des populations n'est pas encore effectif, il sera très progressif et partiel.

A partir de 2012 les restrictions d'accès ont été progressivement réduites.

En fonction du niveau de la radioactivité résiduelle le territoire a été découpé en trois zones (figure 14), ce zonage étant appelé à évoluer dans le temps. Cette figure illustre en même temps l'étendue et l'importance de la contamination de la région autour de la centrale.

- la zone de type 1 (verte) est une zone d'environ 600 km^2 où l'interdiction de séjour de la population a été levée du fait d'une dose annuelle d'irradiation externe inférieure à 20 mSv/an. Cependant, en 2016, seules sont autorisées en journée certaines activités professionnelles jugées nécessaires à la restauration des conditions de vie. La résidence de nuit n'est toujours pas autorisée.

Le retour dans cette zone pourrait concerner 32 000 personnes précédemment évacuées

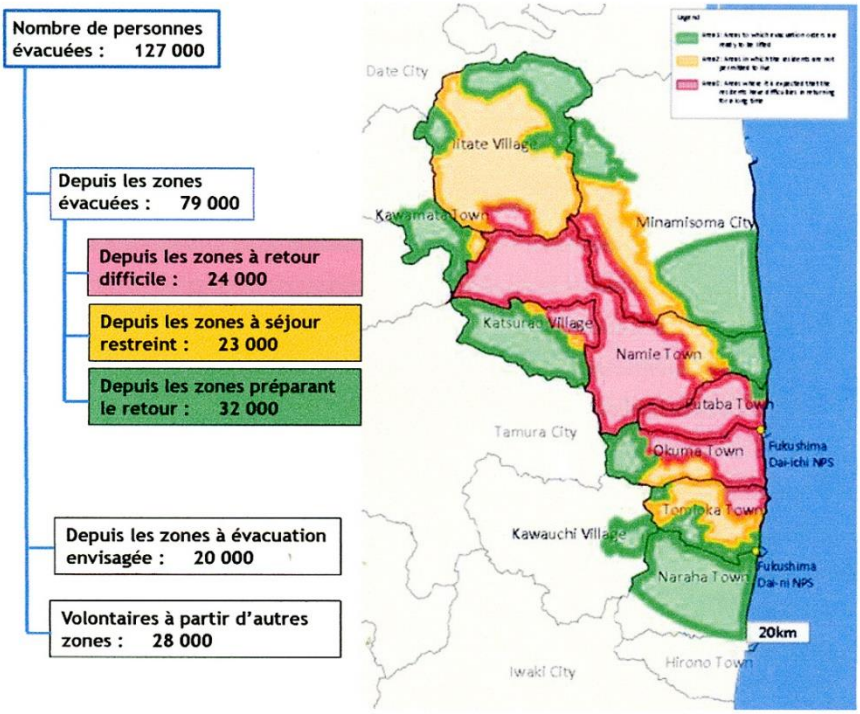


Figure 14. *Découpage en 3 zones en fonction de la contamination des sols par le césium*.

- la zone de type 2 (jaune). Dans cette zone les doses en cas de séjour permanent pouvant dépasser 20 mSv/an (tout en restant inférieure à 50 mSv), le séjour des populations reste interdit à court terme. A l'heure actuelle, seuls des retours ponctuels et encadrés sont autorisés par les pouvoirs publics. Dans ces zones les autorités japonaises visent un retour progressif dans quelques années. 23 000 personnes avaient été évacuées de ces zones.

- la zone de type 3 (rouge). Le séjour des populations y est difficilement envisageable du fait de doses d'irradiation susceptibles de dépasser les 50 mSv/an. Seul un accès très ponctuel est possible, sous réserve d'une autorisation des pouvoirs publics et du port d'équipements de protection contre la contamination. 24 000 personnes habitaient à l'intérieur de cette zone.

Compte tenu des conditions économiques, sociales et culturelles régnant dans la région, le retour dans ces zones fait débat au sein même des populations concernées, les conditions du retour dans ces zones « libérées » n'étant pas uniquement déterminées par des critères liés à la radioprotection.

Les sondages d'opinion montrent que pour plus de 50% des personnes interrogées il existe une incertitude croissante quant à leur éventuel retour. Les points de vue divergent en fonction des générations, les personnes les plus âgées, attachées à leurs terres et à leurs traditions, étant plus favorables au retour.

Malgré les actions de décontamination et les mesures de surveillance assurant un niveau d'exposition à la radioactivité ambiante faible et sans risque, des réticences et des hésitations se manifestent. Ces réticences sont fondées sur la perception des risques éventuels pour la santé, notamment celle des enfants, ce qui explique que majoritairement les jeunes souhaitent ne pas revenir dans ces zones.

De toute manière, les conditions de vie dans ces territoires seront forcément différentes de celles qui existaient avant l'accident et les perspectives sur le long terme restent incertaines.

Y retourner ? Mais pour y faire quoi ?

En octobre 2014, 25% des personnes évacuées avaient quitté la préfecture de Fukushima. Seulement 17 500 personnes (22%) sont prêtes à y revenir, et parmi elles un grand nombre d'agriculteurs. Une proportion importante, 33 000 personnes (soit 42%), a fait le choix du non-retour et 29 000 personnes (33%) sont encore indécises.

Une majorité estime donc que les conditions de leur retour ne sont pas réunies. Cette opinion provient en grande partie d'une incompréhension par le public des annonces faites par le gouvernement. D'un côté celui-ci fixe un seuil de 20 mSv/an pour lever les interdictions d'accès et, d'un autre côté, il se fixe comme objectif une décontamination poussée des sols pour atteindre une dose de 1 mSv/an.

Bien évidemment c'est ce dernier seuil de 1 mSv/an qui est interprété par la population comme l'objectif à atteindre en tout point pour considérer que la décontamination est achevée et que le territoire est à nouveau habitable sans aucun risque. Pour la plupart donc, tant que ce seuil de 1 mSv ne sera pas atteint, la contamination résiduelle est considérée comme une menace pour la santé et constitue un obstacle à un retour à une vie normale.

Une conclusion apparaît clairement dès aujourd'hui, il est certain que peu de jeunes couples désireux d'avoir des enfants viendront se réinstaller dans les zones « libérées » de la radioactivité. A terme ne subsistera majoritairement dans ces zones qu'une population vieillissante, l'écart existant entre l'évolution de cette population et celle du reste du pays ne pouvant aller qu'en grandissant. Une vision peu réjouissante a priori.

