



L'accident nucléaire de Fukushima Daiichi

Exposé préparé par B. Bonin, CEA

avec des planches reprises de plusieurs sources:

M. Braun, Areva,

B. Tarride et C. Renault, INSTN,

P. Raymond, CEA,

D. Champion, IRSN

A. Omoto, U. Tokyo

H. Matsui, TEPCO

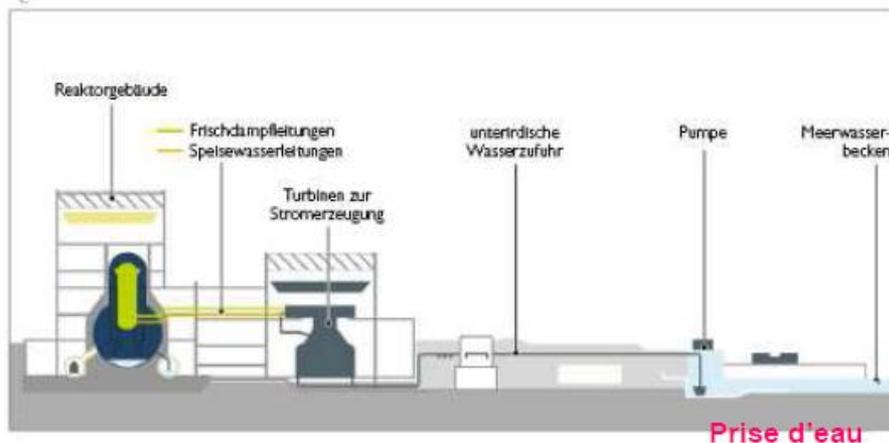


Exposé présenté par H. Safa, CEA



Plan de l'exposé

- La centrale de Fukushima et ses réacteurs
- Le déroulement de l'accident
- Conséquences radiologiques et environnementales
- Conséquences pour le nucléaire dans le monde



- 4 sites nucléaires concernés
- Plus critique : Fukushima Daiichi : 6 réacteurs BWR (avec ses piscines combustible), dont 3 en production au 11/03/2011.

La centrale de Fukushima

Tranche 1 GE Mark I BWR (460 MWe) connectée au réseau fin 1970

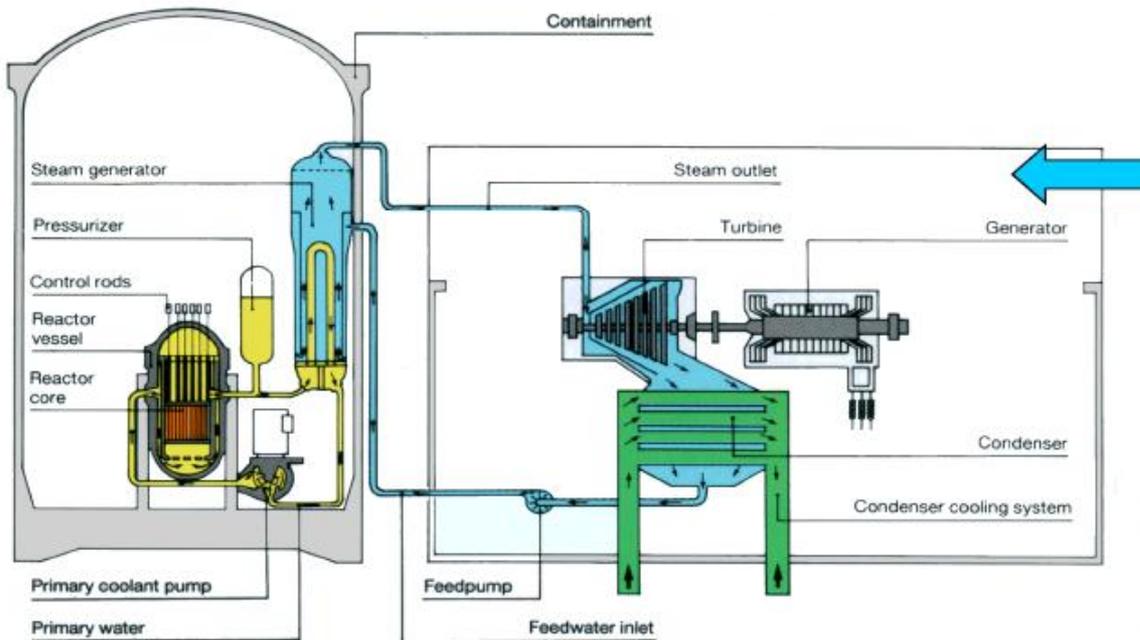
Tranches 2, 3, 4 - GE Mark I BWR (784 MWe) connectée au réseau entre 1973 et 1978



Présentation de la centrale de Fukushima Daiichi



Centrale de Fukushima Daiichi	Type	Puissance	Première divergence	Concepteur	Etat au moment du séisme
Réacteur n°1	BWR	460 MWe	1970	GE	En puissance
Réacteur n°2	BWR	784 MWe	1973	GE	En puissance
Réacteur n°3	BWR	784 MWe	1974	Toshiba	En puissance
Réacteur n°4	BWR	784 MWe	1978	Hitachi	Arrêt
Réacteur n°5	BWR	784 MWe	1978	Toshiba	Arrêt
Réacteur n°6	BWR	1100 MWe	1979	GE	Arrêt



REP

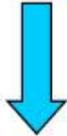
Circuit primaire

Réacteur fonctionnement normal

Pression : 150 bars
 Température : 285°C
 Densité de puissance cœur : ~100 KW/litre

Volume enceinte : 60 à 90.000 m³
 Pression de conception de l'enceinte : 3 bars

REB



Circuit primaire

Réacteur fonctionnement normal

Pression : 70 bars
 Température : 285°C
 Densité de puissance cœur :
 Unité 1 : 40 KW/litre
 Unité 2 : 50 KW/litre

Volume enceinte : 11.000 m³
 Pression de conception de l'enceinte : 4,2 bars

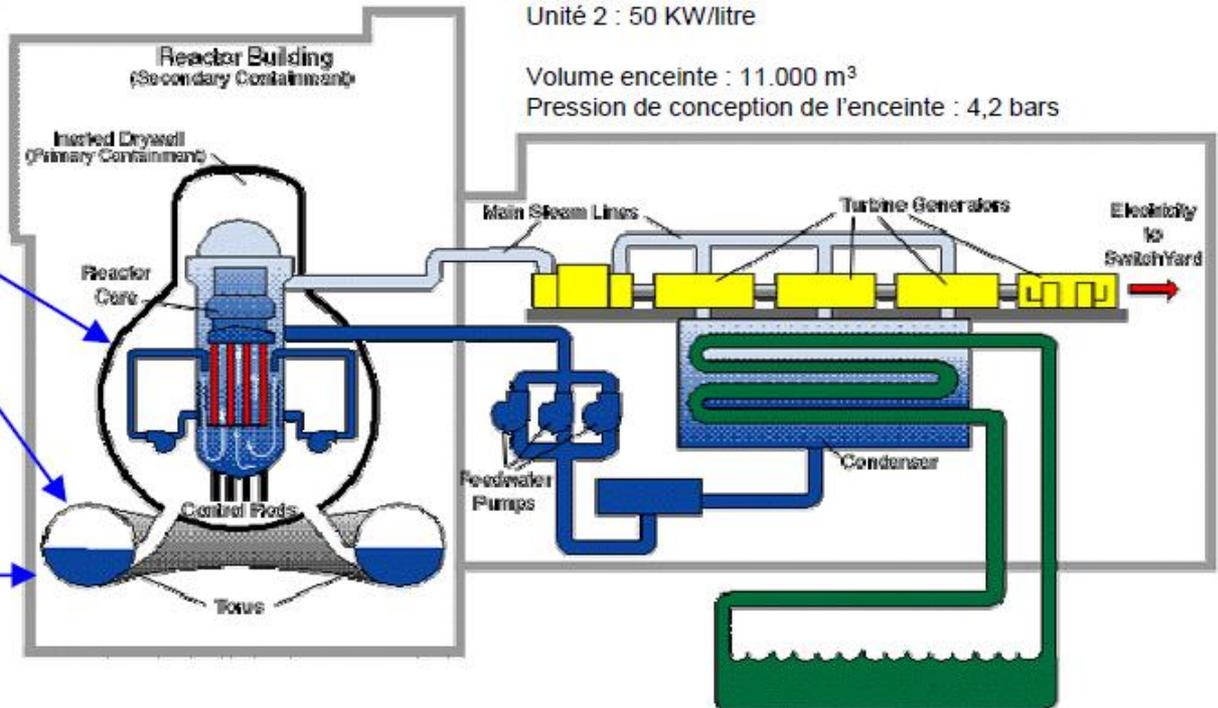
REB

Principe de fonctionnement de l'enceinte

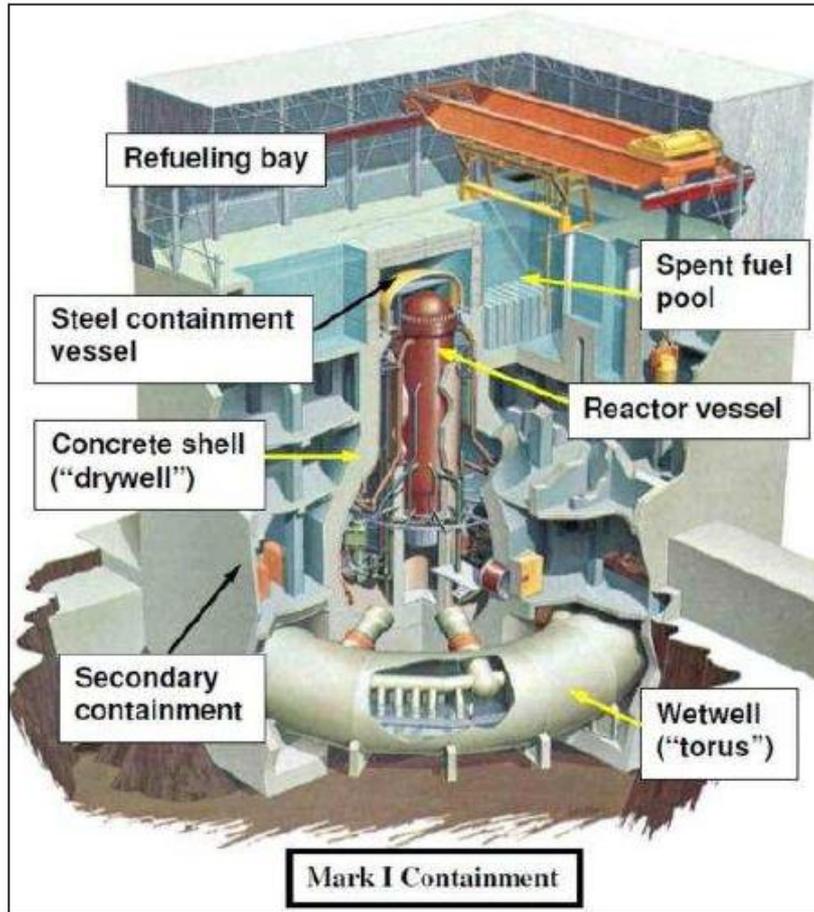
Volume sec contenant la cuve du réacteur

Volume humide (tore) contenant la piscine

En cas de fuite de la cuve réacteur, la vapeur sous pression passe via les barboteurs dans la piscine du tore où elle est condensée



BWR Mark I General Electric (GE)



Le bâtiment du réacteur

- bâtiment en béton
- partie supérieure en bardage métallique



L'enceinte de confinement

- puits sec (drywell) en forme de poire
- puits humide (wetwell) en forme de tore

Le haut du bâtiment réacteur

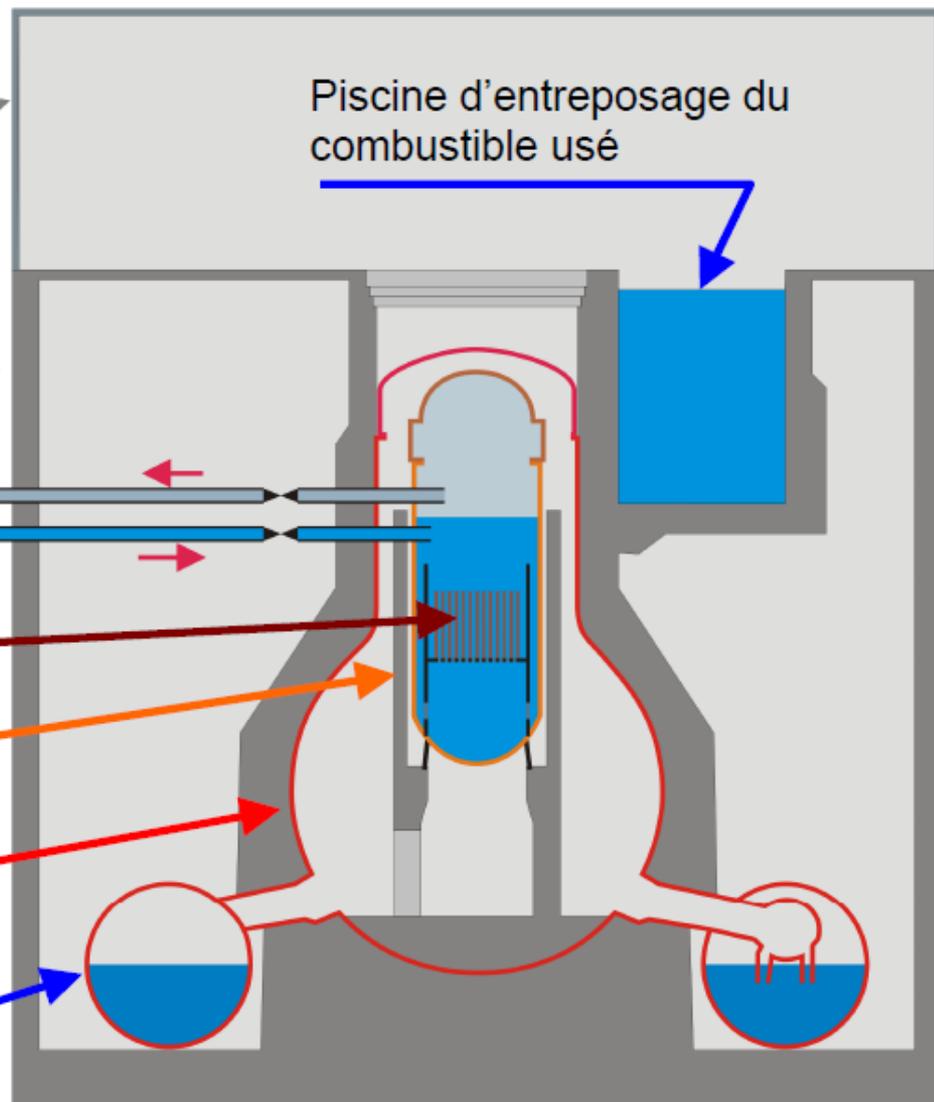
► Service Floor



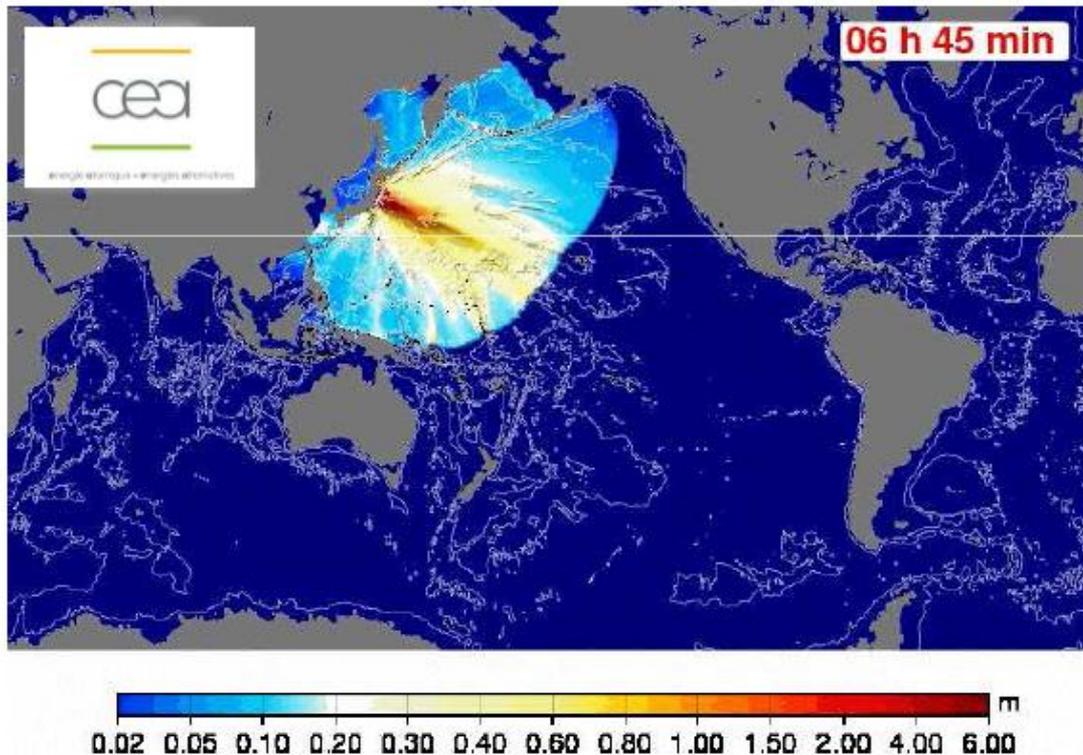
Source : M. Braun, Areva

Architecture et fonctionnement

- ▶ Partie supérieure (construction en acier)
- ▶ Bâtiment réacteur en béton (confinement secondaire)
- ▶ Coeur du réacteur
- ▶ Cuve du réacteur
- ▶ Enceinte (puits sec)
- ▶ Enceinte (puits humide) /
Chambre de condensation



Déroulement de l'accident : le séisme et le tsunami



Délai entre le séisme et l'arrivée du tsunami sur la côte de Fukushima : environ 45 minutes

14:46 Séisme mag. 9

15:30 Tsunami sur Fukushima

15:41 Perte totale électrique

Source : P. Raymond, DEN

Fukushima Daiichi » le 11/03/11 14h46

Séisme : Accélération 0.37 g

> dimensionnement = 0.3g

Bonne tenue générale, grâce
aux marges

Mais vague tsunami 14 m

> digue dimensionnée à 6,5m.



avant / après



Déroulement des évènements

1. **Le séisme** provoque :

- l'arrêt automatique des réacteurs
- la perte des alimentations électriques externes de la centrale

