

Un décryptage des 3 accidents nucléaires civils majeurs

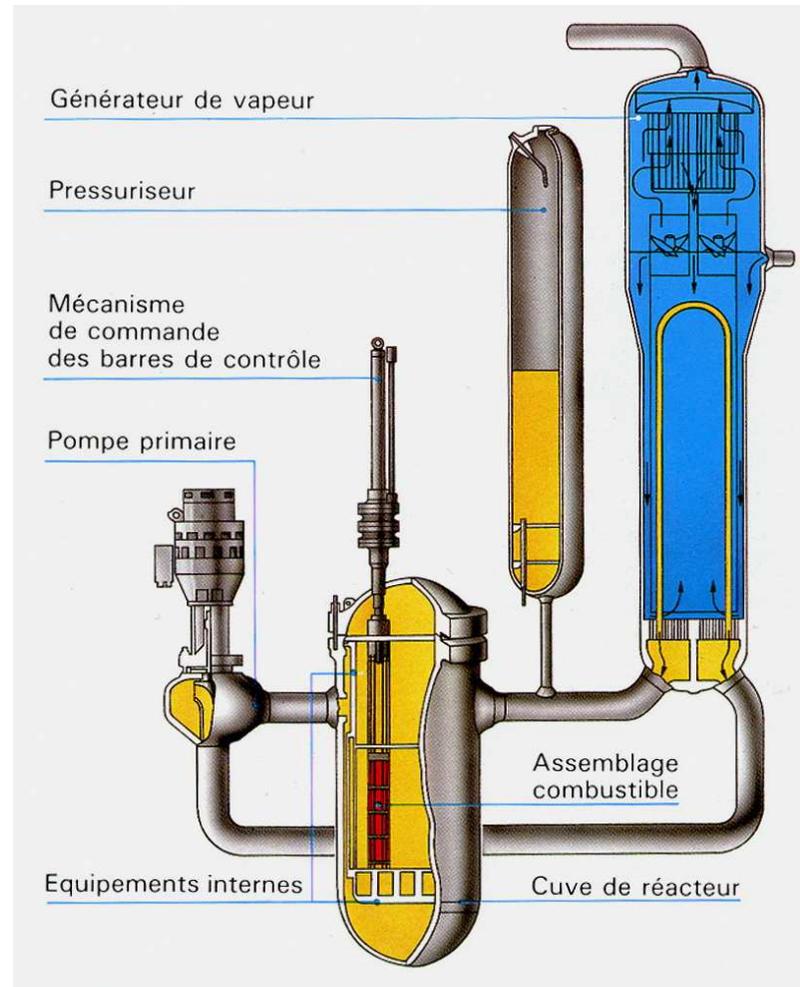
par Pierre Schmitt

SFEN RAL
22 Janvier 2020

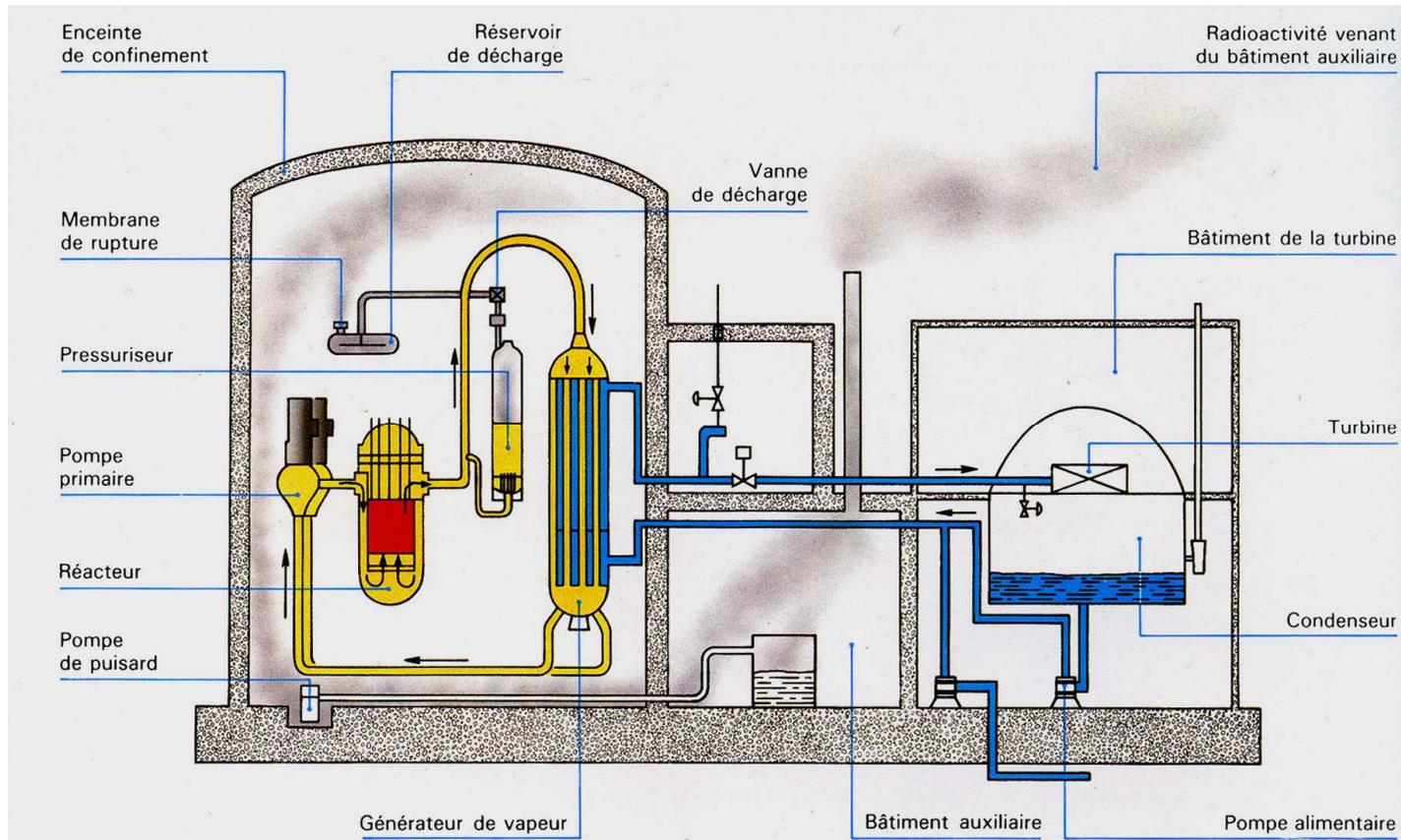
L'accident de Three Mile Island, 28 mars 1979.

Une filière à eau pressurisée non encore arrivée à maturité

Principe de la régulation de la pression du circuit primaire



Les conséquences externes de l'accident de TMI



Activité rejetée sous forme gazeuse 20 Ci (800 000 Ci sont restées confinées dans l'enceinte de confinement)

Scénario de l'accident

Défaut d'alimentation en eau des générateurs de vapeur.

Arrêt automatique du réacteur suivi d'un pic (normal) de pression du primaire.

Suite à ce transitoire, la vanne de décharge du pressuriseur s'ouvre.

Le pic passé, l'opérateur donne l'ordre de fermeture de la vanne...

Défaillance matérielle, la vanne ne se referme pas.

L'opérateur ignore qu'elle est restée ouverte (absence d'information en S d C).

Le circuit primaire se dépressurise par la vanne de décharge, la pression baisse.

$P < 110$ bars, le système d'Injection de Sécurité Haute Pression démarre automatiquement.

Dans le pressuriseur la pression chute → ébullition, formation d'une émulsion.

L'indication de niveau de l'eau pressuriseur n'a plus aucune signification.

En apparence le niveau d'eau monte dans le pressuriseur (idem le lait sur le feu !)

L'opérateur arrête l'injection pour éviter la « solidification » du circuit primaire,.

La pression continue de chuter, ébullition généralisée du circuit primaire.

Les pompes primaires brassent un mélange eau-vapeur, cavitent et vibrent.

L'opérateur est contraint de les arrêter. La puissance résiduelle n'est plus évacuée.

Fusion du cœur, réaction exothermique zirconium-eau, production d'hydrogène.

Les interrogations

Immédiatement après l'accident, les interrogations sont multiples*

A propos de la cuve du réacteur

- Quel est l'état de la cuve du réacteur ?
- La cuve est-elle percée ? Début de « Syndrome chinois » ?
- Où est le corium ?

A propos de l'hydrogène

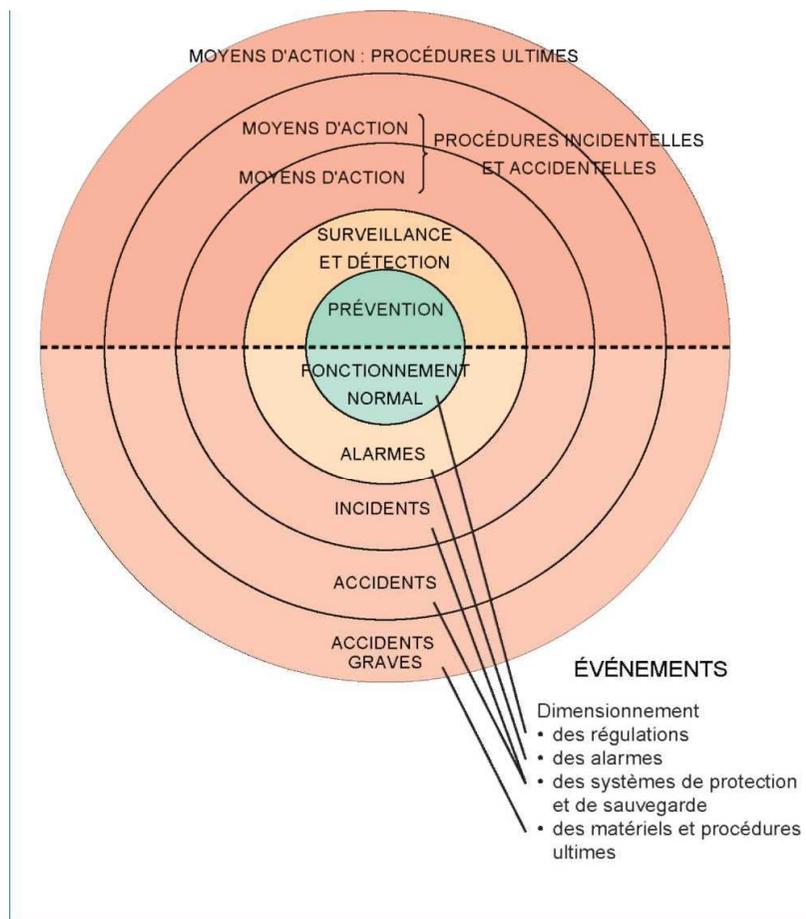
- Hydrogène, produit en quelle quantité? Où est-il ?
- Risque-t-il d'exploser ?

À propos de la tenue de l'enceinte

- Quelle serait la tenue de l'enceinte en cas d'explosion d'hydrogène ?
- Quel sera la pérennité du confinement de l'enceinte sous pression ?

* Associées aux discordances entre les informations elles sont à l'origine de la panique de la population

Amélioration de la défense en profondeur, les lignes de défense



Les 3 fonctions de base à assurer :

La maîtrise de la réaction nucléaire,
L'évacuation de la puissance résiduelle,
Le conditionnement de la radioactivité.

Les trois barrières de confinement de la radioactivité :

Le gainage du combustible,
L'ensemble du circuit primaire,
L'enceinte de confinement (le bâtiment réacteur).

La protection de l'intégrité des barrières :

La régulation générale (surveillance en fonctionnement),
Les systèmes de sécurité (retour à un état stable et sûr),
Les systèmes de sauvegarde (protection des barrières).

Les situations accidentelles :

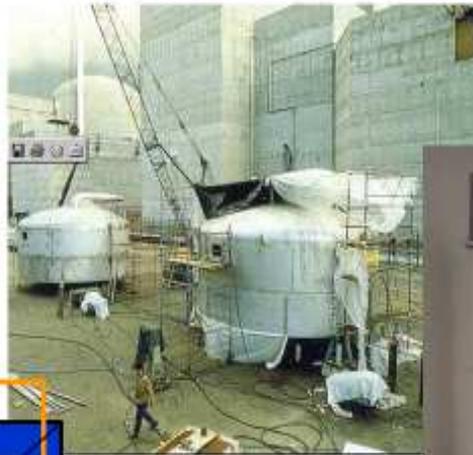
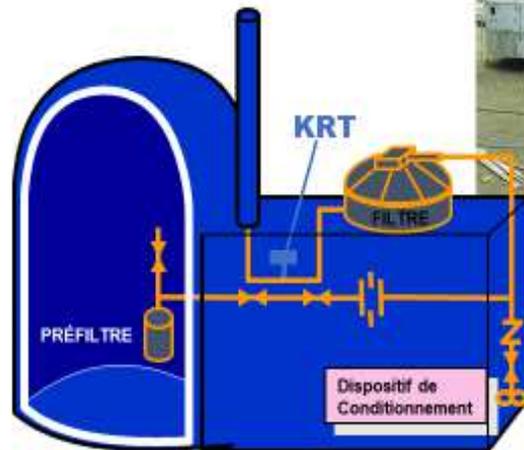
Les procédures A,
Les procédure H (perte des systèmes de sauvegarde),
Les procédure U (retard et limitation des rejets).

L'approche par état (après TMI)

Parmi les améliorations des lignes de défense

Retour d'expérience TMI

Risque hydrogène,
Dépressurisation de l'enceinte



Les enseignements de TMI

Les aspects positifs de TMI : la conception, la défense en profondeur et... l'expérience

Validation du concept de défense en profondeur (barrières de confinement et sauvegarde),

Caractère « pardonnant » du PWR / erreurs humaines,

Marges de dimensionnement (non percement de la cuve).

Conduite en situation évolutive : faire le bon diagnostic, choisir les bonnes stratégies

- Elaboration de consignes spécifiques **U**rgence et **H**ors dimensionnement,
- En cas d'accident grave, **approche par l'état** (différente de l'approche événementielle),
- **Aides aux opérateurs** : ingénieur dédié sûreté radioprotection + équipe de crise locale,
- Liaison et **soutien** à la centrale : **équipes de crise** niveau national d'EDF et ASN,
- Organisation : **Plans d'urgence** interne au site (PUI) et hors site (PPI sécurité civile).

Formation : collecte, analyse et échange du retour d'expérience, « bonnes pratiques ».

- Au niveau **local** : installation de simulateurs de formation pleine échelle...
- Au niveau **national** : services centraux (analyse du retour d'expérience, inspections...),
- Au niveau **international**, partage REX (AIEA et INSAG, l'INPO, WANO, peer reviews).

Information du public et des autorités (restera à améliorer / réseaux sociaux ..!)

- Les **commissions locales d'information** (élus locaux...), les exercices de crise
- Création par l'AIEA de l'**échelle de gravité**

L'accident de de Tchernobyl

Les deux causes profondes :

Le contexte de la guerre froide et de la course à l'arme atomique

L'incurie et le laxisme d'un système

Le nucléaire n'est pas dangereux...
tant que ceux qui le conçoivent et l'exploitent
sont convaincus qu'il l'est.

Un résumé de l'accident selon différents acteurs soviétiques

Parole d'un exploitant... avant l'accident :

« *Les RBMK c'est simple, ça se conduit comme un samovar* »...

Parole d'un chef de quart de Tchernobyl 3... après l'accident :

« *Tchernobyl est d'abord un accident soviétique avant d'être un accident nucléaire* »

Parole de Legasov (Institut Kurtchakov) à la commission d'enquête de l'AIEA :

« *A partir de 1 h du matin le réacteur fait ce qu'il veut et l'exploitant n'importe quoi* »

Parole d'un citoyen soviétique rapporté par Svétlana Aliexievitch, « La supplication » :

« *Ils savaient et ils n'ont rien fait !* »

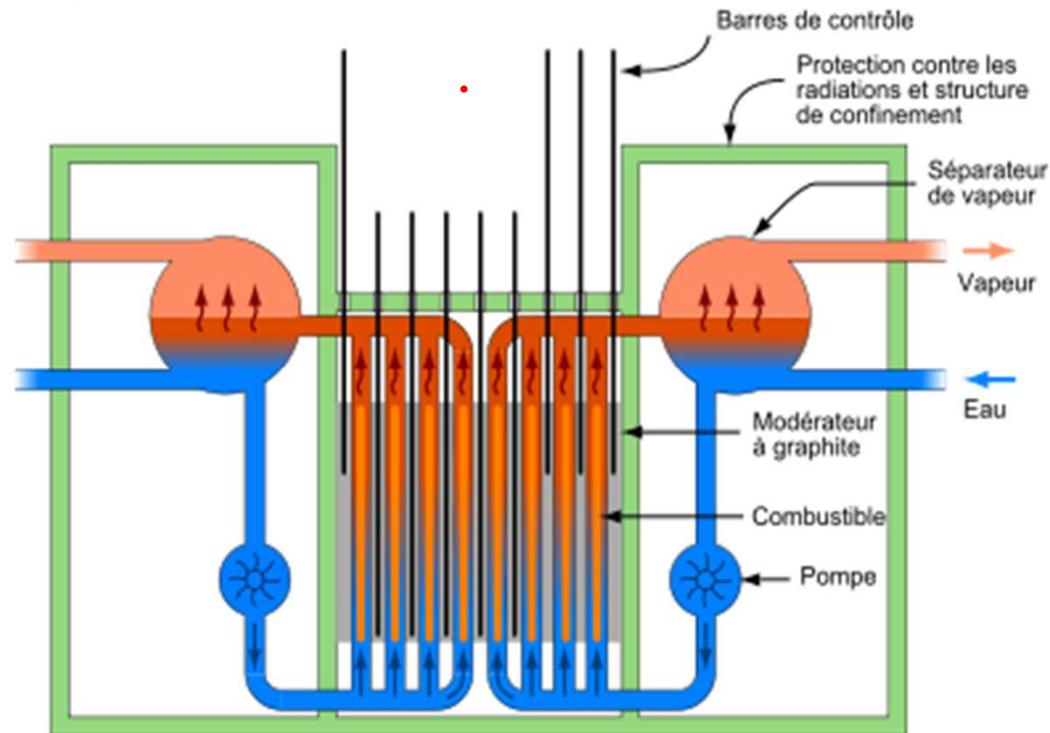
.... Tout, ou à peu près, est dit !

Les réacteurs RBMK : un étrange hybride d'UNGG et de BWR »

Combustible **U enrichi à 1,8%**, modérateur **graphite**, caloporteur **eau légère** (bouillante)

Réacteurs optimisés pour la **production de Pu 239 de qualité militaire** (contexte de guerre froide)

D'où déchargement fréquent en marche (... idem UNGG en France !) → choix tubes de force.

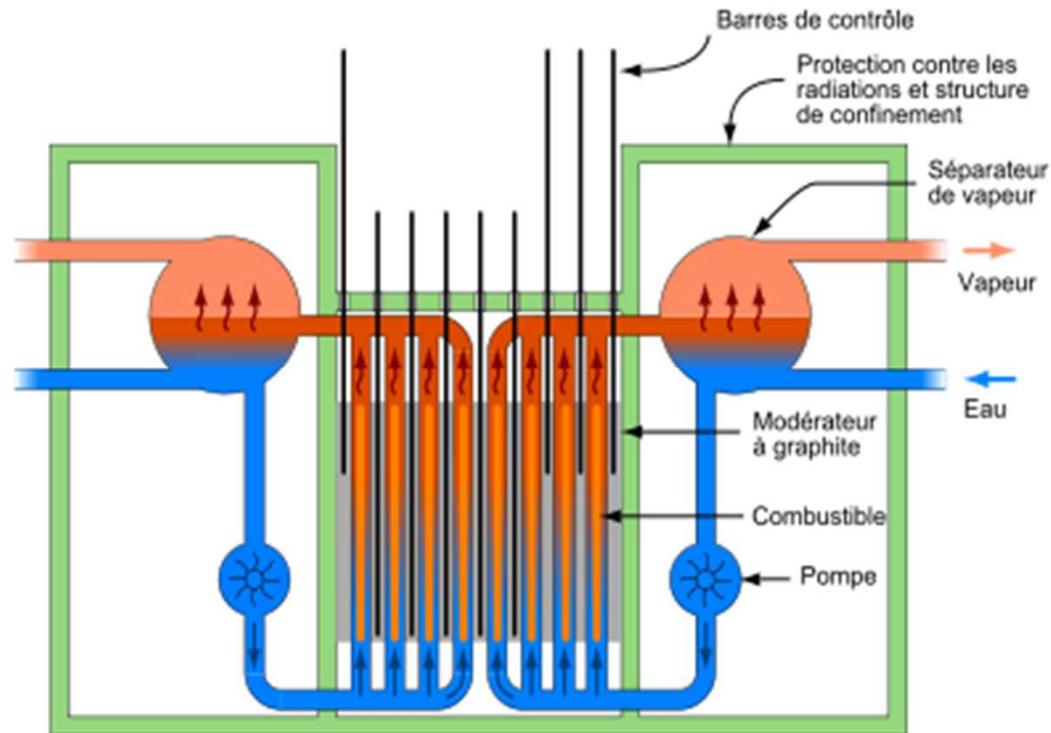


SFEN 22 janvier 2020

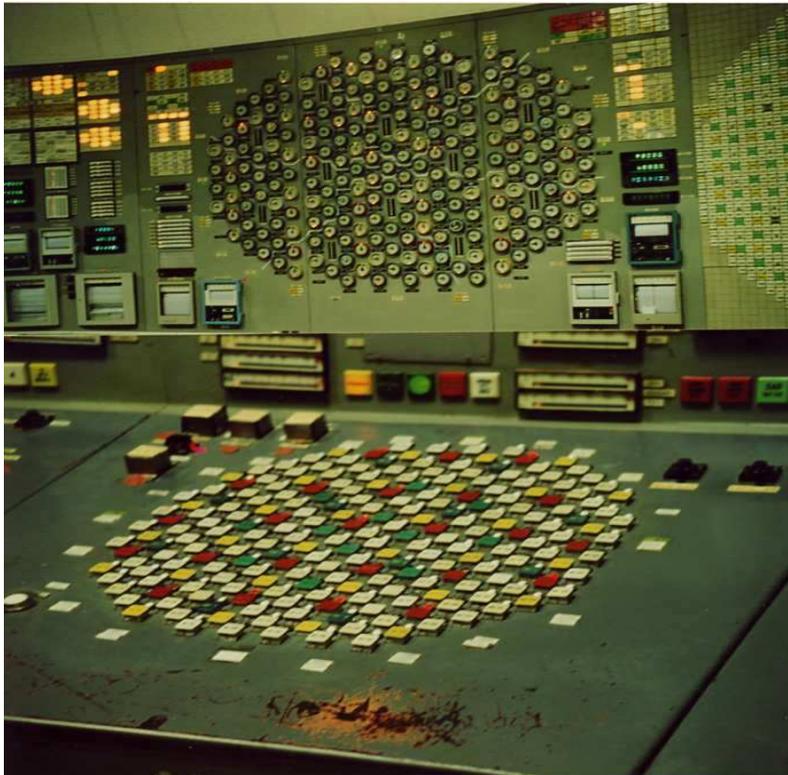
Première et principale source d'instabilité : **le coefficient de « vide » > 0**

Dans les RBMK, l'eau est plus un absorbant de neutrons qu'un modérateur,
Lors de l'ébullition (passage eau liquide → vapeur gaz), la densité de l'absorbant ↓
Effet de « vide » : si l'absorbant ↓ la réactivité et la puissance ↑

Danger si l'ébullition est mal maîtrisée...



Seconde source d'instabilité : **un pilotage complexe et « vicieux »**



*Pupitre de commande et indicateurs de position
des barres de contrôle en salle de commande*

En puissance, pilotage par ordinateur.
A **faible puissance**, pilotage manuel
gestion complexe (voir ci-contre !) →
effet : instabilité neutronique

Introduction des barres de contrôle motorisée,
Pas de chute rapide (gravitaire) →
effet : réaction lente et tardive

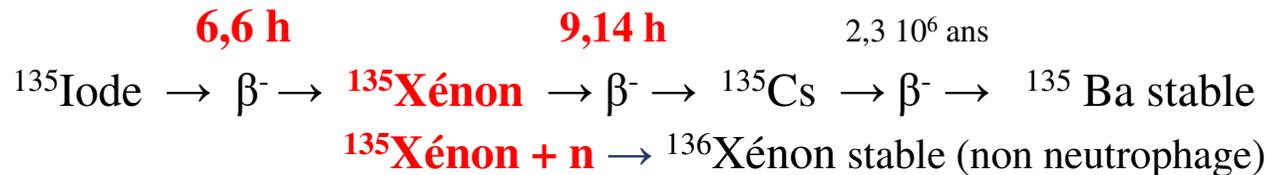
Prolongateur de barre de Cd en graphite
Au début de l'introduction d'une barre
introduction d'un... modérateur !!
effet ↗ de la réactivité !!

Le cumul des trois → effet fatal

Troisième source d'instabilité : **l'empoisonnement xénon.**

Le **xénon 135** est un produit de fission absorbant de neutrons

Réacteur en puissance, le flux de neutrons est important :



En puissance le Xénon 135 ne s'accumule pas (pas d'empoisonnement)

Réacteur à très faible puissance, le flux de neutrons est très faible :

Le xénon 135 n'est plus détruit par capture de neutrons, ${}^{135}\text{Xénon} + \text{n}$

La Période xénon 135 étant supérieure à celle de l'Iode 135 \rightarrow **le xénon 135 s'accumule, d'où « empoisonnement » du réacteur par le ${}^{135}\text{Xénon}$...**

... la puissance réacteur \downarrow pour répartir \uparrow **barres commande « très » haut...**

Avant l'accident, montée des barres hors du domaine autorisé après inhibition des sécurités

Si la puissance croit $\uparrow \rightarrow$ xénon $\downarrow \rightarrow$ réactivité \uparrow ... l'inverse de ce qui doit être !

Le « coefficient de puissance » est alors positif : risque de criticité prompte !

Un enchaînement diabolique et inéluctable

Situation initiale, avant l'essai :

Cœur fin en de cycle, peu réactif, fonctionnement prolongé à faible puissance, empoisonnement Xe.