Le suivi médical des personnes évacuées (hors des intervenants sur site)

Contrairement à la situation qui a prévalu dans l'ex-URSS, la population japonaise concernée par les retombées de l'accident de Fukushima est remarquablement bien suivie sur le plan sanitaire et continue de l'être année après année. Ce suivi assuré par l'Université médicale de Fukushima permet de dresser un bilan sanitaire précis et exhaustif des populations, notamment celles des enfants et des femmes enceintes.

Les résultats détaillés, et disponibles en 2017, du suivi médical de ces diverses population sont présentés en annexe 2.

Les conséquences sanitaires autres que celles directement liées à la radioactivité.

Si, sur un plan strictement radiologique, les conséquences de l'accident de Fukushima et de ses retombées resteront indiscernables, il n'en est pas de même des conséquences de l'accident sur l'état sanitaire général de la population.

Le diagnostic sur l'état sanitaire général de la population est, en moins sinistre, globalement similaire à celui établi suite à l'accident de Tchernobyl pour les populations déplacées de l'ex-URSS.

Les premiers rapports de 2012 et de 2013 de l'Université de Médecine de Fukushima montrent en effet une très nette dégradation de l'état général de la santé de cette population, qu'elle ait été effectivement évacuée ou préparée à l'être.

Globalement il a été constaté une prévalence à l'hypertension artérielle, une proportion anormale du nombre de personnes diabétiques et de personnes souffrant d'insuffisance rénale, une importante prise de poids par accumulation de tissus graisseux et, chez les enfants âgés de 7 à 15 ans, des taux anormalement élevés de cholestérol et de triglycérides.

Enfin il a été observé une forte augmentation du nombre de personnes présentant des problèmes hépatiques vraisemblablement liés à une consommation excessive d'alcool.

Venant compléter ces examens purement médicaux, un questionnaire est envoyé chaque année aux personnes évacuées afin d'évaluer l'impact de l'accident sur leur santé mentale. La première année 92 300 personnes, dont 19 000 enfants, ont répondu au questionnaire. Soit un taux de réponse de 44% très significatif de la préoccupation de la population quant à sa santé et à son devenir.

Les résultats de l'enquête menée en 2014 montrent que plus de 12 000 personnes, dont 1256 enfants, exprimaient le besoin de recevoir un soutien psychologique via une consultation téléphonique ou par l'envoi de documents capables de répondre à leurs interrogations. Seule une partie de ces 12 000 personnes ont donné suite à leur demande.

Les problèmes évoqués par les enfants restent constants au fil des années : une émotivité exacerbée (38%), un caractère irritable (34%), des problèmes relationnels avec leurs amis (33%) et un comportement de rébellion (31%). A l'issue des entretiens téléphoniques 78 enfants ont consulté un médecin dont 37 un psychiatre ou un psychologue.

En 2012, les problèmes évoqués par les 4 000 adultes qui ont manifesté le désir d'être joints par téléphone, concernent un syndrome dépressif dans 44% des cas. A la suite de ces entretiens téléphoniques, 2 900 personnes se sont rendues chez un médecin dont 510 chez un psychiatre ou un psychologue.

Ce taux était en diminution l'année suivante (34%).

Parmi les autres problèmes évoqués par ces adultes : une diminution de leur condition physique, la prise de psychotropes, la peur accrue des séismes et l'insomnie.

Annexe 1
Evaluation des risques des expositions aux rayonnements ionisants

Quelques définitions et précisions

Concernant la radioactivité et ses effets biologiques sur les tissus vivants, il doit être distingué ce qui est mesurable (ce qui est du domaine de la physique) de ce qui ne l'est pas directement (ce qui est du domaine de la biologie et de la médecine) et qui ne peut être obtenu que par le calcul s'appuyant sur des paramètres et des données obtenus statistiquement à travers des enquêtes effectuées sur des populations particulières (cohortes) ayant ou non subi une irradiation (naturelle, accidentelle ou médicale).

- Ce qui est mesurable et quantifiable.

On mesure l'activité d'une source radioactive : c'est le nombre de désintégrations se produisant par seconde au sein de cette source. L'activité d'une source s'exprime en becquerel, le becquerel correspondant à une désintégration par seconde. Symbole Bq.

C'est une unité minuscule. Pour les activités courantes et plus importantes on utilise le kilobecquerel (mille Bq), le mégabecquerel (million Bq), le giga becquerel (milliard de Bq)… ou l'ancienne unité, le *curie*, équivalant à 37 milliards de becquerels.

Par analyse spectrale on détermine la nature du rayonnement émis par une source radioactive de rayons alpha, bêta, gamma ou neutronique, en fonction de *sa charge électrique*, positive, négative ou neutre, et de son *énergie*. A partir essentiellement de ces deux données, on est en mesure d'identifier très précisément le radioélément qui a émis ce rayonnement (iode 131, césium 137…), ses propriétés physiques et chimiques de ce radioélément et finalement sa *radiotoxicité* c'est-à-dire son action spécifique sur un organisme entier ou un organe particulier. Par exemple l'action de l'iode 129 ou 131 sur la thyroïde.

Connaissant l'activité d'une source et les divers radioéléments ionisants qu'elle contient, on est alors en mesure de connaître l'énergie que cette source transmet à de la matière, en particulier à un tissu vivant.

Cette énergie transférée s'appelle la *dose absorbée*. Elle s'exprime en *gray*, le gray correspondant à une énergie de 1 joule (unité d'énergie) déposée par kilogramme de matière inerte ou vivante. Cette unité, le gray, est celle utilisée en radiothérapie pour quantifier l'énergie transmise à un tissu vivant.

La connaissance de la dose absorbée en gray par un tissu vivant n'est cependant pas suffisante à elle seule pour déterminer l'effet biologique d'un rayonnement sur ce tissu. L'effet biologique ne s'obtient que par un calcul tenant compte d'un certain nombre de paramètres biologiques supplémentaires qui doivent être pris en considération et qui permettent de passer de la dose absorbée en gray qui est une *grandeur physique* (une quantité d'énergie absorbée par unité de masse) à un effet biologique qui, lui, n'est pas physiquement quantifiable à l'aide des seules grandeurs physiques fondamentales que sont la longueur, la masse et le temps.

- Ce qui est calculé

Le passage d'une énergie absorbée à un effet biologique résulte d'un calcul dont le résultat rend globalement compte de l'effet biologique d'un rayonnement. Un calcul est spécifique à un *rayonnement donné* (de sa nature et de son énergie) sur un *tissu donné*. Par exemple, un calcul sera relatif à l'effet de l'iode 131 sur la thyroïde en précisant, de plus, s'il s'agit d'un adulte ou d'un enfant, les tissus d'un enfant étant beaucoup plus sensibles que ceux d'un adulte.