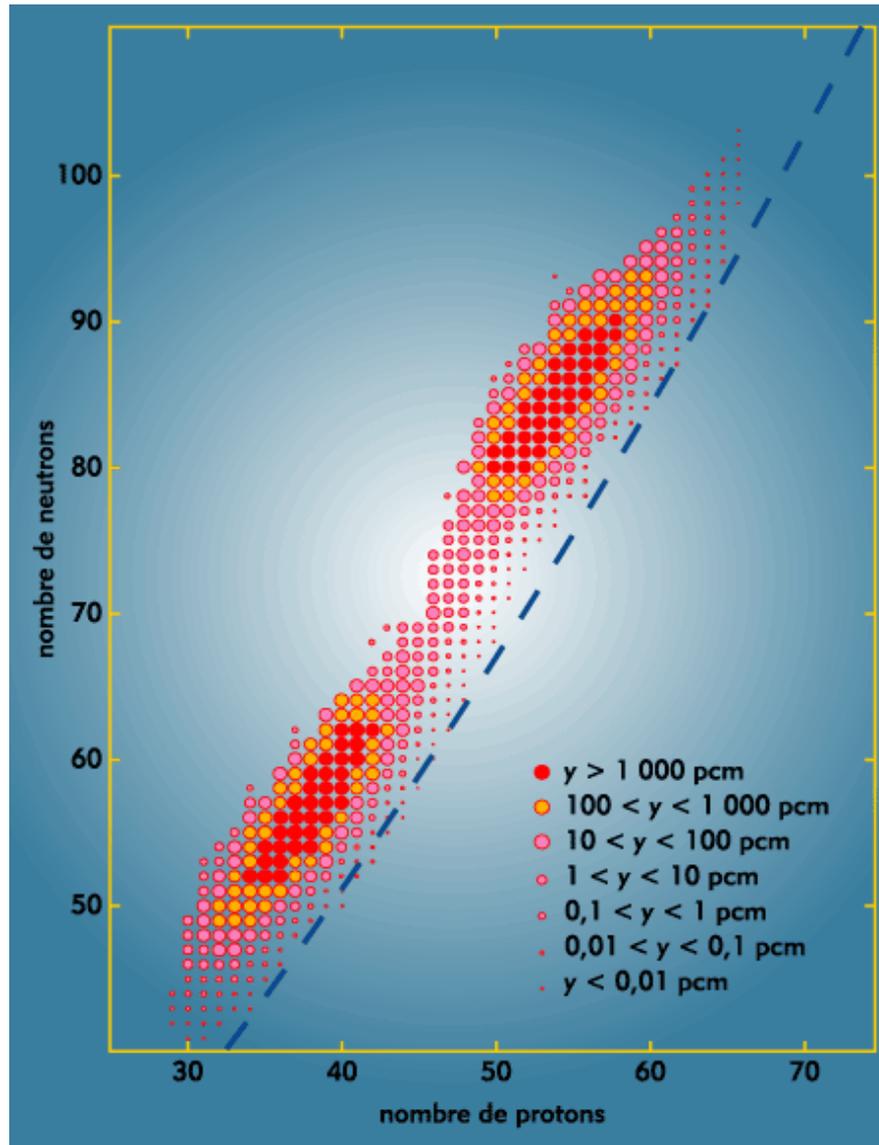
2. **Le tsunami** provoque :

- **la perte totale de la source froide** (station de pompage)

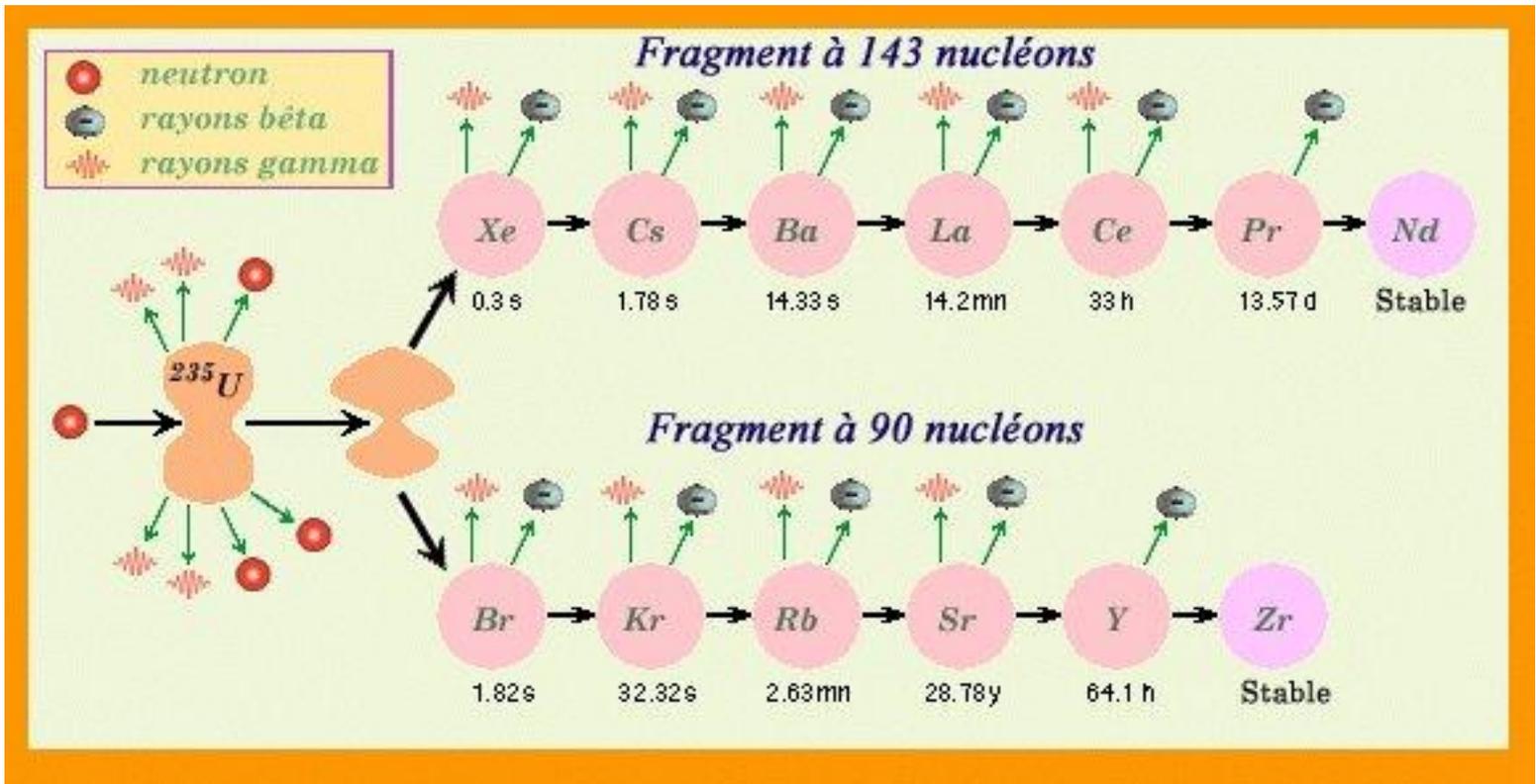
puis la perte des alimentations internes de secours (groupes électrogènes, fuel)

Pourtant, il reste à évacuer la **puissance résiduelle** générée par les produits de fission. La suite était inévitable...

Les produits de fission



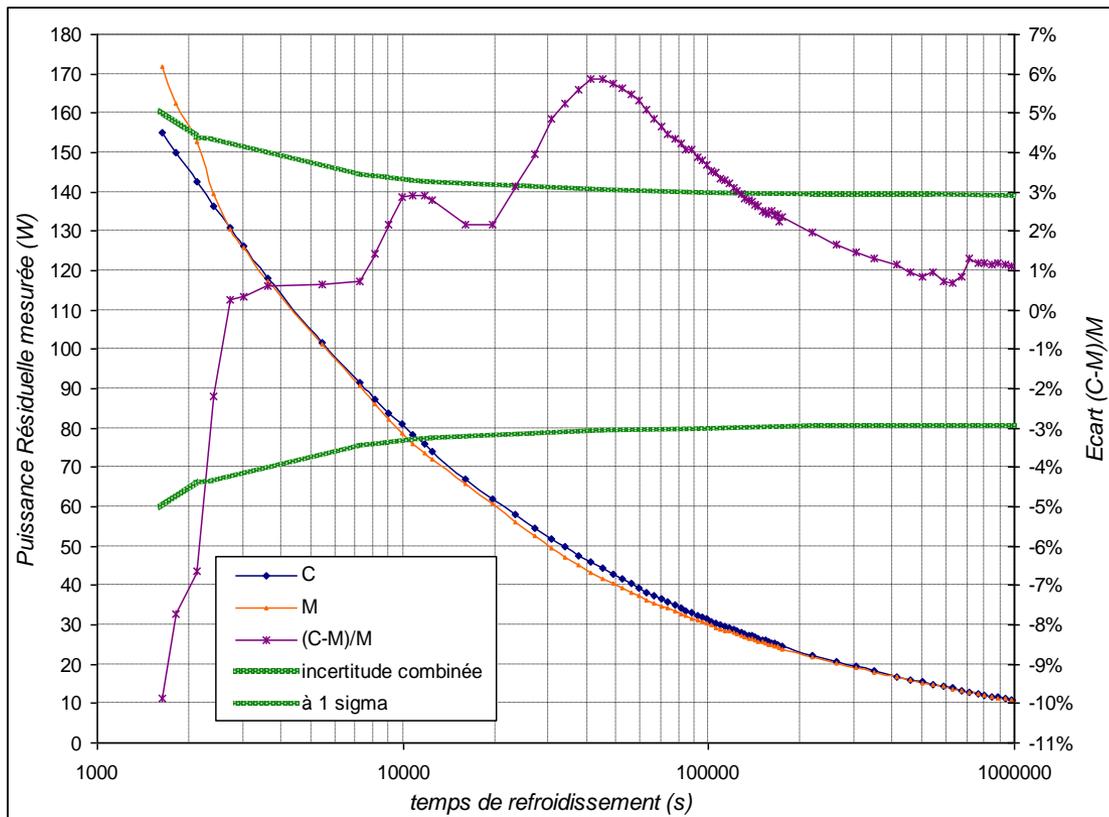
Radioactivité des produits de fission



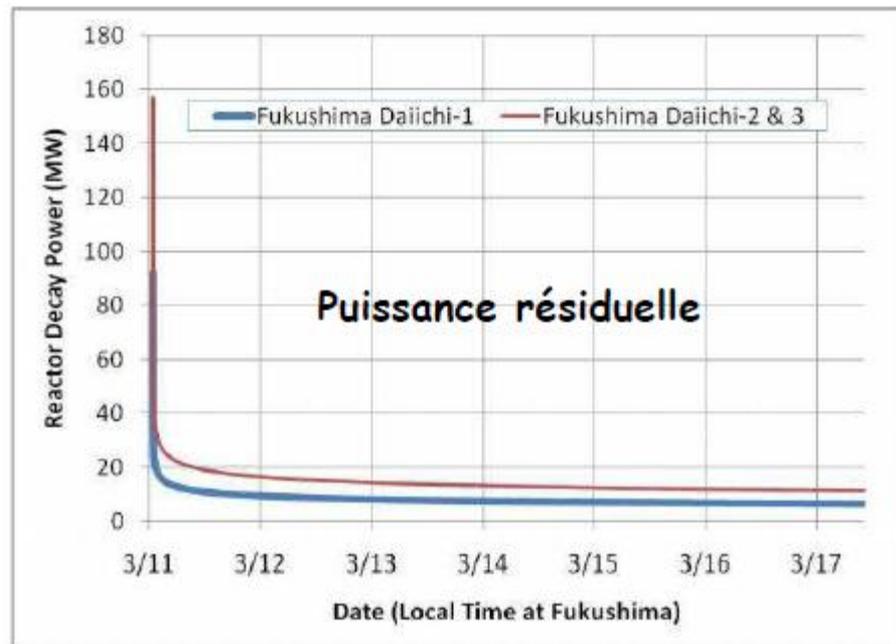
Même après son arrêt, le réacteur produit de l'énergie, du fait de la décroissance radioactive des produits de fission en son sein

Puissance résiduelle (court terme)

- À $t = 0$: 7% de la puissance nominale
- À $t = 3\text{h}$, 3% de la puissance nominale
- À $t = 1\text{ jour}$, 1% de la puissance nominale



La puissance résiduelle (long terme)





Déroulement de l'accident

Fukushima : Fonctionnement en situation accidentelle

Au départ

Pendant une dizaine d'heures, le réacteur peut évacuer la puissance résiduelle des combustibles sans électricité avec les turbo-pompes utilisant la vapeur du réacteur

- La pression dans le réacteur diminue
 - Le niveau d'eau dans le réacteur est maintenu par l'apport d'eau d'une bache
 - **Cette phase a été mise en œuvre durant les premières heures après le séisme jusqu'à ce que les bâches à eau soient vides.**

Ensuite

- Sans alimentation électrique la seule solution est d'injecter de l'eau dans le réacteur par un moyen externe
- L'eau se vaporise dans le cœur
- Pour contrôler la pression dans le cœur on ouvre la soupape de sécurité périodiquement
- Pour limiter la pression dans l'enceinte on ouvre une vanne vers le bâtiment réacteur périodiquement
- Pour éviter le dénoyage du combustible et sa dégradation (corium) il faut arriver à maintenir le cœur sous eau

Le premier recours utilisé à Fukushima pour évacuer la puissance résiduelle en l'absence de source froide

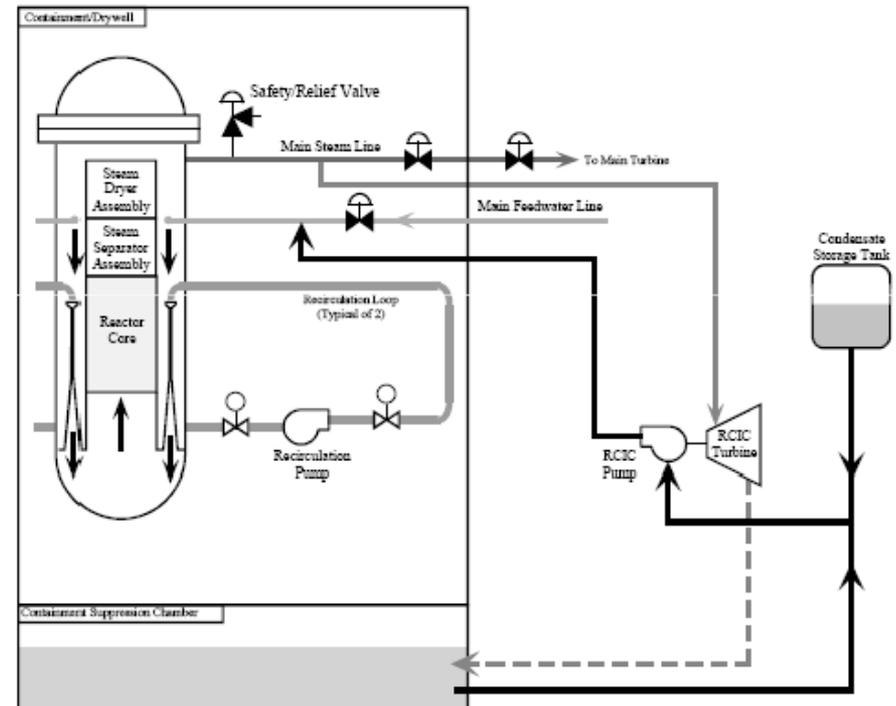
Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC)

The Reactor Core Isolation Cooling System is not a safety-related system proper, but it can help cool the reactor in the event of a contingency.

RCIC is designed to remove the residual heat of the fuel from the reactor once it has been shut down. It injects approximately 2,000 L/min into the reactor core for this purpose, at high pressure. It also takes less time to start than the HPCI system, approximately 5 seconds from an initiating signal.

The RCIC system is operable with no electric power other than battery power.

During a station blackout (where all off-site power is lost and the diesel generators fail) the RCIC is capable of providing decay heat removal by itself.



NB : HPCI is powered by steam from the reactor, and takes approximately 10 seconds to spin up from an initiating signal, and can deliver approximately 19,000 L/min (5,000 US gal/min) to the core at any core pressure above 6.8 atm

NB : Ce dispositif ne fait que transférer des calories du cœur vers la chambre de condensation. Il n'est efficace qu'à court terme.

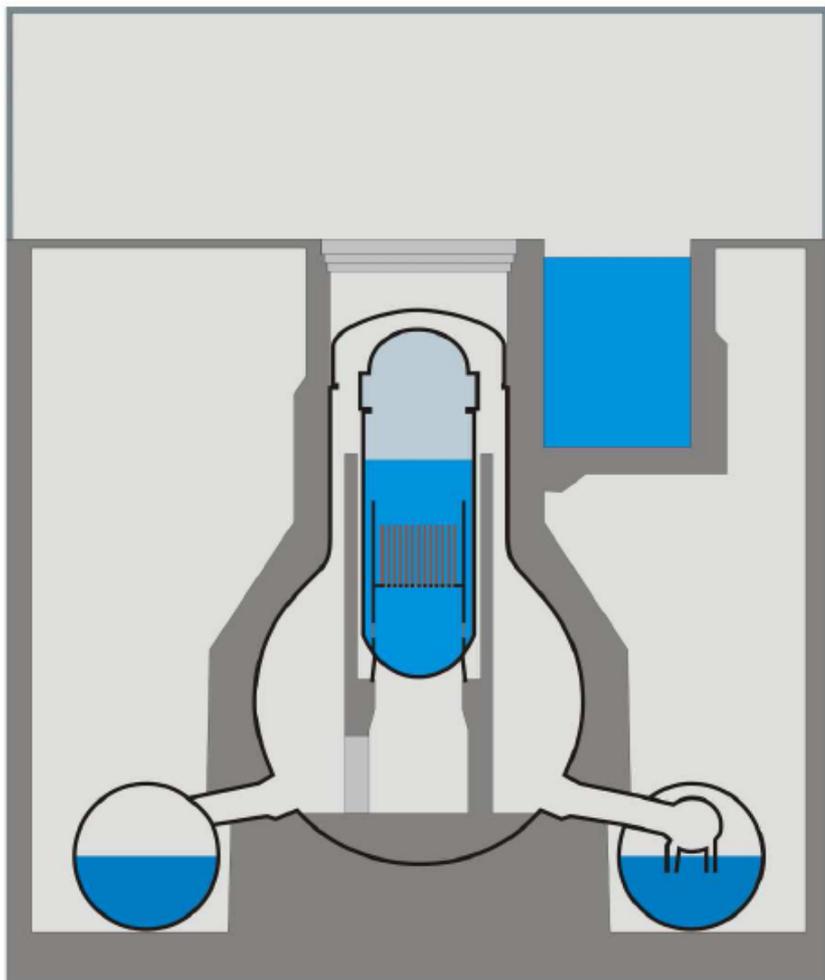
Source : P. Raymond, DEN

La séquence des évènements

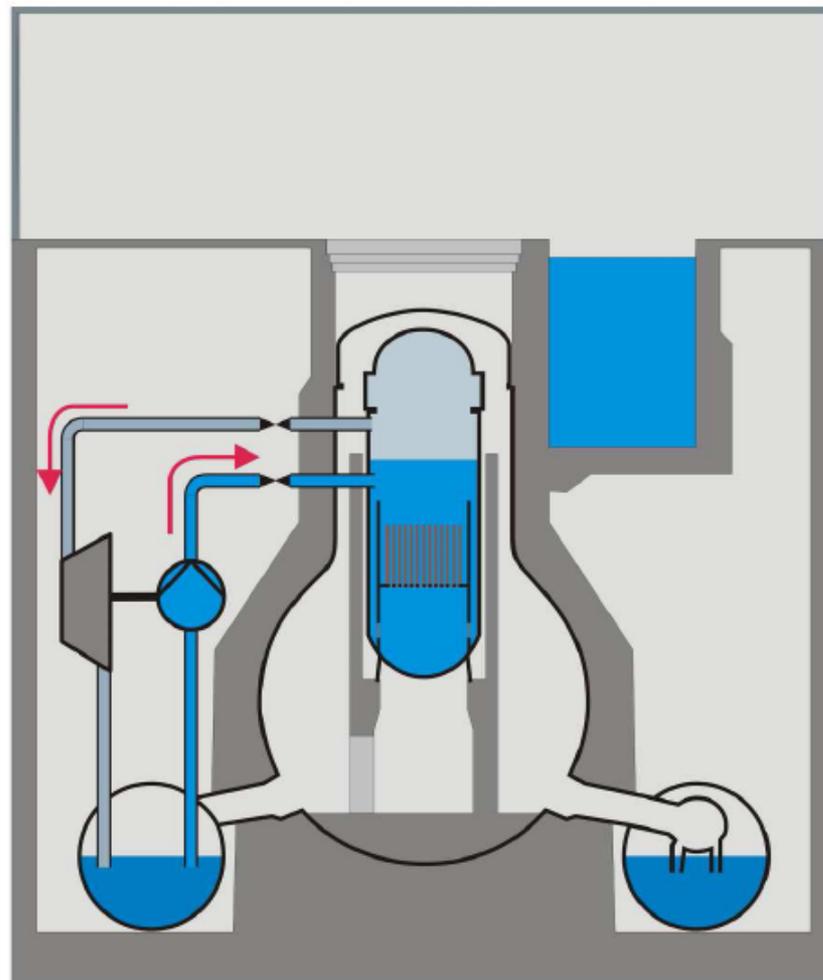
- Augmentation progressive de la température du cœur
- Dénoyage du cœur
- Dégradation des gaines du combustible et du combustible lui-même, avec libération des PF volatils
- Réaction eau/zircaloy et production hydrogène mêlée à la vapeur
- Augmentation de la pression à l'intérieur de l'enceinte de confinement (0,8 MPa)
- Sauvegarde de l'enceinte par relâchements volontaires et contrôlés de vapeur vers l'enceinte de confinement puis vers la partie supérieure du bâtiment