Déroulement de l'essai

- Comme prévu par la procédure d'essai, le débit d'eau arrivant au réacteur 
- cafouillages divers, transitoire mal maîtrisé, instabilité des niveaux dans les séparateurs →
- Vaporisation importante et brutale dans les tubes de force →
- Création d'un effet de vide positif → réactivité  →
- Le flux de neutrons  → l'empoisonnement xénon 135  de + en + rapidement →
- La réactivité   de plus en plus rapidement →
- Enfin ! ordre d'insertion des barres de commande depuis la position « très » haute (interdite !) →
- d'abord insertion des prolongateurs graphite → remplace un absorbant (eau) par un modérateur →
- l'effet modérateur / capture neutrons  → Réactivité    →

Criticité prompt, en 4 secondes la puissance du réacteur \approx 100 fois la puissance nominale

Résumé : des faiblesses identifiées et parfaitement connues

« Ils savaient mais ils n'ont rien fait »

Instabilité intrinsèque

coefficient de vide > 0 , effet xénon,

- Fonctionnement prolongé à basse charge fortement déconseillé si cœur en fin de cycle,
- Multiples faiblesses de conception non corrigées par des sécurités intrinsèques ou actives.

Système de pilotage et d'arrêt vicieux.

- Pilotage manuel (211 barres), délicat et complexe : instabilités, contrôle difficile,
- Système d'arrêt lent, peu réactif,
- Barres de contrôle, introduction de prolongateurs graphite : effet positif sur la réactivité.

« Tchernobyl est d'abord un accident soviétique avant d'être un accident nucléaire »

Mode d'exploitation laxiste et fautif, un retour d'expérience censuré et inexploité.

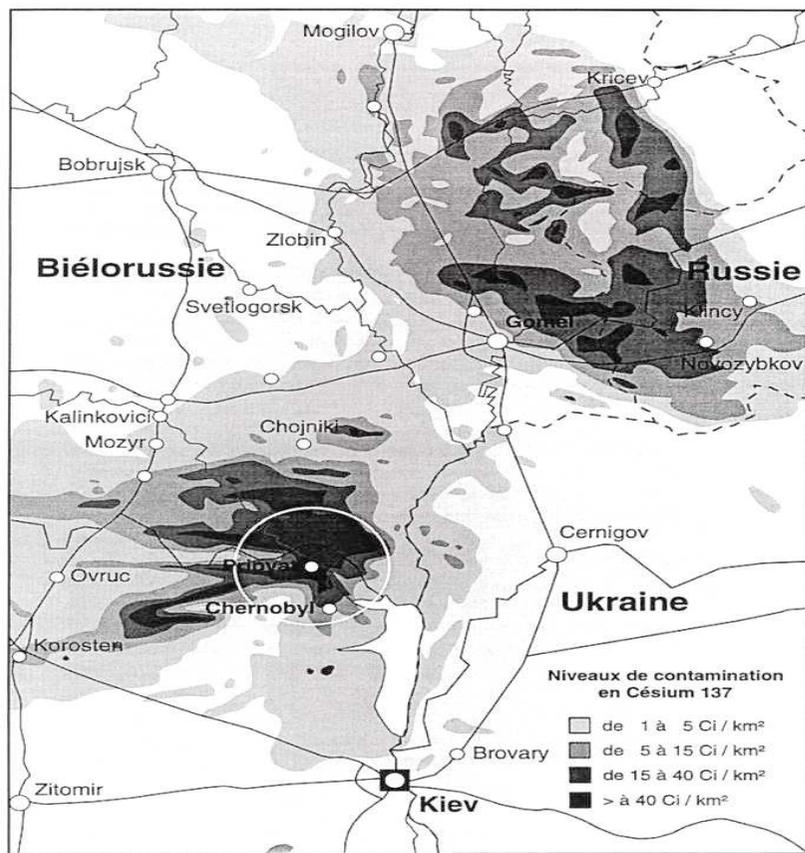
- Consignes de sureté. Connues ? Comprises ? Respectées ? Non, sciemment violées... et sur ordre !
- Utilisation abusive d'inhibitions de systèmes de sécurité,
- Censure (préservation du prestige ?) en 1981 un « presque Tchernobyl » évité à la centrale de Leningrad.



FN 22 janvier 2020



Les zones fortement contaminées, exclusion ou accès contrôlé



Zone d'exclusion :

30 km autour de la centrale

Activité > 40 Ci / km²*

135 000 habitants évacués

Zone d'accès contrôlé :

Total : 10 000 km²

Activité entre 15 et 40 Ci / km²

270 000 habitants évacués

Autres zones contaminées :

Activité de 5 à 15 Ci / km²

1,4 millions d'habitants**

Activité de 1 à 5 Ci / km²

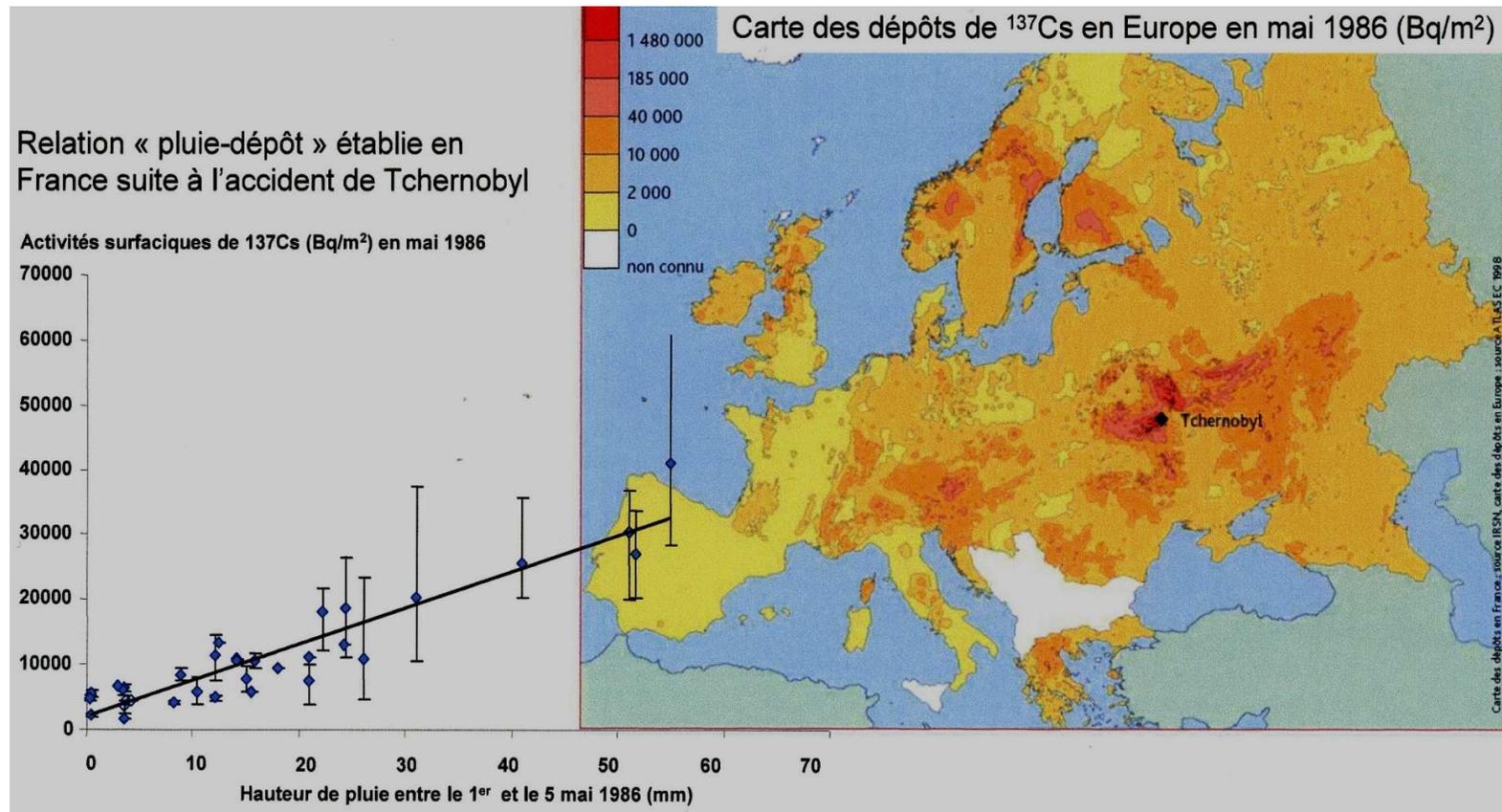
5,5 millions d'habitants**

* 1 Ci / km² ≈ dose de 1 mSv / an

** Non évacués

Tchernobyl, contamination de l'Europe (mai 1986)

Dépôts de césium 134 et 137 (T = 2 et 30 ans marqueurs) et **influence des précipitations**



Vision de l'extension du nuage sur l'Europe

SFEN 22 janvier 2020

L'accident de la centrale de Fukushima, 11 mars 2011

L'impensé, et non l'impensable, a eu lieu.

Cupidité et laxisme d'un système, mais aussi...

l'abnégation et l'ingéniosité de l'équipe intervenant sur le terrain

Tectonique des plaques au large du Japon

Subduction de deux plaques sous la plaque
Eurasienne (Japon):

- celle du Pacifique (Fosse du Japon)
- celle des Philippines (Fosse de Kanki)

Télescopage complexe de 3 plaques,
Eurasienne, Pacifique et Philippines

Vitesse de déplacement Pacifique / Eurasie
très importante : 90 à 95 mm/an

Principaux séismes pour vitesses identiques

Kamchatka 9 (1952)

Chili 9,5 (1960)

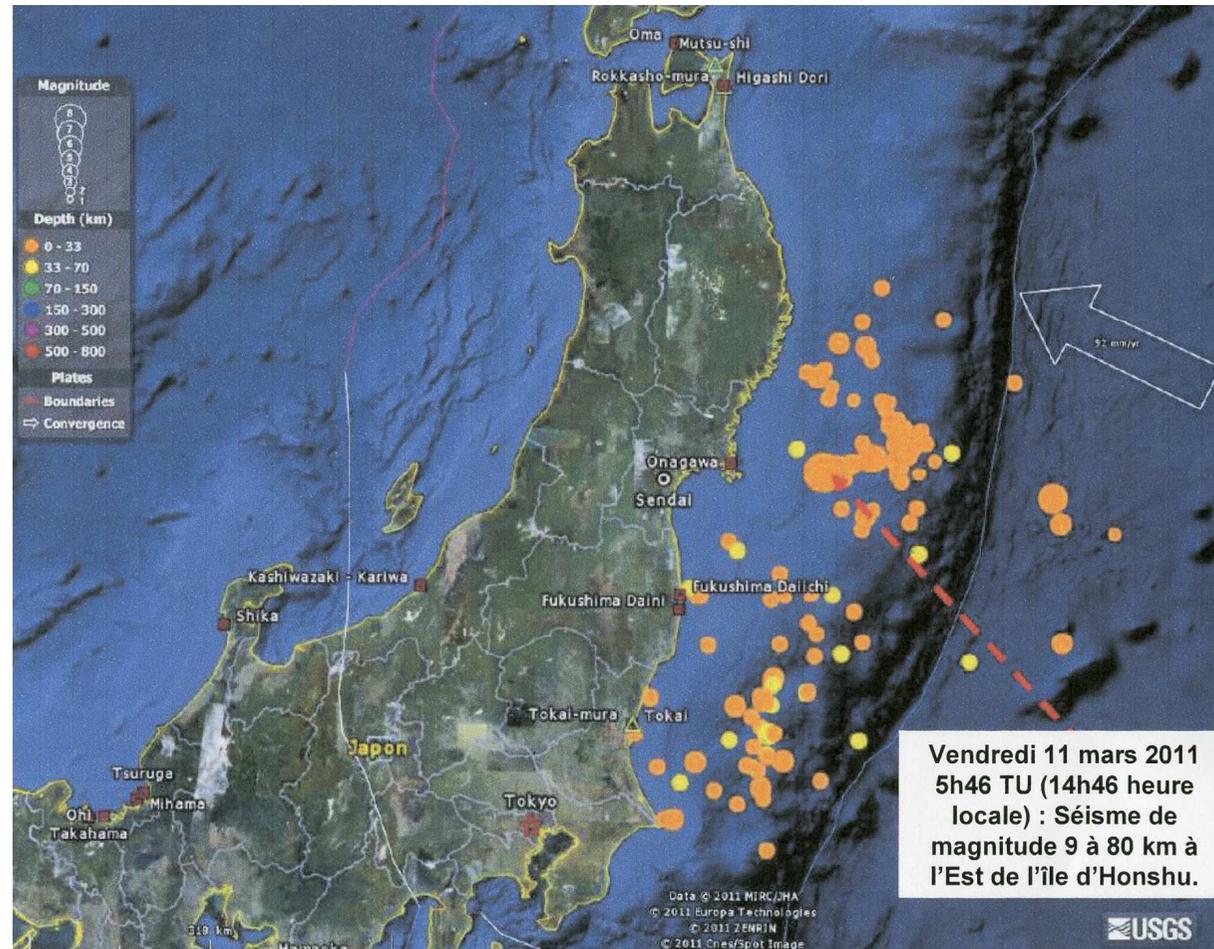
Alaska 9,2 (1964)

Antécédents Japon pour séisme et tsunami

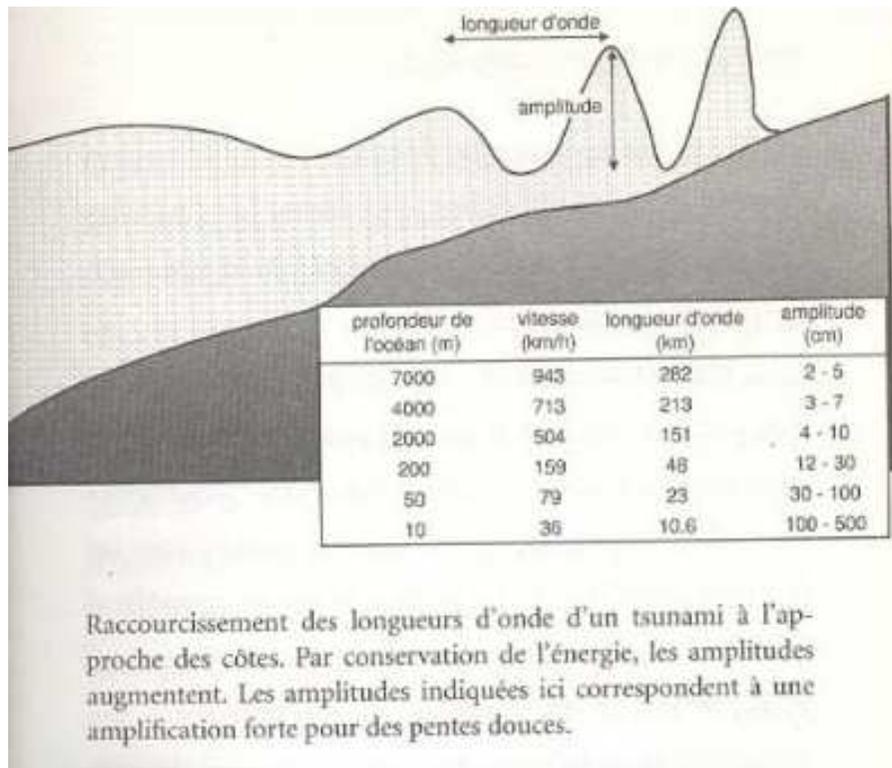
Séisme 9 en 869 et tsunami 26 000 † en 1896



Le séisme du 11 mars et ses répliques



Relation entre séismes et hauteur des tsunamis : fonction du relief des fonds.



A posteriori : **erreurs d'appréciation** de certains géophysiciens et **désaccord sur les prévisions** de magnitude maximale des séismes sur la côte Est du Japon.

En 2011, la législation pour la côte est Japon était restée à une magnitude < 8.

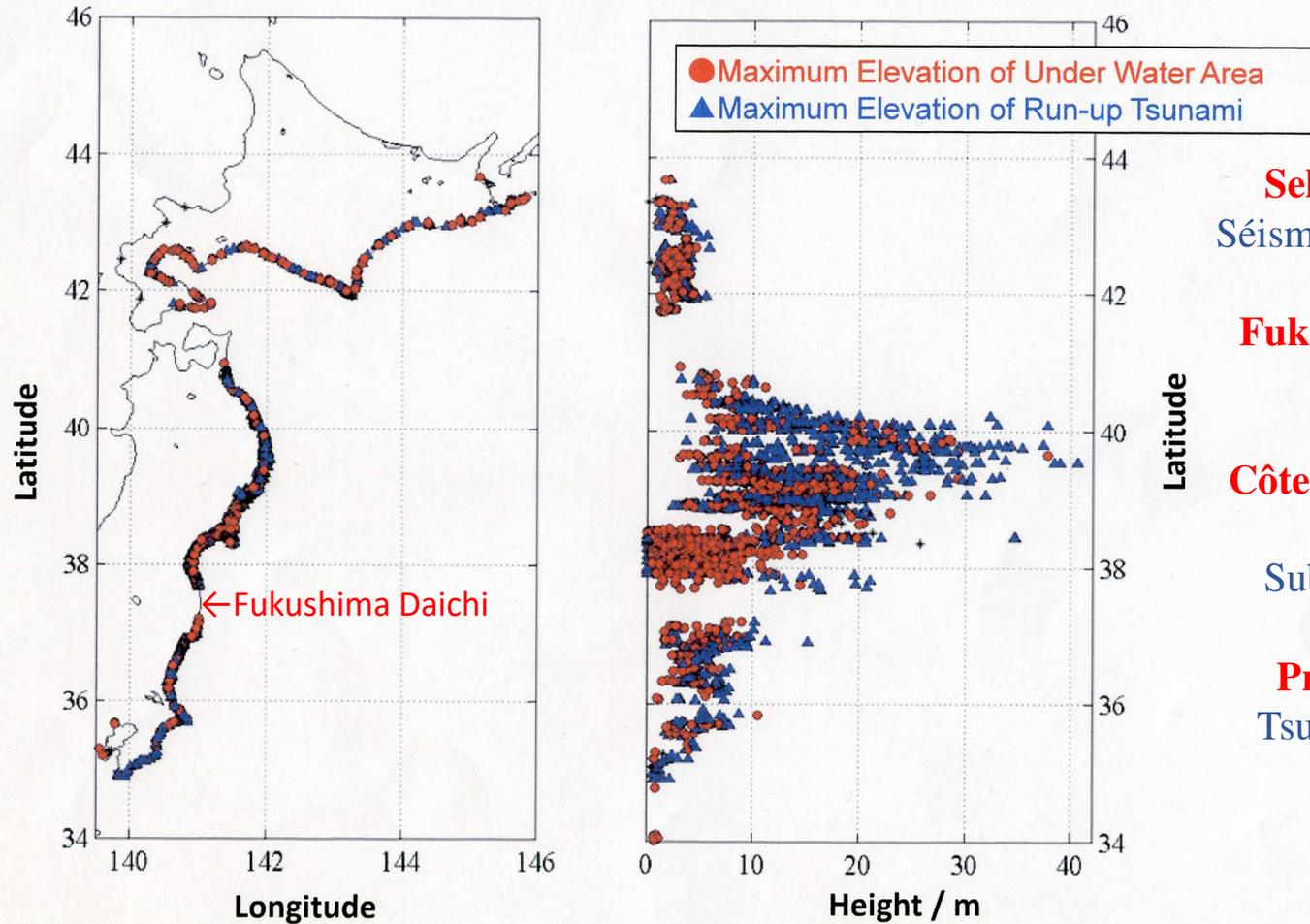
Attentisme et laxisme du gouvernement, de la NISA et de la NSC qui ne tranchent pas malgré les avis alarmistes faisant référence aux séismes de M 9 et plus dans le reste du Pacifique (la Ceinture de Feu).

Inertie cupide de la TEPCO, « *on n'investit pas dans des modifications tant que les experts n'ont pas tranché* »

NISA*, Nucléaire and Industry Safety Agency dépendant du METI, (Economie, Commerce et Industrie)

NSC** Nuclear Safety Commission dépend du 1^{er} Ministre

Tsunami after the Earthquake on March 11, 2011



Selon la réglementation 2011
Séisme région : magnitude max 7,5

Fukushima tsunami escompté :
4 à 5 m

Côte Est du Japon en mars 2001
Séisme : magnitude 9
Submersion : entre 10 et 40 m

Précurseurs dans la région
Tsunami de 1896, 26 000 morts

Avant le tsunami



SFEN 22 janvier 2020

Après



SFEN 22 janvier 2020

Vers la fusion inéluctable du combustible

SFEN 22 janvier 2020

L'arrivée du Tsunami sur la centrale

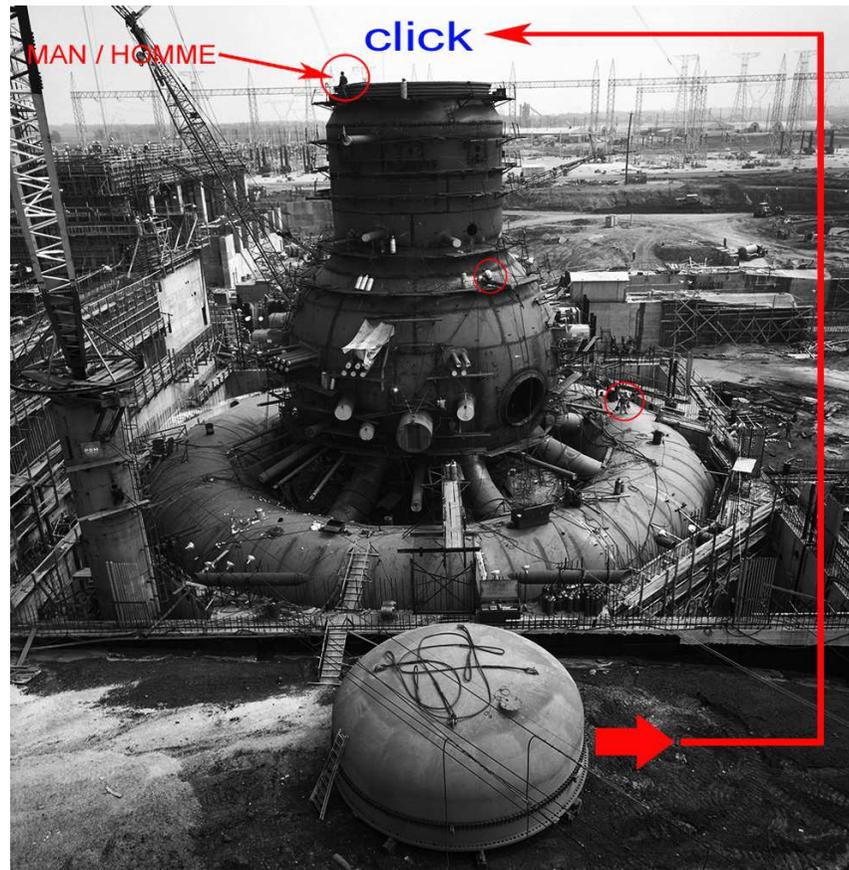


[Cliquer sur la vidéo→](#)

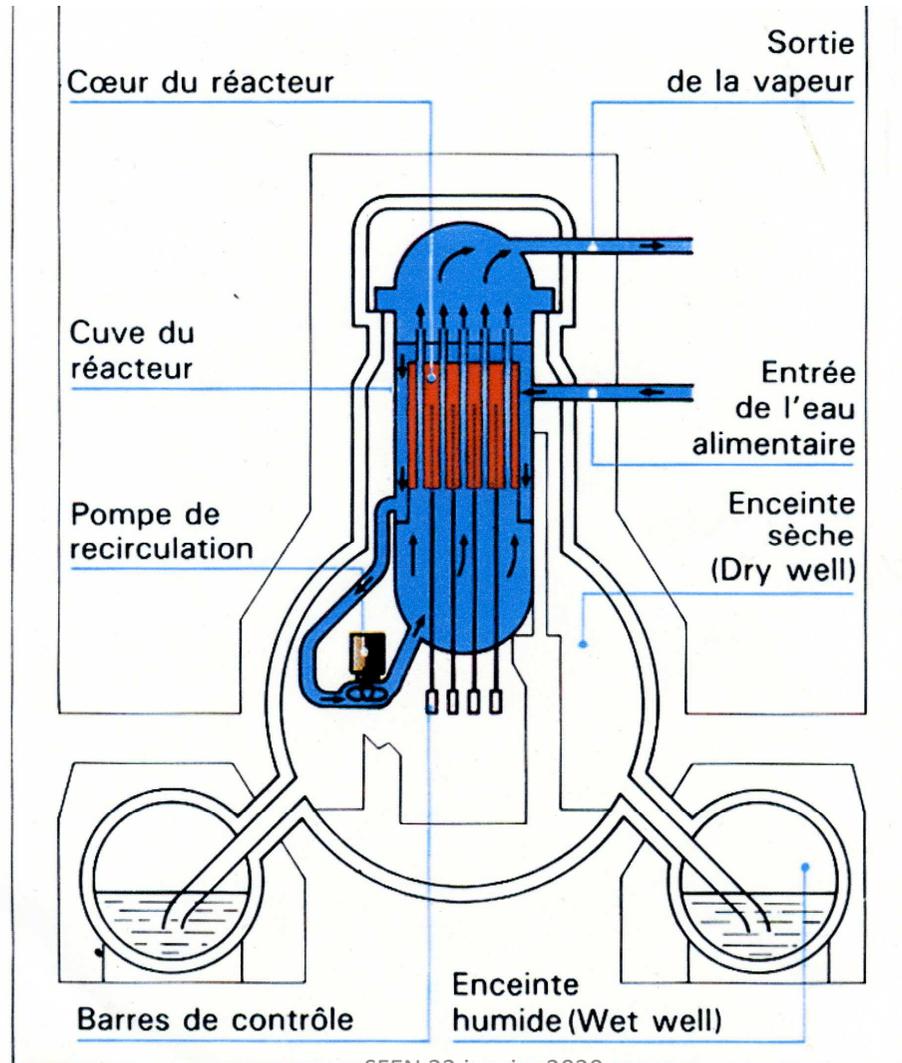


SFEN 22 janvier 2020

Enceinte de confinement (chambre sèche et toroïdale humide) en cours de construction



SFEN 22 janvier 2020



Disposition générale d'un BWR

Réacteur, cuve, cœur, barre de commande...)