Le résultat de ces calculs est une grandeur hybride appelée *dose efficace* (ou *dose équivalente*). Elle s'exprimait autrefois en *rem* pour « *rad équivalent men* ». Mais, pour être homogène avec les unités du système international SI d'unités (mètre, kilogramme, seconde), les doses efficaces s'expriment aujourd'hui en *sievert*. Symbole Sv.

Un sievert équivaut à 100 rem, il correspond cependant à une irradiation importante aussi, pour les irradiations courantes dues à la radioactivité naturelle, aux examens radiographiques… on utilise le millisievert. Symbole mSv.

- Le calcul de la dose efficace (ou dose équivalente)

On obtient la *dose efficace* en en sievert en multipliant la *dose absorbée* en gray par un *facteur de pondération radiologique* qui tient globalement compte d'un certain nombre de paramètres biologiques, en particulier :

- de la nocivité relative variant de 1 à 20 selon les différents types de rayonnement (1 pour les gamma, 5 pour les protons… 20 pour les alpha),
- de la manière dont l'irradiation est appliquée, du débit de dose, selon que la dose est appliquée en une seule fois ou répartie dans le temps,
- de la répartition de l'irradiation, selon qu'elle est répartie sur le corps entier ou seulement sur un organe,
- de la sensibilité du tissu de l'organe irradié au type de rayonnement, cette sensibilité pouvant être elle-même fonction de la personne et de son âge (cas de l'hypersensibilité à l'irradiation de la thyroïde en développement chez les enfants en bas âge),

… etc.

Ces différents paramètres ont été quantifiés grâce aux résultats accumulés depuis le début de l'utilisation des rayonnements ionisants au XXe siècle. Résultats obtenus lors de recherches et d'expérimentations animales, résultats d'études épidémiologiques conduites sur les populations particulières (cohortes) ayant été soumises à divers types d'irradiations : irradiation naturelle, examens médicaux (radiographies, scanners…), radiothérapie, irradiations accidentelles, bombardements de Hiroshima et de Nagasaki, retombées des essais nucléaires… etc.

En résumé : *la dose efficace,* qui s'exprime en sievert, *est l'indicateur global de l'effet biologique d'un rayonnement sur un tissu vivant.* Elle est égale à la dose absorbée, exprimée en gray, multipliée par un facteur de pondération radiologique qui tient compte des paramètres caractérisant l'action d'un rayonnement donné sur un tissu vivant donné.

Quelques repères.

En France, la dose efficace moyenne reçue annuellement du fait de la radioactivité naturelle est de 2 mSv/an. Elle peut atteindre 40 ou 50 mSv/an dans des régions où la radioactivité est particulièrement élevée (Iran, Brésil, état du Kérala en Inde…) sans que les

études épidémiologiques aient statistiquement pu montrer dans ces contrées un quelconque effet radio-induit tel que mutations génétiques, dégénérescence, leucémies ou excès de cancers par rapport à d'autres populations…

Les effets biologiques de l'exposition aux rayonnements ionisants

On distingue deux types d'effets, les effets déterministes pour lesquels à une cause correspond l'apparition d'un effet certain et observable, et les effets stochastiques dont l'apparition est aléatoire et qui ne peuvent être attribués à une cause identifiée.

Selon l'importance des doses absorbées pendant une exposition à un rayonnement ionisant, on se situera dans l'une ou l'autre des deux zones, celle des doses élevées et celle des faibles doses… ou dans une zone intermédiaire, la zone « grise » séparant ces deux zones.

a) ***Les effets dits déterministes***

Dans le domaine des doses élevées, un domaine qui débute au-delà d'un seuil de quelques centaines de mSv, les effets biologiques sont dits *avérés*. Avérés signifie que, pour ces doses, on *constate réellement* des effets biologiques dont la gravité va croissant avec la dose. Ce sont des effets précoces apparaissant après une irradiation importante dans un délai variant de quelques heures à quelques semaines.

Les effets déterministes sont des effets *observables de manière certaine, non aléatoire.*

Ils apparaissent systématiquement pour des doses absorbées importantes et leur gravité sur un plan sanitaire est fonction de la dose.

Pour une irradiation du *corps entier* ce sont :

- une modification visible de la numération sanguine, le seuil d'apparition de cet effet est d'environ 500-700 mSv,
- des signes cliniques immédiats et visibles (nausée, vomissements…) dits mal des rayons, dont le seuil d'apparition est de 1 000 mSv,
- un risque de décès, pour une dose dite létale à 50%, à partir de 5 Sv. Le décès est quasi certain au-delà de 10 Sv.

Lorsque les doses ne sont administrées qu'à un organe particulier ou à une zone limitée, par exemple dans le cadre d'une radiothérapie, les effets sont différents et les doses absorbées peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées, supérieures même à 10 gray.

D'un point de vue biologique, ce n'est qu'au-dessus d'une irradiation de 100 à 200 mSv pour le corps entier que commence à apparaître de manière statistiquement décelable le risque d'une réparation fautive de l'ADN des cellules endommagées par un rayonnement ionisant. Au-dessus de 1 Sv le risque de prolifération de cellules mutantes fautives est un effet statistiquement observable.

b) ***Les effets stochastiques***

Dans le domaine des faibles et très faibles expositions aux rayonnements ionisants, c'est-à-dire aux doses inférieures à 100 mSv, contrairement aux effets avérés précédents, on ne sait ni détecter ni caractériser un effet biologique imputable à ces niveaux d'exposition.

Par exemple on ne sait ni détecter ni caractériser les effets biologiques imputables à la radioactivité naturelle (radioactivité des roches et du rayonnement cosmique…) y compris

dans des contrées (Inde, Brésil, Iran…) où cette radioactivité peut être 20 fois supérieure à celle que l'on rencontre dans nos régions.

Notons que la vie est apparue sur terre il y a 2 ou 3 milliards d'années alors que la radioactivité était très supérieure à celle existant aujourd'hui. Par exemple, la radioactivité due à la présence d'uranium 235 (de période 750 millions d'années) et de ses descendants était 16 fois supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui…

Dans le domaine des faibles doses un effet, s'il existe, n'apparaît pas systématiquement et sa nature ne peut pas être déterminée a priori. En fonction d'une dose absorbée, on ne peut qu'établir de manière statistique la probabilité de survenue (et non la gravité) d'un type d'effet parmi ceux possibles : mutation, dégénérescence, cancer...