Progression de l'accident (1)

D'après Dr Matthias Braun, AREVA-NP GmbH



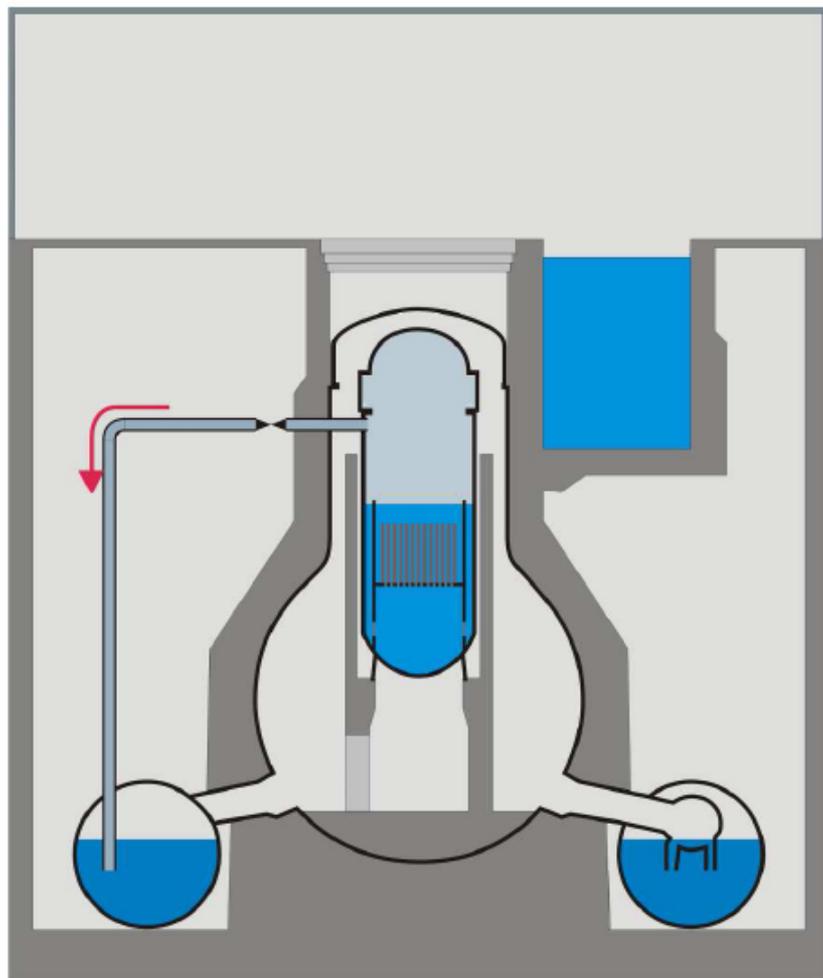
Perte totale des alimentations électriques



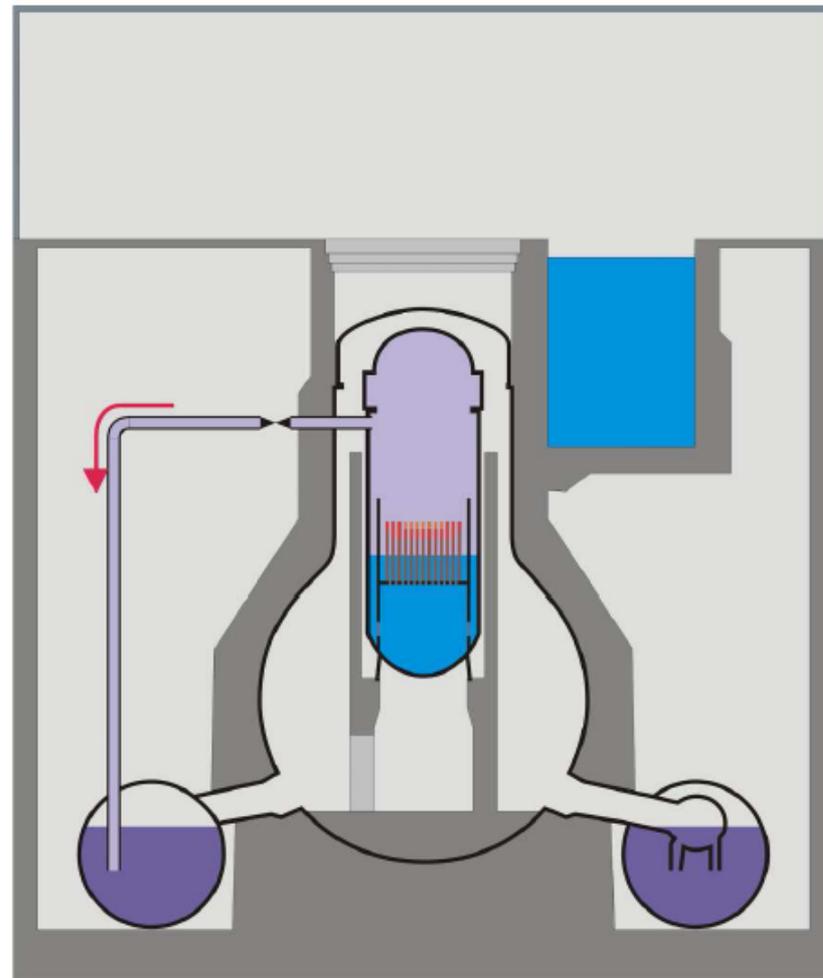
Refroidissement temporaire du coeur
(turbopompe + batteries)

Progression de l'accident (2)

D'après Dr Matthias Braun, AREVA-NP GmbH



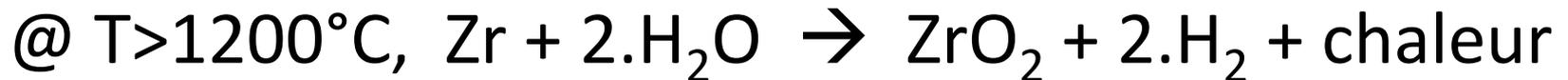
Augmentation de la pression dans la cuve et ouverture des vannes de dépressurisation



Découvrement partiel des éléments combustibles dans le coeur

Conséquences du dénoyage du cœur

Montée en température des éléments combustibles :
dégradation de la gaine, qui peut aller jusqu'à la
fusion; libération des PF volatils

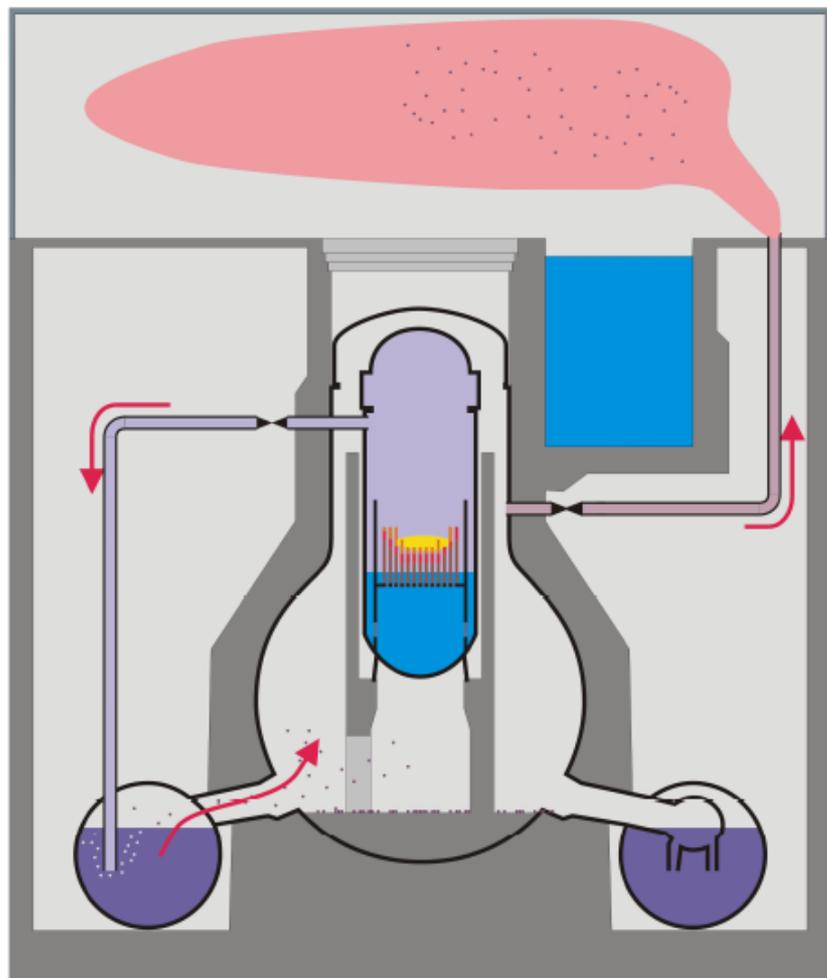


Risque d'explosion si l'hydrogène rentre en contact
avec l'oxygène de l'air

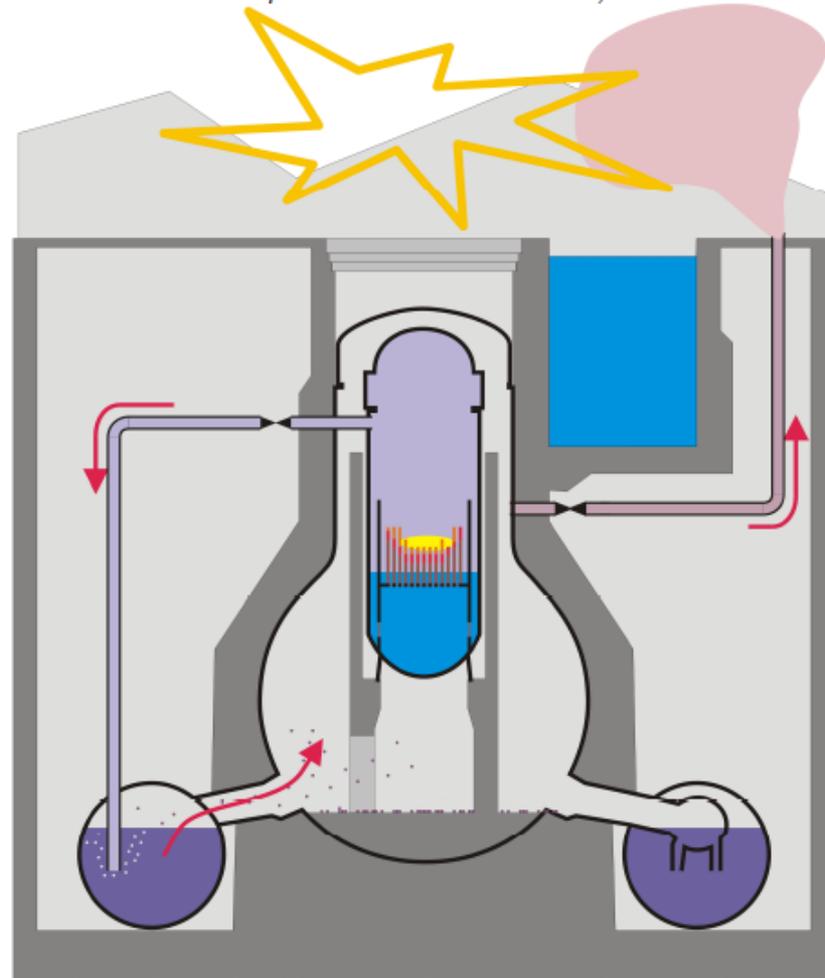
(seuil à T ambiante : concentration en $\text{H}_2 > 4\%$)

Progression de l'accident (3)

D'après Dr Matthias Braun, AREVA-NP GmbH

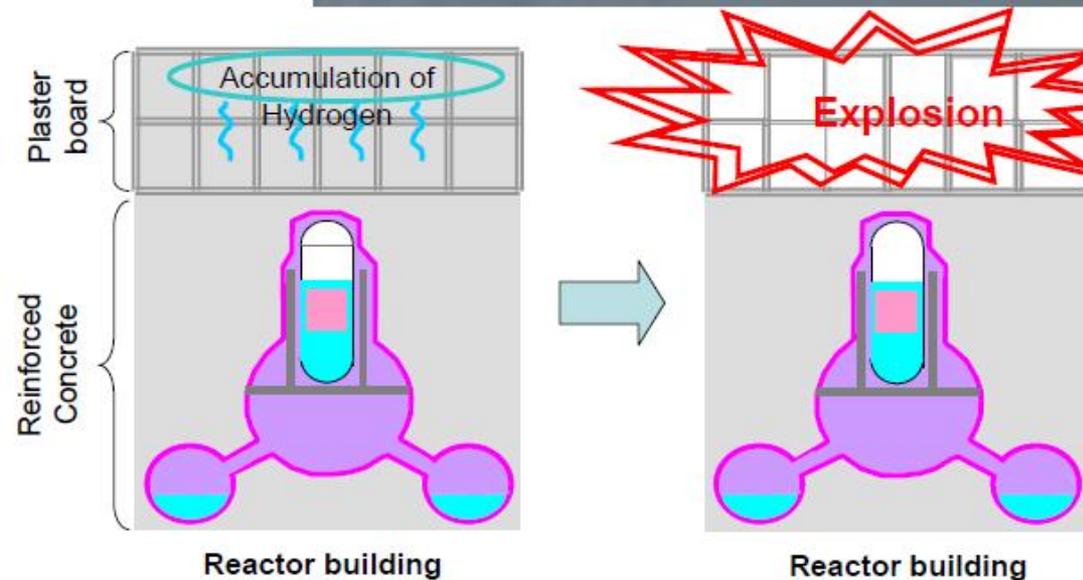
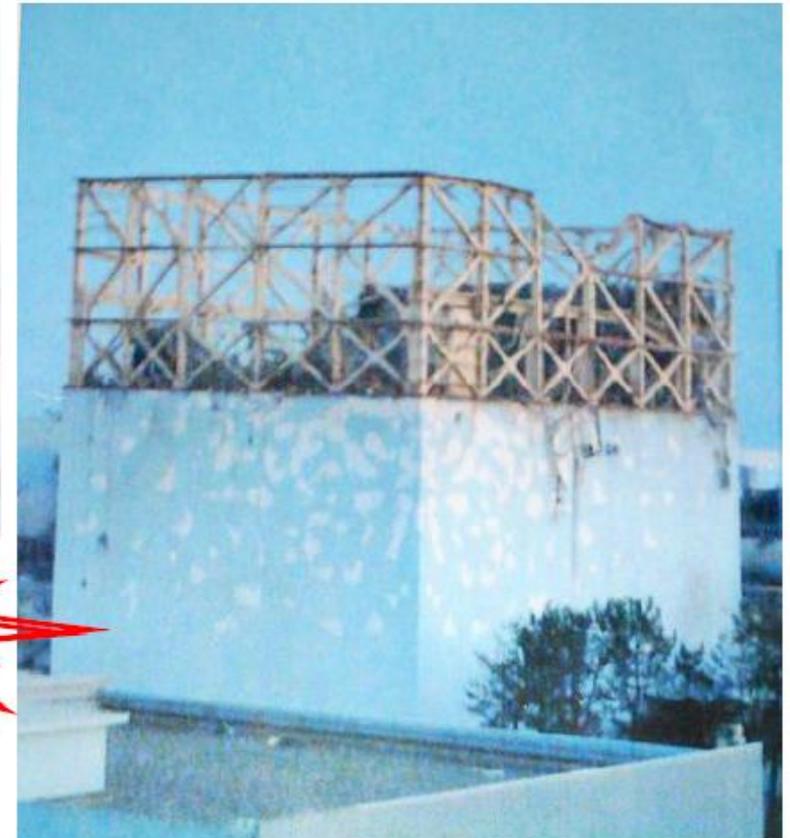


Dépressurisation de l'enceinte et transfert de produits de fission (volatiles) et d'hydrogène



Combustion de l'hydrogène dans la partie supérieure du bâtiment réacteur (impact sûreté faible)

Explosions hydrogène



Unité 3, le 16 Mars



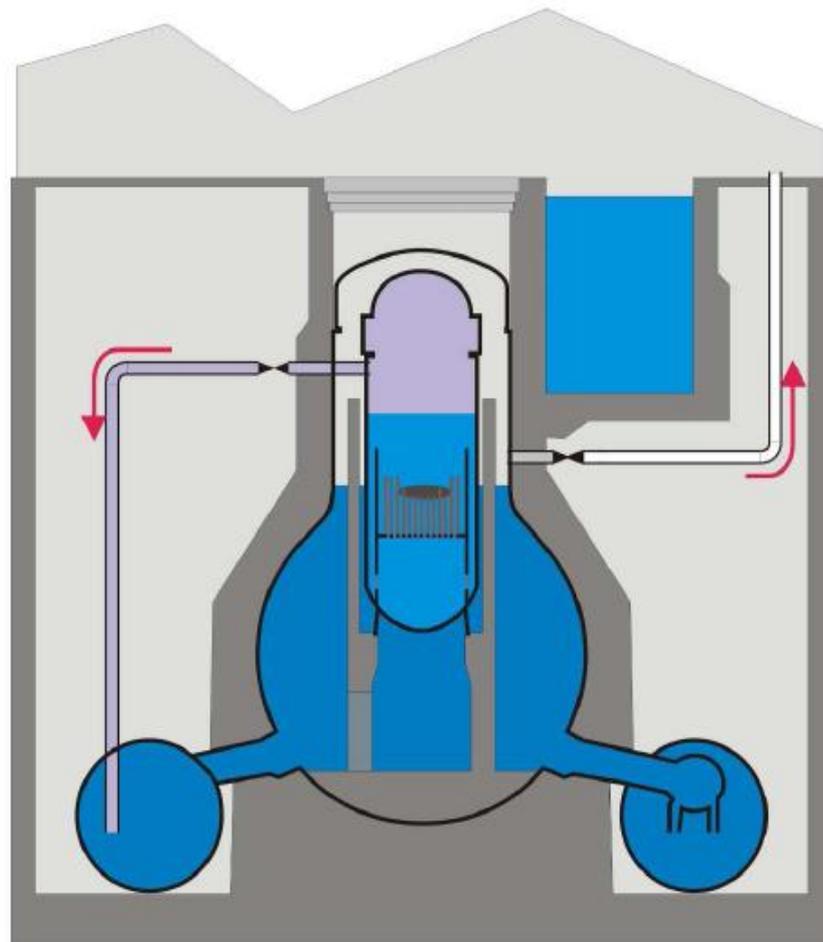
Progression de l'accident (4)