Enceinte de confinement sèche

Chambre humide de forme torique

Piscine du combustible usé (en hauteur)

Partie supérieure du bâtiment (bardage)

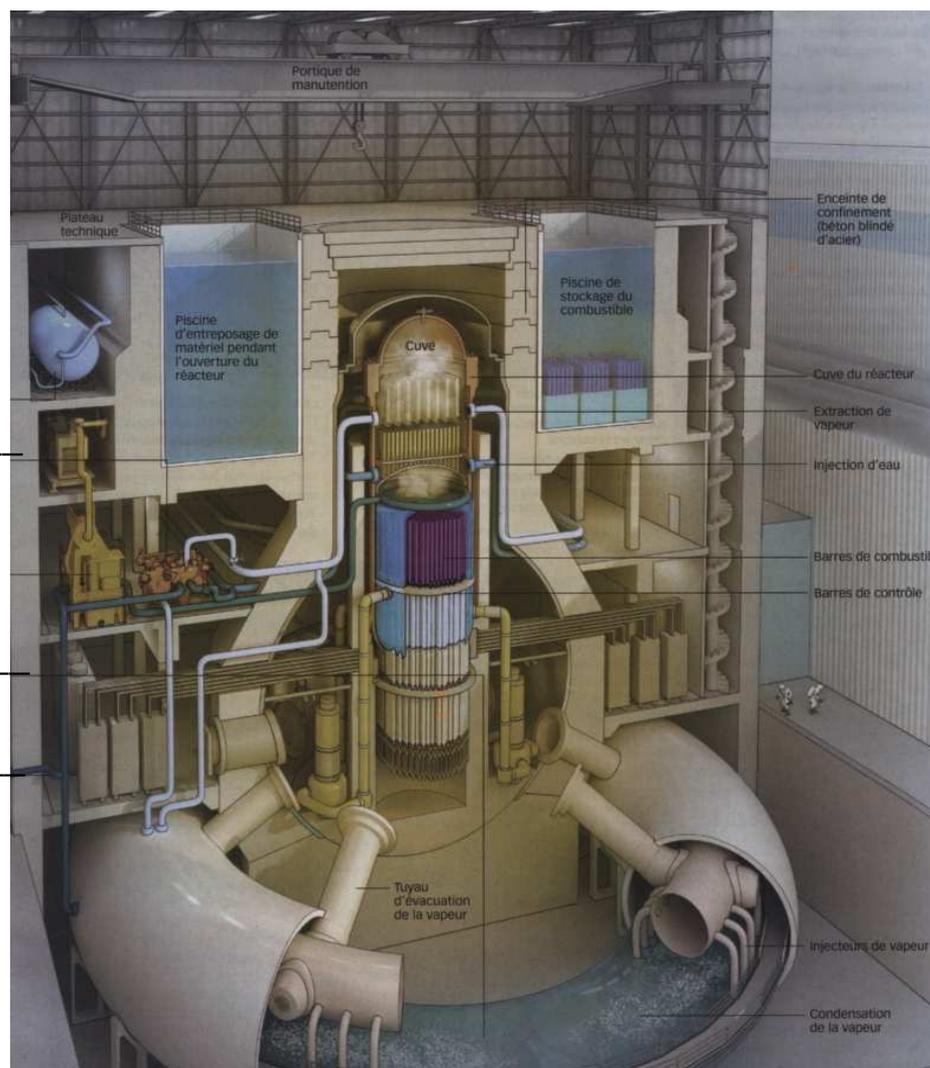
Turbopompe d'injection haute pression HPCI _____

Turbopompe évacuation P résiduelle secours RCIC _____

Chambre humide de dépressurisation, réserve d'eau _____

Alimentation en eau extérieure* _____

*utilisée pour l'injection d'eau de mer (camions pompier).



Chronologie des toutes premières heures

21 mars 2011 à 14 h 46 survenue d'un séisme de magnitude 9,1 à 160 km au large de Sendai.

Suite au séisme, à la centrale, tout se passe « normalement » sans dommage lié au séisme, Le séisme provoque l'arrêt automatique (sur signal sismique) et l'isolement des réacteurs, **Suite au séisme, effondrement du réseau général → perte de l'alimentation électrique extérieure,** Reprise de l'alimentation électrique par les diésels du site (pas d'îlotage : réacteurs déjà arrêtés).

15 h 27 arrivée du tsunami sur la centrale.

Submersion des diésels : **perte définitive de la source électrique de secours,**
Submersion de la station de pompage d'eau de mer : **perte définitive de la source froide.**

Vers 17 h c'est le « black-out ».

A partir de ce moment les **batteries vont se décharger...** sans pouvoir être rechargées (diésels out !)
Plus **aucune indication fiable** en salle de commande (température, niveaux, pression...),
Aucune manœuvre possible, autre que manuelle effectuée en local,
Aucun automatisme ou actionneur disponible (moteur, pompe, compresseur, vannes...).

« Nous étions dans un avion dont les indicateurs s'éteignent et où les commandes ne répondent plus. »

« Emotionnellement nous étions anéantis, ».

« Il était plus qu'évident qu'on allait droit à l'accident sévère, ou même pire encore »



SFEN 22 janvier 2020

- Loss of Off-Site Power Supply and EDG -

Station Black-Out

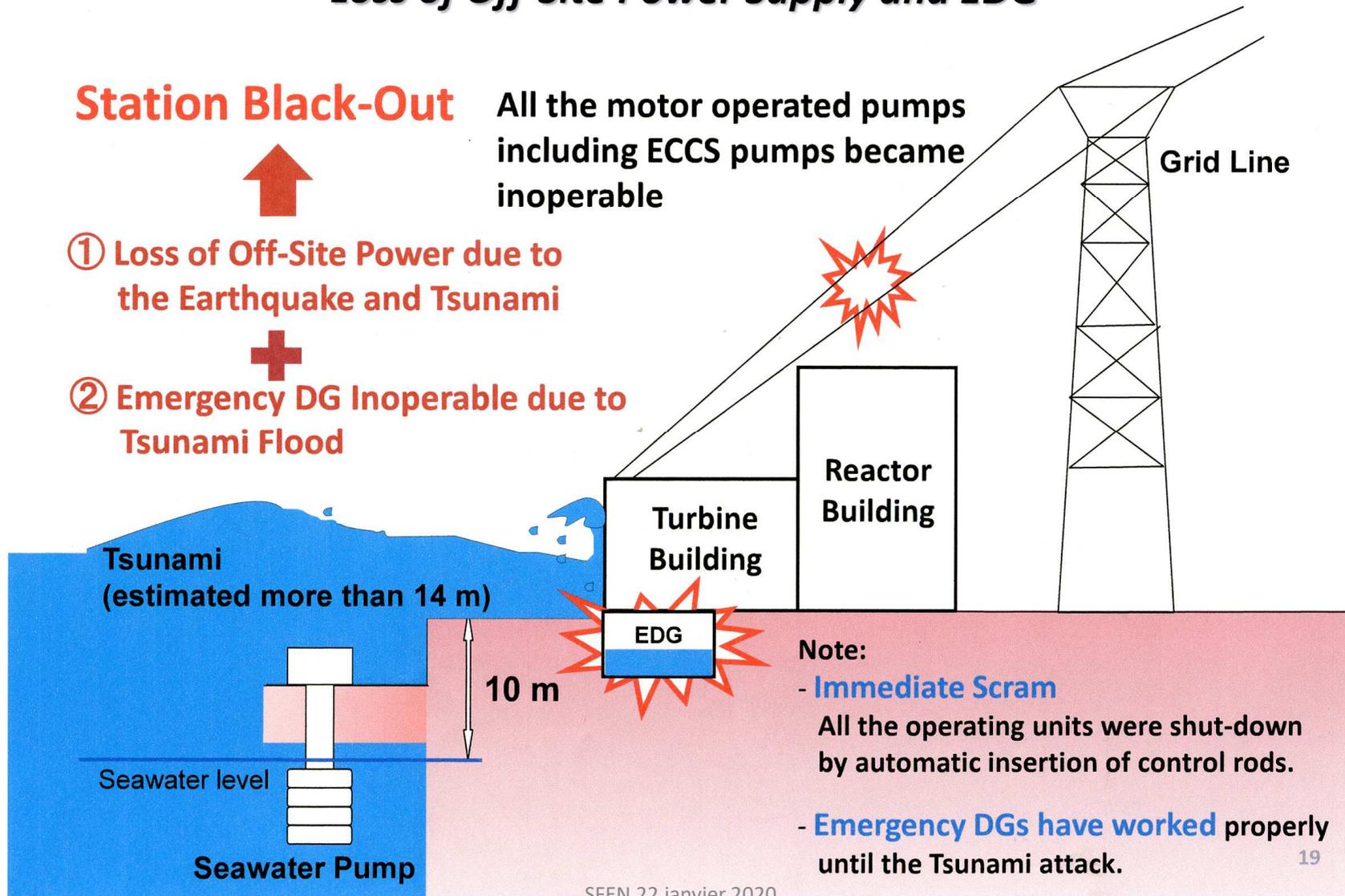


All the motor operated pumps including ECCS pumps became inoperable

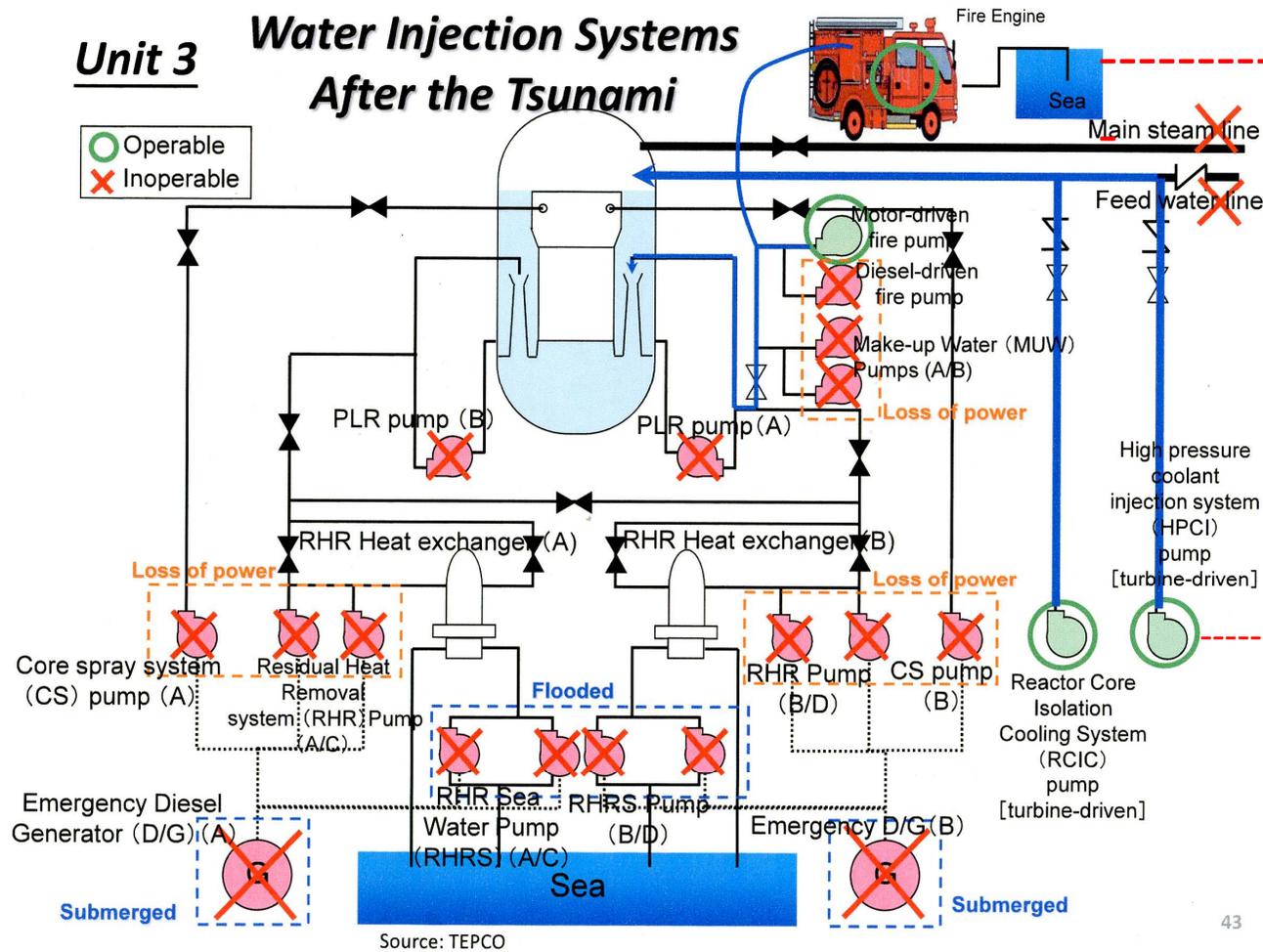
① Loss of Off-Site Power due to the Earthquake and Tsunami



② Emergency DG Inoperable due to Tsunami Flood



Unit 3 Water Injection Systems After the Tsunami



Camions d'incendie
 Pression max : 10 bar
 Alimentation eau de mer

Turbopompes d'injection
 Alimentées en vapeur
 provenant du réacteur
 (... avant leur défaillance
 suite à décharge batteries)

Pertes du réseau de distribution électrique par submersion ou suite à des défauts (isolement...)
Perte du contrôle commande, des moyens d'agir, de manoeuvrer à distance et... **de l'éclairage**



SFEN 22 janvier 2020

Evacuation de la puissance résiduelle

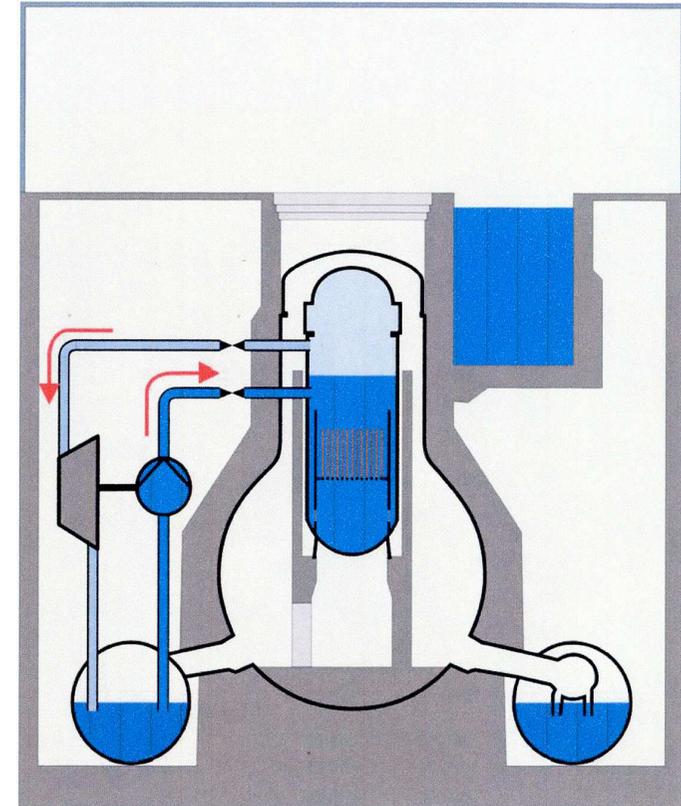
- Les réacteurs sont à l'arrêt et isolés.
- Les seuls systèmes de refroidissement restés opérationnels sont les **turbopompes** alimentées par la **vapeur produite par la puissance résiduelle**
- Les puissances résiduelles à évacuer

	R1	R2 et R3
une heure après l'arrêt :	69	118 MW
après 1 jour	8,3	14 MW
après une semaine	2,3	4 MW

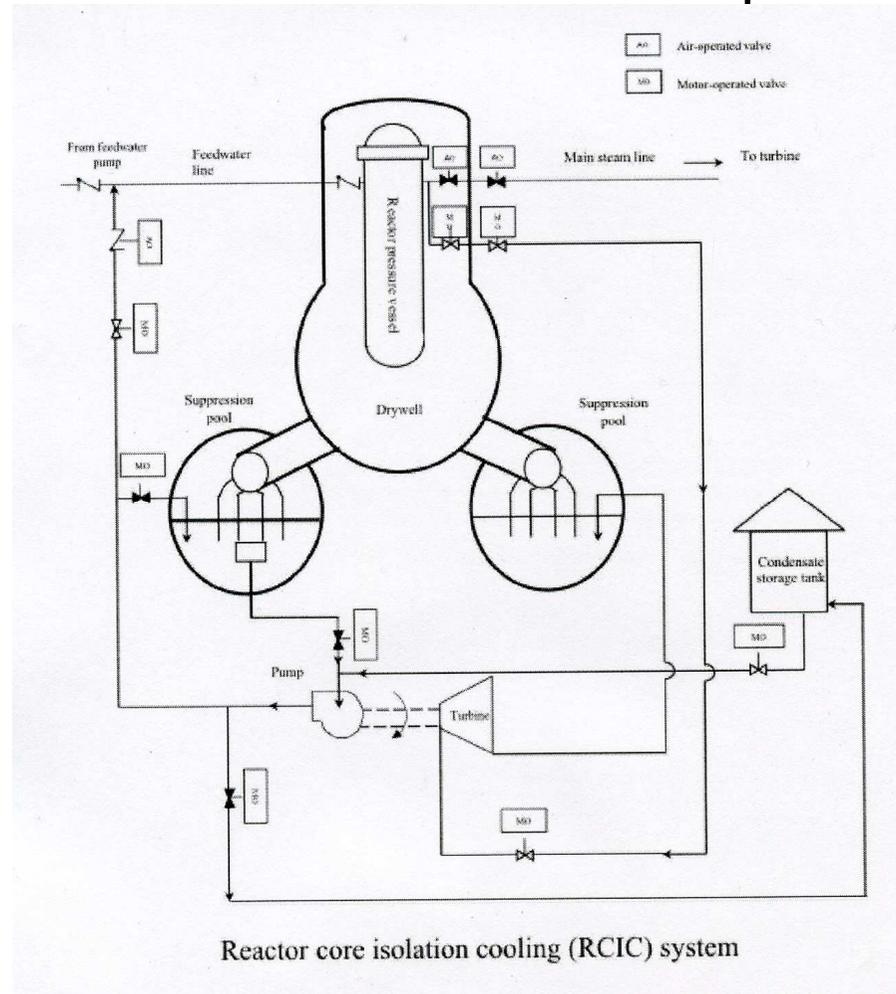
Mais

- le fonctionnement des turbopompes nécessite :
- . la **disponibilité des batteries... non rechargeables**
- . une **température basse de la chambre humide ...**

Or les chambres humides ne sont pas refroidies...



Systeme de secours d'evacuation de la puissance résiduelle



SFEN 22 janvier 2020

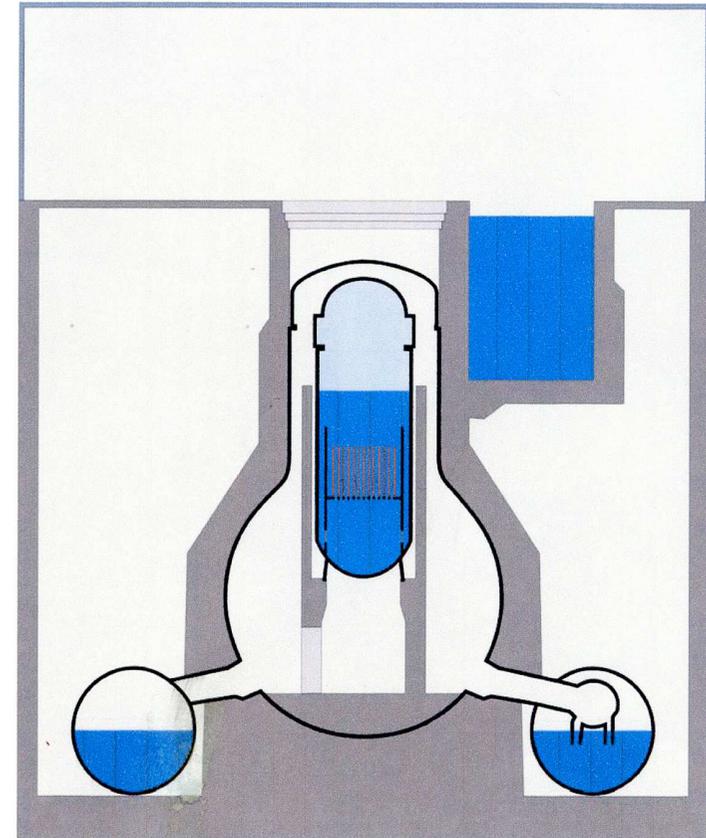
Défaillances successives du refroidissement des réacteurs

- **Réacteur 1**, le 11 mars 16 h 36
Mise en route impossible.
- **Réacteur 3**, le 13 mars à 2 h 44
batteries déchargées, arrêt de la turbopompe.
- **Réacteur 2**, le 14 mars à 13 h 25
défaillance de la turbopompe.
- **Piscine réacteur 4**, aucun refroidissement...

Suite à ces défaillances:

Températures et pressions réacteurs et enceintes ↗

La situation deviendra vite problématique
le risque est majeur,



Solution : décharger la vapeur dans la chambre humide

Priorité : baisser la pression dans les réacteurs.

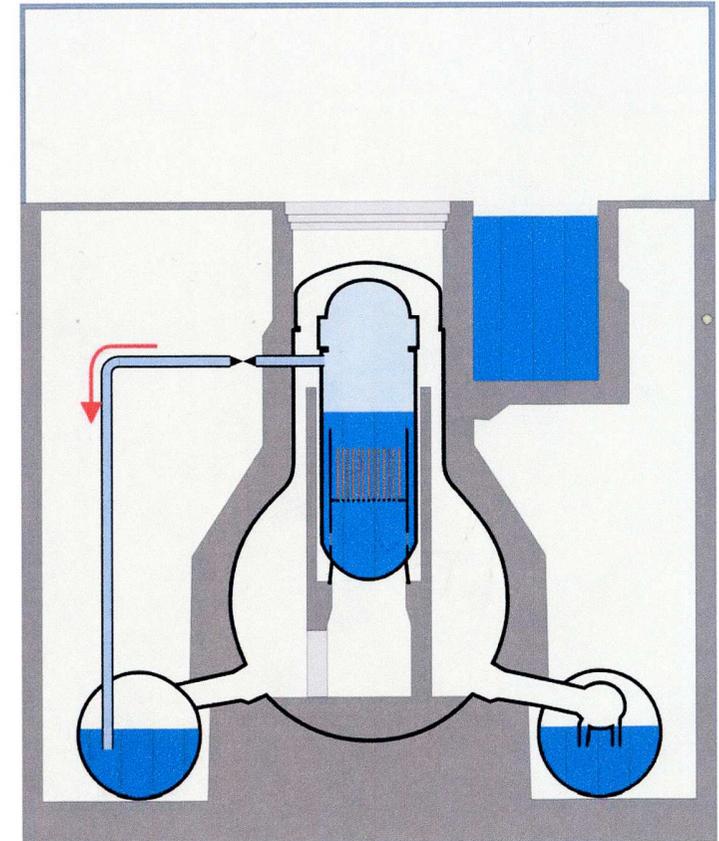
- seule solution, ouvrir la **ligne de dépressurisation** vers la chambre humide,
- où la **vapeur se condense**.

Mais, conséquences :

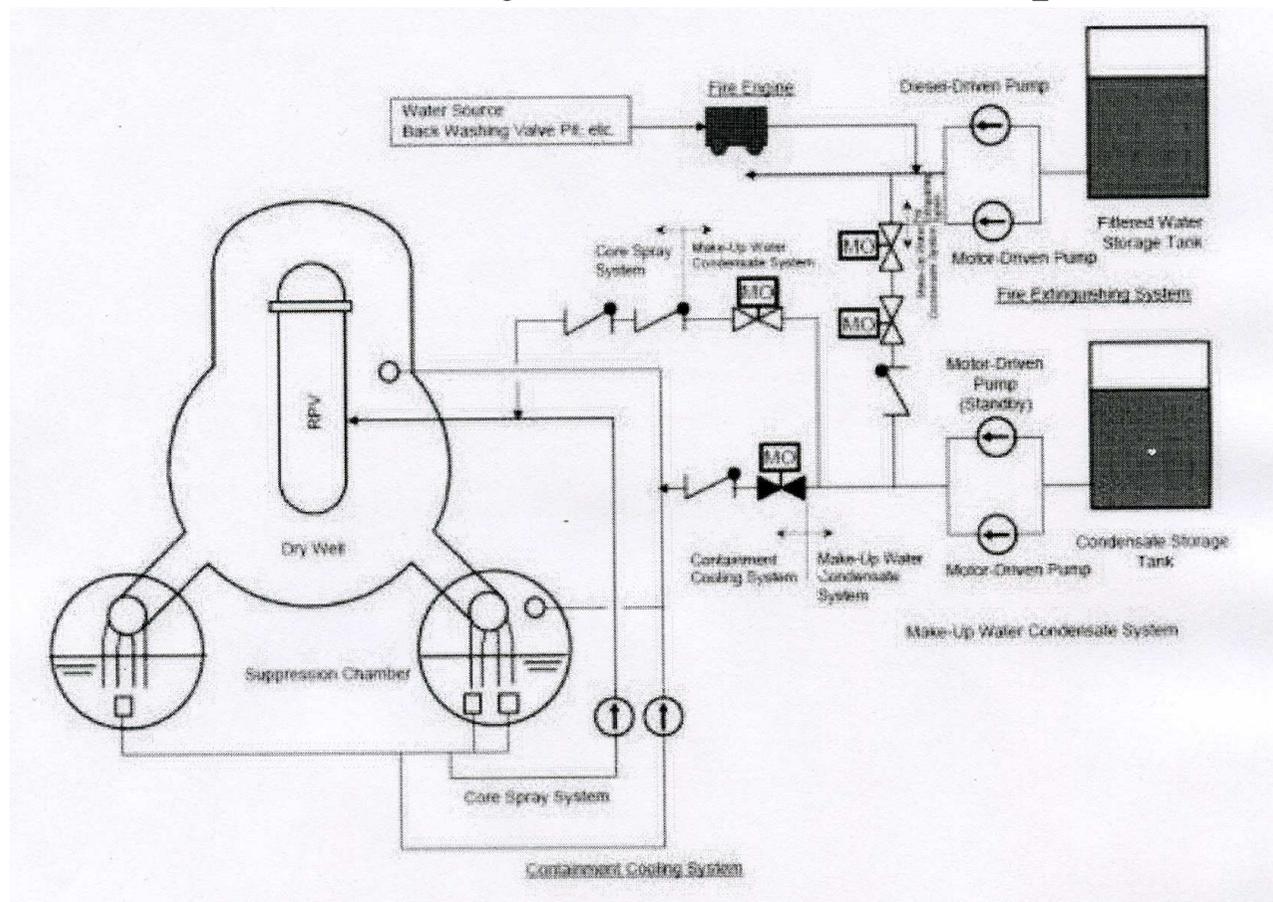
- Le **dénoyage des cœurs** par baisse du niveau de l'eau **si** on ne parvient pas à injecter de l'eau dans le réacteur en quantité suffisante,
- À terme **échauffement inéluctable** de l'eau dans la chambre humide.