Aux faibles doses, l'estimation des effets radio-induits a été établie sur la base d'études statistiques fondées sur des données épidémiologiques obtenues à partir de populations ayant été ou non (pour les populations témoin) soumises à une irradiation autre que naturelle.

Les populations ayant été soumises à irradiation l'ont été lors de traitements par radiothérapie ou d'examens radiologiques (ces populations sont parfaitement connues et très bien suivies), ayant survécu aux bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, ce sont les population victimes d'irradiations accidentelles (accidents de laboratoire, radiographies industrielles) ou exposées aux retombées des accidents nucléaires (Windscale UK, Kystin, Mayak et Tchernobyl en URSS) ou des essais d'armes nucléaires.

Les données statistiques et les études sur les effets des faibles doses portent donc sur des populations nombreuses et diverses. Elles ont permis à la Commission Internationale de Protection Radiologique, la CIPR fondée dès 1928, d'établir des règles et d'édicter des recommandations en matière de protection contre les rayonnements ionisants. En 1955 l'ONU a créé un Comité scientifique pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, l'UNSCEAR.

De bonne foi, il ne peut donc pas être affirmé que l'on ne possède ni d'expérience, ni de connaissance fiables des effets des faibles doses d'irradiation.

La relation linéaire sans seuil

Comme toute enquête statistique, celle sur l'effet des faibles doses possède ses limites. En toute rigueur, on ne peut en effet pas exclure l'existence d'un risque dans le domaine des faibles doses même si aucun effet n'est en apparence perceptible ou n'apparaît pas directement et immédiatement.

Comme il se trouvera toujours quelqu'un pour objecter que l'on ne voit rien ni ne trouve rien parce qu'on n'a pas suffisamment ou mal cherché, mieux vaut fonder l'évaluation de l'impact sanitaire des expositions aux rayonnements ionisants sur une démarche a priori inattaquable car prudente et conservatrice même si elle n'est pas formellement établie sur un plan scientifique.

Fondamentalement, la démarche adoptée pour l'évaluation des effets des faibles doses peut se résumer ainsi « *on n'observe rien mais on n'en conclut pas pour autant qu'il n'existe rien et, surtout, on ne nie rien* ».

Il faut en ce domaine accepter une évidence perçue il y a 2000 ans par Aristote qui enseignait déjà qu'il est *impossible de démontrer l'inexistence d'un risque qui n'existe pas*…! Ce philosophe avait non seulement su ébaucher la première théorie atomique mais il avait

également fourni la réponse à l'un des débats autour de l'énergie nucléaire parmi les plus lancinants, celui autour de l'existence ou de la non existence de l'effet des rayonnements ionisants aux faibles doses !

C'est donc par conservatisme, par une démarche précautionneuse maximale, que l'on a accepté d'extrapoler de manière linéaire et continue vers les faibles et les très faibles doses la loi établie *à partir des données recueillies pour les fortes doses* administrées généralement en un temps bref (cas le plus pénalisant) et pour lesquelles des effets avérés sont observés.

Cependant pour les faibles doses, n'étant pas en mesure de constater et d'affecter un effet avéré à une dose, on remplace la relation valide aux fortes doses entre une dose et l'apparition certaine d'un effet avéré, par une *relation entre une dose et la probabilité d'apparition d'un effet ou d'un dommage.*

Pour résumer, aux faibles doses le caractère aléatoire de l'apparition d'un effet stochastique fait qu'on ne peut *qu'estimer la probabilité d'apparition de cet effet* en fonction de la dose.

Deux points fondamentaux sont à retenir :

- aux faibles doses, la relation linéaire sans seuil donne seulement la probabilité de survenue d'un effet. Au faibles doses *c'est uniquement la probabilité d'apparition d'un effet (mutations, cancers…) qui est liée à la dose mais la relation donne pas (comme aux fortes doses) la gravité du dommage,*

- en vertu d'une application extrêmement conservatrice *on s'interdit de fixer un seuil en dessous duquel une exposition au rayonnement ionisant n'aurait aucun effet*. En affectant une probabilité d'apparition à un effet, quelle que soit la dose aussi infime soit-elle, on émet l'hypothèse que la moindre dose peut avoir un effet. C'est une règle particulièrement contraignante que la communauté internationale en charge de réglementer les activités nucléaires, industrielles ou médicales, s'est imposée.

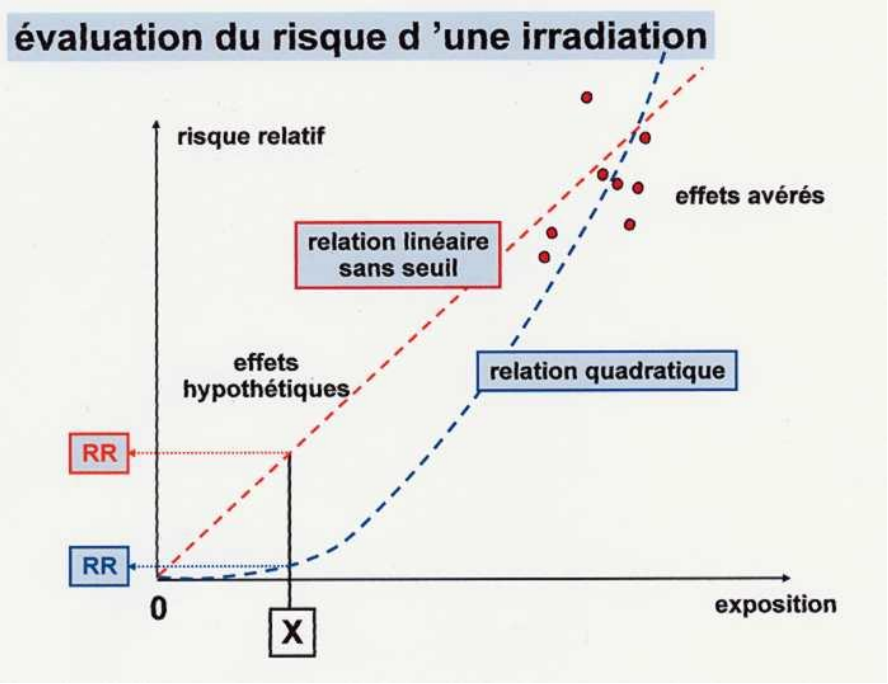


Figure 15. *Relation linéaire sans seuil. Pour une population exposée à un rayonnement ionisant la relation linéaire sans seuil permet d'obtenir en fonction de la dose d'exposition la borne supérieure d'apparition d'un excès de dommage au sein de cette population.*

Pratiquement la relation linéaire sans seuil (figure 15) est représentée par une droite reliant de manière continue les domaines des fortes à celui des faibles doses, reliant les domaines des effets avérés à celui des effets hypothétiques.