D'après Dr Matthias Braun, AREVA-NP GmbH



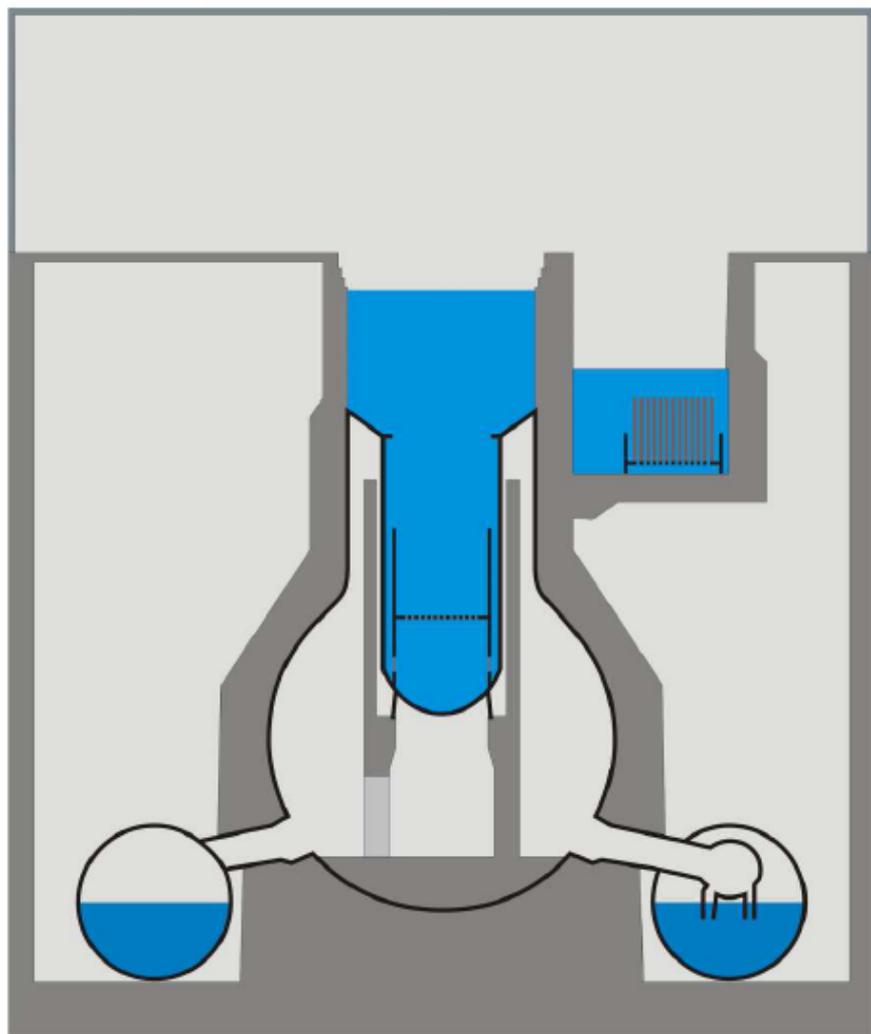
Etat des réacteurs

- ◆ Coeur endommagé en tranches 1,2,3
- ◆ Bâtiments endommagés du fait d'incendies divers en tranches 1-4
- ◆ Cuves du réacteur remplies avec des pompes mobiles sur toutes les tranches

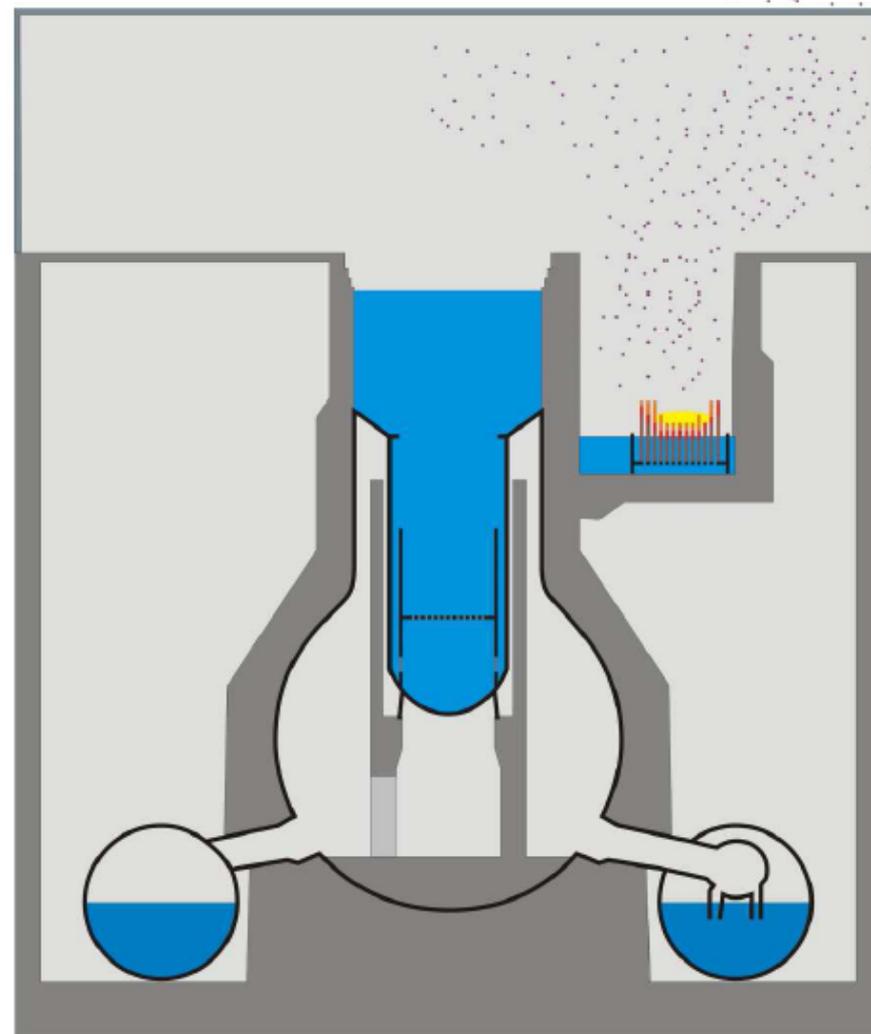


Progression de l'accident (5)

D'après Dr Matthias Braun, AREVA-NP GmbH

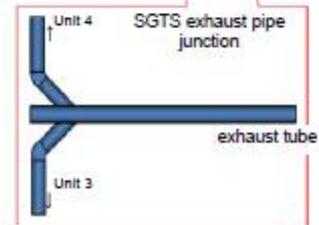
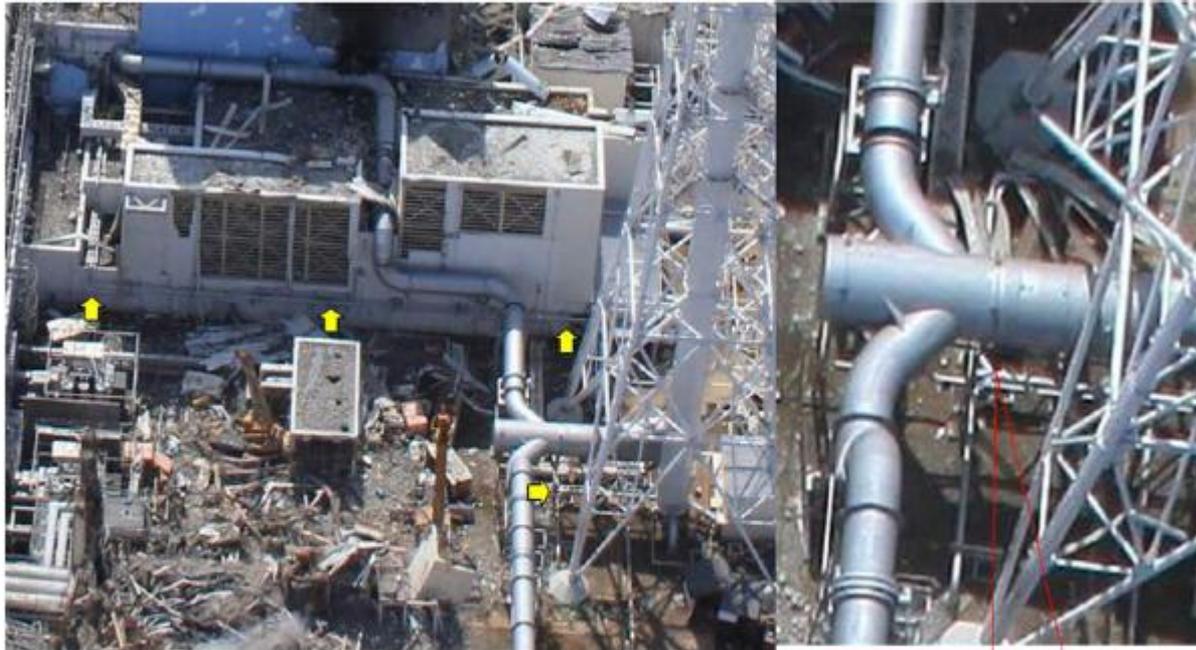


Assèchement des piscines d'entreposage du combustible usé (tranche 4)



Fusion d'éléments combustibles en air, rejets vers l'extérieur

Eventage des bâtiments réacteur N°3 et N°4



Bilan réacteurs et piscines 1 à 4



Réacteurs en production, arrêtés automatiquement par sismomètre

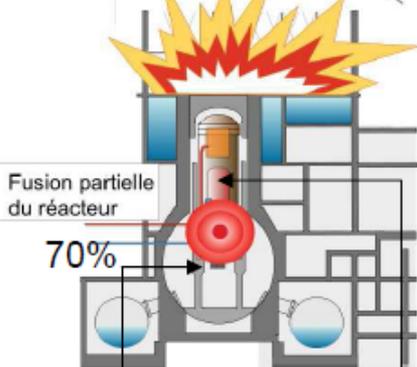
Réacteur initialement à l'arrêt

Les cuves des réacteurs ont tenu

Particularité : combustible MOX

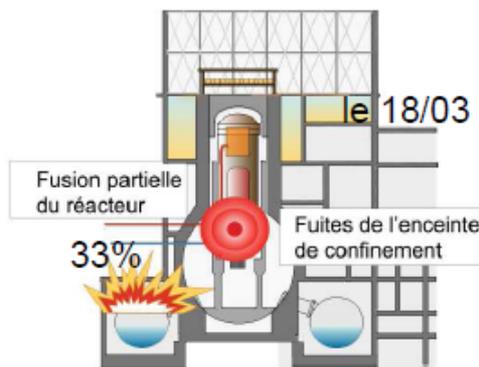
Réacteur 1

Samedi 12 mars : explosion de la structure du bâtiment



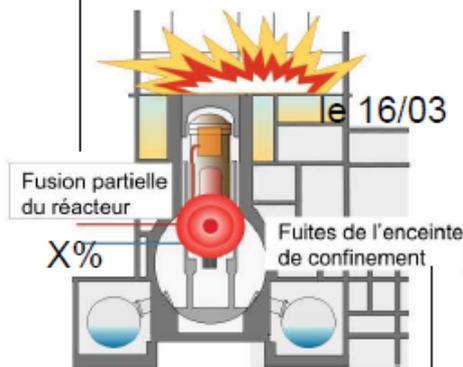
Réacteur 2

Mardi 15 mars : explosion dans la piscine de condensation



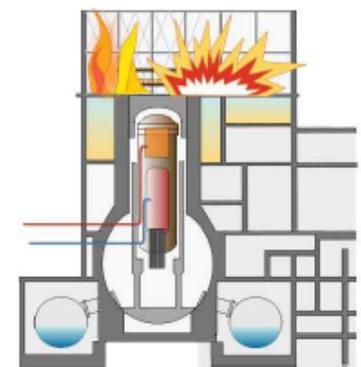
Réacteur 3

Lundi 14 mars : explosion soufflant le toit du bâtiment



Réacteur 4

Mardi 15 mars : explosion puis incendie au niveau de la piscine d'entreposage



Tous réacteurs : Injection d'eau de mer, puis eau douce (> 26/03) avec bore

Origine probable des rejets radioactifs « non filtrés » dans l'environnement

Le tore du réacteur 2 est probablement endommagé

Deux mois après l'accident



<http://www.asahi.com/photo/news/gallery/fukushimagenpatsu/>

Toujours pas d'accès à la mer
pour la source froide

La puissance résiduelle est
encore évacuée par injection
d'eau douce, mais l'éventage de
vapeur n'est plus nécessaire

Le réseau électrique est rétabli

L'état du combustible dans les
réacteurs 1, 2 et 3 est mal
connu

Des galeries techniques pleines
d'eau contaminée

Robot Investigation of Reactor Building

Packbot

(courtesy of i-robot corporation)



Observed Dose Rate at R/B

Unit 1: 10-49 mSv/h,

1120mSv/h (around SHC pp)

Unit 2: 4mSv/h

Unit 3: 28-57mSv/h

Source : H. Matsui, ICAPP 2011

Comparaison Fukushima 1,2,3&4 / TMI2 & Tchernobyl4



	Fonction de sûreté affectée	Cinétique accident	Maitrise du réacteur	Cœur	Confinement	Terme source rejets	Cat IN ES	Principaux enseignements : importance de :
TMI2 (1979)	Evacuation puissance à l'arrêt	Lente	Resté toujours maîtrisable	50% fondu	Quasi-intègre	≈ 0	5	<ul style="list-style-type: none"> - Composante FH&O - EPS : défaillances de « mode commun » - Accidents graves : couplage « fusion » et « perte confinement »
Tchernobyl 4 (1986)	Contrôle réaction en chaîne, et donc confinement	Explosive *	Non maîtrisé dès le début	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersé - Partie entraînée par ascendances thermiques 	Confinement insuffisant et inopérant (cinétique explosive)	S1 (max)	7	<ul style="list-style-type: none"> - stabilité neutronique - AS indépendante - culture de sûreté
Fukushima 1,2,3&4 (2011)	Evacuation puissance à l'arrêt, puis confinement	Lente	Perte, puis reprise du contrôle ?	<ul style="list-style-type: none"> - Réacteurs 1,2&3 : fusion partielle - Piscines 3&4 : fusion ? 	<ul style="list-style-type: none"> - Réacteur 1 OK - Réacteurs 2&3 : partiel - Piscines : « faible » 	De S1/10 à 10xS1 ?	7	<ul style="list-style-type: none"> - Agression type séisme = « mode commun » connu - Réexa décenn

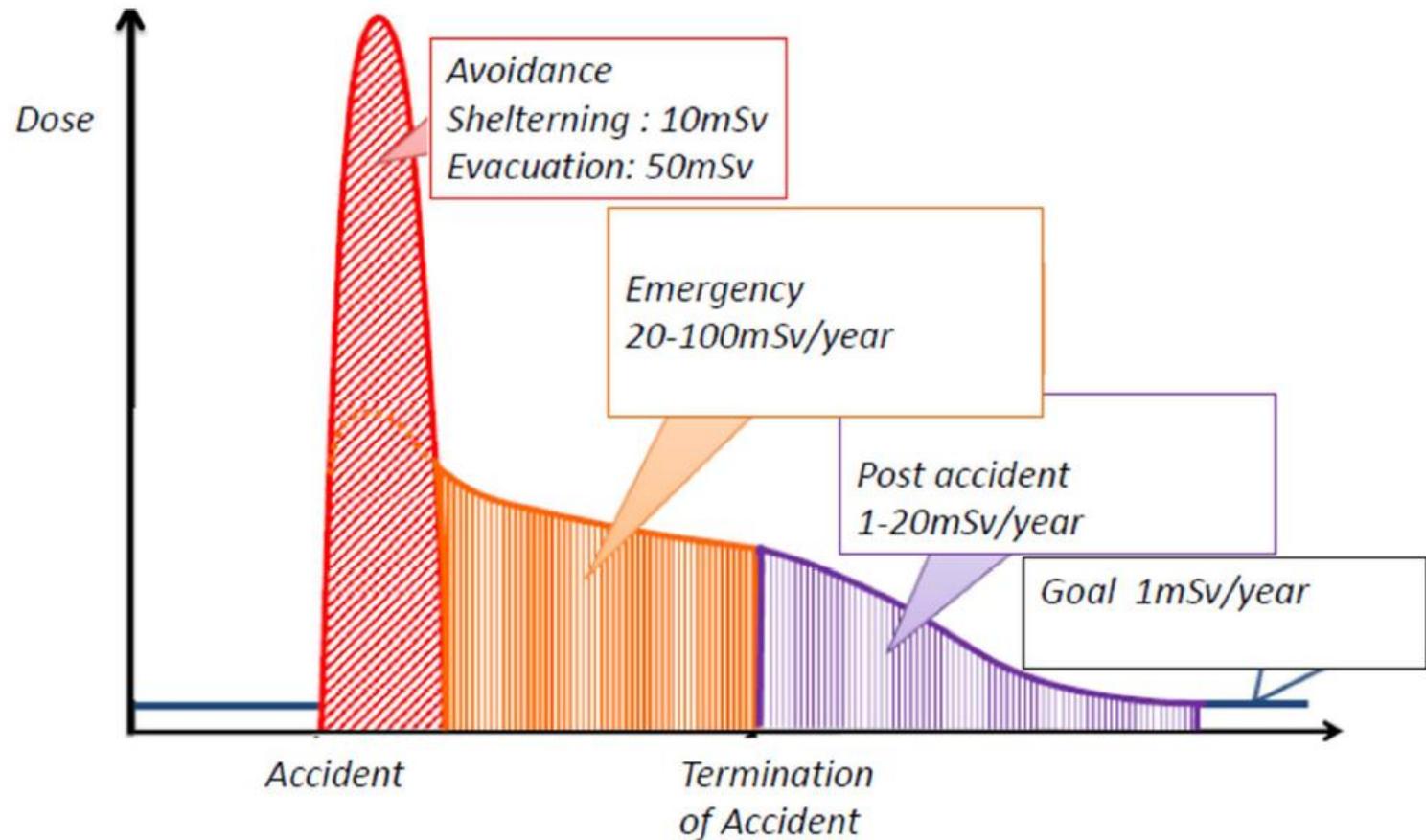
* Explosion vapeur dans le cœur et non explosion nucléaire type bombe A

Les principaux radionucléides relâchés

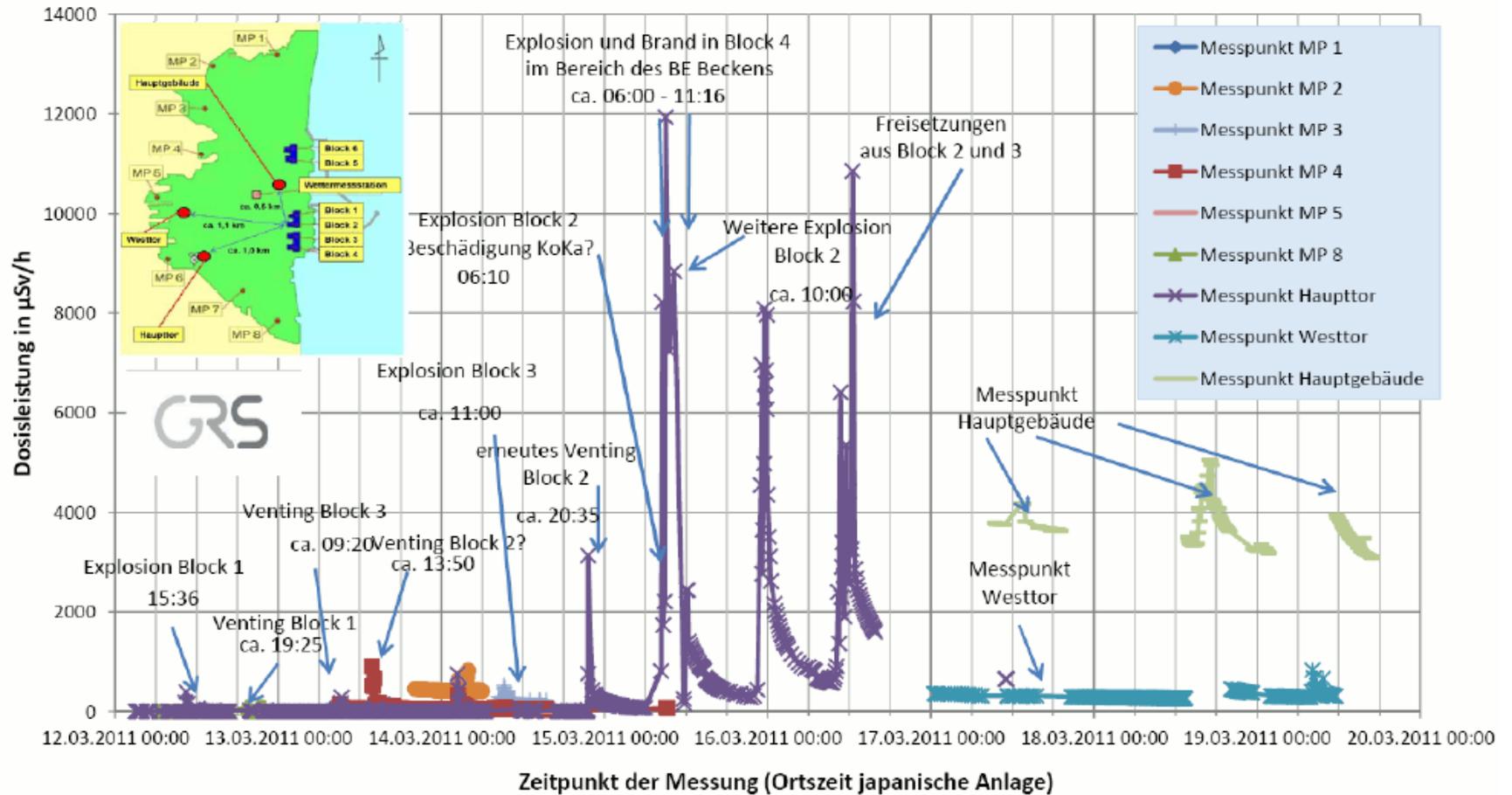
Isotope	Bq	% relâché
Kr 85, (T = 1 an) + isotopes du Xe	1,73E18 sur 1,6E19	11 %
I 131 (T = 8j)	1,94E17 sur 2,8E19	0,7 %
Cs 137 (T = 30 a)	2,85E16 sur 1,1E19	0,03 %
Te 132 (T=3j)	9,07E16 sur 1,6E19	0,05 %