Les problèmes immédiats et urgents :

- trouver de l'eau en quantité suffisante... **mais où ?**
- injecter à une pression suffisante... **par quels moyens ?**



Les ultimes tentatives d'injection d'eau et d'aspersion enceinte



« Eau de mer, obéissance à la japonaise et transgression »

Yoshida devant la Commission d'enquête parlementaire au sujet de l'injection d'eau de mer.

« Il était évident que nous arriverions assez vite à épuiser l'eau douce, la seule chose dont nous pouvions disposer de manière illimitée c'était la mer. Pour moi il était évident qu'on en arriverait à injecter de l'eau de mer; il n'y avait pas d'autre solution.

[Alors que la première injection avait déjà débuté] Le Président de TEPCO envoyé auprès du Premier ministre m'annonce que le Premier ministre n'a pas encore donné son accord concernant l'injection d'eau de mer et m'ordonne d'arrêter l'injection. Sans aucune justification, il m'a juste dit d'arrêter.

Je lui ai dit qu'on ne pouvait pas faire une chose pareille, qu'on venait juste de commencer et qu'après tout le mal qu'on s'était donné...etc. De manière très autoritaire il m'a dit d'arrêter de discuter et de stopper l'injection.

Ça m'a révolté, j'ai raccroché.

La seule chose à faire c'était d'injecter de l'eau et faire baisser la pression, il n'était pas question que je me soumette à un tel ordre et j'ai décidé de faire à ma manière.

Tous les ordres qui disaient d'arrêter, de faire ci, de faire ça, c'étaient des parasites »

Au motif qu'elle termine un « essai », la centrale poursuit l'injection commencée.

Ce que le dénouement de la crise doit au professionnalisme

L'enquêteur à Yoshida :

« Ce qui est important ici est bien de savoir combien de personnes étaient capables de **voir les choses dans leur ensemble** et si elles étaient dans une **situation leur permettant d'agir**.

Les gens comme moi [l'enquêteur] ne peuvent s'empêcher de penser que les **employés de Tepco, habitués à n'obéir qu'aux ordres et aux directives, n'en étaient absolument pas capables**, qu'ils allaient se trouver démunis face à la réalité des événements. ».

Est-ce que le système permettait d'exploiter les très grandes capacités de chacun dans un ensemble ? »

Yoshida :

Des trois centrales de Tepco, celle-ci [la plus ancienne] est celle qui a eu le plus de soucis. Ils ont largement eu l'occasion de s'y frotter, ils ont l'expérience et c'est parce qu'ils avaient cette expérience qu'ils ont été capables d'accomplir tout ça.

Je suis persuadé que nous devons beaucoup à leur ingéniosité et à leur intelligence

Malgré cela, nous en sommes arrivés là...

Conclusion de l'enquêteur : « **C'est grâce à cela que les choses ne sont pas allées plus loin. S'ils n'avaient pas été là, il n'y avait pas de raison pour que les choses en restent là.** »

Atteinte du niveau d'eau critique, dénoyage du cœur

L'injection d'eau dans les réacteurs est très aléatoire, insuffisante ou rendue impossible :

(pression réacteur supérieure au refoulement des pompes incendie, flash vapeur sur le combustible fondu, destruction des alimentations en eau suite aux explosions H...)

Le dénoyage du combustible devient inévitable

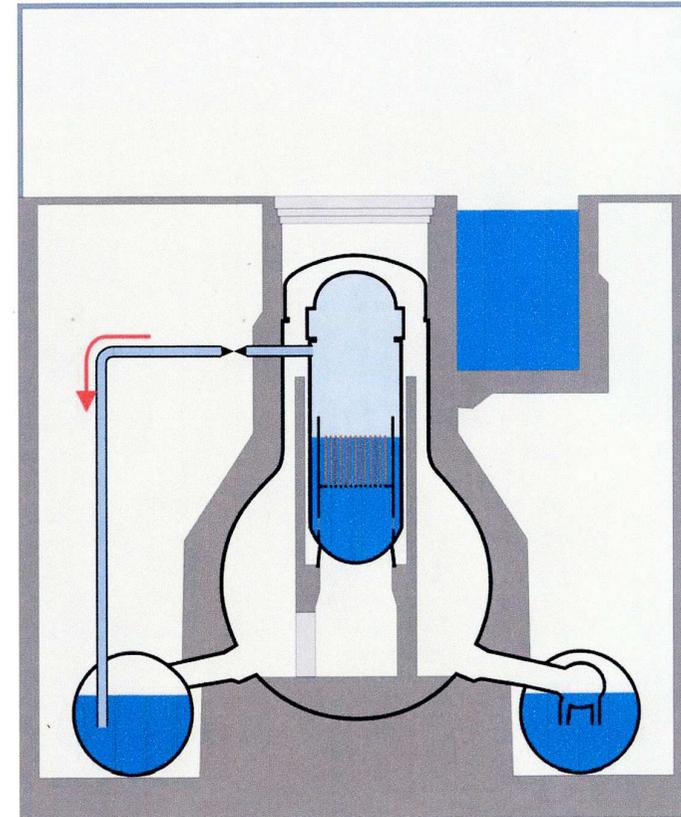
Echauffement anormal du combustible,



Rupture du gainage combustible

Dissémination des produits de fission

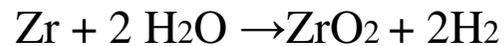
dans l'enceinte de confinement (chambre humide)



Conséquences du dénoyage du combustible

1) La production d'hydrogène

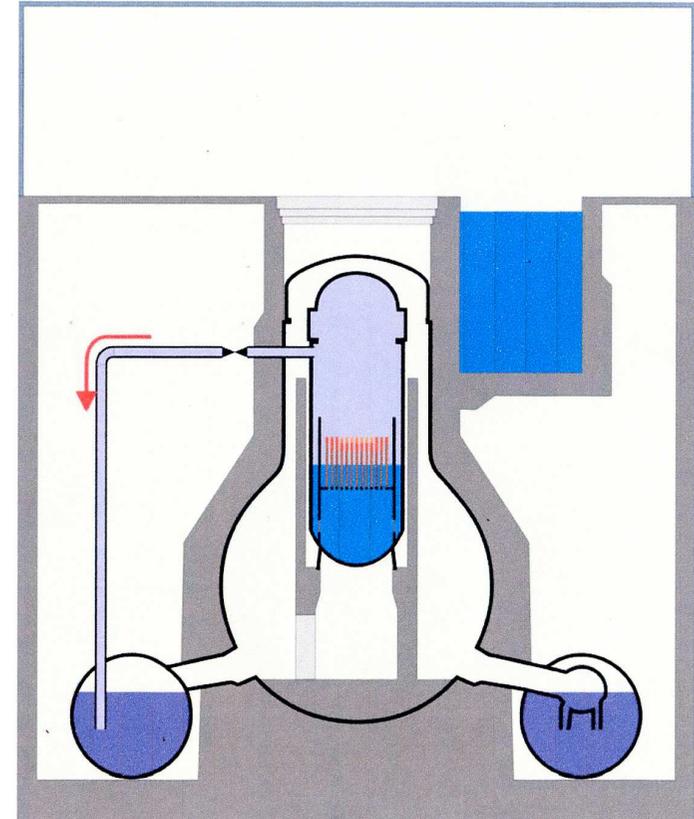
- Quand la température des gaines dépasse 1 200° C, le **zirconium des gaines** « brûle » dans la vapeur d'eau



- **production d'hydrogène**, un puissant détonnant
Hydrogène produite selon les calculs a posteriori :
réacteurs 1 ≈ 300 à 600 kg, 2 et 3 ≈ 300 à 1 000 kg

2) Le percement possible de la cuve du réacteur

La **réaction eau Zirconium** est très exothermique,
Vers 2 000°C création d'un **corium** (mélange de combustible et de structures en fusion),



Une évolution de plus en plus critique de la situation

Faute de pouvoir évacuer l'énergie :
la chambre humide entre en ébullition
la vapeur ne se condense plus, sa pression 

Pression de calcul de l'enceinte 5 bar

Risque de rupture \approx 8 bar

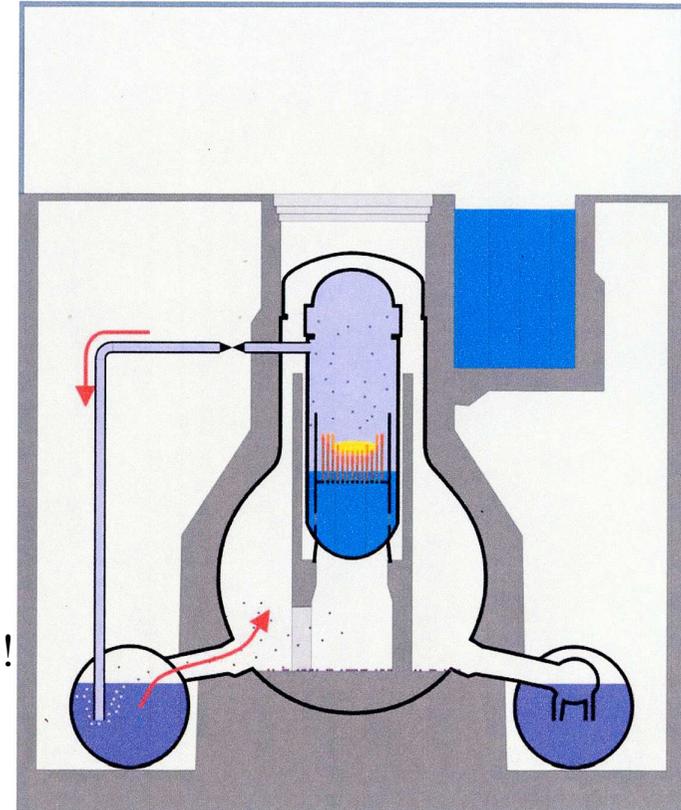
Hydrogène et radioactivité s'y accumulent...

La priorité : faire baisser la pression enceinte

Par aspersion chambre sèche?...

... limitation pression camions incendie \approx 5-10 bar !

Seule solution : dépressuriser par éventage



L'éventage solution ultime et désespérée

Concertation préalable avec les autorités :

- choix (si possible) du moment des rejets / vent,
- confinement ou évacuation des populations.

Difficultés énormes rencontrés sur le terrain,

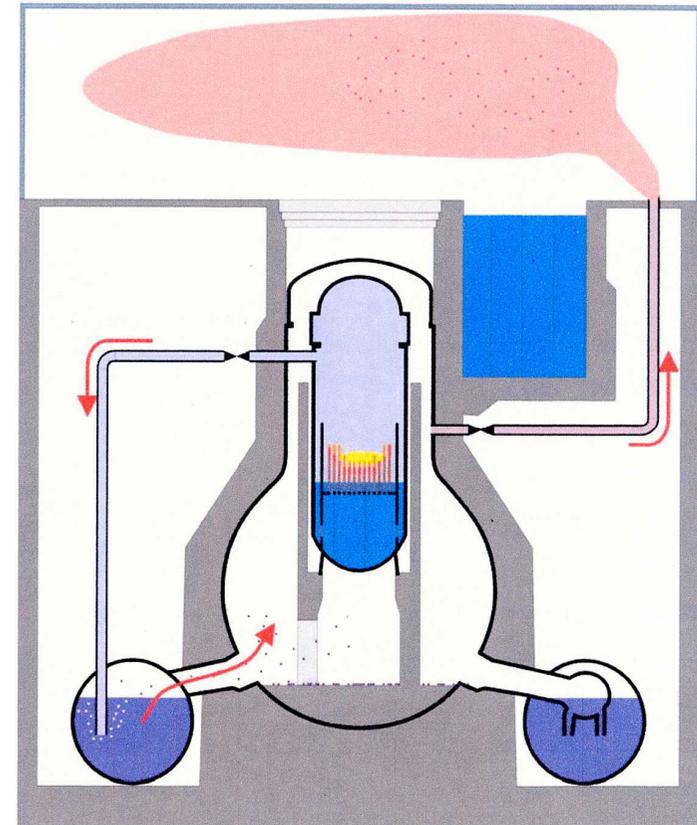
Pénibilité des manœuvres en local : chaleur, port du masque intégral, stress, aptitudes physiques...

Danger de mort omniprésent :

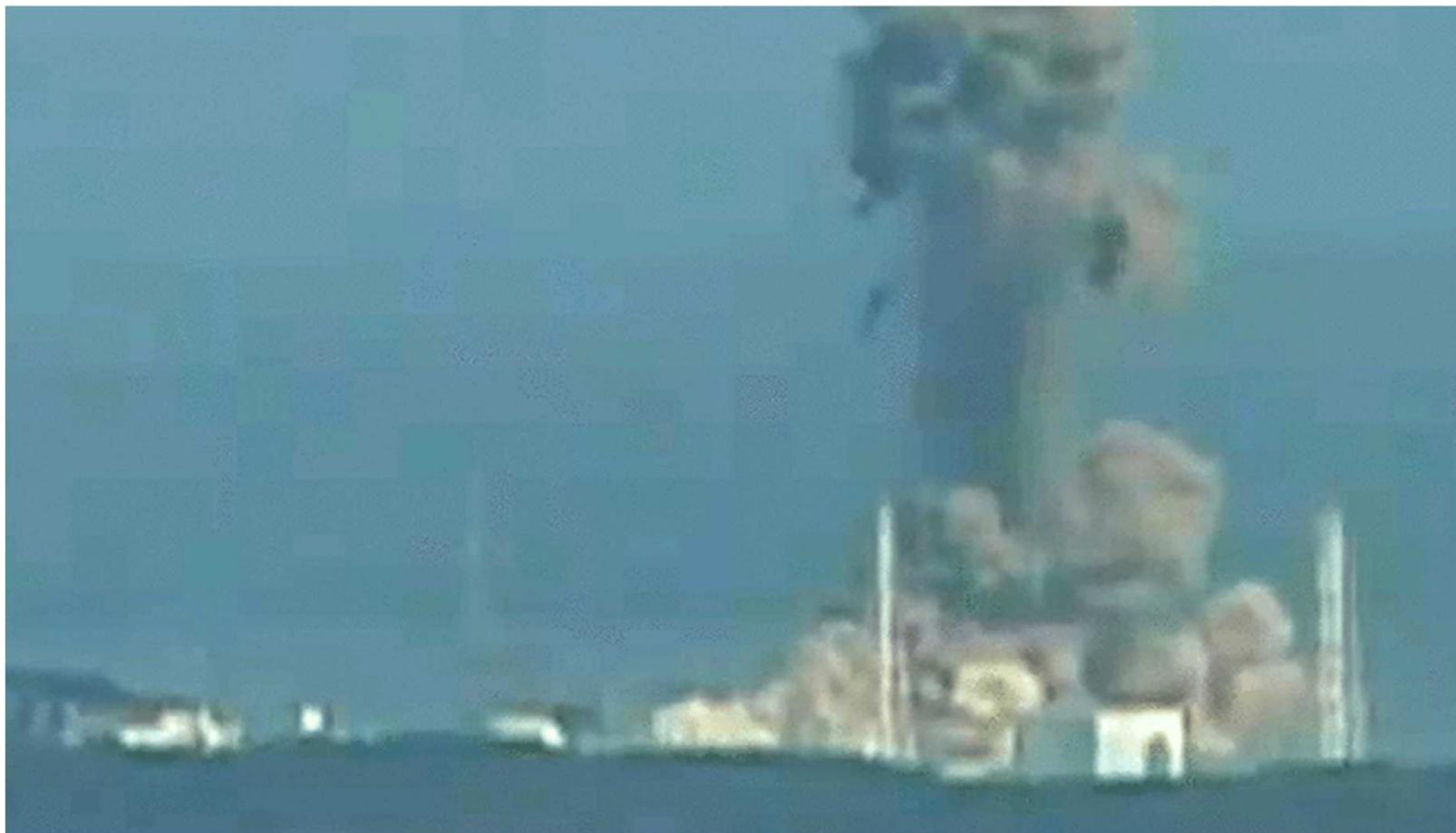
- Nombreuses répliques magnitude 7,
- 2 Explosions hydrogène (13 blessés),
- Radioactivité très élevée.
- 2 incendies

Gestion des équipes d'intervention

- Qui envoyer sur le terrain ? Capacités physiques?
- Dans quelles conditions de sécurité ?
- Effectifs : binômes + équipe secours,
- Gestion de la dosimétrie, cumul et limite de dose.



Explosion du bâtiment du réacteur 3 le 14 mars à 11 h 01



SFEN 22 janvier 2020

Etat du bâtiment réacteur 3 après l'explosion d'hydrogène



SFEN 22 janvier 2020

Le 14 Mars le bâtiment du réacteur 3 vient d'exploser... soit la deuxième explosion en moins de 48 h. Le bilan de l'explosion est lourd, 10 blessés. Le risque d'explosion de l'enceinte du réacteur 2 augmente rendant la situation de plus en plus dangereuse, tout le monde a été mis à l'abri.

Cependant la pression dans l'enceinte du réacteur 2 étant proche de sa pression de calcul, il faut impérativement « y retourner ! » injecter, injecter... coûte que coûte.

Yoshida : « *Nous savions que le combustible [du réacteur 2] était complètement découvert, que nous n'arrivions pas à dépressuriser et que l'eau n'entraît pas. Quand la vanne est ouverte et que, malgré ça, la pression ne tombe pas on se dit que **ce qui devait arriver est arrivé**. C'est le moment où j'ai vraiment touché le fond, **je nous voyais tous morts**.*

Ce qui me préoccupait le plus était la survie de tous ceux qui se trouvaient dans le bâtiment antisismique et à proximité. Je leur ai dit « Nous avons fait tout ce qui était en notre pouvoir, mais la situation devient très dangereuse. **S'il vous plait, rentrez chez vous.** »

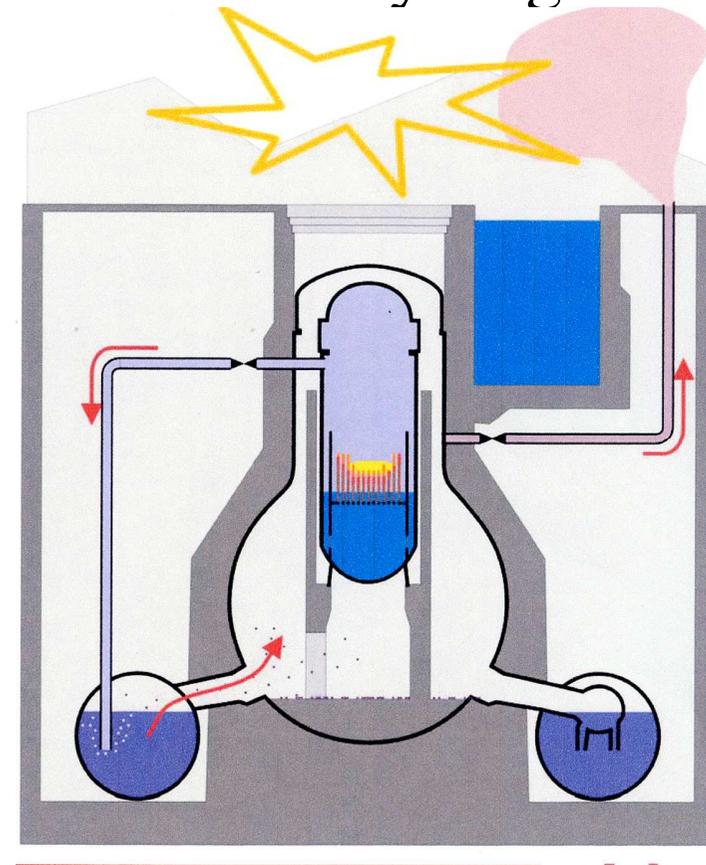
*[**Quant à ceux qui restaient pour poursuivre les opérations, les « fifties »**] Tout le monde était sous le choc, figé, incapable de réfléchir. Alors je les ai réunis et leur ai dit à quel point je regrettais de les avoir renvoyés sur le terrain [**juste avant l'explosion du R 3 !**] alors que le danger n'était pas écarté, que j'avais pris la mauvaise décision et que je leur demandais de me pardonner.*

*Je leur ai demandé humblement de retourner poursuivre au plus vite la préparation de l'injection dans le réacteur 2 [**et ce, quelques heures avant la défaillance de son enceinte et de l'incendie dans le R4 !**]*

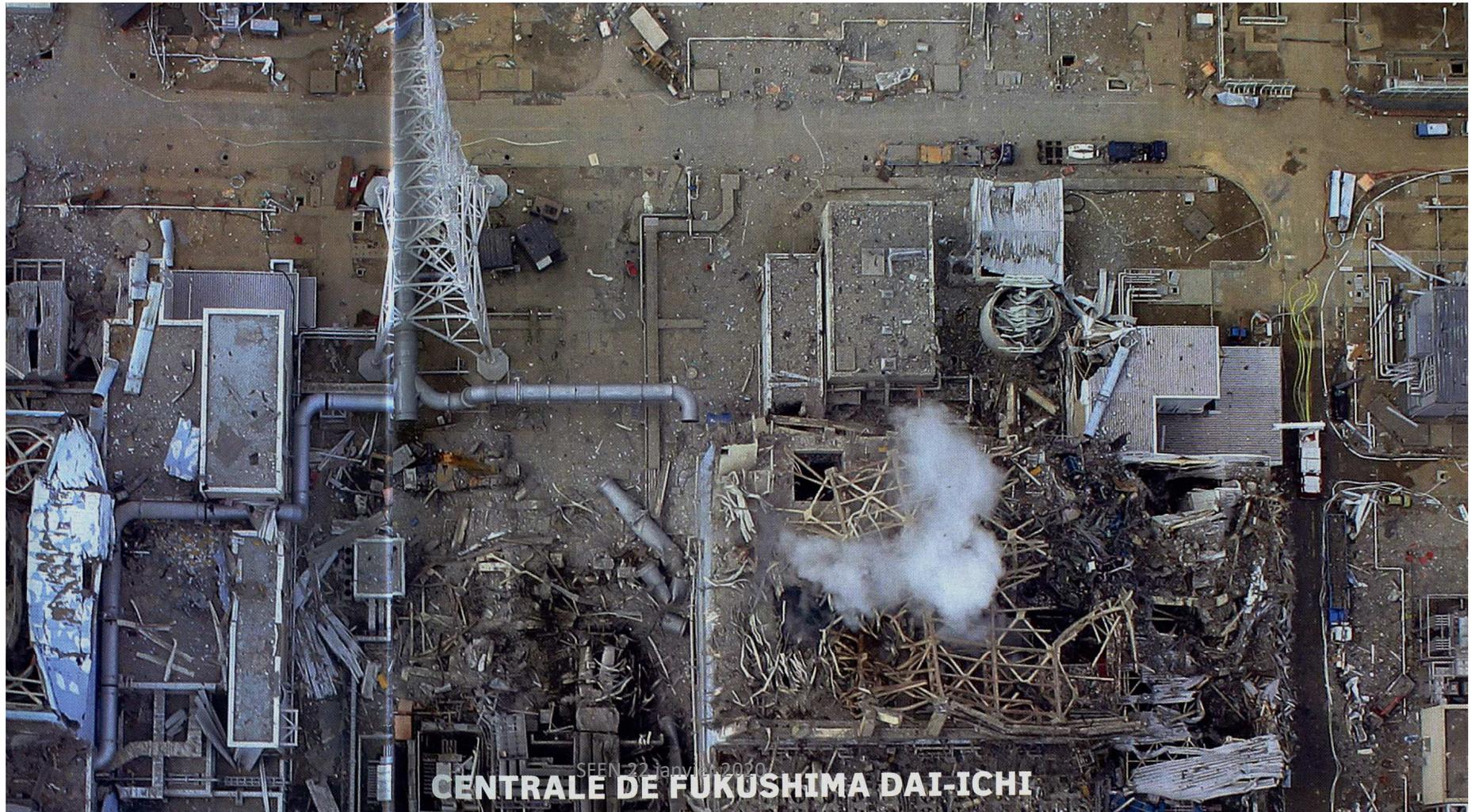
C'est à ce moment-là que j'ai vécu l'une des plus grandes émotions de ma vie. Ils voulaient tous retourner sur le terrain. J'ai dû les modérer.

Résumé des explosions et incendies dus à l'hydrogène

- **Réacteur 1** : le 12/03 à 15h 36 :
Destruction du bardage supérieur du bâtiment, spectaculaire mais impact sûreté faible,
- **Réacteur 3** : le 14 /03 à 11 h 01 :
Destruction des bâtiments réacteur 3 et endommagement de la piscine R4
- **Réacteur 2** : le 15/03 à 6 h 10
Endommagement de l'enceinte de confinement
Importantes fuites d'eau contaminée.
impact majeur sur l'environnement,
- **Piscine du réacteur 4** : les 15 et 16 /03
2 incendies et risque potentiel \approx Tchernobyl



Etat du bâtiment R 3 et liaison (cheminée) avec bâtiment R 4



Fukushima, réacteur n°4, la piscine de stockage du combustible



Piscine combustible du réacteur 4... le pire était à redouter.

Suite à l'explosion hydrogène du réacteur 3.

- Déclenchement de deux incendies les 14 et 15 mars,
- Importantes destructions du bâtiment R4 et du confinement au-dessus de la piscine.