En abscisse sont reportées les doses individuelles d'exposition au rayonnement ionisant, exprimées en sievert. En ordonnée, est reporté le risque relatif « RR » d'apparition d'un effet.

Statistiquement le risque relatif RR est défini de la manière suivante : pour une population soumise à une exposition individuelle moyenne « d » et pour un type de dommage donné (mutation, cancer d'un type particulier, tout type de cancers…) le risque relatif permet d'obtenir par calcul une évaluation de la borne supérieure théorique du nombre de *dommages en excès* que l'on pourrait observer parmi cette population.

L'expression « en excès » signifie que le nombre des dommages ainsi calculé à partir de la relation linéaire sans seuil viendrait en surnombre par rapport au nombre de dommages qui apparaitraient naturellement et spontanément parmi une population témoin non soumise à irradiation.

Exemple de calcul pour un type de cancer « C » donné.

Pour une population « N » ayant subi une irradiation moyenne « d », le risque d'apparition de cancers létaux (entraînant 50% de décès) en excès par rapport aux cancers spontanés (non radio induits) est estimé de la manière suivante :

a) Pour une population soumise à une irradiation composée de « N » personnes ayant reçu en moyenne une dose « d », on calcule une *dose collective* « D » qui est le produit de la dose moyenne « d » reçue individuellement par le nombre « N » de personnes.

La dose collective D = d x N s'exprime en une unité quelque peu barbare, en « *personne-Sievert* ».

b) Connaissant la dose individuelle moyenne « d », pour ce type de cancer « C », la relation linéaire sans seuil fournit un *coefficient de risque relatif* « RR » par unité de personne-Sievert.

c) Le produit de la dose collective D par ce coefficient RR donne, pour une population N soumise à une exposition moyenne d, une estimation de la *borne supérieure* du nombre de *cancers « C » en excès qui pourraient apparaître sur la durée de vie de cette population en plus des cancers spontanés qui apparaitront, eux de manière statistiquement certaine, parmi cette même population.*

Dans la réalité, dans le domaine des faibles et très faibles doses, le nombre de cancers par excès imputables à l'exposition de la population sera compris entre 0 et cette borne théorique supérieure D x RR calculée de manière très conservatrice.

Dans le domaine des faibles doses le nombre de cancers en excès ainsi calculé est généralement inférieur aux variations statistiques du nombre de cancers apparaissant spontanément parmi une population. Les variations statistiques rendent très généralement les « cancers en excès » ainsi calculés indiscernables parmi les cancers spontanés. Voir à ce sujet, ci-après, la discussion de cette remarque à propos de l'accident de Tchernobyl).

De nombreux spécialistes considèrent ce type de calcul dénué de toute réelle signification dès lors qu'il est effectué en dehors de la stricte évaluation de la borne supérieure d'un risque hypothétique, l'usage pour lequel il a été envisagé.

Quelques repères

Aux fortes doses administrées en un temps bref, le coefficient de risque relatif RR varie de 0,08 à 0,11 cancer létal / personne-sievert.

Aux faibles doses et à faible débit il est de 0,04 à 0,057 cancer létal par personne-Sv.

Selon l'âge et le sexe le risque global de cancer varie. Le rapport du risque femme / homme est de 1,7 et le rapport du risque enfant / adulte est de 4. Ce qui signifie que la femme est plus sensible que l'homme aux rayonnements ionisants et que l'enfant est beaucoup plus sensible que l'adulte.

Aux faibles doses, c'est l'apparition de la leucémie myéloïde qui semble être l'indicateur le plus significatif des cancers radio-induits.

En dehors de toute irradiation induite par l'activité humaine, statistiquement, le nombre d'apparitions spontanées de cette maladie est de 1 à 2 cas pour 10 000 habitants en Europe, aux USA et au Japon où le niveau général de la santé publique est bon ou très bon.

Toujours selon les statistiques, pour ces pays, la mortalité générale par cancers, de tout type, est de 20% de la population soit, toujours pour 10 000 habitants, 2000 décès statistiquement certains sur la durée de vie.

La controverse au sujet de la relation linéaire sans seuil

De manière paradoxale, cette relation linéaire sans seuil issue d'un principe de précaution extrême est la source de violentes controverses.

Ces controverses naissent d'une application systématique et aveugle de cette relation linéaire sans seuil par certaines personnes qui inversent de manière spécieuse la philosophie sur laquelle repose son fondement.

Ces personnes affirment qu'aux faibles et très faibles doses *aucune observation ne permettant de nier que des effets existent, elles en déduisent que ces effets… existent réellement* !

Partant de ce postulat spécieux - mais logiquement imparable : *ce n'est pas parce qu'on ne voit rien qu'il n'y a rien* - ils en concluent qu'aux faibles doses des effets tangibles et réels existent bel et bien et que la relation linéaire sans seuil permet de *comptabiliser des effets réels* y compris aux doses les plus infimes.

Il suffit dès lors d'appliquer à une population aussi vaste qu'on le désire (en fonction de ce que l'on souhaite démontrer…) une probabilité infime de survenue d'un effet pour trouver par la magie d'une simple multiplication un nombre important de victimes.

C'est le problème de l'indétermination bien connu en mathématiques : quel est le résultat de la multiplication d'un nombre infiniment petit (ici un risque dans le domaine des faibles doses) par un nombre infiniment grand (une importante population).

Si on n'y prend garde la réponse à cette question s'apparente à *n'importe quoi… pourvu que ça aille dans le sens souhaité par celui qui effectue le calcul*.

A titre d'illustration, deux exemples de calcul automatique utilisant sans discernement la relation linéaire sans seuil (RLSS). Les surprenants résultats obtenus dans ces deux exemples montrent l'inanité de tels calculs automatiques.

- En France, la dose annuelle moyenne due à la radioactivité naturelle est en moyenne de 2,4 mSv/an. Appliquée aux 66 millions de Français, la dose collective annuelle pour l'ensemble des Français est de 158.000 « personne-sievert ». Si on applique un facteur de risque de 0,05 cancer létal par « personne-sievert » donné par la RLSS pour cette dose individuelle de 2,4 mSv, le calcul automatique conduit à prédire… 8 000 cancers mortels par an imputables en France à la radioactivité naturelle ambiante.