à Fukushima, ce sont surtout les éléments volatils qui ont été relâchés (différence avec Tchernobyl)

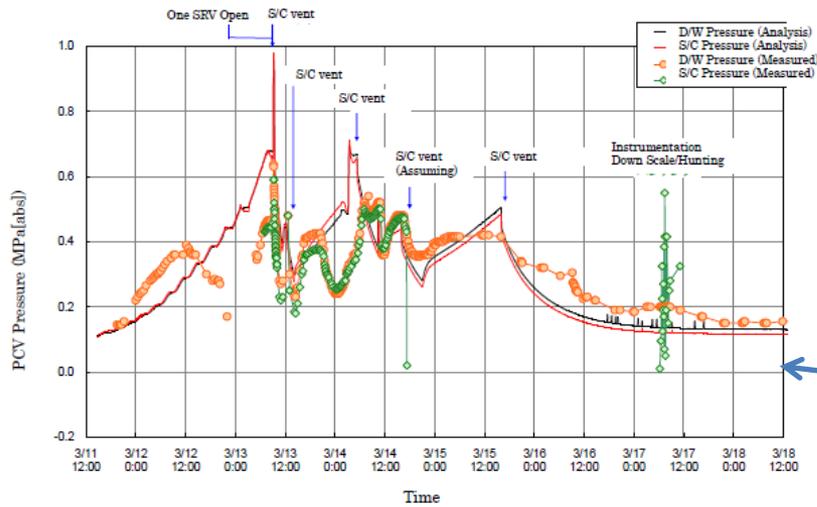
Impact radiologique de l'accident



Mesures de radioactivité dans l'air au voisinage immédiat de la centrale

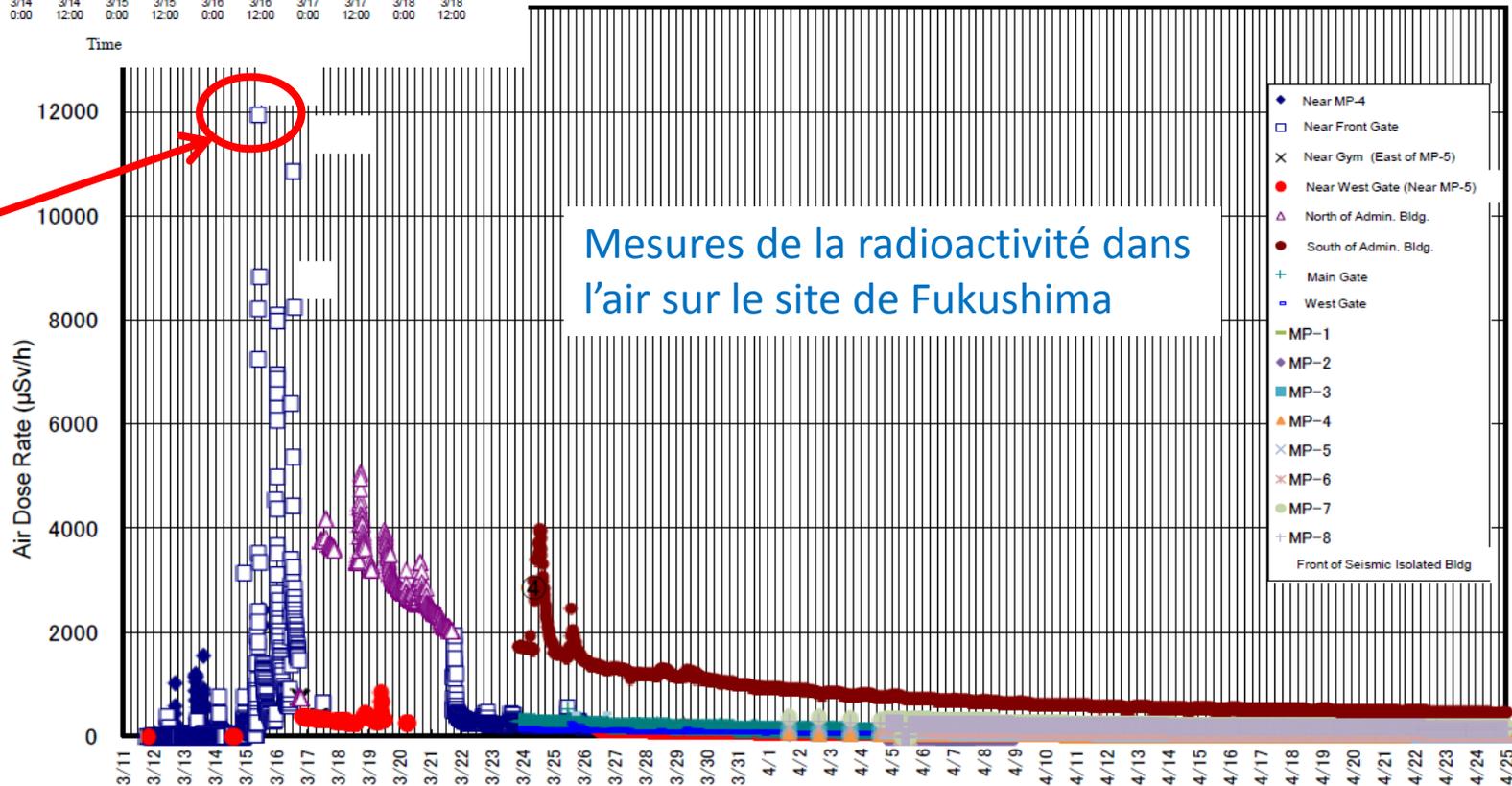


Relâchement de la radioactivité dans l'environnement



Dépressurisations de l'enceinte du réacteur 2

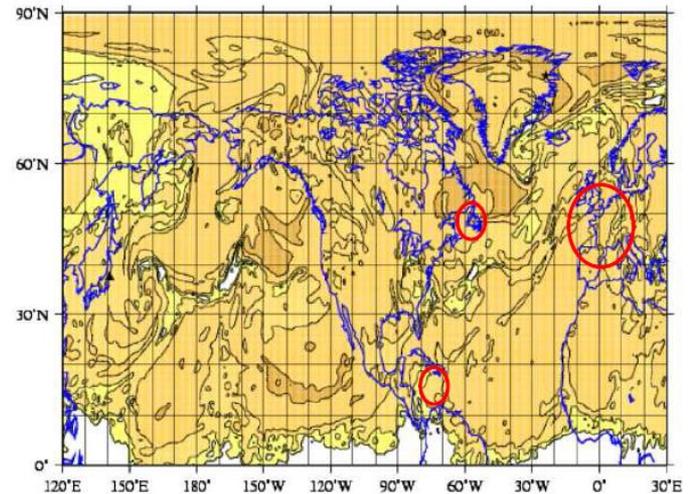
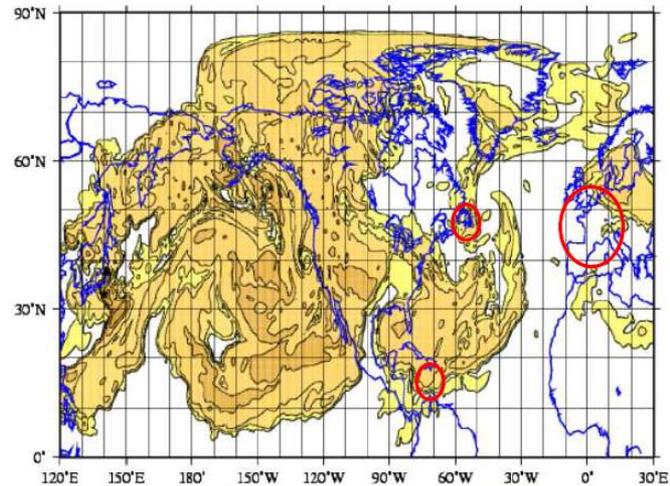
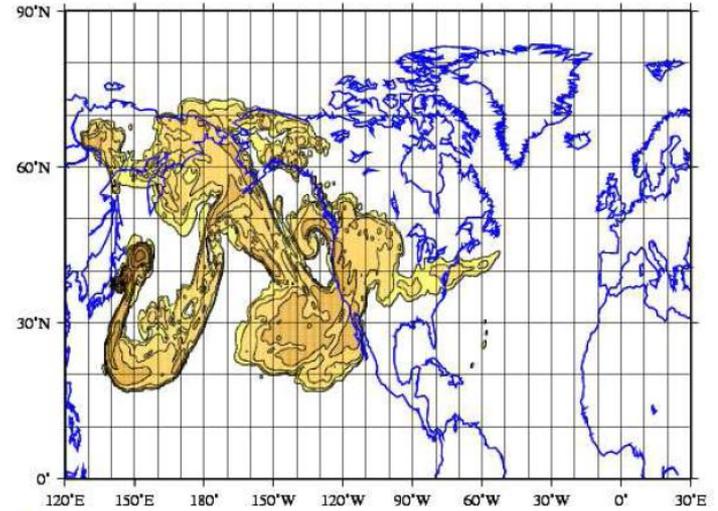
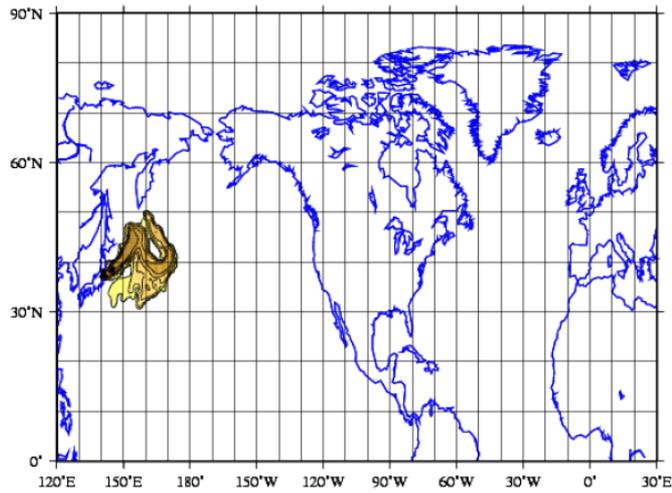
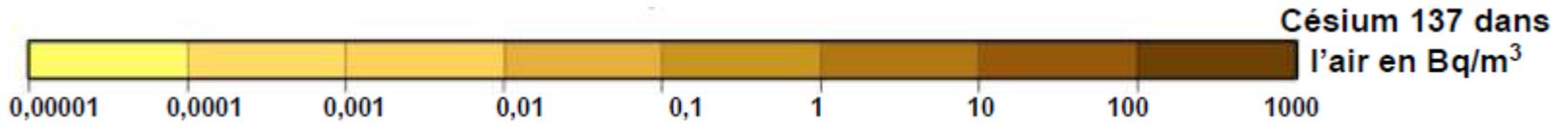
Point max. à 12 mSv/h



Mesures de la radioactivité dans l'air sur le site de Fukushima

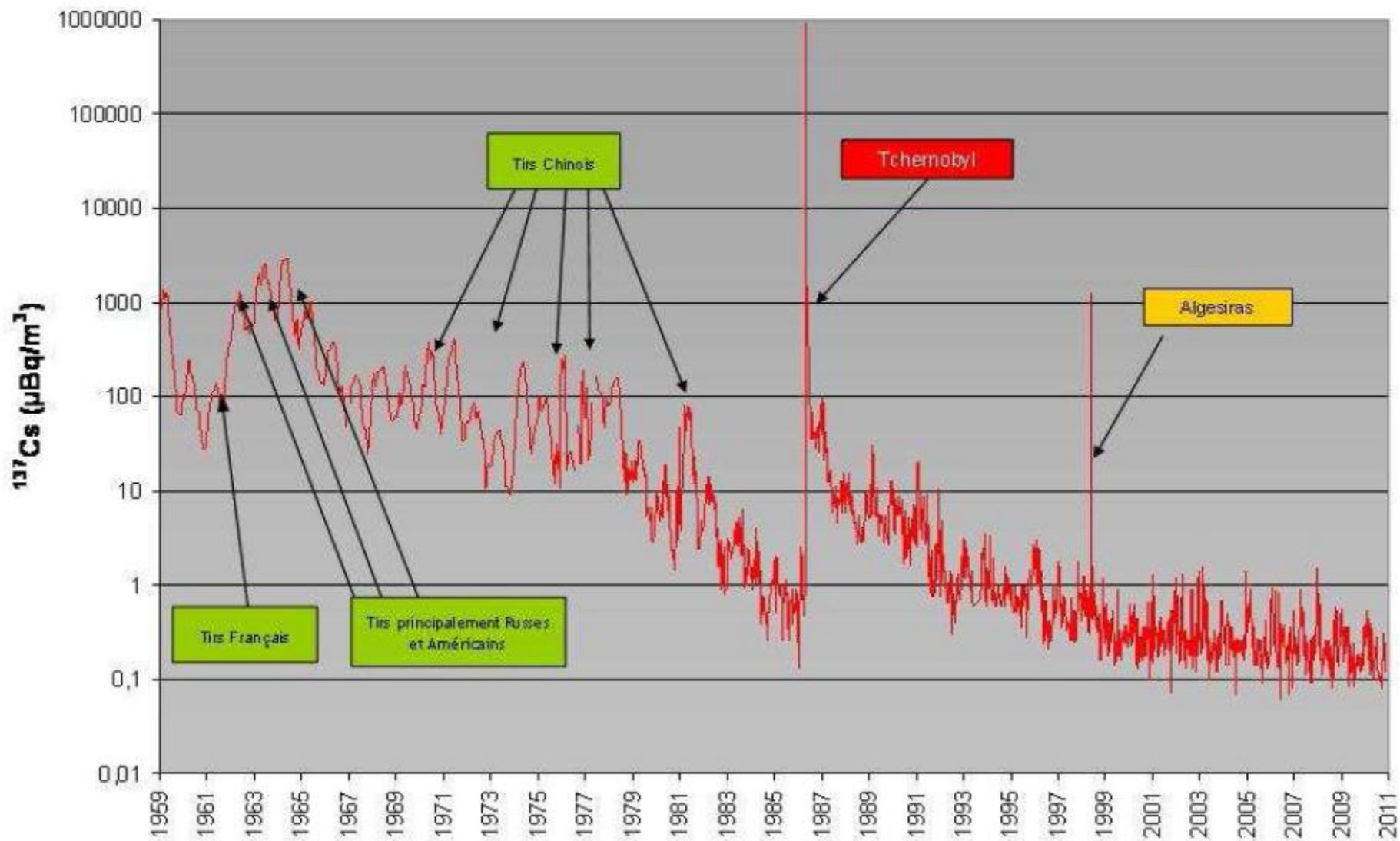
Le relâchement radioactif s'est fait par bouffées

Une chance : le nuage n'est pas allé sur Tokyo.



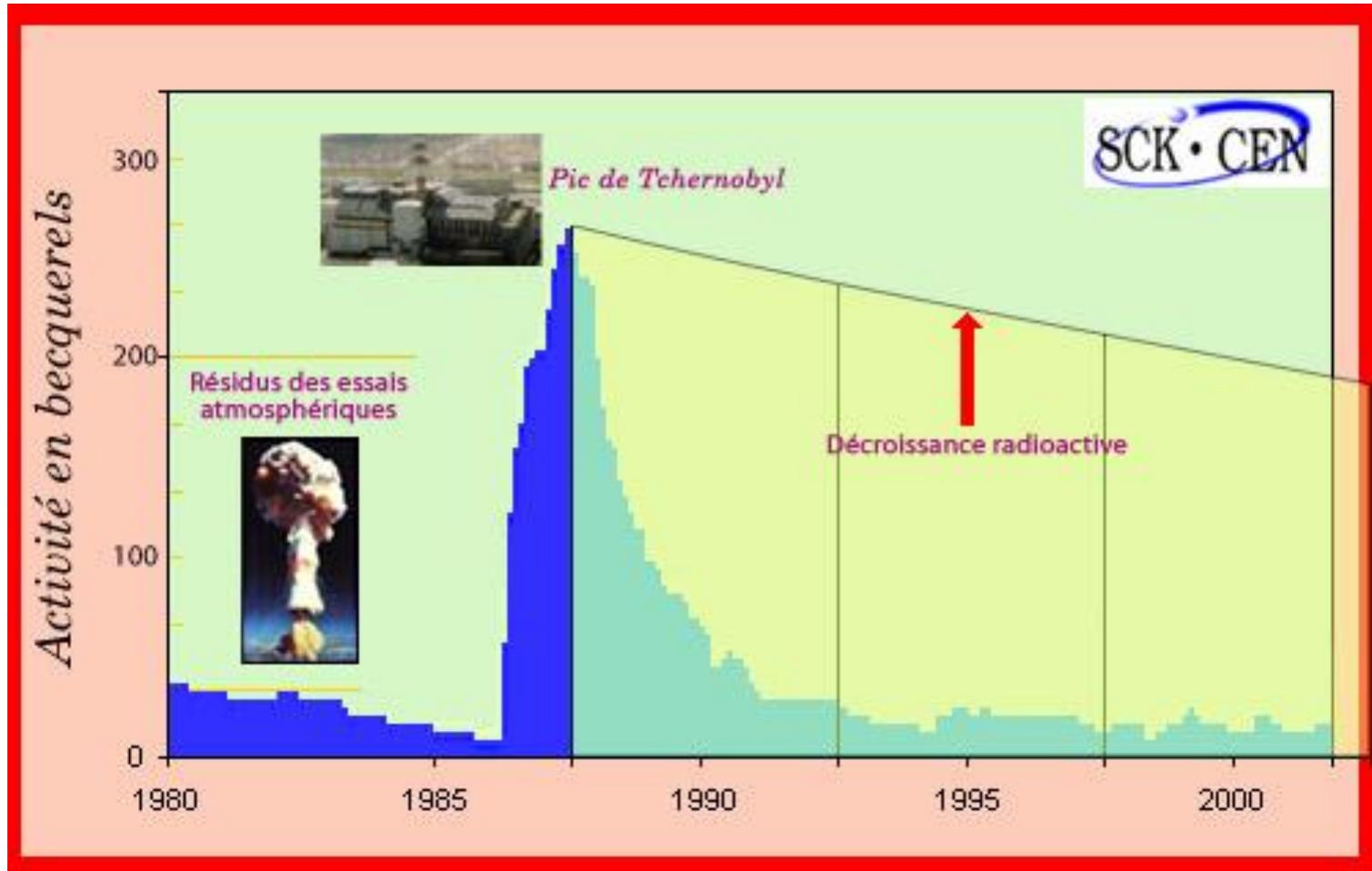
Source : D. Champion, IRSN

Historique des mesures de césium 137 dans l'air en France depuis le début des années 60



Source : D. Champion, IRSN

La biodisponibilité du Césium dans le corps humain



Suivi gammamétrique des travailleurs du centre nucléaire de Mol (Belgique)

Conséquences radiologiques à l'échelle locale

30 personnes irradiées à plus de 100 mSv

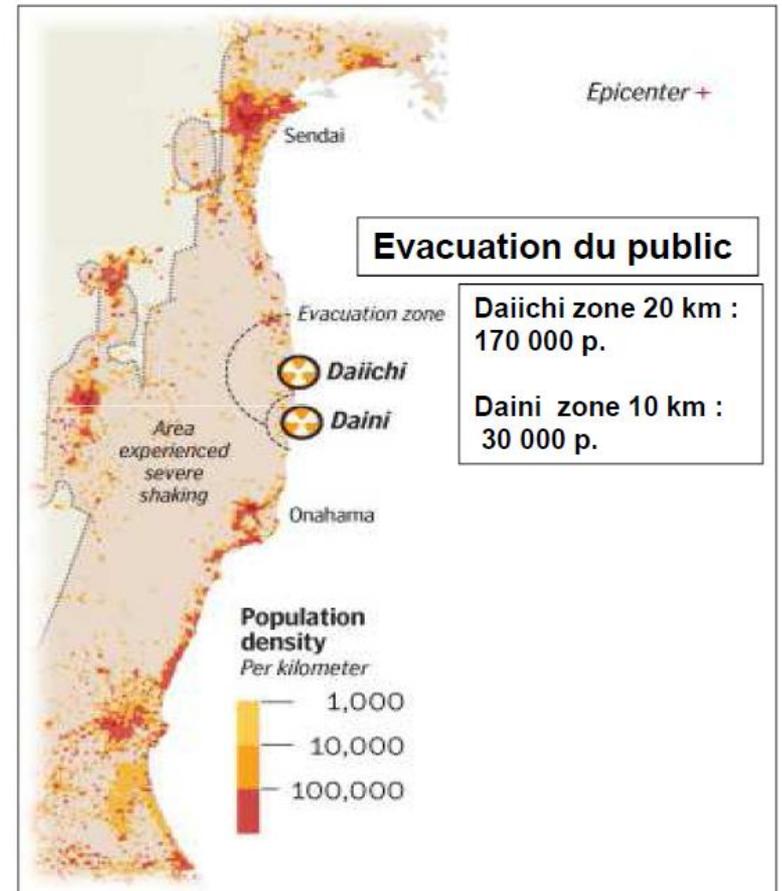
Niveau des rejets

Les mesures de radioactivité effectuées dans l'environnement à proximité de la centrale montrent une décroissance de celle-ci après l'explosion.