Tenue de la piscine plus que douteuse / séismes

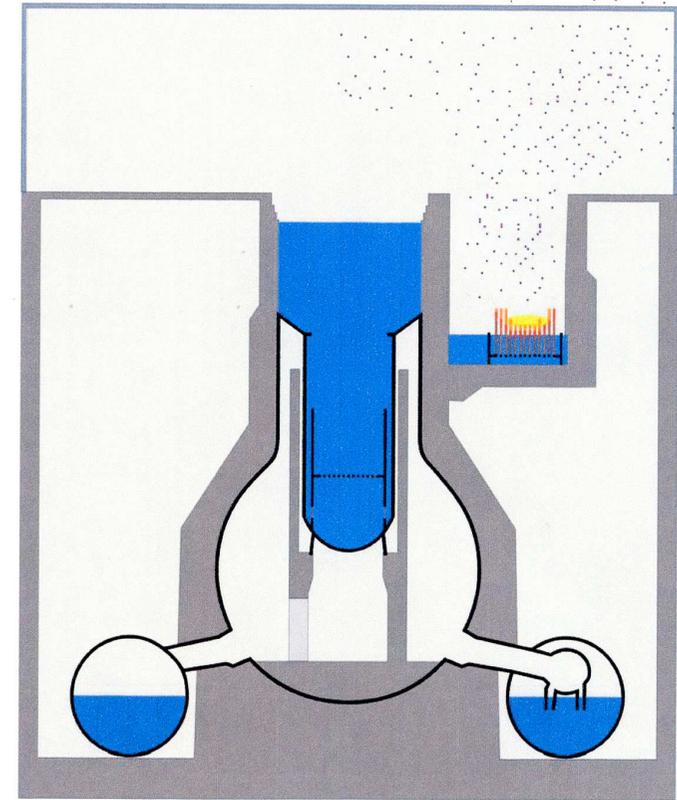
- présence sous eau du cœur déchargé du R4
- l'état du combustible est inconnu : dénoyé ? fondu ?

Rejet de radioactivité potentiel majeur

Si dénoyage du combustible → catastrophe d'une ampleur comparable à celle de Tchernobyl, avec...
à moins de 200 km, Tokyo et 38 millions d'habitants,

Noyer le combustible ! Une urgence absolue

(Opérations Pschitt-Pschitt... puis girafe)



Refroidissement de la piscine du combustible du réacteur 4

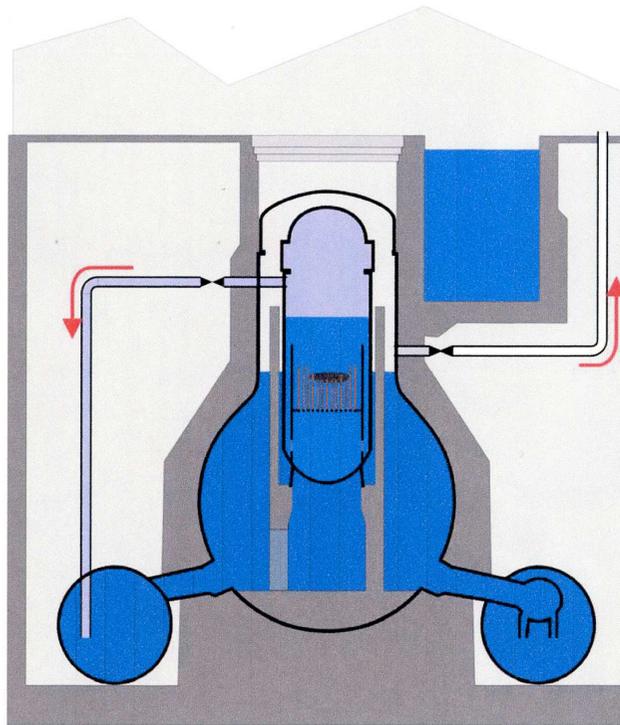


↑ Opération initiale « Pschitt-Pschitt »
à l'aide de camions de pompiers...

→
Opération « girafe » pompe à béton



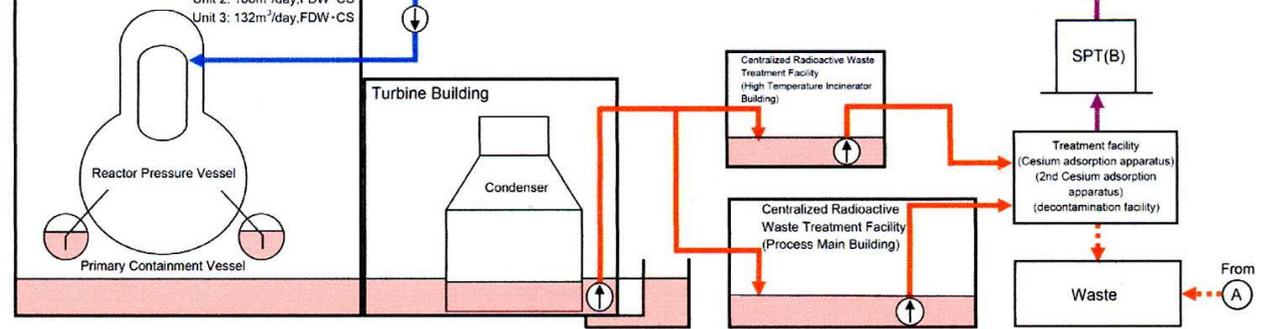
Situation actuelle des quatre réacteurs



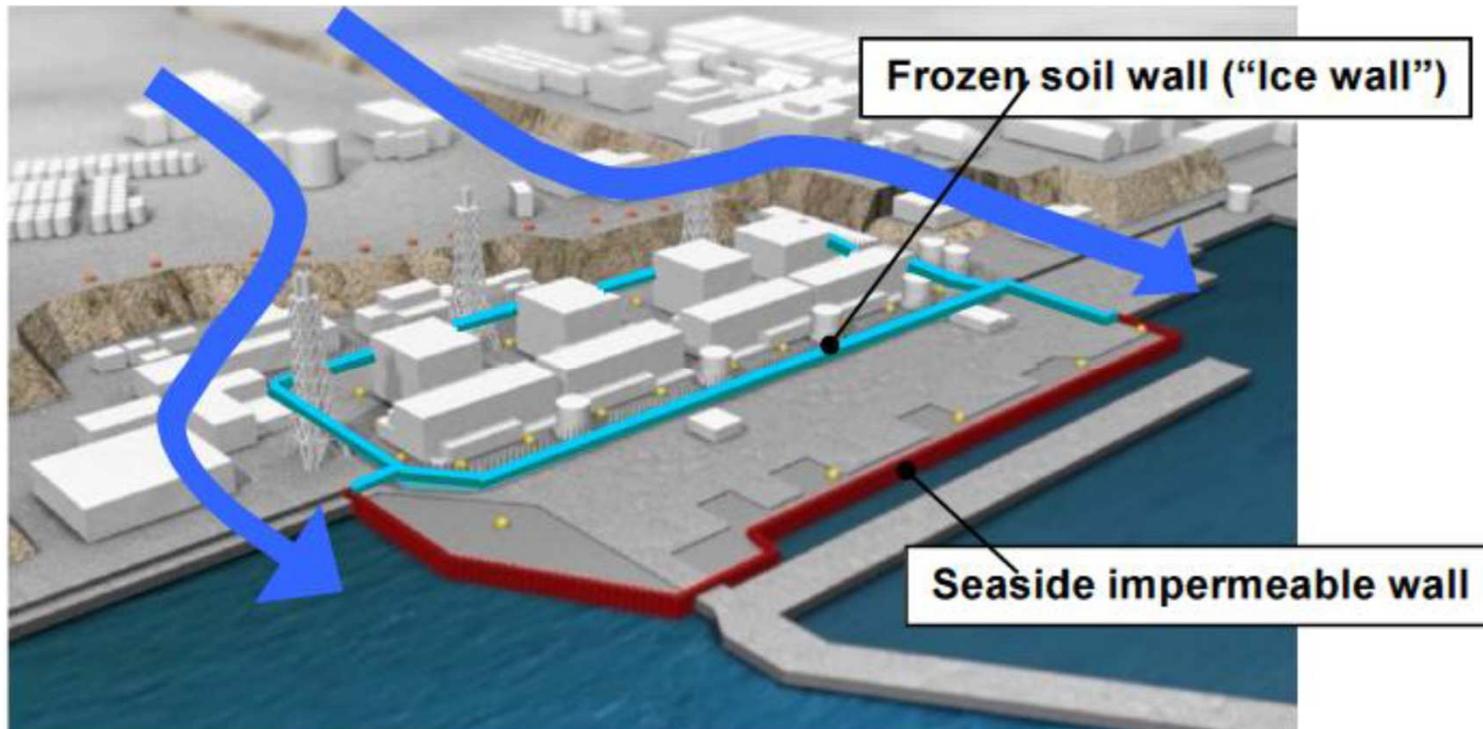
Classification		
High level radioactive water/Waste	High level radioactive water/Waste	
Treated water (saltwater)	Treated water (saltwater)	
Treated water (concentrated saltwater)	Treated water (concentrated saltwater)	
Treated water (freshwater)	Treated water (freshwater)	
Treated water from Multi-nuclide Removal Equipment	Treated water from Multi-nuclide Removal Equipment	
Freshwater	Freshwater	

Volume of water to be injected to Reactor (215-211)	Change from last report
1 Filtrate water	-
2 Treated water freshwater	+19m ³
Cumulative treated water	424,585m ³

Reactor Building
 Unit 1: 108m³/day,FDW-CS
 Unit 2: 108m³/day,FDW-CS
 Unit 3: 132m³/day,FDW-CS



Confinement du site / nappe phréatique



Stockage et traitement des eaux contaminées



Les effets biologiques des rayonnements ionisants

Pourquoi le sujet est-il si difficile à aborder ?

Ce qui est mesurable et quantifiable : trois grandeurs physiques

L'activité d'une source radioactive : le nombre de désintégrations par seconde. Unité **le becquerel (Bq)**

La nature du rayonnement : α , β , γ ou neutronique (électriquement chargé ou non)

L'énergie transmise à la matière : la **dose absorbée**. Unité **le gray**, 1 joule par kilo de matière.

La connaissance des effets biologiques ne s'obtient que par le calcul

Seul le calcul permet de passer la dose absorbée (une grandeur physique) aux effets biologiques.

Le calcul fournit un « indicateur biologique global » : la **dose équivalente (ou efficace)**, unité le **sievert**

La dose équivalente est **l'indicateur global de l'effet biologique** d'un rayonnement sur un tissu vivant.

Pour les contaminations internes : **la dose engagée** (effet cumulé sur la durée de vie *biologique*).

La dose équivalente, le calcul est complexe, il est fonction, entre autres paramètres :

de **la nocivité du rayonnement** (α , β , γ ou neutronique), le coefficient variant de 1 (γ) à 20 (α)

des **conditions d'irradiation** (irradiation unique ou répartie dans le temps, débit de dose...)

de la **localisation de l'irradiation**, répartition corps entier ou organe particulier (thyroïde...)

de la **sensibilité du tissu irradié**, elle-même fonction des personnes (enfant, adulte, hypersensibilités...)

Repères : Tissu humain : 60 Bq / kg (dû au potassium 40, carbone 14), le lait 40 Bq /litre, le granit : 1 000 Bq /kg

La radioactivité naturelle en France 2mSv/an, en Inde, Iran ou Brésil 10 à 20 mSv / an

Calcul de la dose équivalente à partir de ce qui est mesurable : le Bq !..

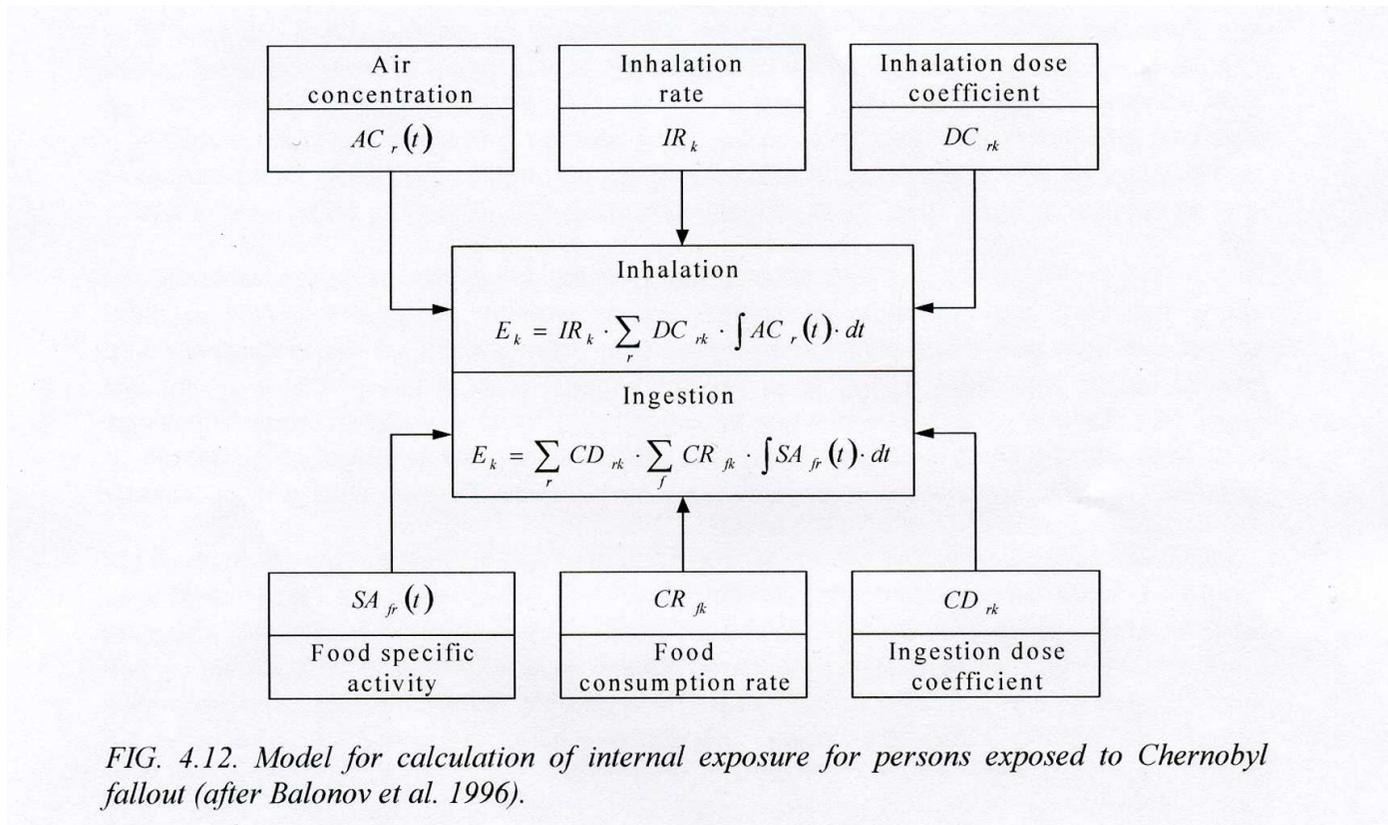


FIG. 4.12. Model for calculation of internal exposure for persons exposed to Chernobyl fallout (after Balonov et al. 1996).

Les effets des rayonnements ionisants sur l'homme

Quatre grands types d'effets

- **Les effets précoces**, n'apparaissent que pour les doses élevées > 500 mSv (accidents),
- **Les effets somatiques tardifs**, sont relatifs aux doses faibles < 100 mSv, Ils peuvent se manifester, après plusieurs années ou dizaines d'années (cardio vasculaire, cancers...),
- **Les effets génétiques**, ils concernent les descendants des personnes irradiés,
- **Les effets tératogènes**, il s'agit de l'atteinte de l'embryon ou du fœtus au cours d'une grossesse.

D'une manière générale

- **L'ampleur des effets précoces** est directement liée à l'importance de la **dose**,
- les effets précoces apparaissent manière certaine au-delà d'un « **seuil** » **$> à 500$ mSv**,
- Les effets **somatiques tardifs** n'ont **pas de caractère spécifique et leur apparition est aléatoire**

De manière conservatrice et arbitraire on considère que les **effets somatiques tardifs sont sans seuil**

La relation qui en découle, **la Relation Linéaire Sans Seuil (RLSS) n'est pas une loi biologique.**

(1) Les effets avérés aux fortes doses d'irradiation

Aux fortes irradiations correspond l'apparition d'effets observables, avérés, non aléatoires

- Ils **apparaissent systématiquement** dans un délai de quelques heures à quelques semaines.
- Leur **gravité** est fonction de la dose efficace reçue.

Pour une irradiation du corps entier :

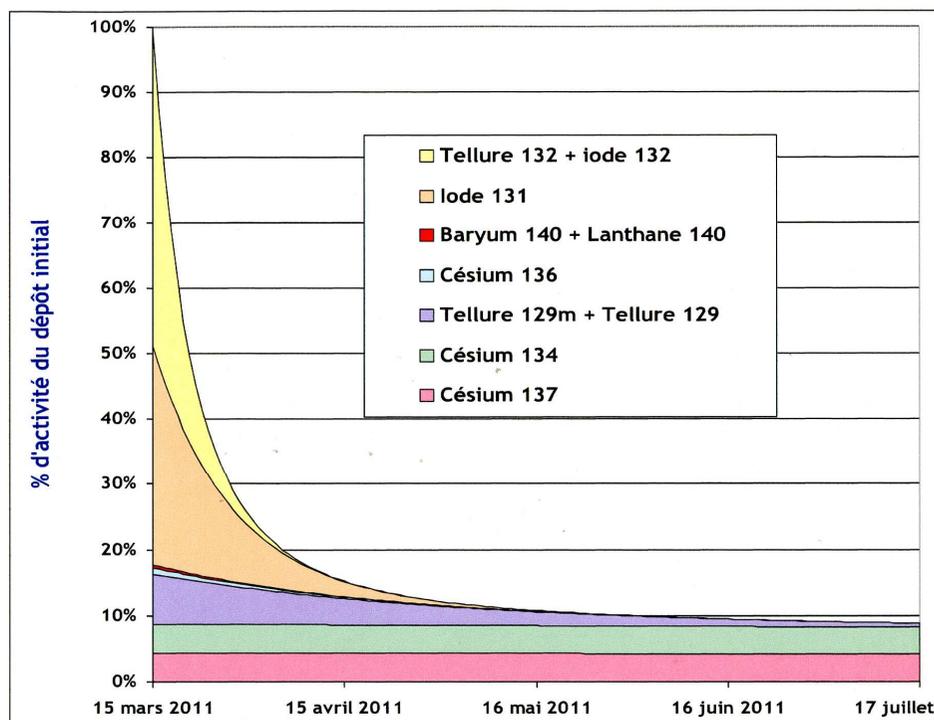
- entre 100 et 200 mSv le risque de **réparation fautive de l'ADN** commence à être statistiquement décelable,
- à partir de 500 - 700 mSv, apparaît une **modification de la numération sanguine**,
- à partir de 1 000 mSv, signes cliniques immédiats : le « **mal des rayons** » (nausée, vomissement...),
- au-dessus d'une dose létale de 5 Sv, probabilité de **décès à 50%**. Au-dessus de 10 Sv le décès est certain.

Les effets des fortes doses sont **qualitativement et quantitativement très bien connus et renseignés** :

- données de **la médecine nucléaire** (radiothérapies, scanners...)
- observations des personnes fortement irradiées : **Hiroshima, Nagasaki, accidents industriels** ou de **laboratoire, Tchernobyl...** les astronautes !
- Transposition (prudente) de **l'expérimentation animale**.

L'origine des fortes irradiations lors des accidents nucléaires

Radioactivité relative de produits de fission en fonction du temps



Au début de l'accident : la radioactivité prépondérante est celle des **éléments à période très courte ► très actifs (Te...**
Deux mois après, ne subsistent que les **éléments à période plus longue ► beaucoup moins actifs (césium, strontium...)**

Les effets avérés *immédiats*, les premiers intervenants

Tchernobyl : 600 sauveteurs et pompiers interviennent immédiatement après l'explosion :

- 3 ont péri lors des explosions. Ils sont portés disparus,
- 237 ont reçu des doses élevées et à très fort débit. Ils ont tous été hospitalisés.
- Parmi eux, 134 présentaient un syndrome d'irradiation aiguë dont :

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

- 28 sont décédés entre le 4 mai et le 31 août 1986.
- 19 autres sauveteurs sont décédés entre 1987 et 2004. Un lien avec l'accident n'a été établi de manière certaine que pour la moitié d'entre eux.

Nota : Les trois autres réacteurs de la centrale de Tchernobyl ont été exploités jusqu'en 2001, soit 15 ans après l'accident. En 2001 pendant cette période plus de 6 000 personnes travaillaient sur le site

A la mémoire des 31 intervenants décédés en 1986

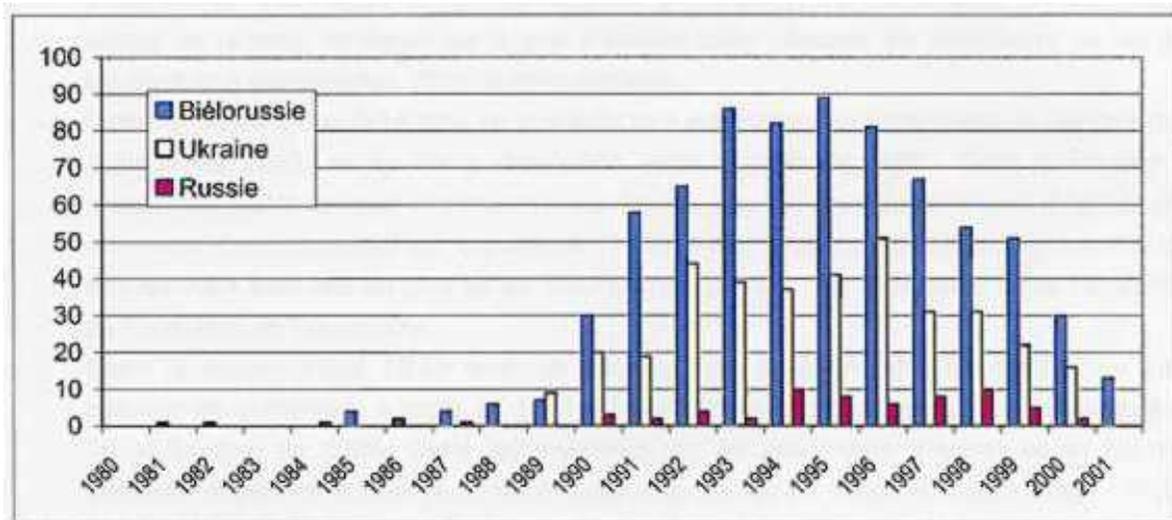
Monument érigé dans la nouvelle cité du personnel de la centrale située à Slavutich



SFEN 22 janvier 2020

(2) Les effets *avérés différés* sur les jeunes enfants.

- Les **cancers de la thyroïde** : uniquement chez les enfants de moins de 16-18 ans en 1986
- Recensement en 2018, environ **7 000 cas** ayant entraîné **15 décès**.
- Les plus exposés avaient **moins de 15 ans en 1986**.
- **Aucun cas en excès** pour les enfants conçus **après 1986... ni chez les adultes**.



- Biélorussie : 750
- Ukraine : 350
- Russie : 60

Figure 2 : Nombre de cancers de la thyroïde sur la période 1980-2001 chez les personnes âgées de moins de 15 ans au moment du diagnostic

Les « liquidateurs », dosimétrie incertaine, une zone « grise »

« Le peuple soviétique est un peuple de héros, il saura vaincre le réacteur comme, naguère, il a su vaincre le nazisme »



... ils ont reçu un « diplôme » pour leur héroïsme,
mais, suite à la chute de l'URSS, la plupart ont été totalement abandonnés...oubliés.

Cas particulier des les « liquidateurs » de Tchernobyl

Toute personne ayant « travaillé » de 1986 à 1990 dans un rayon de 30 km.

Tâches : déblayer, enfouir, décontaminer, construire le sarcophage... etc. ».

Nombre : les « vrais », environ 200 000 essentiellement des militaires du contingent.

Dosimétrie : reconstitution des doses par indicateurs biologiques (Estoniens, Ukrainiens)

Doses : en moyenne 110 mSv, 4% sont au-dessus de 250 mSv, maximum 600 mSv.

Evaluations des risques en excès (cancer, leucémie, troubles thyroïdiens, morbidité...)

Principales conclusions du Forum Tchernobyl sur les liquidateurs (2000-2005) :

Suivi médical difficile ou inexistant après la dislocation de l'URSS, population dispersée.

Morbidité importante, angoisse, maladies psychosomatiques, cardio-vasculaires...

Sentiment de non reconnaissance et d'abandon par les nouveaux Etats de la CEI.

Comportements à risque : alcool, drogue... **suicides, + 50% par rapport à la population.**

Effets difficiles à discerner de ceux plus généralement liés à l'effondrement de l'URSS

Niveau de vie ↓ protection sociale ↓ alcoolisme ↑... → **morbidité ↑ espérance de vie ↓↓**

Les effets avérés *non directement liés* à la radioactivité

Principale conclusion du Forum Tchernobyl (ONU 2005) : « *L'augmentation générale de la morbidité* [et non de la mortalité !] *est le plus grand problème de santé que l'accident a provoqué* ».

Constat général suite à l'effondrement de l'URSS (1990) et à l'accident.

L'état sanitaire de l'ex-URSS (Russie + CEI) s'est fortement dégradé :

Exemple, l'espérance de vie des hommes : 63 ans (1975) → 59 ans (2009).

Effets clairement liés à l'accident :

- **Conséquences sociales** engendrée par les déplacements, la perte des biens, les séparations, le déracinement, la mauvaises réintégration, le chômage... etc.
- **Troubles psychologiques liés au stress**, dépression, asthénie, anémie, troubles cardio-vasculaires et gastriques, pathologies diverses.
- **Les comportements à risque**, alcool, drogue, sida...
- **Persistance des mythes et idées fausses** engendrés par le secret initial sur les risques liés à l'irradiation d'où angoisse/effet de la radioactivité.
- **Fatalisme paralysant** dû à l'assistanat (7millions de personnes bénéficiaires !) entretenant un misérabilisme y compris parmi les nouvelles générations.