Ce qui est manifestement absurde et contraire aux observations. Quelle hécatombe ce serait dans les contrées (Inde, Brésil, Iran…) où la radioactivité naturelle dépasse 20 mSv !

- Toujours en France, la dose annuelle imputable aux radiographies est en moyenne de 1 mSv/personne. Les examens radiographiques seraient-ils annuellement la cause de la mort

par cancers de 3.300 personnes ? Si cela était, on le saurait et, devant une telle hécatombe, il conviendrait d'interdire les examens radiographiques (même s'il est vrai qu'on pourrait certainement en diminuer le nombre !).

Plus humoristique un calcul similaire nous conduirait à mettre en évidence une nouvelle menace pour l'humanité : « l'effet moquette ». Imaginons que l'on puisse faire monter l'ensemble des 7 à 8 milliards d'habitants de la planète d'un petit centimètre… soit l'épaisseur d'une moquette. L'intensité du rayonnement cosmique augmentant avec l'altitude, l'accroissement de l'altitude moyenne de l'humanité de l'épaisseur d'une moquette entraînerait celui de la dose collective qu'elle reçoit. Selon une application absurde de la RLSS, cet accroissement infinitésimal de la dose collective multiplié par 7 à 8 milliards conduirait inévitablement à comptabiliser des « morts en excès ». Un calcul identique aboutirait même à une catastrophe humanitaire à l'échelle mondiale si toute l'humanité montait brutalement… d'un étage.

Conclusions sur la controverse

Il existe donc deux manières d'utiliser cette relation sans seuil : la première qui affirme l'existence d'effets que personne n'est en mesure de mettre en évidence et la seconde qui utilise la relation de manière précautionneuse tout en étant convaincu de prendre en compte des effets hypothétiques, des effets dont il ne sera jamais possible d'établir la réalité.

La seconde manière est utilisée pour évaluer la borne supérieure les effets sanitaires collectifs d'une exposition d'origine autre que naturelle (industrielle, médicale, accidentelle…) et s'assurer que ces effets seront et resteront inférieurs à une limite que l'on sait être très éloigné de tout risque réel.

Pour les populations cette limite est a été internationalement fixée à 1 mSv/an en se référant à l'exposition due à la radioactivité naturelle (2,4 mSv/an en France). Pour les travailleurs médicalement suivis du nucléaire elle est de 20 mSv/an.

La première manière qui consiste à utiliser la RLSS hors de son domaine de signification pour affirmer que des effets hypothétiques se produiront de manière certaine n'est scientifiquement pas licite.

Pour les tenants de la seconde interprétation « *La relation linéaire sans seuil ne doit pas être considérée comme une loi biologique fondée* [elle ne l'est effectivement pas !] *mais comme la manifestation d'un principe de précaution maximum tendant à évaluer la borne supérieure d'un risque radiologique* ». Lors d'une prise de décision la RLSS permet d'évaluer de manière très conservatrice la borne supérieure d'un risque radiologique « *de manière à se situer systématiquement très en dehors de toute zone de danger possible* » et de décider si ce risque est acceptable par rapport aux bénéfices que cette décision est susceptible d'apporter.

Cette manière d'évaluer des risques collectifs a été étendue à d'autres domaines, elle est particulièrement adaptée aux prises de décision dans le domaine de la santé publique, de la vaccination, des examens radiographiques, de la radiothérapie…

Les Académies de Médecine et des Sciences ont émis un avis sur la controverse existant au sujet de la LRSS. La majorité des spécialistes reconnaissent que la relation dose-effets linéaire sans seuil est une hypothèse extrêmement conservatrice dès lors que les doses d'irradiation sont inférieures à quelques dizaines de milli sievert et affirment que l'utilisation automatique de la LRSS est fallacieuse : « *La RLSS est souvent appliquée abusivement en multipliant les effets de doses infimes estimées par la RLSS, par de grands effectifs pour calculer le nombre de morts induits si des millions de personnes étaient*

exposées à quelques micro sieverts. Ces calculs fondés sur des doses collectives sont dénués de toute signification… Certains continuent néanmoins à les effectuer, ce qui conduit à des estimations fantaisistes qui, sans fondement scientifique, contribuent à faire croire que la moindre irradiation serait dangereuse. ».

La controverse sur la RLSS a un effet négatif certain, celui d'alimenter inutilement l'angoisse collective et de discréditer les spécialistes de la radioprotection – et à travers eux l'ensemble du monde du nucléaire - qui refusent d'en approuver l'usage en dehors de celui pour lequel elle a été élaborée et pour lequel elle a une signification.

Petit complément concernant l'usage de la RLSS.

Lorsque la ICPR (International Commission on Radiological Protection) a choisi de retenir la *relation linéaire sans seuil* pour décrire les effets sanitaires de faibles doses, il s'agissait d'un choix purement pragmatique destiné à simplifier la gestion du risque présenté par les rayonnements ionisants. Ce choix est en effet le plus simple pour gérer au plan pratique un risque radiologique.

Petite explication : la *relation étant linéaire,* pour connaître l'effet cumulé de différentes doses absorbées par une personne, *indépendamment les unes des autres et à des moments différents,* il « suffit » d'additionner ces doses.

C'est effectivement simple mais biologiquement parfaitement inexact ! Cette addition nie en particulier tous les effets biologiques bénéfiques et réparateurs sans lesquels toute vie deviendrait impossible.

Le choix de la RLSS est un choix arbitraire et non une loi biologique.

Annexe 2

Résultats du suivi des enfants et des femmes enceintes par l'Université médicale de Fukushima.

En 2011, 210 000 personnes ont été affectées par l'accident, ce sont les populations qui ont été évacuées préventivement ou dans les mois qui ont suivi en fonction de la contamination des sols et les populations qui étaient préparées à être évacuées au cas où cela se serait avéré nécessaire, mais qui ne l'ont pas été.

Ces deux populations, celle évacuée et celle placée en état d'alerte, sont toujours régulièrement suivies.

Depuis 2012, une fois par an, elles sont invitées individuellement à subir un bilan médical approfondi. L'analyse de ces bilans médicaux est effectuée sous l'égide de l'Université de Médecine de Fukushima qui publie régulièrement un rapport présentant la synthèse de ses travaux et l'analyse des données recueillies.