Les valeurs maximales de débit de dose atteintes ont été de:

- l'ordre de 12 mSv/h à l'entrée de la centrale
- 400 mSv /h à proximité du réacteur N°3

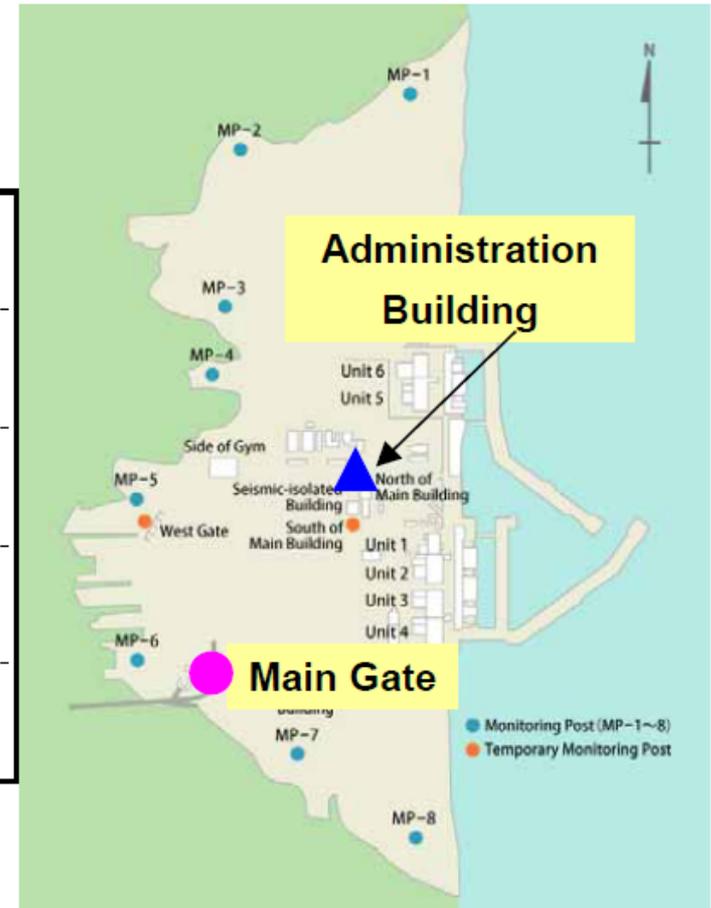
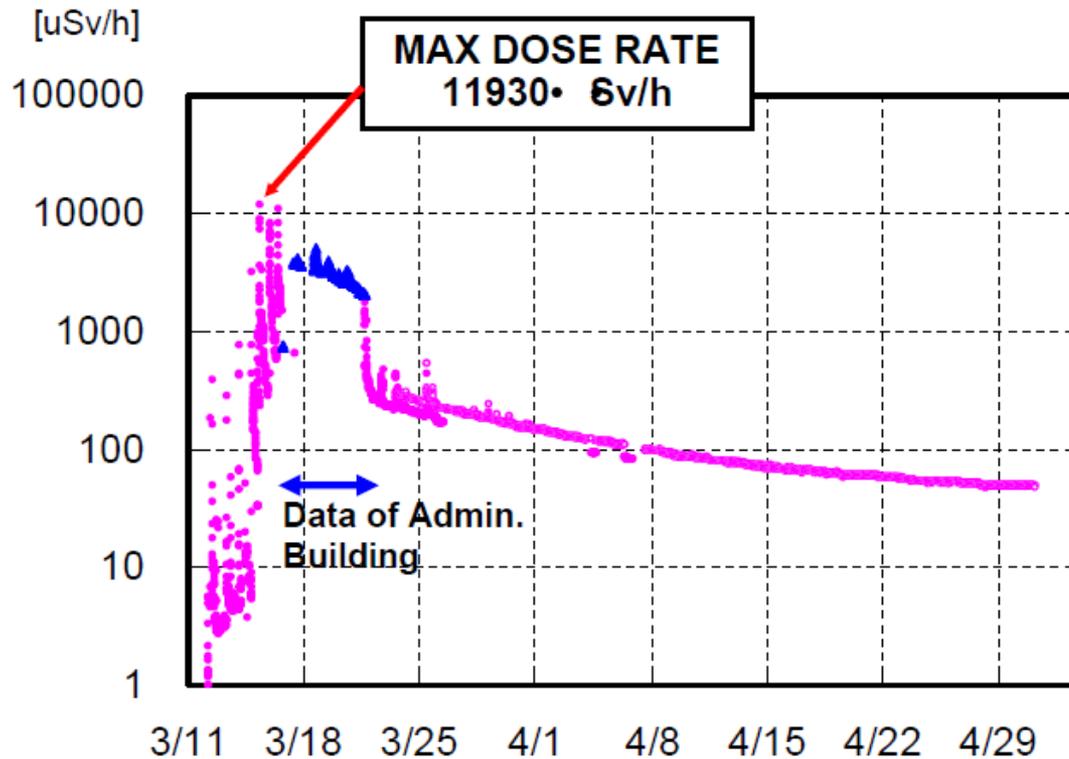
Le 16 mars à 16h le débit de dose à l'entrée du site était de 1,5 mSv/h



Source : TEPCO

Monitoring Result at Site Boundary

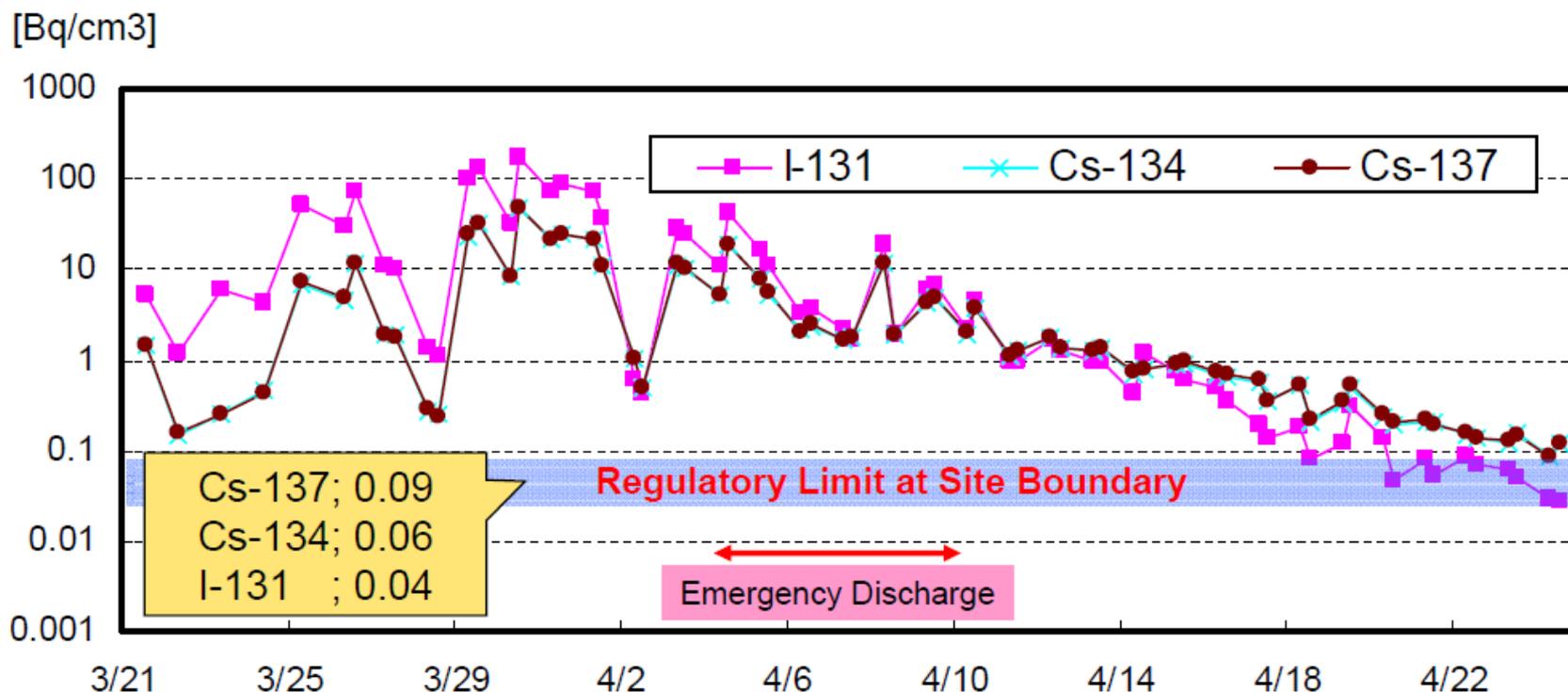
Dose rate (Main Gate)



Source : H. Matsui, ICAPP 2011

Monitoring Result (Seawater)

Radioactivity Concentration of seawater at the south of Unit 1-4 water discharge canal



Source : H. Matsui, ICAPP 2011

Conséquences radiologiques

▶ Outside the Plant site

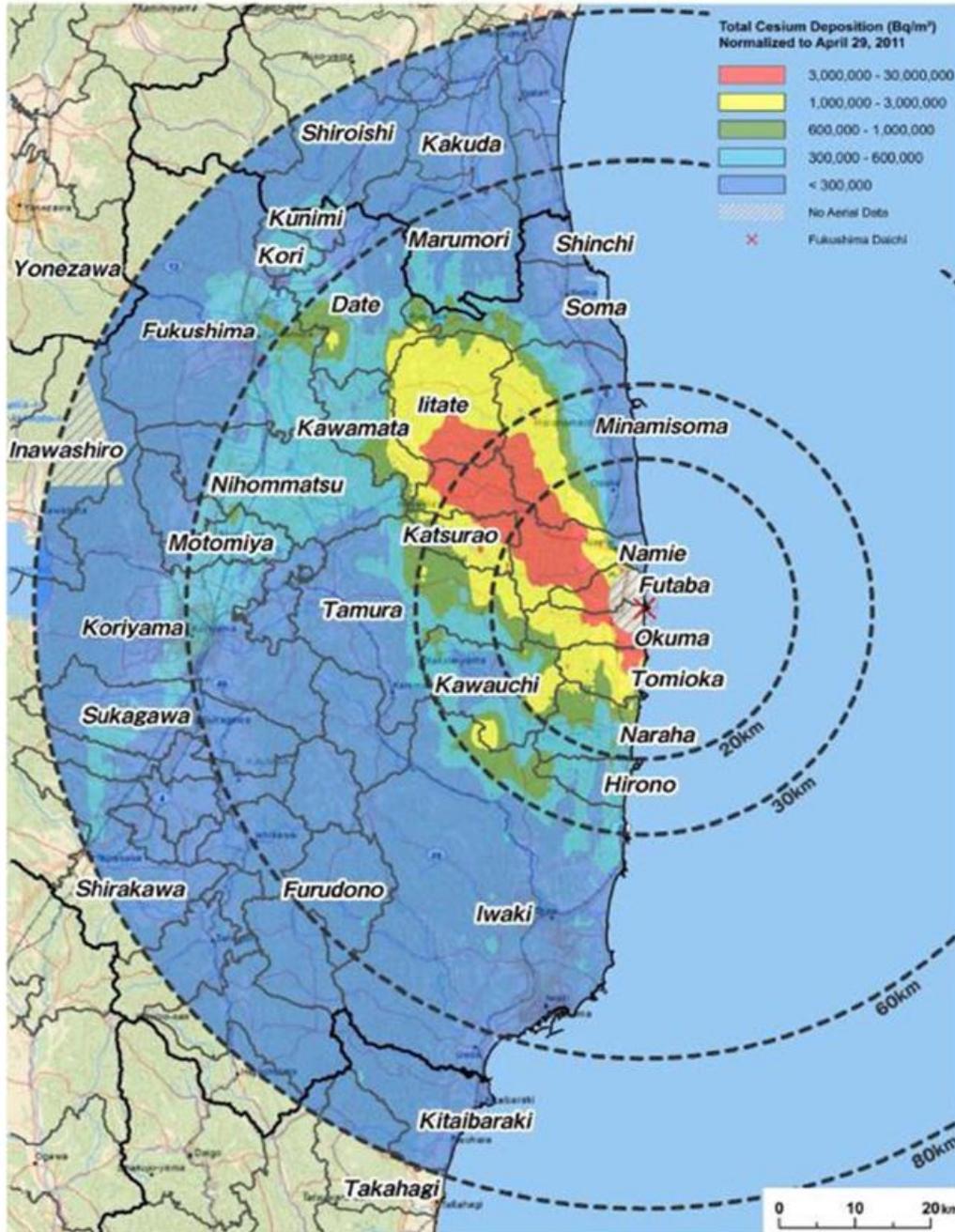
- ◆ As reactor building mostly intact
=> reduced release of Aerosols (not Chernobyl-like)
- ◆ Fission product release in steam
=> fast Aerosol grows, large fraction falls down in the proximity of the plant
- ◆ Main contribution to the radioactive dose outside plant are the radioactive noble gases
- ◆ Carried / distributed by the wind, decreasing dose with time
- ◆ No „Fall-out“ of the noble gases, so no local high contamination of soil

▶ ~20km around the plant

- ◆ Evacuations were adequate
- ◆ Measured dose up to 0.3mSv/h for short times
- ◆ Maybe destruction of crops / dairy products this year

Aerial Measuring Results

Joint US / Japan Survey Data

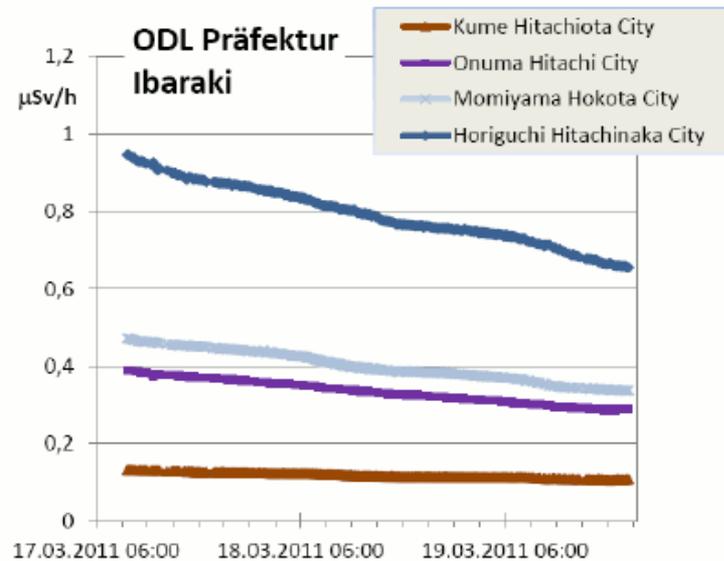


- Des niveaux de contamination en Cs importants dans le « couloir d'Iitate » (en l'absence de contre mesures, sols impropres à l'agriculture sur ~100 km²)
- Des doses attendues de l'ordre de qq dizaines de mSv (intégrées sur la première année) dans le « couloir d'Iitate ».