Les effets somatiques différés

Les effets somatiques (tardifs aux faibles doses <100 mSv)

Ces effets apparaissent aléatoirement

Si des effets existent, **ni la nature, ni l'apparition d'un dommage ne peuvent être déterminées a priori.**

On ne peut qu'**estimer une probabilité de survenue d'un type de dommage** (risque relatif, RR) .

La probabilité est obtenue par **extrapolation de données épidémiologiques** (populations soumises à des irradiations autres que naturelles, médicales, radiothérapie, Hiroshima, Nagasaki, Tchernobyl, accidents...)

Pour chaque **type de dommage** (mutation, dégénérescence, cancers...) la CIPR a établi un

risque relatif (RR) entre une dose et un type d'effet

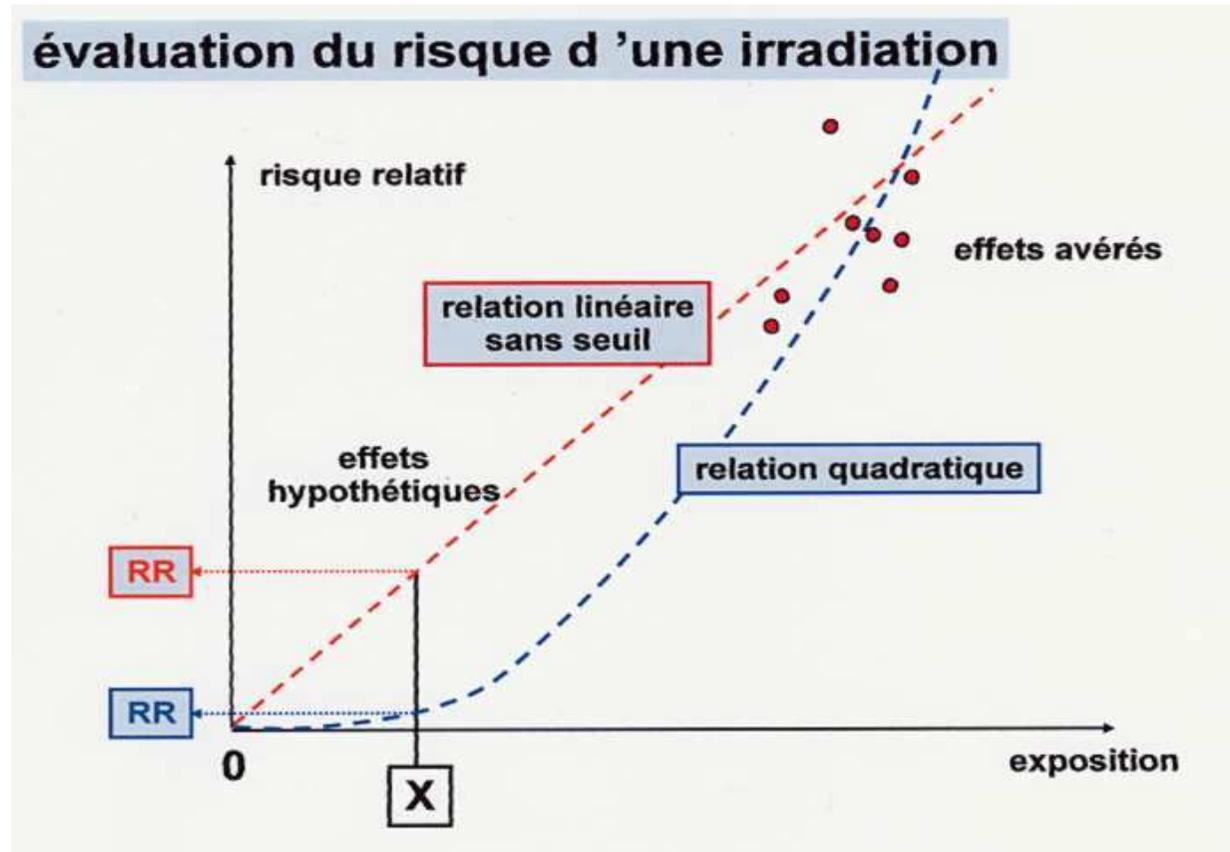
Il permet le calcul du **nombre de dommages aléatoires susceptibles d'apparaître en excès**

parmi une **population exposée** par rapport au nombre de dommages apparaissant **spontanément** au cours de la vie d'une **population témoin équivalente, non exposée.**

$$\text{Nb de dommages en excès} = \text{population concernée} \times \text{RR}$$

(3) les effets somatiques tardifs aux faibles doses la RLSS

la RLSS est une application prudente du principe de précaution et **non une loi biologique**



Pourquoi la RLSS ?

- Ce n'est pas parce qu'on ne voit rien qu'il n'y a rien,
- On ne pourra jamais prouver qu'il n'y a pas d'effet car il y aura toujours quelqu'un qui affirmera qu'on ne voit rien parce qu'on a pas assez ou mal cherché...
- Mais en contrepartie, il faut rester ferme sur les fondements, sur le caractère « hypothétique » des effets calculés des faibles doses **Hypothétique** signifie qu'il s'agit d'un calcul de nature statistique, très conservatif, que les effets calculés en excès ne sont pas discernables des effets dus à d'autres causes ou spontanées

Calcul : nb de dommages en excès / nb spontanés = population concernée multipliée par RR

(3) Discussion à propos de la RLSS

- Aux faibles doses on n'observe **pas effet avéré imputable de manière certaine à une exposition.**
- **En aucun cas une loi biologique** validée par l'observation. Utilisée pour sa commodité (additivité des effets),
- **Décréter qu'il n'existe pas de seuil, ne correspond pas à ce qui est observé**
- **Son objet :**

Principe de précaution poussé à l'extrême. Utilisé pour concevoir et dimensionner les moyens destinés à faire face aux conséquences d'accidents majeurs, (*évaluation et acceptabilité des risques, zonage, condition d'accès, évacuation...*)

Les effets négatifs d'une utilisation abusive de la RLSS

- Hors de sa signification elle nourrit des **angoisses injustifiées** parmi les populations exposées - ou non - par les retombées d'un accident, « *l'angoisse est la principale cause de la forte morbidité des populations de l'ex-URSS et la persistance d'un misérabilisme paralysant* », **une des conclusions du Forum de l'ONU (2000 – 2005) consacré à l'accident de Tchernobyl),**

Exemple d'application abusive : la radioactivité naturelle en France (2,4 mSv /an) serait la cause de 8 000 décès par an...

L'effet « moquette »... catastrophe à l'échelle planétaire si on vivait 1 cm plus haut (moins protégé des rayons cosmiques !).

Retombées de Tchernobyl sur l'Europe de l'ouest. Le calcul 22 000 décès en excès par rapport aux 9 millions de décès par cancers spontanés sur la durée de vie de la population européenne soit 0,02 %... Pourcentage inférieur d'un facteur 100 aux fluctuations de toute statistique épidémiologique.

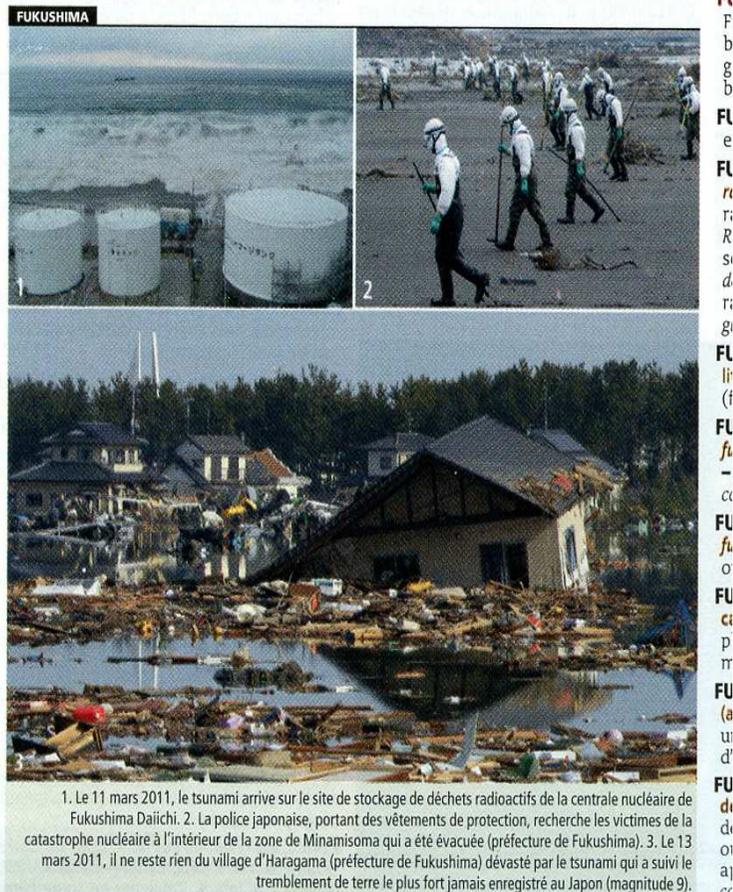
Tchernobyl : évaluation des dommages *en excès* (application de la RLSS)

Evaluation du nombre de *cancers mortels en excès par rapport aux cancers apparaissant naturellement*

Population en cause	Nombre de personnes	Type de cancers	Nb de cancers mortels "naturels" attendus (hors effet Tchernobyl)	Nb de cancers mortels attendus en excès (due à Tchernobyl)	En % des cas spontanés
Intervenants des premiers jours	1.000 +	Tous cancers	150-200	environ 10-20 <i>(10%)</i>	→ 10 %
Liquidateurs les plus exposés (dose reçue supérieure à 100 mSv)	200.000	Tous cancers (leucémies)	41.500 (800)	environ 2.000 (200) <i>(1%)</i>	→ 1 % → 0,1%
Populations évacuées en 1986 <i>> 40 Ci/km²</i>	135.000	Tous cancers (leucémies)	21.500 (500)	environ 150 (10) <i>< 0,01</i>	→ 0,1% et 0,01%
Habitants des régions fortement contaminées (> 15 Ci/Km ²)	270.000	Tous cancers (leucémies)	43.500 (1 000)	> 1 500 (100)	→ 0,6% → 0,04%
Habitants des zones peu contaminées (entre 1 et 15 Ci/km ²)	3 700 000	Tous cancers (leucémies)	433 000 (1 300)	environ 2500 (200)	
Enfants 0 - 14 ans (en 1986) *	1.000.000	Cancers thyroïde	10-40	environ 200-800	→ 0,02 [*] à 0,1%

Conséquences de l'accident de Fukushima

Fukushima vu par le Petit Robert illustré



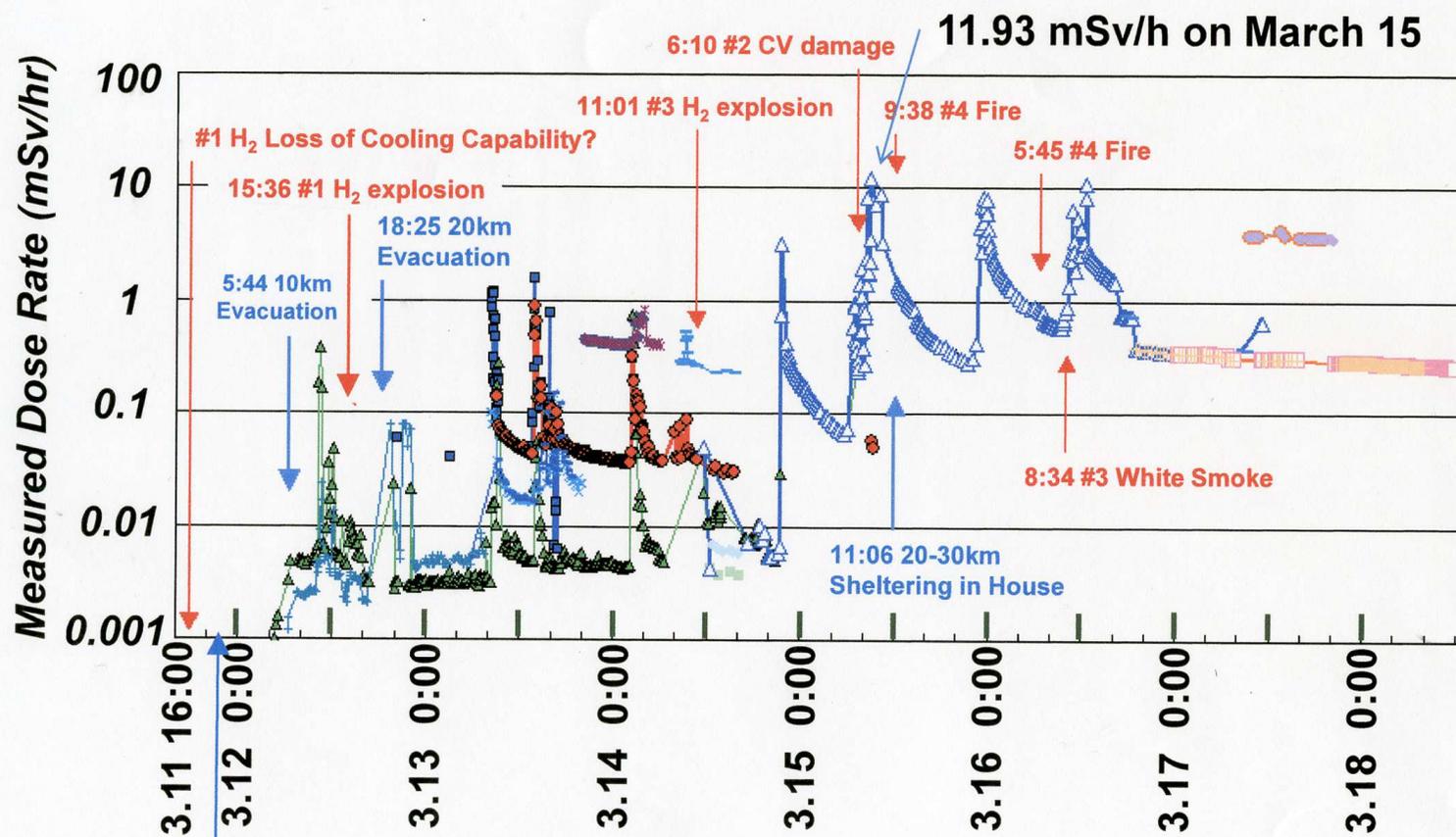
F
F
b
g
b
FL
e
FL
r
r
R
S
d
r
g
FL
li
(
FL
fu
-
ca
FU
o
FU
ci
p
tr
FU
(a
u
d'
FU
di
di
oi
aj
cc

Conséquences du tsunami du 11 mars 2011
26 000 morts et disparus
600 000 sans logis

Illustration du dictionnaire le Petit Robert

« *La police japonaise, portant des vêtements de protection, recherche les victimes de la catastrophe nucléaire à l'intérieur de la zone de Mina Mimosa qui a été évacuée...* ».

On-site Radiation Monitoring in Fukushima Daiichi Site From March 11 to 18



20:50 2km Evacuation (Fukushima Pref.)
21:23 3km Evacuation & 3-10 km Sheltering in House

SPEN 22 janvier 2020

Rejets gazeux et halogènes Tchernobyl / Fukushima

	Tchernobyl	Fukushima	
	UNSCEAR	2011 IRSN	
Radionucléides			
Gaz rares Xe133	7 000 Bq	2 000 Bq	(1 Bq = 10 ¹⁵ Bq = 27 000 curies)
I 131	1 500	90	
Te 132	1 100	60	
Cs 134	60	10	
Cs 137	8	10	
Réfractaires	> 100	très peu	

Nota : en rouge les radionucléides à vie courte à l'origine des doses reçues et des débits de dose les plus importantes. Ce sont eux qui ont nécessité l'évacuations d'urgence de certaines populations.

Doses cumulées reçues par les intervenants sur le site.

Cumul entre le 11 mars 2011 et le 31 décembre 2014

Dose cumulée	TEPCO	Contractants	Total
> 250 mSv	6	0	6
200 - 250 mSv	1	2	3
150 - 200 mSv	26	2	28
100 - 150 mSv	117	20	137
75 - 100 mSv	290	175	465
50 - 75 mSv	327	1 253	1 580
20 - 50 mSv	618	5 342	5 960
10 - 20 mSv	581	4 958	5 539
5 - 10 mSv	487	4 667	5 154
1 - 5 mSv	807	6 970	7 692
< 1 mSv	1 132	11 024	12 156
Total	4 392	36 177	40 569
Maximum (mSv)	678,80	238,42	-
Moyenne (mSv)	23,11	10,85	12,17

Doses cumulées reçues pour les salariés de TEPCO et de ses contractants

Le suivi des intervenants sur le site pendant la crise (mars 2011)

Nature du suivi

Examens annuels ophtalmologiques, auditifs, pulmonaires, cardiovasculaires, digestifs, des analyses biologiques et une évaluation de l'état psychologique et psychiatrique.

Surveillance et examens complémentaires pour les intervenants ayant reçu des doses >100 mSv, (troubles thyroïdiens et recherche de cancers poumon, estomac, colon),

Constats et prévision

Aucun syndrome aigu d'irradiation constaté → pas de cancers en excès statistiquement décelables.

Risque accru de maladie cardio-vasculaire pour les doses > 500 mSv (qq travailleurs du site)

Pour les très fortes doses (>10 Sv) à la thyroïde l'excès d'incidence est de 3,5% vie entière.

Traumatismes psychologiques probables

Compte tenu des conditions dantesques de l'accident : cumul du tsunami et de la gestion pendant 6 jours de l'évolution catastrophique des 4 réacteurs « déchaînés », trois explosions, deux incendies, un niveau de radioactivité élevé, la situation des familles suite au tsunami ... etc.

Les étapes de l'évacuation des populations

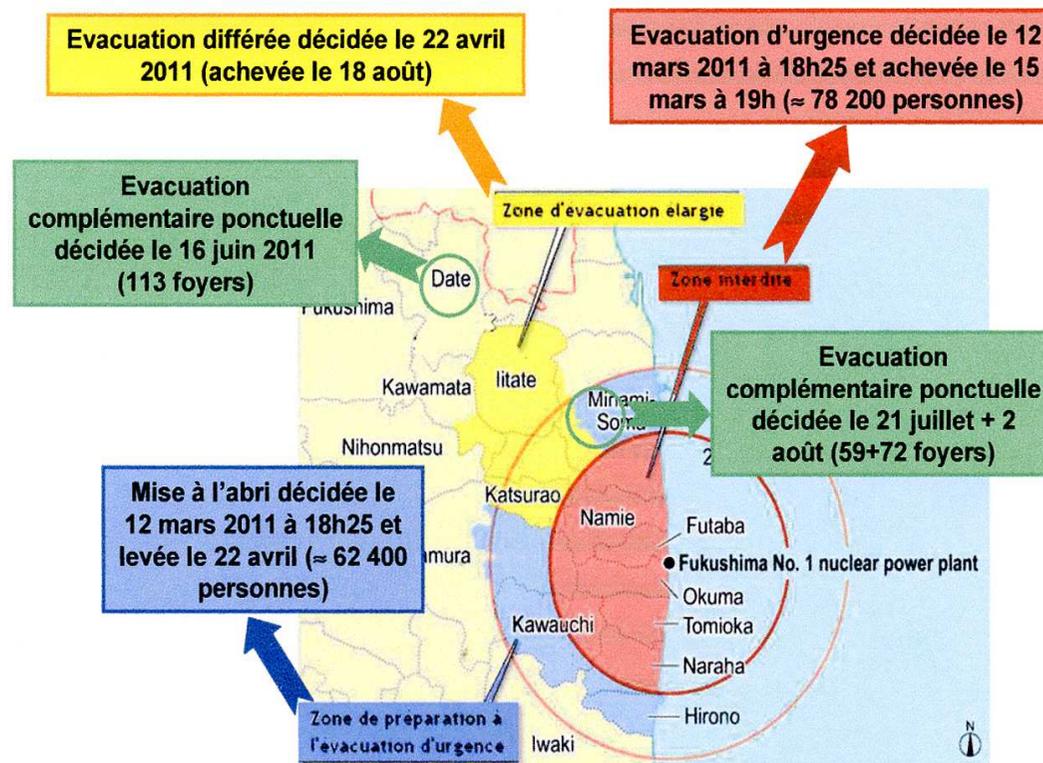
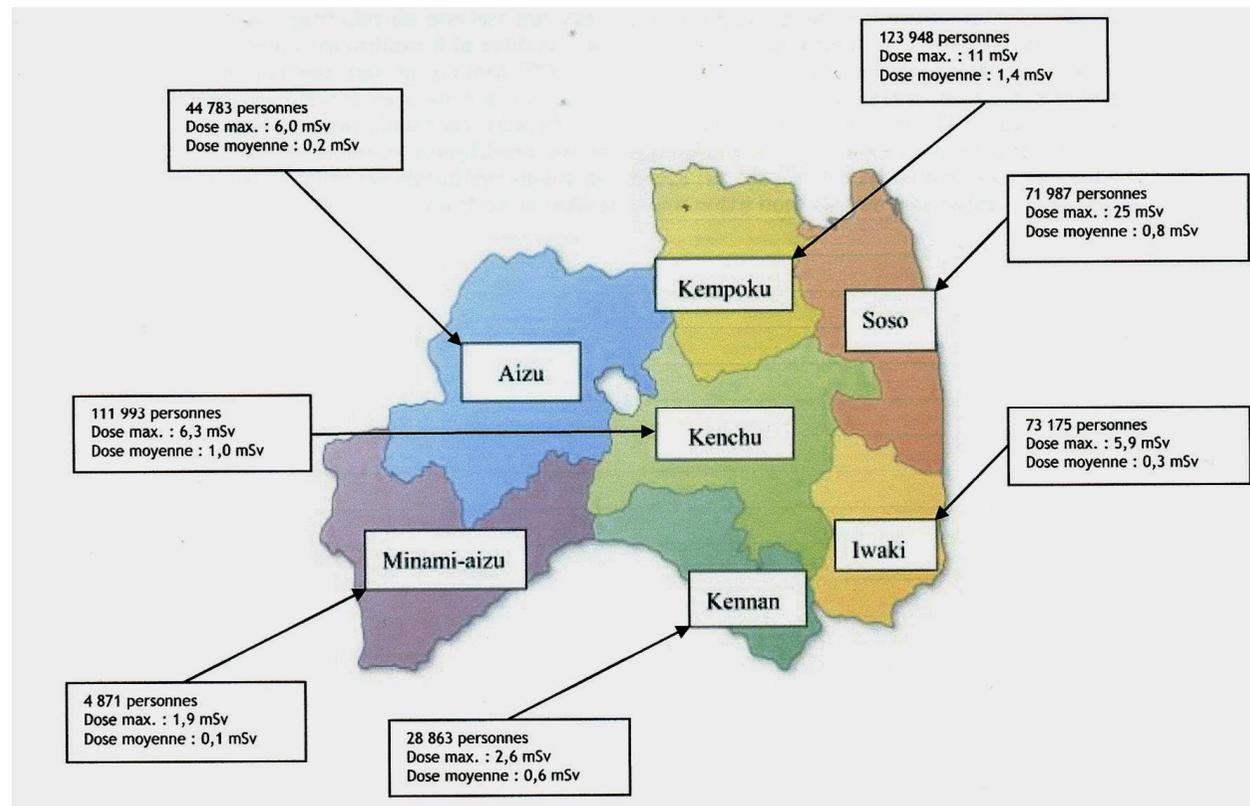


Figure 2 - Zones d'évacuation de la population mise en place au Japon au cours de l'année 2011

Le suivi des populations par l'Université de Médecine



Nombre de personnes suivies par l'Université de Médecine de Fukushima
Reconstitution par l'Université des doses moyennes et maximales reçues

Doses effectives reçues par le public en mSv (en %)

Doses effectives (mSv)	Nombre d'individus (hors travailleurs) par zones							Total	
	Kempeku	Kenchu	Kennan	Aizu	Minami-Aizu	Soso	Iwaki	Number	Ratio (%)
<1	23,669	53,547	21,892	37,114	3,775	54,509	66,634	261,140	62.0
1-2	77,265	41,613	2,826	254	29	12,266	595	134,848	32.0
2-3	13,811	7,115	12	16	0	1,621	25	22,600	5.4
3-4	433	369	0	1	0	576	3	1,382	0.3
4-5	39	5	0	0	0	449	1	494	0.1
>5	29	2	0	0	0	898	1	930	0.2
Total	115,246	102,651	24,730	37,385	3,804	70,319	67,259	421,394	100.0
Maximum dose (mSv)	11	5.9	2.6	3.6	1.9	25	5.9	-	-
Average dose (mSv)	1.4	1.0	0.6	0.2	0.1	0.8	0.3	-	-

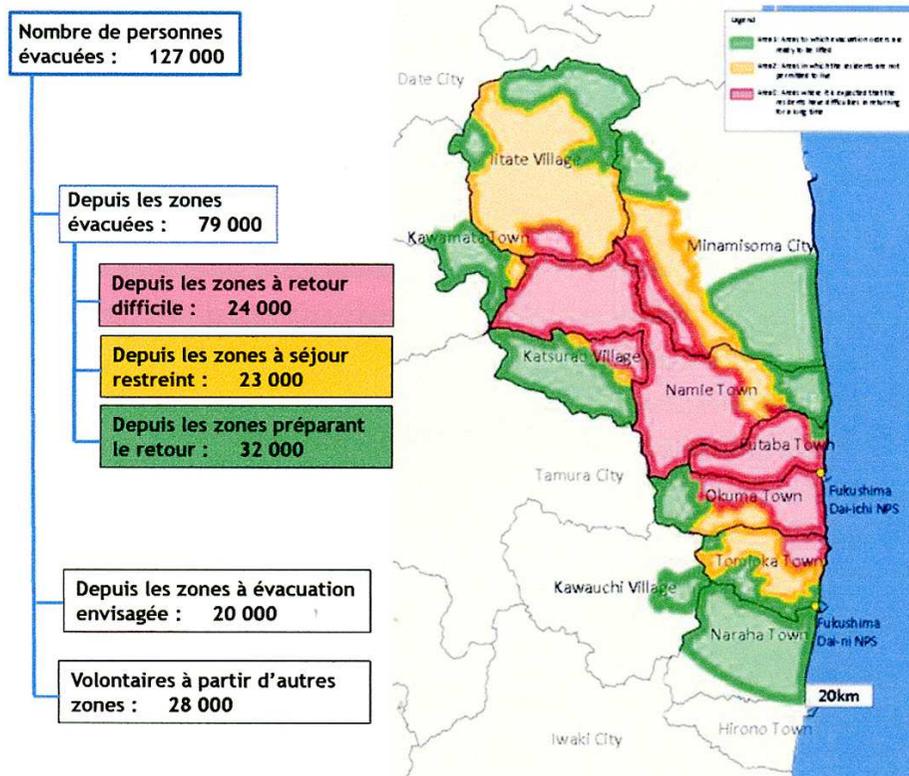
Distribution des doses pour le public par zones géographiques dans la préfecture de Fukushima

Dose effective reçue par le public en mSv / tranche d'âge

Dose effective (mSv)	Nombre d'individus par groupes d'âge									Total
	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-	
<1	40,902	36,957	19,572	31,397	26,403	30,692	34,125	24,373	16,719	261,140
1-2	19,529	17,869	9,374	16,982	15,813	17,861	18,719	11,854	6,847	134,848
2-3	5,289	3,297	1,032	2,151	2,087	2,789	3,231	1,904	820	22,600
3-4	216	137	76	147	143	224	216	156	67	1,382
4-5	19	45	36	40	76	90	77	72	39	494
>5	23	31	51	77	99	220	196	157	76	930
Total	65,978	58,336	30,141	50,794	44,621	51,876	56,564	38,516	24,568	421,394

Répartition des doses pour le public estimées par groupes d'âge dans la préfecture de Fukushima

L'éventuel retour des personnes évacuées



Les critères de retour sont les suivants :

Zone verte : la dose < 20 mSv/an
Interdiction de séjour levée.