En 2012, sur ces 210 000 personnes, plus de 84 000 ont répondu à la convocation (40%) soit un taux très élevé de réponses, atteignant même 64,5% pour les enfants. Trois ans plus tard, en 2015, seulement 34 000 personnes (15%) répondaient positivement et 28% pour les enfants. Cette évolution semble dénoter une moindre inquiétude des personnes qui se sentent de moins en moins concernées par les éventuelles conséquences pour leur santé des expositions auxquelles elles ont été soumises.

Par ailleurs, grâce aux réponses au questionnaire remis aux deux millions d'habitants de la préfecture de Fukushima, et auquel 554 241 personnes ont répondu (27%), la faculté de médecine de Fukushima a pu établir, pour chaque personne ayant répondu, la dose qu'elle a reçue dans les quatre mois qui ont suivi l'accident en fonction de son habitat et de son activité (y compris pour les 2 137 personnes de passage dans la région !).

Statistiquement, 62,2% des habitants ont reçu moins de 1 mSv, 31,7% une dose comprise entre 1 et 2 mSv, 5% entre 2 et 3 mSv… le maximum a été atteint pour 12 personnes ayant reçu une dose de l'ordre de 15 mSv.

Pour l'ensemble de la population de la préfecture, la dose moyenne reçue est de 1,4 mSv.

Compte tenu de la faible dose moyenne et de l'absence de dose élevée, toutes étant inférieures à 15 mSv, on se situe dans le domaine des effets hypothétiques de la relation linéaire sans seuil. *Sur le plan radiologique* – et uniquement sur ce plan – l'application de la relation linéaire sans seuil montre que les conséquences de l'accident de Fukushima resteront statistiquement indiscernables, que le nombre de décès en excès dû à l'irradiation accidentelle ne pourra pas être discerné parmi le nombre des cancers apparaissant spontanément dans une population n'ayant pas été exposée aux retombées de l'accident nucléaire de Fukushima.

Il a été montré précédemment, au chapitre consacré aux conséquences sanitaires non directement liées à l'irradiation de l'accident de Fukushima, que ces conséquences étaient très importantes et participaient à une dégradation de l'état sanitaire général des populations concernées.

Suivi des femmes enceintes au moment de l'accident

L'étude menée par l'Université médicale de Fukushima porte, d'une part, sur le suivi des 20 000 femmes se trouvant dans la préfecture de Fukushima et qui ont déclaré une grossesse à compter du 1er août 2010 (soit 9 mois avant l'accident) et, d'autre part, sur le suivi d'éventuelles anomalies génétiques et congénitales constatées chez les enfants que ces femmes ont mis au monde.

Le taux de réponse au questionnaire envoyé par l'Université est important. Il est de 58% pour les femmes ayant déclaré leur grossesse entre août 2010 et juillet 2011. Ce taux est voisin de 50% pour celles ayant déclaré être enceintes après l'accident entre août 2011 et juillet 2013 (soit quatre mois et plus après l'accident).

Après une légère augmentation du taux d'avortement entre 2011 et 2012 (0,06 et 0,08%) ce taux est redevenu normal en 2013 (0,04%). Entre 2011 et 2013, il n'a pas été constaté d'évolution du taux de fausses couches (0,77%, 0,81%, 0,78% respectivement pour 2011, 2012 et 2013).

Après une augmentation du taux de naissances prématurées (4,75% en 2011, 5,74% en 2012) le taux est redevenu normal, similaire à celui de l'ensemble du Japon.

S'agissant des malformations à la naissance, dans la préfecture de Fukushima le taux a légèrement baissé mais la variation n'est pas significative. Ce taux est de 2,39% pour les naissances résultant de grossesses déclarées entre août 2010 et juillet 2011 et de 2,35%, pour celles déclarées entre août 2011 et juillet 2013.

Ces chiffres sont comparables à la moyenne nationale japonaise compris entre 3 et 5%.

Dans un tiers des cas, les malformations constatées sont de nature cardiaque (0,91%).

Il n'est pas surprenant de constater que plus d'un tiers des femmes ont nourri leur enfant au sein par crainte de la contamination du lait.

S'agissant de la santé mentale des mères, l'enquête menée auprès des femmes ayant déclaré leur grossesse comportait un questionnaire posant, entre autres questions, les deux questions suivantes : « *Vous êtes-vous sentie triste ou déprimée au cours du mois précédent ? Vous êtes-vous sentie désintéressée par ce qui vous entoure ?* »

Les résultats publiés en 2014 montrent que 25% de femmes enceintes ont répondu positivement à l'une ou à l'autre de ces deux questions. Le nombre de femmes enceintes souffrant d'une dépression (13%) reste significativement plus élevé que dans le reste du Japon (9%). Sur la période 2013-2014, 1101 femmes enceintes ont exprimé le souhait de bénéficier d'un soutien psychologique, la raison invoquée étant liée à des symptômes dépressifs pour les deux tiers et à la peur des conséquences de la radioactivité sur leur grossesse pour 17% d'entre elles. A la question « *pour quelle raison ne souhaitez-vous pas entamer une nouvelle grossesse ?* » seulement 5,6% des femmes interrogées en 2014 évoquent une peur liée à la radioactivité. Elles étaient 15% l'année précédente.

Suivi des enfants exposés, méthodologie du suivi de la fonction thyroïdienne.

La méthodologie adoptée tient évidemment compte du délai de latence d'apparition d'éventuels cancers thyroïdiens. L'expérience de Tchernobyl montre qu'il est au minimum de quatre ans.

Afin d'évaluer la fonction thyroïdienne des enfants exposés aux rejets radioactifs, l'Université médicale de Fukushima a débuté en avril 2011 une vaste campagne d'échographie de la thyroïde destinée aux 360 000 enfants âgés de moins de 18 ans (nés entre

le 2 avril 1992 et le 1er avril 2011) ayant résidé ou étant présents dans la Préfecture de Fukushima au moment de l'accident.

Lors de cette campagne qui a débutée en avril 2011, compte tenu du temps de latence, aucune affection thyroïdienne, cancer, nodule, hyperthyroïdie… ne pouvait être imputée à l'accident de Fukushima. Cette vaste campagne avait donc pour objectif de faire une sorte « d'état des lieux », le point zéro de la santé thyroïdienne des enfants, antérieurement à l'accident et ce avant que d'éventuels effets imputables à l'accident n'apparaissent.