Conséquences radiologiques à l'échelle régionale

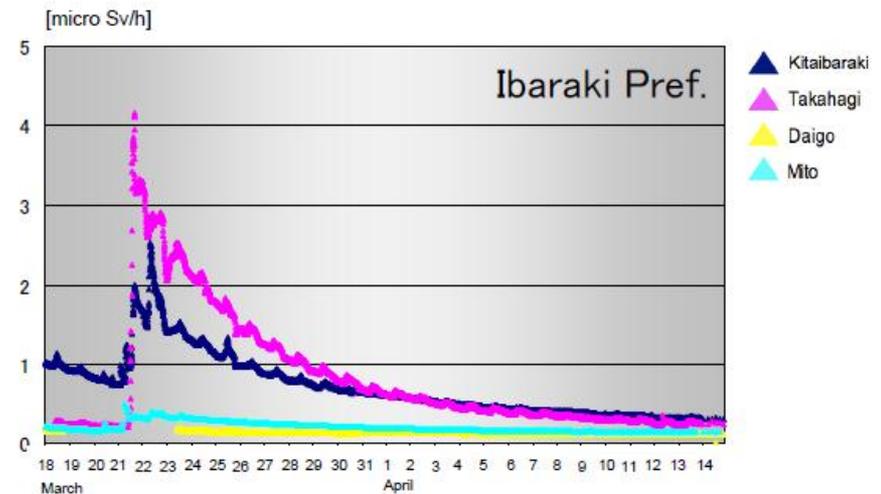
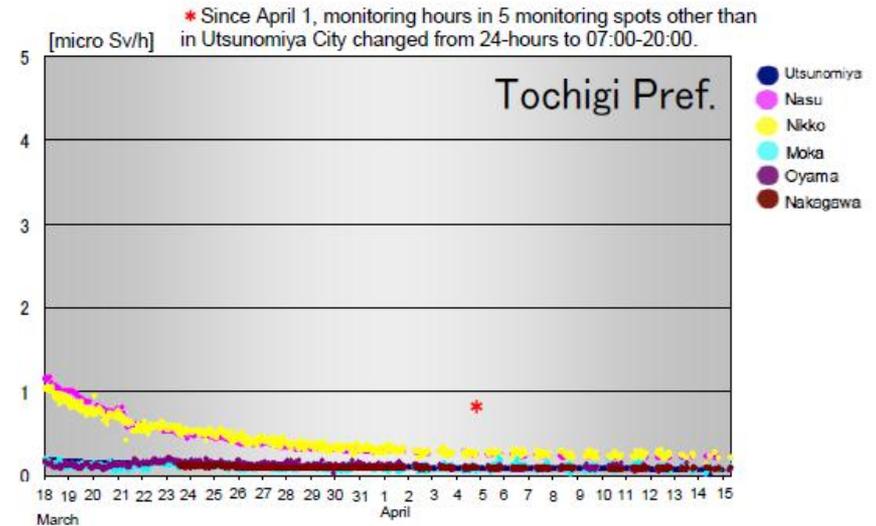
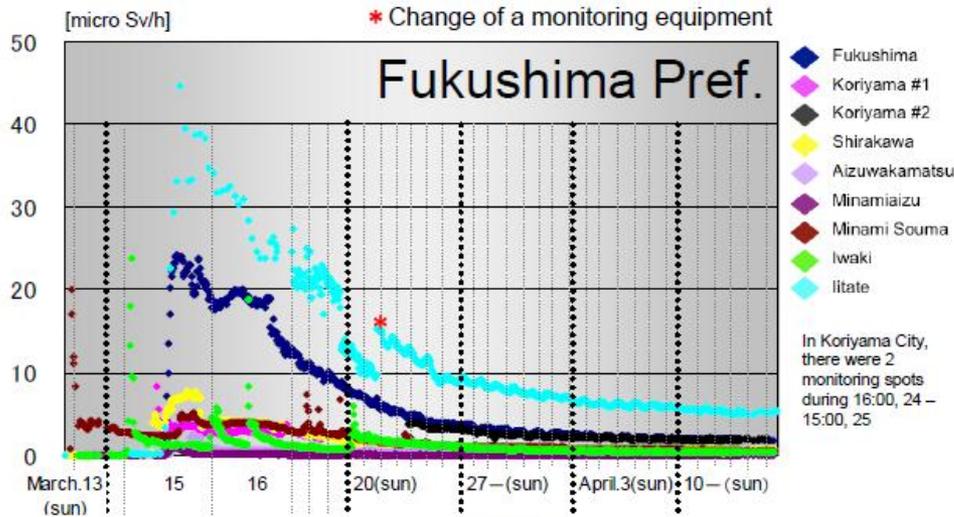


Source : GRS.de



- ▶ ~50km around the plant
- ◆ Control of Crop / Dairy products
- ◆ Usage of Iodine pills
(Caution, pills can interfere with heart medicine)

Trend of Radiation in the Environment around Fukushima Daiichi NPS



Source: MEXT/Fukushima Pref./Ibaraki Pref./Tochigi Pref.
 JAIF collects figures based on the official information.
 Updated at 15:00 on April 15 (FRI)

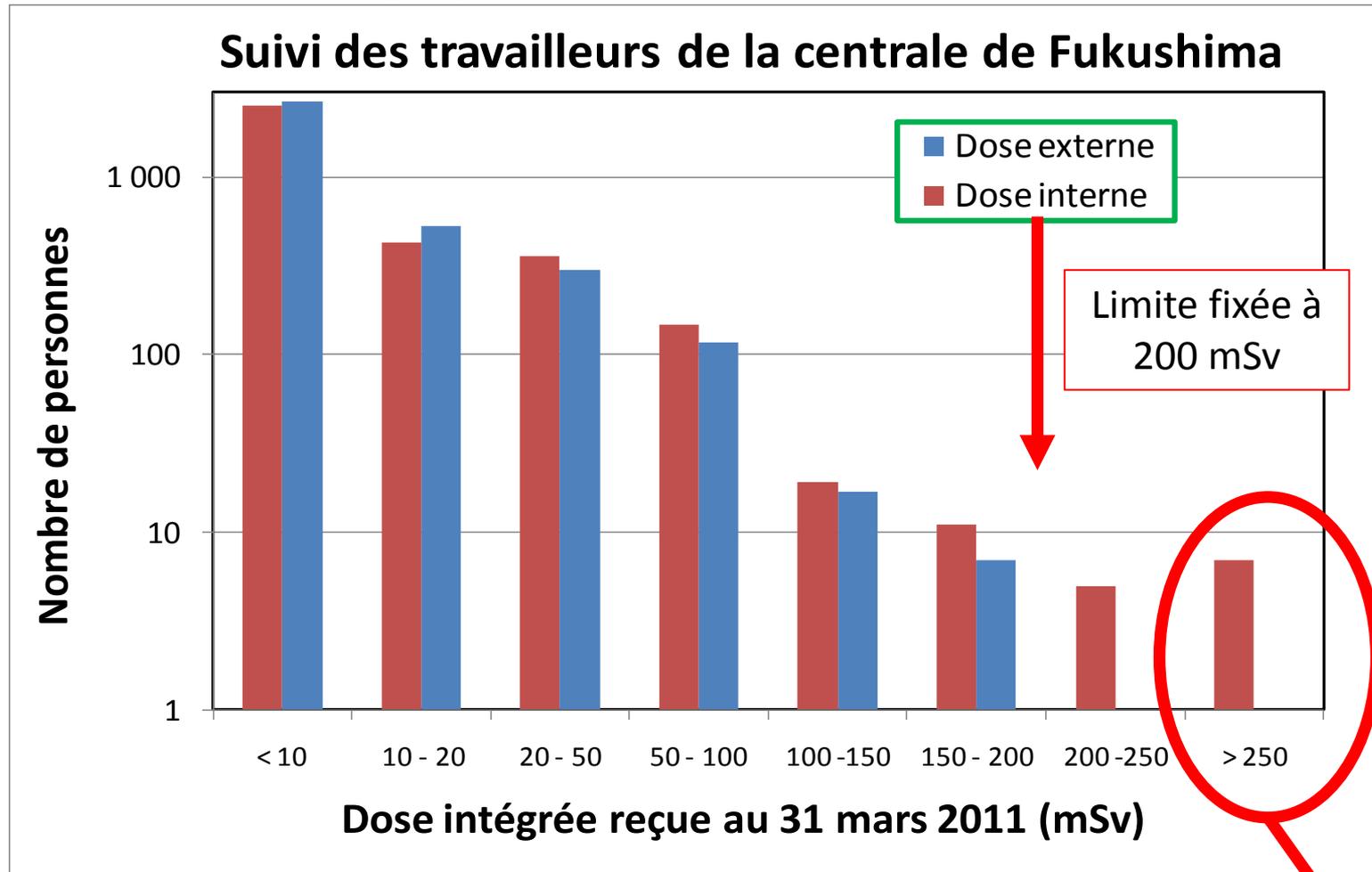
Doses intégrées au 19 Avril (exposition externe)

Readings of Integrated Dose at Monitoring Post out of Fukushima Dai-ichi NPP



Explanatory note: [Monitoring Post Number] Readings of Integrated Dose in micro Sv, <increment from the last monitoring> (average dose in micro-Sv per hour).

Bilan radiologique des travailleurs de Fukushima

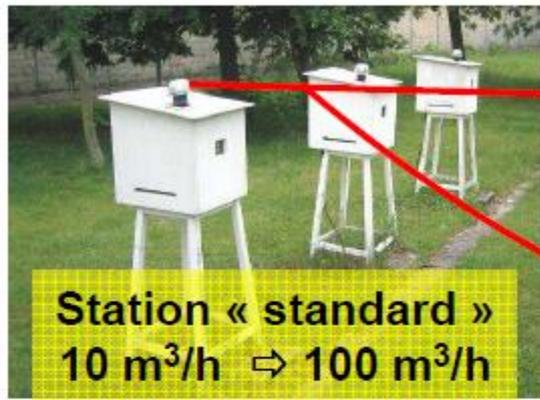


1427 employés TEPCO et 2212 sous-traitants = 3639 total

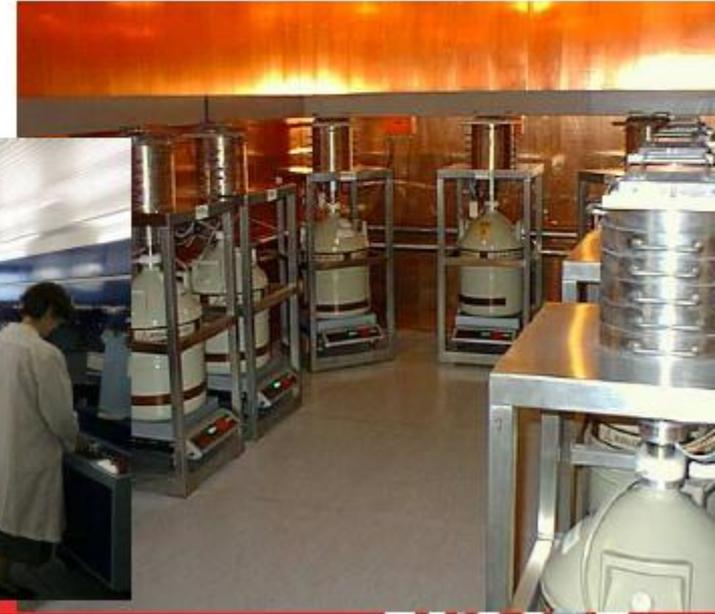
Dose moyenne externe = 9.7 mSv

2 personnes auraient
reçu par inhalation
540 mSv et 590 mSv

La surveillance des poussières radioactives de l'air : réseau OPERA-Air de l'IRSN

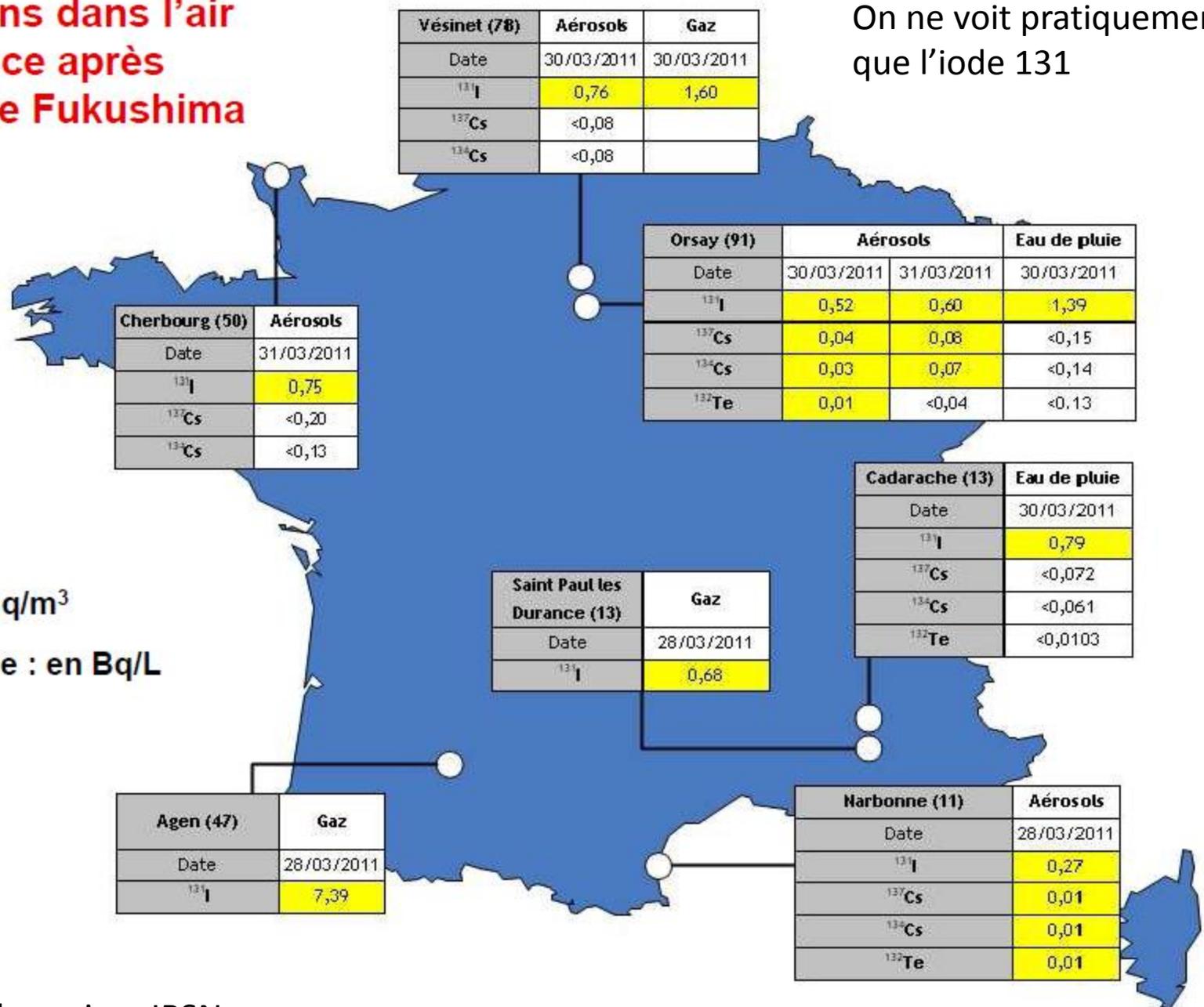


Mesure de l'activité des filtres



Observations dans l'air en France après l'accident de Fukushima

On ne voit pratiquement que l'iode 131



Air : en mBq/m³

Eau de pluie : en Bq/L

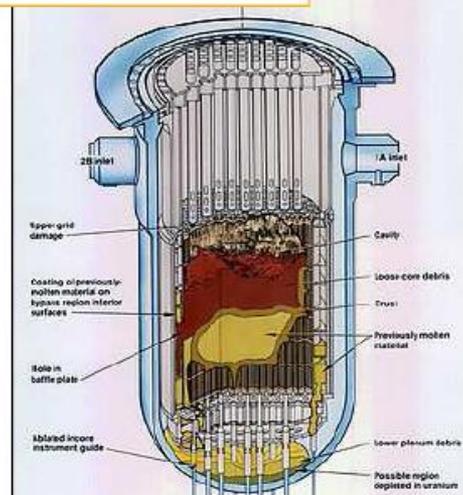
Niveau de gravité INES : Fukushima = 7

Type	INES	Incidence hors site	Incidence sur site
Accident majeur	7	Rejet majeur : effet étendu sur la santé et l'environnement.	Mort de plusieurs personnes sur le site et destruction de l'installation
Accident grave	6	Rejet important susceptible d'exiger l'application intégrale des contre-mesures prévues.	
Accident (entraînant un risque hors du site)	5	Rejet limité susceptible d'exiger l'application partielle des contre-mesures prévues.	Endommagement grave du réacteur ou des barrières radiologiques.
Accident (n'entraînant pas de risque important à l'extérieur du site)	4	Rejet mineur: exposition du public de l'ordre des limites prescrites.	Endommagement important du réacteur ou des barrières biologiques, ou exposition létale d'un travailleur.
Incident grave	3	Très faible rejet : exposition du public représentant une fraction des limites prescrites.	Contamination grave ou effets aigus sur la santé d'un travailleur.
Incident	2	(pas de conséquence)	Contamination importante ou surexposition d'un travailleur.
Anomalie	1		(pas de conséquence)

Tchernobyl 1986
Fusion totale
Confinement détruit
Incendie de graphite



TMI -1979
Fusion partielle
Confinement intact



Source : P. Raymond, DEN

Les REP auraient-ils mieux résisté?

Oui, du fait de l'existence d'un circuit secondaire d'eau non active, et du fait de leur enceinte de confinement de grand volume.

- Si pas de source froide, l'évacuation de la puissance résiduelle se fait par évaporation d'eau du circuit secondaire (relâchement de vapeur non radioactive, différence avec REB).
- Si impossible de réinjecter de l'eau dans le circuit secondaire, le scénario est identique sur REP et REB : T et P montent dans le circuit primaire, nécessité d'éventer (relâchement de vapeur radioactive, risque de dénoyage du cœur, production d'hydrogène)
- Si relâchement, l'enceinte de confinement de petit volume dans les REB monte vite en pression; l'enceinte de très grand volume des REP donne encore du temps avant de devoir relâcher la radioactivité dans l'environnement.
- Le risque H₂ est pris en compte sur les REP (recombineurs catalytiques ou igniteurs). Avec un REP, il n'y aurait probablement pas eu d'explosion.

Seule la génération III est conçue pour découpler fusion du cœur et perte du confinement

Enceinte externe béton armé renforcée vis-à-vis des agressions (avion militaire, explosion \approx 300 mbars, séisme MSK > 8)

Enceinte interne résistant à la déflagration H_2 (6,5 bars, détonation exclue par recombineurs catalytiques)

Elimination des chemins de fuites de l'enceinte vers l'extérieur (filtration)

Récupérateur de corium (cœur fondu) : étalement et refroidissement

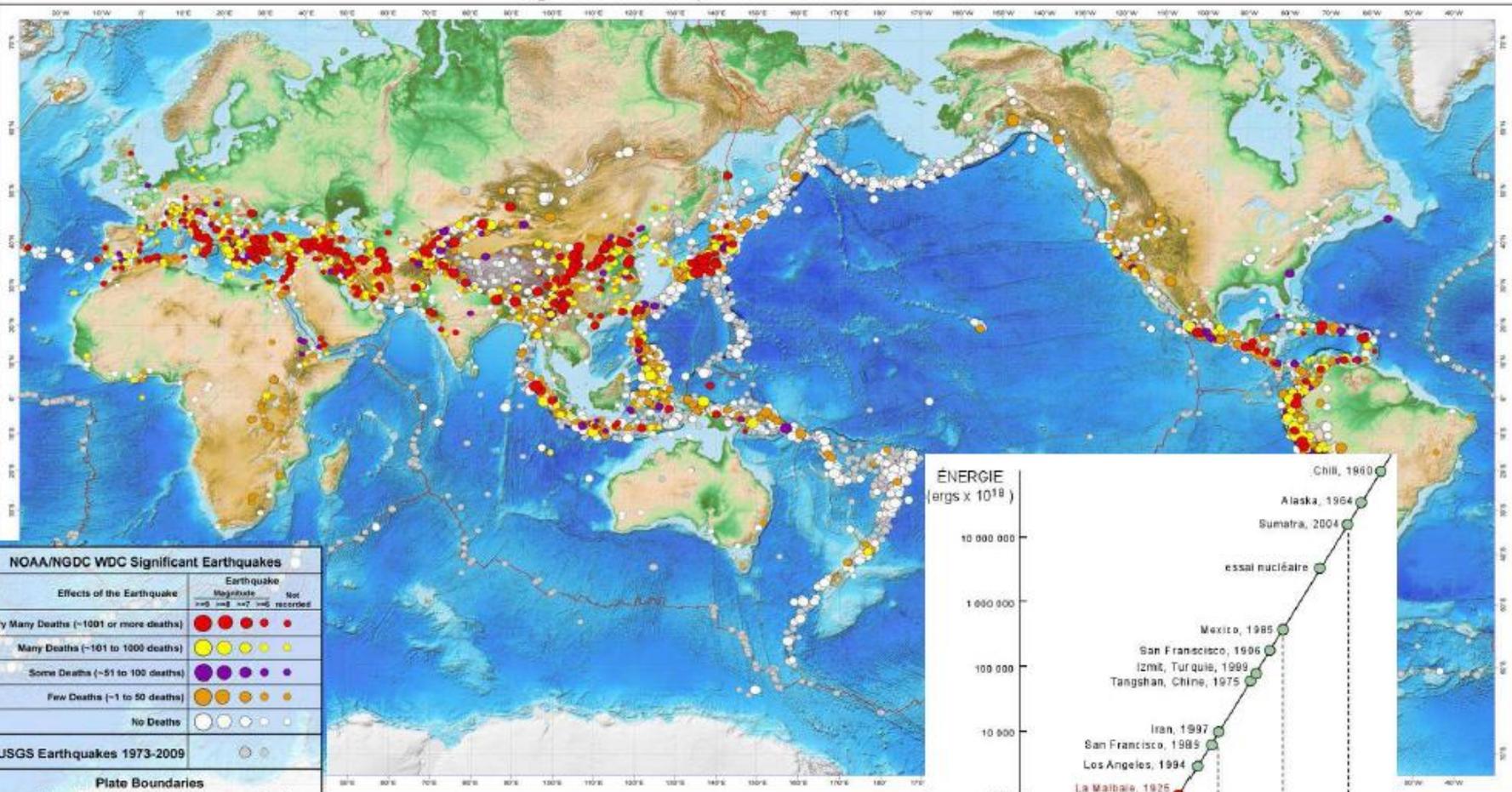
Elimination des séquences avec by-pass ou défaillance précoce de l'enceinte

Réservoir d'eau interne enceinte, pour refroidir le corium

Sauvegarde :
4 trains dans 4 bâtiments séparés, dont 2 « bunkérisés »

Puits de cuve et récupérateur maintenus sec pour éviter le risque d'explosion vapeur

Significant Earthquakes 2150 B.C. to A.D. 2010



NOAA/NGDC WDC Significant Earthquakes

Effects of the Earthquake	Earthquake Magnitudes	
	M=9	M=7
Very Many Deaths (~1001 or more deaths)	●●●●●	●●●●●
Many Deaths (~101 to 1000 deaths)	●●●●●	●●●●●
Some Deaths (~51 to 100 deaths)	●●●●●	●●●●●
Few Deaths (~1 to 50 deaths)	●●●●●	●●●●●
No Deaths	○	○

USGS Earthquakes 1973-2009

Plate Boundaries

- Divergent
- Convergent
- Transform

Year	Magnitude	Deaths	Damage
1973	6.5	0	0
1974	6.2	0	0
1975	6.0	0	0
1976	6.8	0	0
1977	6.5	0	0
1978	6.3	0	0
1979	6.1	0	0
1980	6.9	0	0
1981	6.7	0	0
1982	6.4	0	0
1983	6.2	0	0
1984	6.0	0	0
1985	6.8	0	0
1986	6.6	0	0
1987	6.4	0	0
1988	6.2	0	0
1989	6.0	0	0
1990	6.8	0	0
1991	6.6	0	0
1992	6.4	0	0
1993	6.2	0	0
1994	6.0	0	0
1995	6.8	0	0
1996	6.6	0	0
1997	6.4	0	0
1998	6.2	0	0
1999	6.0	0	0
2000	6.8	0	0
2001	6.6	0	0
2002	6.4	0	0
2003	6.2	0	0
2004	6.0	0	0
2005	6.8	0	0
2006	6.6	0	0
2007	6.4	0	0
2008	6.2	0	0
2009	6.0	0	0
2010	6.8	0	0

NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) and co-located World Data Center (WDC) for Geophysics and Marine Geology and the International Tsunami Information Center (ITIC), a UNESCO/NGDC-NOAA partnership, have collaborated to produce a map showing significant earthquakes. The information comes from the NGDC Significant Earthquake Database that includes information on destructive earthquakes from 2150 B.C. to A.D. 2010 resulting at least one of the following criteria: resulting in moderate damage (approximately US\$ 25 million or more), caused 50 or more deaths, registered a magnitude 7.0 or greater, assigned a Modified Mercalli intensity 8 or greater, or generated a tsunami.