Zone jaune : la dose dépasse 20 mSv/an
Retour ponctuel encadré autorisé
retour progressif d'ici qq années.

Zone rouge : la dose dépasse 50 mSv /an
Retour difficilement envisageable, Accès
limité et très ponctuel.

Enseignements des accidents sur le plan sanitaire

- Les mesures soit de précaution soit d'**évacuation** des populations génèrent un **stress très important**.
- Elles ne doivent être **mises en œuvre que si la situation radiologique l'exige vraiment, > seuil**
- **Seuil 15 mSv** ? Cumul dans l'année suivant l'accident (irradiation + ingestion)? Seuil de la non prise en compte des effets selon la RLSS
- Ne pas forcer les évacuations lorsque cela n'est pas strictement indispensable et restreindre la durée des interdictions ou des restrictions à ce qui est juste nécessaire,
- **Laisser les habitants libres de leur choix** en expliquant le niveau des risques encourus (Ithaque),
- Aider ceux qui ont fait le choix de partir (jeunes avec enfants...)

Conclusion

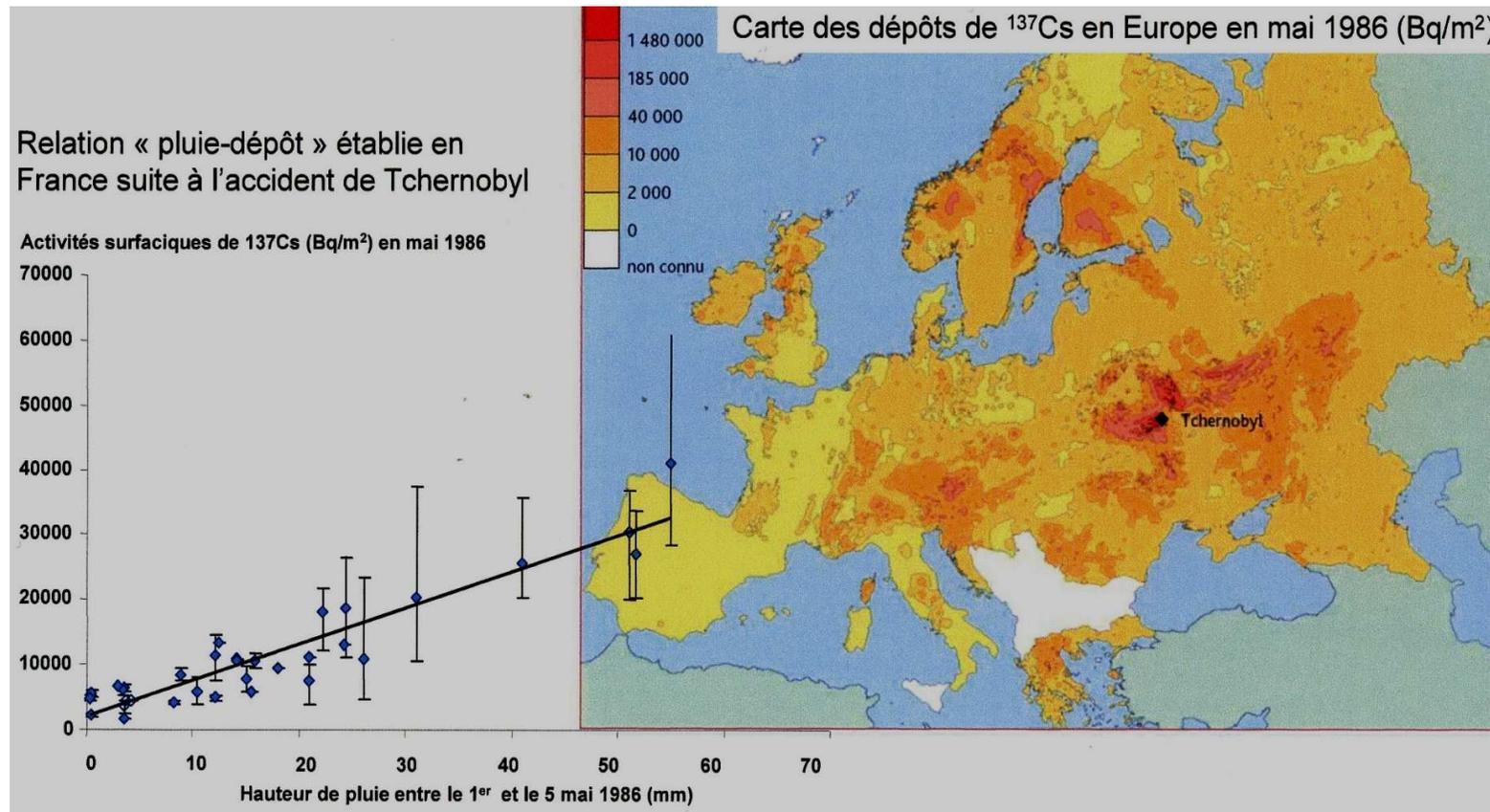
Réflexion nécessaire sur les dimensions sociales et éthiques des conséquences des accidents,
Revoir l'approche actuelle fondée sur des critères et sur des seuils inutilement conservatifs,

Impact de Tchernobyl en France

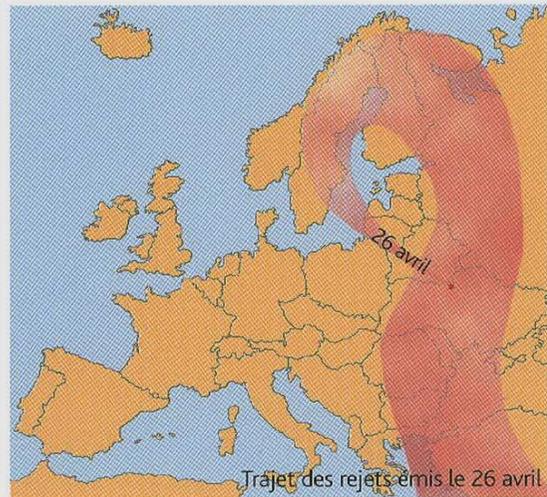
SFEN 22 janvier 2020

Tchernobyl : étendue de la contamination en l'Europe (mai 1986)

Dépôts de césium 137 (marqueur subsistant) et influence des précipitations

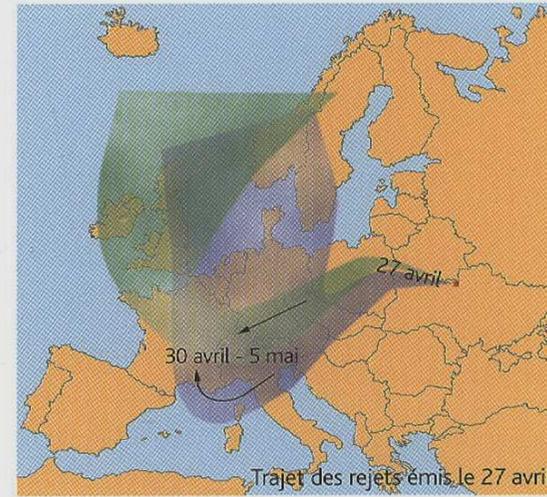


L'arrivée en France des rejets des 26 et 27 avril



Plus de 50 % de la radioactivité totale relâchée par le réacteur accidenté est contenue dans le premier panache du 26 avril. Il est emporté vers le nord-ouest.

Parvenu au-dessus des pays scandinaves, il est rabattu vers l'est puis le sud, ramenant les polluants radioactifs en Europe centrale et balkanique.

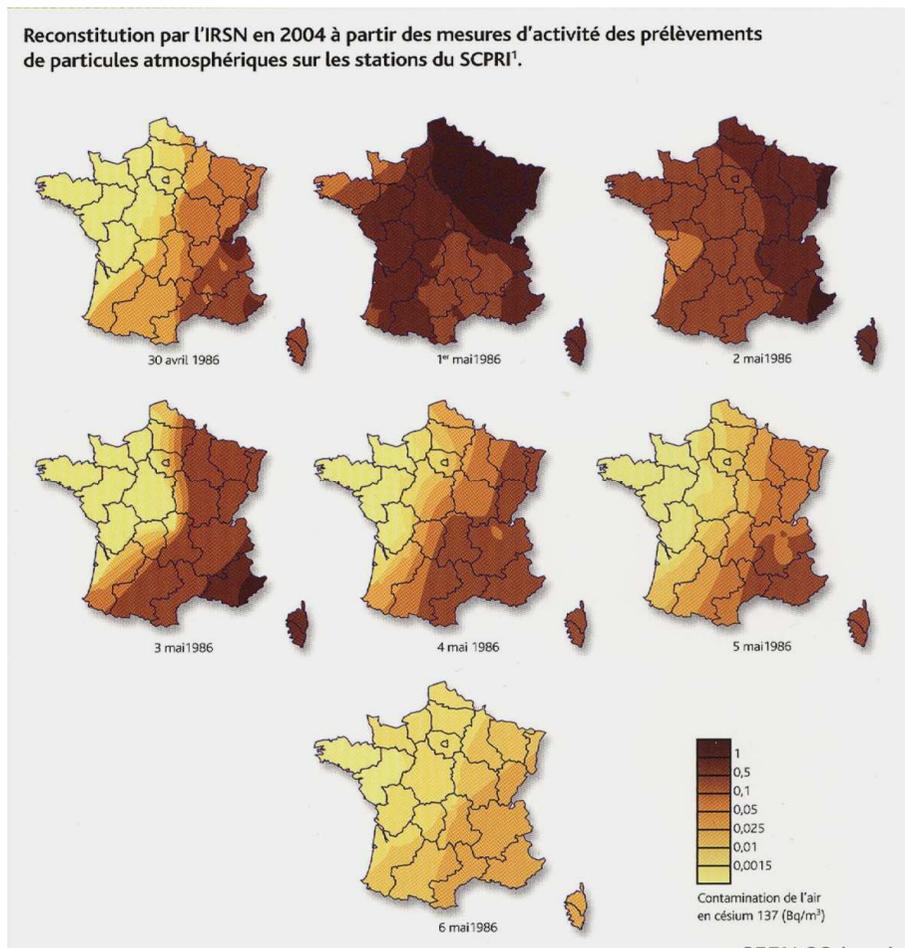


Les rejets du 27 avril sont entraînés vers l'ouest. Ceux du matin abordent la France par l'est (trajet vert) et ceux de l'après-midi par le sud (trajet bleu). Ils traversent le territoire entre le 30 avril et le 5 mai.

Tous les rejets émis après le 27 avril concerneront les parties est et sud de l'Europe, épargnant la France.

Trajet du « nuage » ayant survolé la France

Mesures en temps réel : contamination atmosphérique (passage du nuage entre le 30 avril et le 6 mai 1986)



Radioactivité ambiante :

mesure globale du rayonnement gamma
Sols + atmosphère

Contamination atmosphérique.

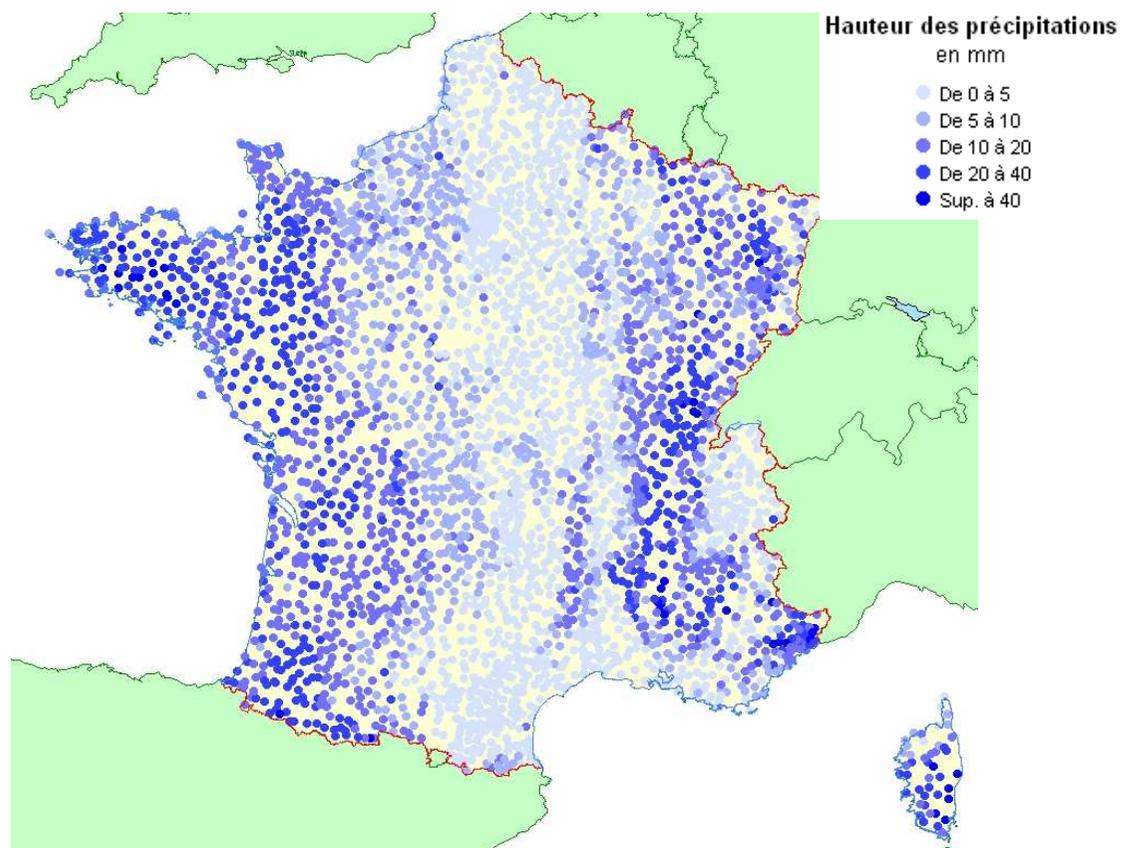
comptage « bêta total » (à 1j et 6j) des dépôts de poussières et d'aérosols aspirés sur des **filtres papier** puis analyse spectrale.

Nota important

Les filtres papier ayant servi au comptage de l'activité du césium en 1986 avaient été conservés. En 2005 la reprise du comptage du césium encore présent **met définitivement fin à la polémique sur la validité des mesures « officielles » du SCPRI faites en mai et juin 1986.**

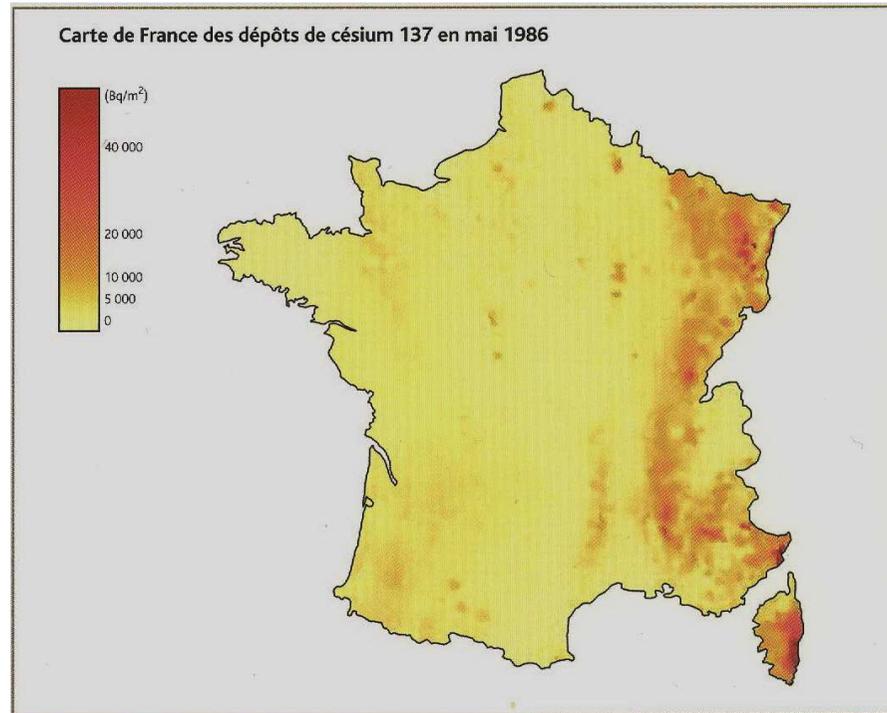
Hauteur totale des précipitations

entre le 30 avril et le 6 mai



Dépôts de césium au sol

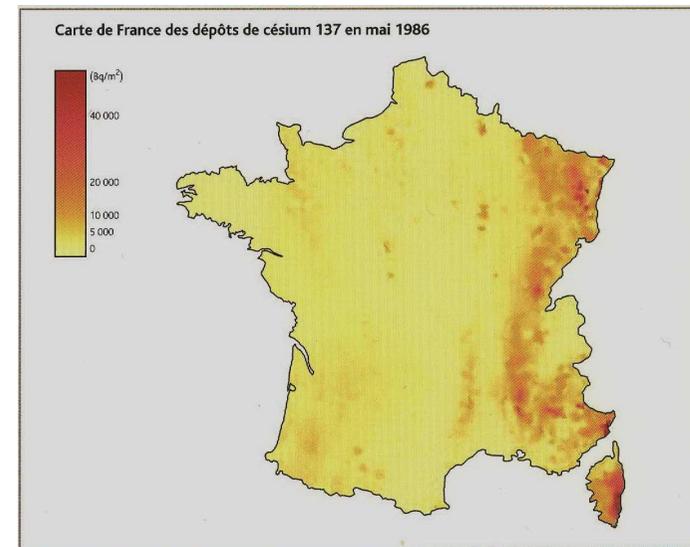
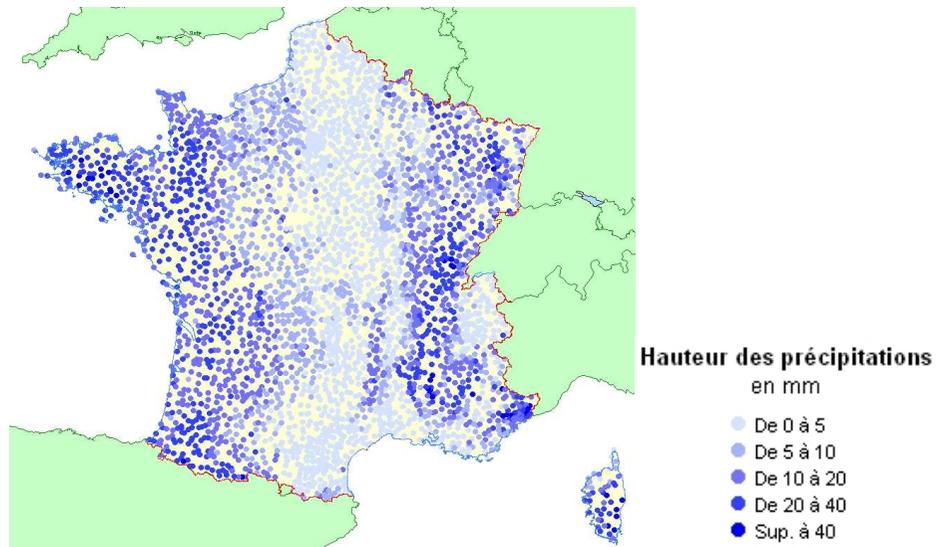
Le césium (période 30 ans) est le marqueur sur le long terme de la contamination des sols



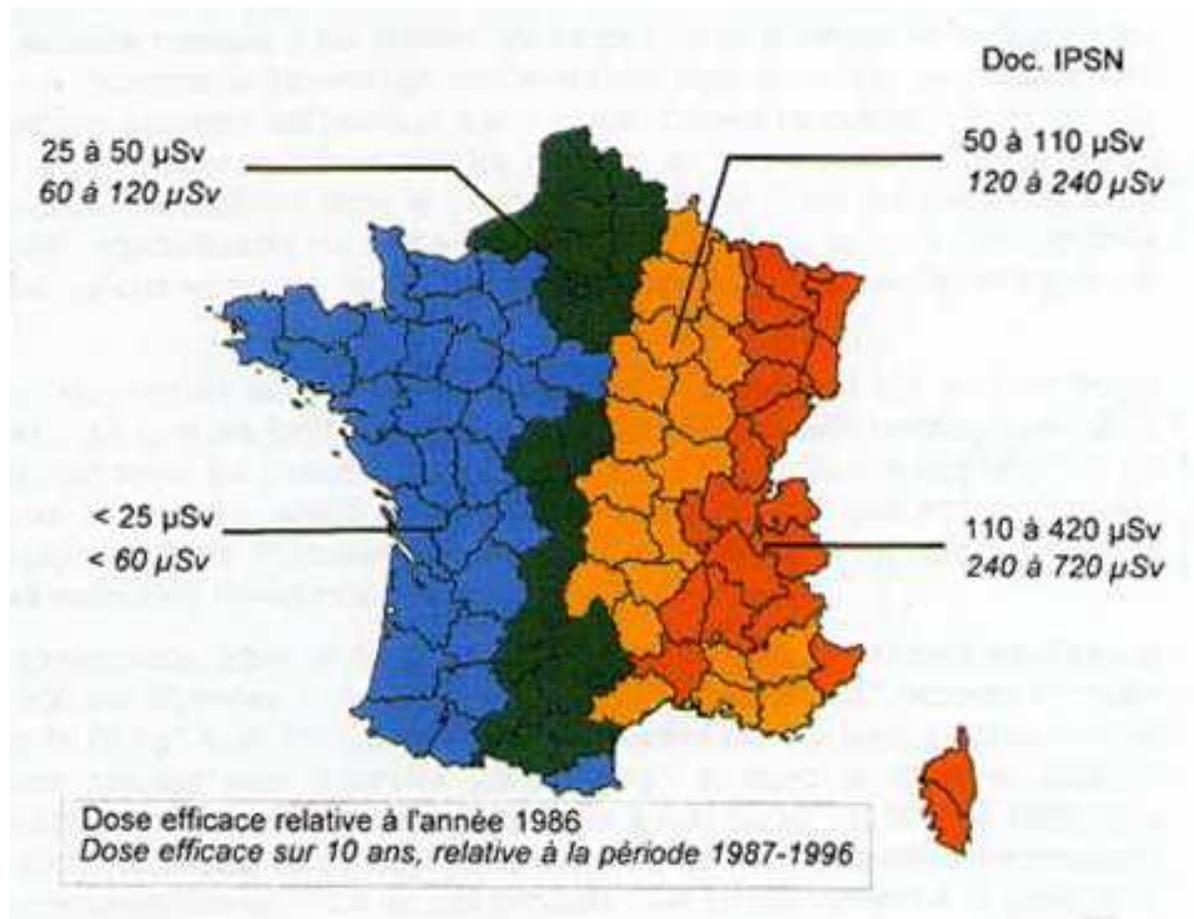
Le dépôt du césium est la somme de deux dépôts **l'un sec, l'autre humide**.
Le dépôt humide **est beaucoup plus important**, il résulte du **lessivage du panache par la pluie**.
En un lieu, il est fonction de la contamination du panache *et* de la hauteur des précipitations

Le césium n'est qu'un marqueur

- la durée de vie des 2 césiums 131 et 134 : 30 et 2 ans → identification Tchernobyl ou essais d'armes
- Etablissement à postériori d'une cartographie de la contamination des sols, très corrélée avec pluviométrie

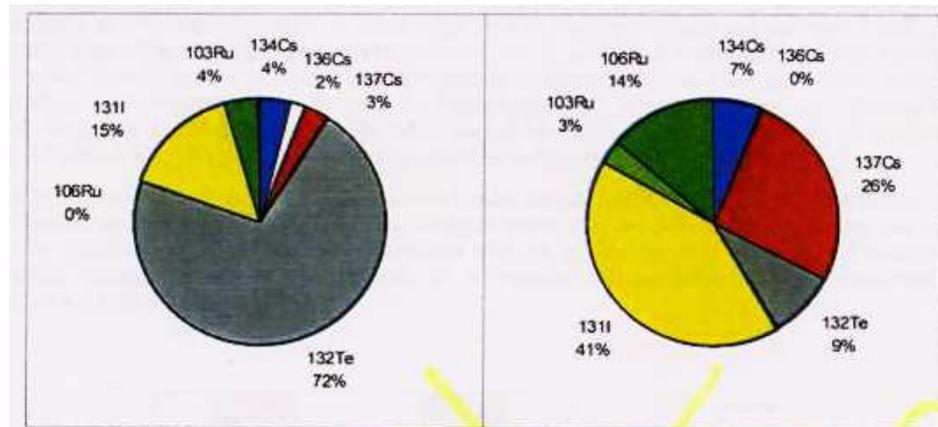


Dose efficace reçue en 1986 et entre 1986 et 1996



Doses reçues par irradiation externe et par inhalation en France pour un adulte et un enfant en 1986

1986
Irradiation
externe



1986
Irradiation
interne
par inhalation

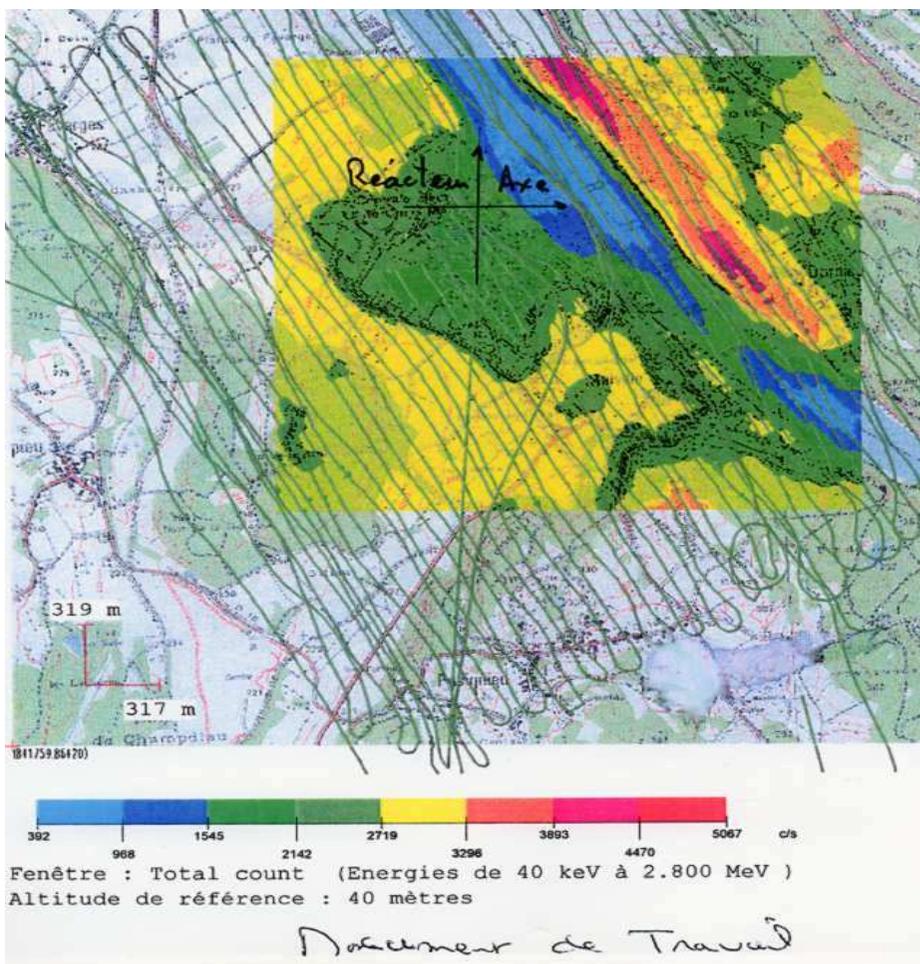
Contributions des radionucléides aux doses efficaces externe (à gauche) et interne par inhalation dans le panache pour un adulte en 1986.