Les autorités japonaises s'étaient fixé un premier objectif : ces 360 000 enfants devaient bénéficier avant le mois d'avril 2014 d'une première échographie thyroïdienne. En cas de détection d'une anomalie, cette échographie devait être complétée par des analyses biologiques, voire des biopsies.

Une seconde campagne de dépistage chez les mêmes enfants devait par la suite être réalisée à partir d'avril 2014 pour observer si le nombre d'anomalie détectées lors de la première enquête (celle de 2011-2014) évoluait. Cette seconde campagne de dépistage devait s'être achevée en avril 2016.

Par la suite les autorités prévoyaient que, pour les enfants présents dans la préfecture au moment de l'accident, les dépistages périodiques seraient poursuivis au même rythme, tous les deux ans, jusqu'à ce que les enfants atteignent l'âge de 20 ans, puis tous les 5 ans au-delà de l'âge de 20 ans.

Ce programme sur le long terme est jusqu'à présent rigoureusement suivi.

Les résultats des campagnes de dépistage chez les enfants

Lors de la première campagne de « point zéro » (d'avril 2011 à avril 2014) 300 476 enfants sur les 367 700 convoqués ont été examinés par échographie thyroïdienne. Parmi eux :

58,8% présentent une absence de nodule ou de kyste,

0,6% présentent des nodules inférieurs à 5 mm,

0,8% présentent des nodules supérieurs à 5 mm,

47,9% présentent des kystes liquidiens inférieurs à 20 mm,

0,004% des kystes liquidiens supérieurs à 20 mm

Finalement 2 294 enfants (soit 0,7%) ont été identifiés comme devant subir des examens complémentaires. Parmi eux la biopsie a confirmé le caractère potentiellement malin des nodules ou kystes pour 113 d'entre eux (0,04%) alors âgés de 6 à 18 ans au moment de l'accident.

Dans 99 cas l'ablation chirurgicale de la thyroïde a été jugée nécessaire. L'ablation a confirmé la présence d'un cancer de la thyroïde de type adénocarcinome papillaire chez 95 enfants.

Que conclure de cette première campagne ?

Selon les données présentées ci-dessus, entre 2011 et 2014 et pour la préfecture de Fukushima, l'incidence annuelle du cancer de la thyroïde serait de 11 pour 100 000.

Or dans les autres préfectures du japon cette même incidence annuelle obtenue à partir des données des registres de cancers (et non suite à un dépistage systématique) n'est en moyenne que de 0,75 cancers pour 100 000… soit une incidence quinze fois plus faible que l'incidence trouvée dans la préfecture de Fukushima…

De nouveau on se trouve devant le même « biais » méthodologique (screening factor) et le même constat « d'épidémie de diagnostics » que celui établi précédemment en France après l'accident de Tchernobyl et qui aboutit à la conclusion qu'il est incohérent de comparer deux incidences de nature différente, la première étant obtenue lors d'une campagne de *dépistage*

systématique, la seconde étant obtenue sur la base de données enregistrées hors de toute campagne de dépistage systématique.

Aussi, dans le but de débusquer cette incohérence, les autorités ont entrepris plusieurs autres campagnes de dépistage systématique du cancer de la thyroïde chez des enfants âgés de moins de 18 ans dans des préfectures non touchées par les retombées de l'accident (préfectures d'Aomori, de Hiroshima et de Yamanashi…). Ces campagnes de détection systématique, réalisées hors des zones intéressées par l'accident, ont clairement montré que l'incidence du cancer de la thyroïde obtenue par une campagne de dépistage systématique variait dans de très larges proportions, entre 23 et 130 cas sur 100 000 selon les préfectures.

Des écarts similaires sur l'incidence des cancers thyroïdiens chez les enfants avaient déjà été constatés en Corée du Sud en 1999 suite à la mise en place d'un dépistage systématique.

En conclusion, faute de pouvoir trancher, le nombre de 98 cancers de la thyroïde détectés chez les enfants de la préfecture de Fukushima (soit une incidence de 11 sur 100 000) servira de référence pour les campagnes ultérieures de dépistage systématique et le dénombrement des cas qui ne se seraient pas encore développés au moment de la première campagne.

Les résultats de la seconde campagne de dépistage ont fait l'objet d'un rapport de l'Université médicale de Fukushima daté du 12 février 2016. Entre avril 2014 et décembre 2015, sur les 381 261 enfants invités à subir un examen, 236 595 ont pu être examinés. Les résultats montrent que :

- 39,8% présentent une absence de nodule ou de kyste,
- 0,6% présentent des nodules de moins de 5 mm,
- 0,8% présentent des nodules de plus de 5 mm,
- 58% présentent des kystes liquidiens inférieurs à 20 mm,
- 0,003% présentent des kystes liquidiens supérieurs à 20 mm.

1 819 enfants ont été identifiés comme devant subir des examens complémentaires. Pour 51 enfants âgés de 6 à 18 ans la biopsie a révélé un caractère potentiellement malin, l'ablation chirurgicale de la thyroïde a été pratiquée sur 16 d'entre eux. La présence d'un cancer de la thyroïde de type adénocarcinome papillaire a été confirmée pour ces 16 cas. Les avis sont partagés sur l'opportunité d'opérer les 35 autres enfants, la décision de les opérer dépendra d'examens complémentaires.

Selon que l'on considère les 16 enfants opérés ou les 51 cas ayant nécessité un examen complémentaire par biopsie, entre avril 2014 et décembre 2015 l'incidence annuelle du cancer de la thyroïde chez les enfants varie de 4 à 14.

La comparaison des résultats des deux campagnes de 2011-2014 et de 2014-2016 de dépistage systématique ne montre pas d'augmentation du nombre de cas de cancer de la thyroïde, ce qui n'est pas étonnant compte tenu du temps de latence de ce type de cancer.

La comparaison des résultats ne permet donc pas aujourd'hui (en 2017) de conclure si dans le futur on assistera ou pas à une augmentation du nombre de cas imputables à l'accident.

Seuls les résultats des futures campagnes de dépistage (2016-2018 et surtout celle de 2018-2020) seront en mesure d'apporter une réponse.

Cependant, et en principe, compte tenu des mesures d'évacuation préventive et de mise à l'abri, on ne devrait pas constater d'excès de cancers de la thyroïde chez les enfants par rapport au nombre des cancers spontanés relevé lors des différentes campagnes débutées en avril 2011 et avril 2014.

Dans tous les cas on devrait rester très en dessous du taux dramatique d'apparition des cancers de la thyroïde enregistré chez les enfants dans l'ex-URSS suite à la catastrophe de Tchernobyl.