	Dose efficace (μSv)	Dose équivalente à la thyroïde* (μSv)	
		Adulte	Enfant de 5 ans
Zone I	165 - 420	810 - 2000	6480 - 16000
Zone II	80 - 210	405 - 1000	3240 - 8000
Zone III	40 - 105	200 - 500	1620 - 4000
Zone IV	< 40	< 200	< 1620

* : une dose équivalente de 20 mSv engagée à la thyroïde correspond à une dose efficace (au corps entier) de 1 mSv (CIPR).

Cartographie γ aéroportée de la radioactivité tellurique

Cartographie des environs immédiats de la centrale de Creys-Malville en 2000



En bleu (300 à 1500 c/s) le Rhône, l'eau est peu radioactive / aux sols.

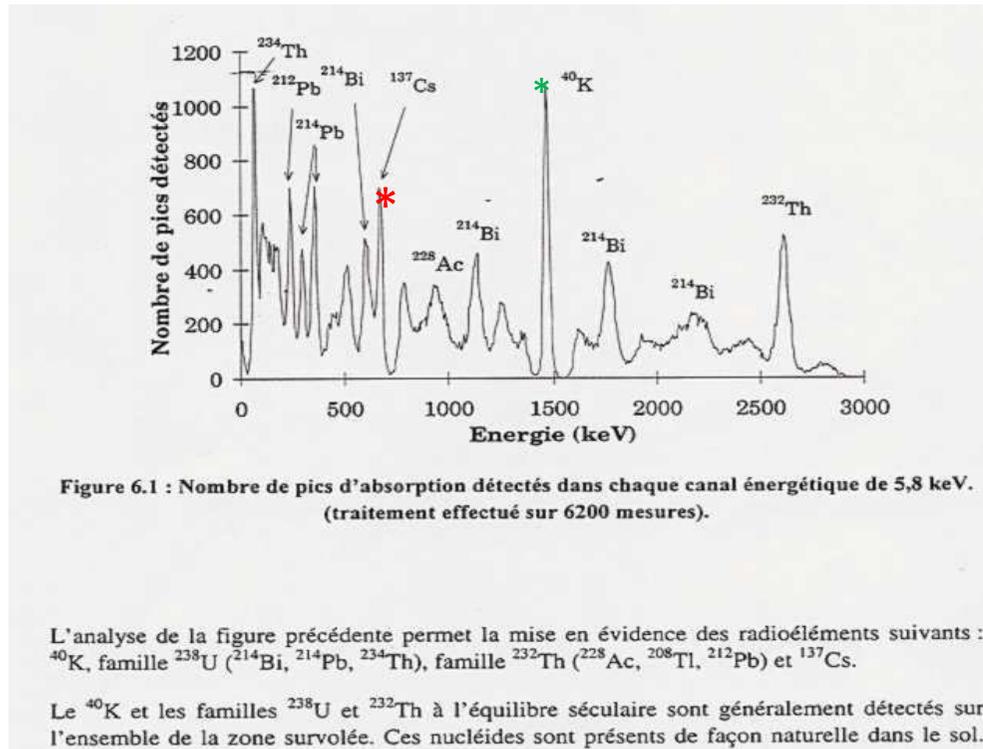
En vert (1500 à 2700 c/s) les zones boisées et le site de la centrale sur la rive gauche du Rhône avec, indiqué, l'axe du réacteur

En Jaune (2700 à 3300 c/s) des terres cultivées nouvellement labourées (dégazage du radon)

En orange et violet (3300 à 4500 c/s), sur la rive droite du Rhône, un champ de maïs dont la radioactivité « importante » par rapport aux autres zones est due aux **engrais phosphatés** naturellement radioactifs du fait de la présence des descendants de l'uranium (se référer au spectre ci-dessous).

La radioactivité tellurique en 2000

(après une demi période de décroissance du césium, soit $\approx 70\%$ dépôt initial).



L'activité du césium (marquée *) est issu des retombées de Tchernobyl et des essais nucléaires. Elle est inférieure à celle du potassium 40 (marquée*) et des descendants de l'Uranium (Th, Bi, Pb...)

L'affaire du nuage qui se serait « arrêté » aux frontières

Césium utilisation abusive par la CRIIRAD

La mesure a posteriori (10 à 15 après l'accident) de la contamination des sols par le césium ne permet pas de « remonter » à celle de la contamination de la chaîne alimentaire par l'iode en mai et juin 1986.

Il faudrait pour ce faire connaître en chaque lieu, et en ce lieu, *à chaque instant et simultanément* :

La composition du nuage en Cs (aérosol) et I (vapeur),

La hauteur des précipitations, l'entraînement des iodes et césium étant différent,

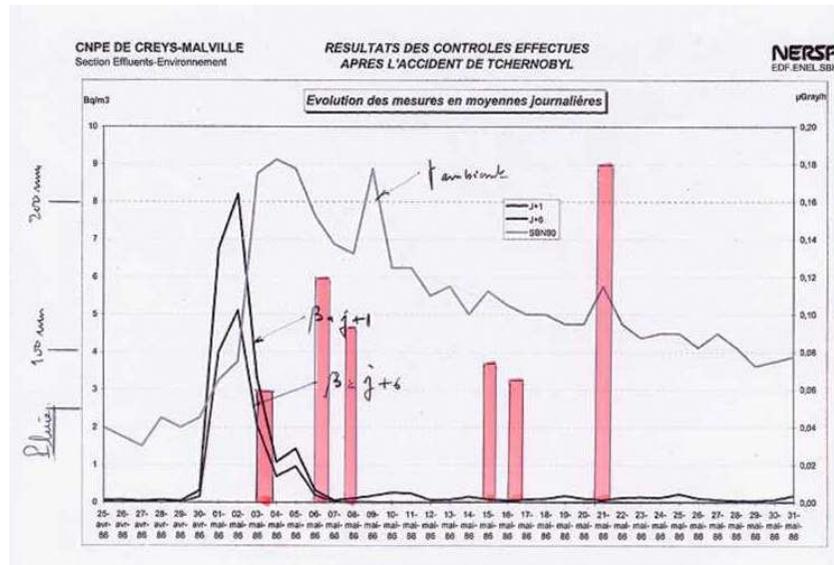
afin de connaître le ratio (I déposé *sur les végétaux* / Cs marqueur *au sol*)

Pour tenter de remonter à la teneur en Iode dans le lait, seul paramètre à surveiller en France en mai 1986.

Autre biais : lessivage des végétaux (herbe) par la pluie et l'accumulation du Cs sur le sol → I/Cs ??? inconnu

Il est aujourd'hui unanimement reconnu que seules les mesures effectuées en temps réel sur les prélèvements de lait sont significatives et

L'impossible reconstitution Iode /Césium



Contamination de l'herbe

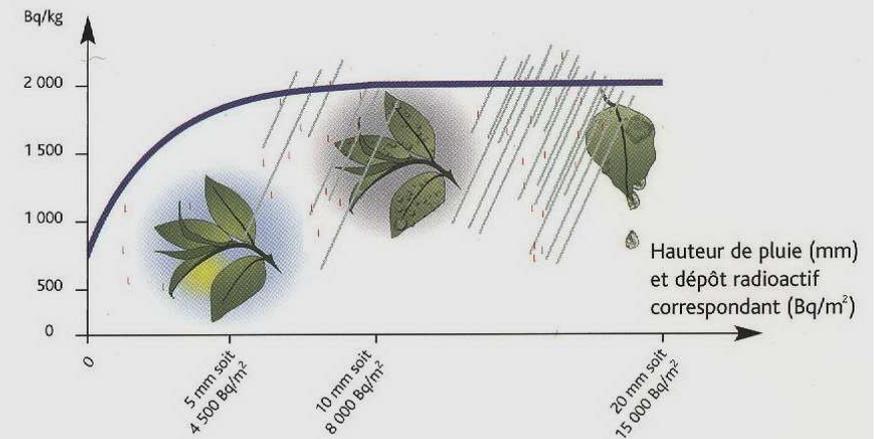


Schéma (1) Corrélation pluviométrie / contamination ? Rapport Iode /césium lors du dépôt ?

Schéma (2) Relation contamination sol/végétation : accumulation sur le sol / lessivage de la végétation ?

Douce France en ce joli début mai 1986, ...

Le nuage de Tchernobyl arrive en France le mercredi 30 avril tard le soir...

A ce moment précis, la France entière est déjà partie en vacances pour un « long viaduc » allant pour certains du jeudi 1^{er} mai, via le jeudi 8 mai,.... jusqu'au lundi 12 mai.

A partir du 30 avril au soir, les ministères sont totalement déserts, hormis quelques « 3^{ème} couteaux »,

Quant au **Président F. Mitterrand** et aux **Premier ministre J. Chirac...** ils inaugurent leur toute nouvelle cohabitation. Ils sont tous deux au G7 qui se tient à Kyoto.

La situation météorologique du 30 avril 1986

Page 6 — LE MONDE — Vendredi 2 mai 1986

révisé le 1^{er} Mai

EUROPE

LA CATASTROPHE DE LA CENTRALE

Les vents radioactifs

L'accident qui s'est produit à la centrale nucléaire soviétique de Tchernobyl pourrait avoir eu lieu très tôt le vendredi 25 avril, et peut-être même le jeudi 24 dans la soirée, ou dans l'après-midi.

L'arrivée sur la Scandinavie et sur l'Allemagne de nuages radioactifs émis par la centrale est due en effet à la situation météorologique. En raison de la rotation de la Terre, dans l'hémisphère nord, l'air s'écoule toujours en laissant les hautes pressions sur sa droite et les basses pressions sur sa gauche. Or l'anticyclone (haute pression) de Sibirie débordait ces jours derniers jusque sur l'est de

la Russie d'Europe, et deux zones de basse pression s'étendaient l'une sur le nord de l'Atlantique, l'autre sur l'Europe du Sud.

Certes, le communiqué soviétique n'a pas précisé la date de l'accident : mais les cartes météorologiques montrent qu'entre le 24 et le 27 avril, l'air radioactif s'écoulait vers le nord-ouest ou le nord-nord-ouest, à des vitesses faibles n'excédant pas 20 kilomètres à l'heure, au moins jusqu'à 1 500 mètres d'altitude. Mais on ne sait pas non plus à quelle hauteur voyagent les nuages radioactifs. En revanche, les auto-

rités suédoises ont fait savoir que l'augmentation de la radioactivité a commencé à se manifester dès l'après-midi du dimanche 27 avril dans leur pays, soit à environ 1 200 kilomètres de Tchernobyl. A vitesse constante de 20 kilomètres à l'heure, l'air radioactif a mis soixante heures pour faire le trajet.

Le temps qui a régné sur la région de Kiev, du 26 au 29 avril, est du type appelé par les spécialistes « marais barométrique ». Les vents y étaient nuls ou faibles. L'air pollué a stagné, mais, chauffé au niveau du sol, il est monté et a donné naissance à des cumulus. Il a ainsi probablement atteint une hauteur de quelques milliers de mètres. La circulation d'altitude, coulant elle aussi vers le nord-ouest, l'a « pris en charge ».

La situation météorologique est en train de changer. Les basses pressions d'Europe du Sud, centrées auparavant sur la Sardaigne, vont se déplacer vers le sud de l'Italie, la Grèce et la Turquie. Les vents devraient donc souffler le 30 avril et le 1^{er} mai non plus vers le nord-ouest, mais vers le sud-ouest. Si ces prévisions se réalisent, l'air se dirigera de la région de Kiev vers la Tchécoslovaquie, la Roumanie, l'Autriche, la Yougoslavie, l'Italie et ensuite vers l'Europe occidentale.

Malheureusement, les autorités soviétiques ne semblent pas avoir réussi à arrêter les émissions du produit radioactif puisque le réacteur brûle toujours.

YVONNE REBEYROL.

Le n... M. Gor... de char... Tchern... politiq... vitale p... nomie e... son co... l'Ouest... dévelo... nucléai... des seu... limiter... de pétr... exporta... cipale s... fortes... sentent... recettes... rel, 20 %

Or c... pour fi... biens... d'équip... doubler... prix du... faire pe... quelque... un gros... rieurs... pétrole... champs... Comm... effort d... dans le... états-m... remanié... compte... ments... l'URS... l'exploit... micux... viendra... cours de

SITUATION LE 30-04-86 A 0 HEURE UCT

L'air coule, parallèlement aux isobares, en laissant toujours, dans l'hémisphère nord, les basses pressions (D, sur la carte) sur sa gauche (A, anticyclone, hautes pressions).

Le Monde paru le vendredi 2 mai sans doute rédigé le 30 avril (le 1^{er} mai étant férié) avant l'arrivée du nuage.

Il montre que, jusqu'au 30 avril, l'anticyclone a empêché l'arrivée du panache sur la France (voir schéma suivant).

Ce n'est nullement une invention de Pierre Pellerin.

Lui imputer la phrase - qu'il jamais prononcée - « le nuage s'est arrêté aux frontières » est une diffamation condamnée confirmée en appel puis en cassation.

L'anticipation de l'arrivée du panache par le SCPRI (Pr Pellerin)

210064
AFP B 210064F
120 1708 *
SCPRI A 696257F

DIR SCPRI
A
MONSIEUR SERGE BERG
AGENCE FRANCE PRESSE

TX 12473 -

CE JOUR 30/4/86 (6H) TOUJOURS AUCUNE ELEVATION
SIGNIFICATIVE DE LA RADIOACTIVITE SUR ENSEMBLE
STATIONS SCPRI DU TERRITOIRE.

SUR PLUSIEURS VOLS STOCKHOLM-PARIS ET OSLO-PARIS (REGION
SCANDINAVE), PRELEVEMENTS PLUS ACTIFS D'UN ORDRE DE GRANDEUR
PAR RAPPORT AU PRELEVEMENT A-F HAMBOURG-PARIS MENTIONNE
DANS MON TELEX DU 29 AVRIL 1986.

POURCENTAGES RELATIFS COMPOSITION EN SPECTROMETRIE GAMMA :

132 TELLURE	:	ENVIRON	36%
132 IODE	:	" "	25%
131 IODE	:	" "	21%
140 BARYUM	:	" "	7%
134 CESIUM	:	" "	4%
103 RUTHENIUM	:	" "	4%
99M TECHNETIUM	:	" "	2%
133 IODE	:	" "	1%
95 ZIRCONIUM	:	TRACES	
95 NIOBIUM	:	" "	
137 CESIUM	:	" "	

PAS DE TRANSURANIENS JUSQU'ALORS.

PR P. PELLERIN - DIR. SCPRI

*
AFP B 210064F
SCPRI A 696257F

La veille l'arrivée du nuage, le 30 avril, grâce au SCPRI on connaît d'avance sa composition :
Les éléments à vie très courte présentent l'activité de loin la plus importante

L'annonce du survol de la France (téléx du SCPRI le 1^{er} mai 1986 à 24 h)

```
210064
AFP B 210064F
121 2353 *
SCPRI Z 696257F

DIR SCPRI
A
M. SERGE BERG AFP

CE JOUR 1ER MAI 86, 24H, TENDANCE POUR L'ENSEMBLE DES STATIONS
DU TERRITOIRE A UN ALIGNEMENT DE LA RADIOACTIVITE ATMOSPHERIQUE
SUR LE NIVEAU RELEVÉ LE 30 AVRIL DANS LE SUD EST.
IL EST RAPPELÉ QUE CE NIVEAU EST SANS AUCUNE INCIDENCE SUR
L'HYGIENE PUBLIQUE.

PR P PELLERIN DIR SCPRI

*
AFP B 210064F
SCPRI Z 696257F
```

Le 1^{er} mai au soir, le Directeur du SCPRI informe que le panache de Tchernobyl est arrivé le soir du 30 avril et a survolé l'ensemble du territoire.

La formulation du téléx indiquant que la radioactivité détecté dès l'arrivée du nuage (le 30 avril au soir à Monaco) s'était étendue à l'ensemble du territoire est assez difficile à décrypter.

Les médias l'ont cependant clairement transmis l'information dès le 2 mai (Libération, ci-après)

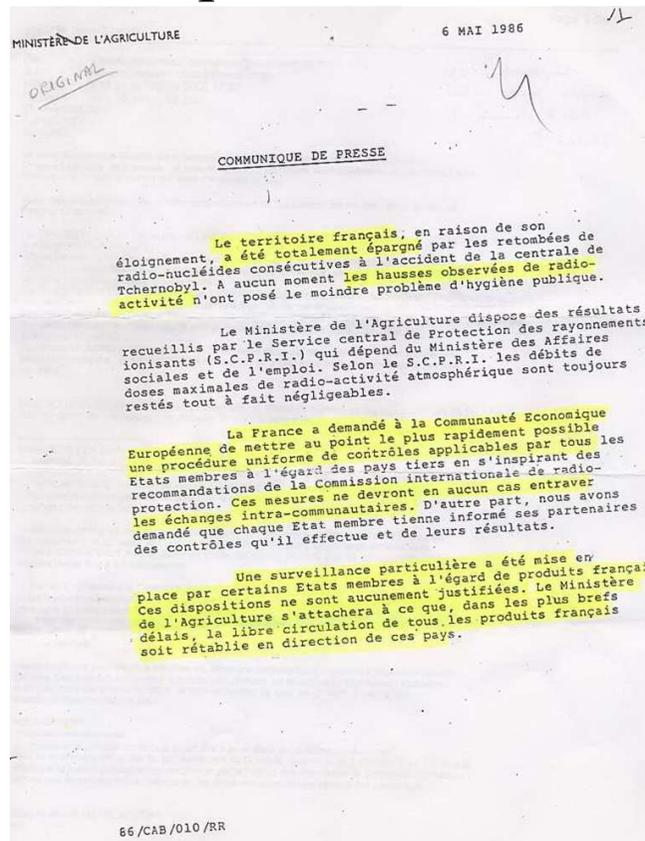
Libération du 2 mai 1986 annonce : « le nuage a survolé la France »



Libération édition du 2 mai, en page 4

« ...**Pierre Pellerin** le Directeur du Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) **a annoncé hier 1^{er} mai que l'augmentation de la radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire** sans aucun danger pour la santé. »

Communiqué du ministère de l'Agriculture du 6/5/86



« Le territoire français en raison de son éloignement a été **totale-ment épargné** par les retombées de radionucléides...

... à aucun moment les **haus- ses observées de la radioactivité** n'ont posé le moindre problème d'hygiène publique »...

Épargné mais... il y a eut hausse de la radioactivité...

Il faudrait savoir !!!

Communiqué inutile, incohérent et totalement absurde.

Cette stupidité, savamment tronquée, deviendra, via M, Noël Mamère « LE MENSONGE », « le nuage s'est arrêté aux frontières » qu'il impute au directeur du SCPRI, Pierre Pellerin...

Fin des vacances ! Les médias du **lundi 12 mai**, tous amnésiques...



Libé : « **Les pouvoirs publics ont menti le nuage de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'hexagone, le professeur Pellerin en a fait l'aveu** »

Autre aveu, bien tardif, en préambule de l'Atlas de la CRIIRAD (2002)

LA VÉRITÉ D'UNE CARICATURE

Plongeons un instant dans le passé. Nous sommes le 2 mai 1986. L'accident survenu le 26 avril est dans tous les esprits, sur toutes les bouches. Imaginons que des journalistes attendent, impatients, les déclarations des autorités françaises. La conférence de presse commence et le directeur du SCPRI annonce solennellement : « *Le nuage de Tchernobyl s'est arrêté aux frontières de la France !* ». Qui peut croire que de tels propos n'aient pas déclenché les rires, voire les huées, de l'assistance ? C'est grotesque.

L'image du douanier intimant au nuage de Tchernobyl de stopper à la frontière franco-allemande appartient à l'univers des **humoristes**. Les responsables se sont évidemment exprimés avec plus de nuance et la désinformation n'a pas toujours été facile à décrypter. Le mensonge s'est décliné en chiffres, cartes, becquerels, interprétations erronées et amalgames subtils... autant de choses que l'opinion publique a naturellement du mal à retenir. Le contenu exact des déclarations officielles a été oublié.

Seules persistent, dans la mémoire collective, l'idée du mensonge et l'image de la frontière... Le trait est évidemment un peu forcé, mais n'est-ce pas le propre d'une caricature réussie que de rendre compte, avec pertinence, d'une réalité nécessairement plus complexe.

Les successeurs du SCPRI² avaient déjà tenté, il y a quelques années, de jouer sur l'ambiguïté. Sur une radio nationale, un repas gratuit à la *Tour d'argent* avait été promis à quiconque pourrait démontrer que Monsieur Pellerin avait effectivement déclaré que les frontières de la France avaient su arrêter le nuage de Tchernobyl. Un pari sans risque ! Nous avions alors souri de la grossièreté du subterfuge. Nous étions loin de nous douter que ce raisonnement spécieux pourrait un jour servir à réécrire l'histoire.

À CHACUN DE JUGER



Le nuage s'est-il vraiment arrêté aux frontières ?

Mais non ! En 2002 la CRIIRAD s'explique enfin : « *l'image appartient à l'univers des humoristes* », il ne s'agit que « *d'une caricature au « trait [il est vrai !] un peu forcée* » !

Qu'importe ! Pour la CRIIRAD, l'essentiel est que dans l'esprit du public : « *seules persiste dans la mémoire collective l'idée du mensonge et l'image de la frontière* ». Une bien curieuse éthique !

Seize ans après l'accident de Tchernobyl, la CRIIRAD, organisme indépendant créé après l'accident pour « *contrer et dénoncer les mensonges officiels* » reconnaît que la célèbre phrase « *le nuage s'est arrêté aux frontières* », n'a jamais été prononcée par le directeur du SCPRI, accusé depuis 1986 d'avoir menti et dissimulé au public le survol de la France par le nuage en provenance de Tchernobyl.

1990 : Le démenti d'un ministre à l'Assemblée... inutile !

CATASTROPHE DE TCHERNOBYL

ASSEMBLEE NATIONALE - 9 MAI 1990

REPOSE DE MONSIEUR ROGER FAUROUX, MINISTRE
DE L'INDUSTRIE ET DE L'AMENAGEMENT DU
TERRITOIRE A MONSIEUR FRANCOIS PATRIAT :

...

" VOUS AVEZ FAIT ALLUSION A CE QUI
S'EST PASSE EN FRANCE AU MOMENT
DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL. JE
DOIS PRECISER, PARCE QU'IL Y A,
ME SEMBLE-T-IL, UNE LEGENDE NOIRE
QU'IL IMPORTE D'EXORCISER, QUE,
AU COURS DU FAMEUX WEEK-END DU
1ER MAI 1986, LE SERVICE CENTRAL
DE PROTECTION CONTRE LES
RAYONNEMENTS IONISANTS A DONNE,
HEURE PAR HEURE, AUX POPULATIONS
DES INFORMATIONS CONCERNANT LE
PASSAGE DU NUAGE RADIOACTIF. ET
J'AI LA UNE CHRONOLOGIE, QUE JE
TIENS A LA DISPOSITION DES
MEMBRES DE CETTE ASSEMBLEE, QUI
INDIQUE QUE RIEN N'A ETE
DISSIMULE. "