There are currently more than 5,000 earthquakes in the database. The global distribution of these earthquakes is 10% Europe, 17% East Asia, 10% Central and South Pacific, 14% Middle East, 10% South America, 8% North America and Hawaii, 5% Central Asia and the Caucasus, 5% Central America and the Caribbean, 3% Southern Asia, 2% Africa, and 2% North Africa and the West Islands. This distribution partially reflects the documented history of a region. For some regions of the seismograph in the late 1800s, the record of earthquakes is linked to historical accounts which are heavily dependent on written or oral reports.

The total number of deaths from earthquakes is over 5 million and the total damage is over USD 500 billion. These numbers are probably underestimates, however, since the actual numbers are unknown for many events. Tables 1 and 2 list the most deadly and damaging earthquakes since 1900. The top ten earthquakes based on magnitude since 1900 are summarized in Table 3. They all generated tsunamis and caused damage.

The events in the NGDC Significant Earthquake Database were gathered from the U.S. Geological Survey, earthquake catalogs, national and government databases and reports, post-event

Table 3

Top ten earthquakes based on magnitude since 1900

Year	Magnitude	Deaths	Damage (US\$ million)
1960	9.5	0	0
1964	9.3	0	0
2004	9.1	0	0
1960	8.8	0	0
1995	8.6	0	0
1997	8.5	0	0
1999	8.4	0	0
1994	8.3	0	0
1975	8.2	0	0
1997	8.1	0	0

NOAA National Geophysical Data Center
 2215 Central Expressway, Boulder, Colorado 80506
 Telephone: 303-442-1500
 Fax: 303-442-1501
 E-mail: gdc@noaa.gov

The International Tsunami Information Center
 2215 Central Expressway, Boulder, Colorado 80506
 Telephone: 303-442-1500
 Fax: 303-442-1501
 E-mail: itic@noaa.gov

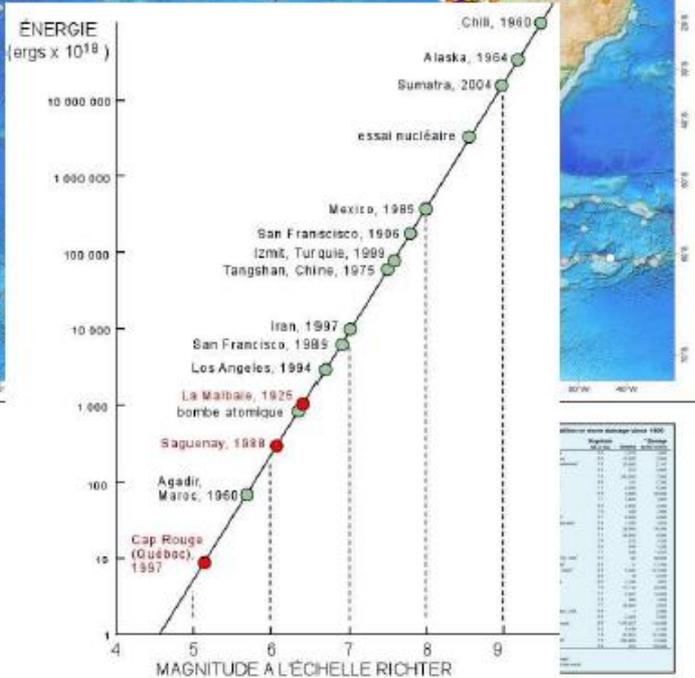


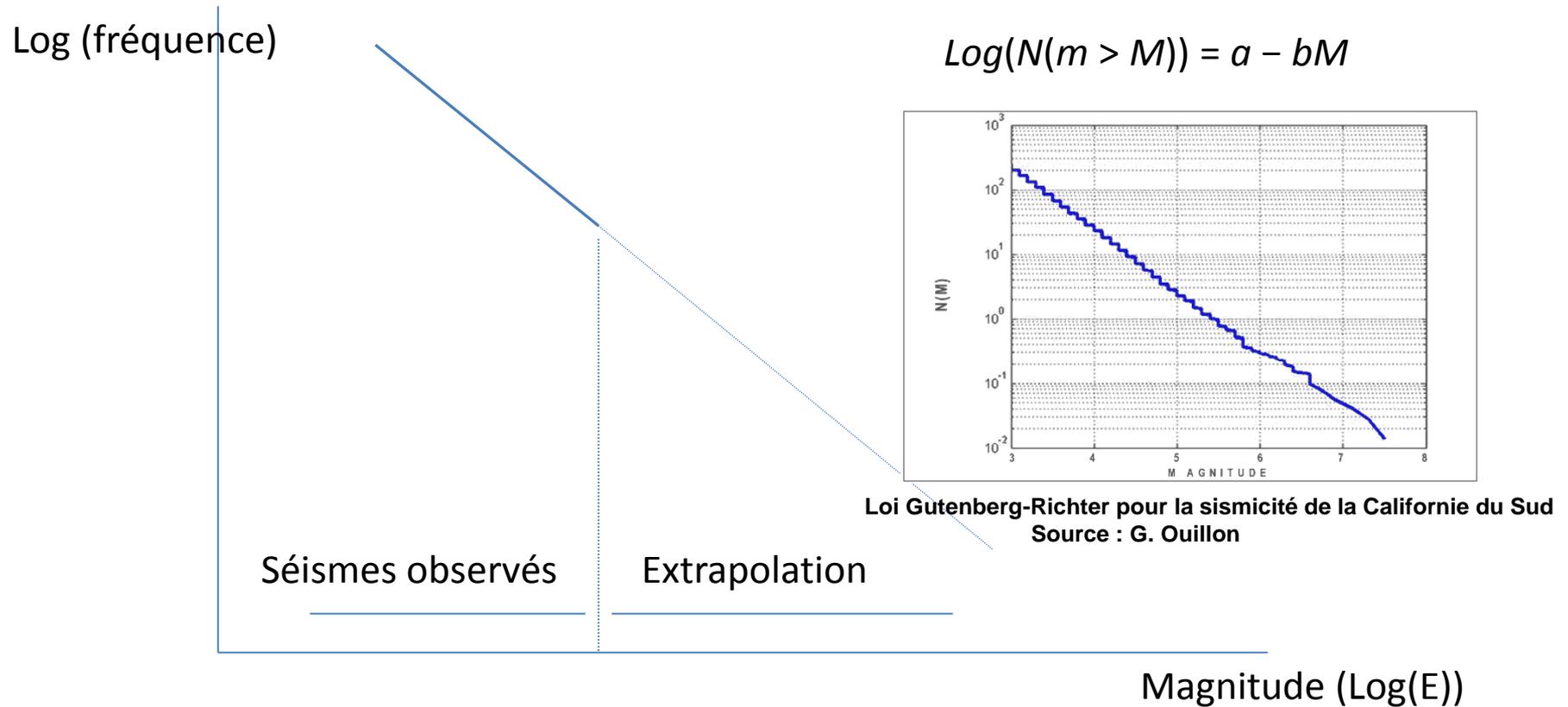
Table 1

Most deadly earthquakes since 1900

Year	Magnitude	Deaths	Damage
1905	7.8	20,000	0
1906	7.7	10,000	0
1907	7.6	10,000	0
1908	7.5	10,000	0
1909	7.4	10,000	0
1910	7.3	10,000	0
1911	7.2	10,000	0
1912	7.1	10,000	0
1913	7.0	10,000	0
1914	6.9	10,000	0
1915	6.8	10,000	0
1916	6.7	10,000	0
1917	6.6	10,000	0
1918	6.5	10,000	0
1919	6.4	10,000	0
1920	6.3	10,000	0
1921	6.2	10,000	0
1922	6.1	10,000	0
1923	6.0	10,000	0
1924	5.9	10,000	0
1925	5.8	10,000	0
1926	5.7	10,000	0
1927	5.6	10,000	0
1928	5.5	10,000	0
1929	5.4	10,000	0
1930	5.3	10,000	0
1931	5.2	10,000	0
1932	5.1	10,000	0
1933	5.0	10,000	0
1934	4.9	10,000	0
1935	4.8	10,000	0
1936	4.7	10,000	0
1937	4.6	10,000	0
1938	4.5	10,000	0
1939	4.4	10,000	0
1940	4.3	10,000	0
1941	4.2	10,000	0
1942	4.1	10,000	0
1943	4.0	10,000	0
1944	3.9	10,000	0
1945	3.8	10,000	0
1946	3.7	10,000	0
1947	3.6	10,000	0
1948	3.5	10,000	0
1949	3.4	10,000	0
1950	3.3	10,000	0
1951	3.2	10,000	0
1952	3.1	10,000	0
1953	3.0	10,000	0
1954	2.9	10,000	0
1955	2.8	10,000	0
1956	2.7	10,000	0
1957	2.6	10,000	0
1958	2.5	10,000	0
1959	2.4	10,000	0
1960	2.3	10,000	0
1961	2.2	10,000	0
1962	2.1	10,000	0
1963	2.0	10,000	0
1964	1.9	10,000	0
1965	1.8	10,000	0
1966	1.7	10,000	0
1967	1.6	10,000	0
1968	1.5	10,000	0
1969	1.4	10,000	0
1970	1.3	10,000	0
1971	1.2	10,000	0
1972	1.1	10,000	0
1973	1.0	10,000	0
1974	0.9	10,000	0
1975	0.8	10,000	0
1976	0.7	10,000	0
1977	0.6	10,000	0
1978	0.5	10,000	0
1979	0.4	10,000	0
1980	0.3	10,000	0
1981	0.2	10,000	0
1982	0.1	10,000	0
1983	0.0	10,000	0
1984	0.0	10,000	0
1985	0.0	10,000	0
1986	0.0	10,000	0
1987	0.0	10,000	0
1988	0.0	10,000	0
1989	0.0	10,000	0
1990	0.0	10,000	0
1991	0.0	10,000	0
1992	0.0	10,000	0
1993	0.0	10,000	0
1994	0.0	10,000	0
1995	0.0	10,000	0
1996	0.0	10,000	0
1997	0.0	10,000	0
1998	0.0	10,000	0
1999	0.0	10,000	0
2000	0.0	10,000	0
2001	0.0	10,000	0
2002	0.0	10,000	0
2003	0.0	10,000	0
2004	0.0	10,000	0
2005	0.0	10,000	0
2006	0.0	10,000	0
2007	0.0	10,000	0
2008	0.0	10,000	0
2009	0.0	10,000	0
2010	0.0	10,000	0

Le risque sismique peut être évalué assez précisément...

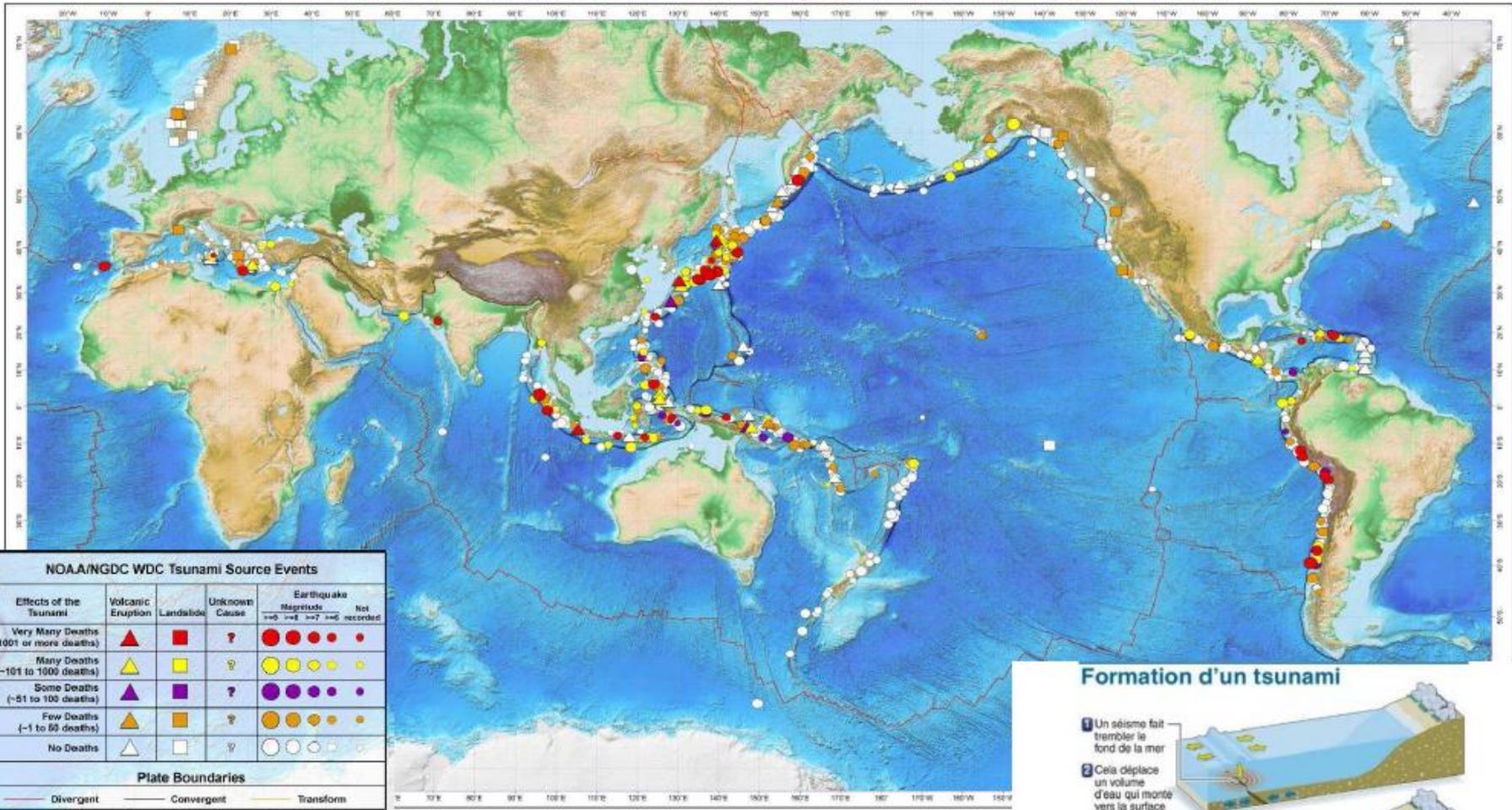
- Loi de Gutenberg-Richter : Possibilité d'extrapoler pour évaluer les risques de séisme à forte magnitude



Pour le risque de tsunami, c'est plus difficile...

Le risque tsunami

Tsunami Sources 1650 B.C. to A.D. 2010 from Earthquake, Volcano, Landslide, and Other Causes



NOAA/NGDC WDC Tsunami Source Events					
Effects of the Tsunami	Volcanic Eruption	Landslide	Unknown Cause	Earthquake Magnitude	Not recorded
Very Many Deaths (~1001 or more deaths)	▲	■	?	● (red)	○ (red)
Many Deaths (~101 to 1000 deaths)	▲ (yellow)	■ (yellow)	?	● (yellow)	○ (yellow)
Some Deaths (~51 to 100 deaths)	▲ (purple)	■ (purple)	?	● (purple)	○ (purple)
Few Deaths (~1 to 50 deaths)	▲ (orange)	■ (orange)	?	● (orange)	○ (orange)
No Deaths	▲ (white)	■ (white)	?	● (white)	○ (white)

Plate Boundaries

— Divergent — Convergent — Transform

Table 1

Year	Region	Deaths
1650	Japan	1000
1691	Japan	1000
1705	Japan	1000
1763	Japan	1000
1801	Japan	1000
1828	Japan	1000
1854	Japan	1000
1868	Japan	1000
1883	Japan	1000
1906	Japan	1000
1923	Japan	1000
1933	Japan	1000
1945	Japan	1000
1952	Japan	1000
1953	Japan	1000
1954	Japan	1000
1957	Japan	1000
1960	Japan	1000
1963	Japan	1000
1964	Japan	1000
1968	Japan	1000
1970	Japan	1000
1973	Japan	1000
1975	Japan	1000
1978	Japan	1000
1980	Japan	1000
1982	Japan	1000
1983	Japan	1000
1984	Japan	1000
1985	Japan	1000
1986	Japan	1000
1987	Japan	1000
1988	Japan	1000
1989	Japan	1000
1990	Japan	1000
1991	Japan	1000
1992	Japan	1000
1993	Japan	1000
1994	Japan	1000
1995	Japan	1000
1996	Japan	1000
1997	Japan	1000
1998	Japan	1000
1999	Japan	1000
2000	Japan	1000
2001	Japan	1000
2002	Japan	1000
2003	Japan	1000
2004	Japan	1000
2005	Japan	1000
2006	Japan	1000
2007	Japan	1000
2008	Japan	1000
2009	Japan	1000
2010	Japan	1000

NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) and its United World Data Center (UWDC) for Geophysics and Marine Geology and the International Tsunami Information Center (ITIC), a UNESCO/IOC/NOAA partnership, have collaborated to produce a map showing tsunami sources. The information comes from the NGDC Historical Tsunami Database that includes information on tsunami source events throughout the world that range in date from 1650 B.C. to A.D. 2010. The tsunami database is from the Tsunami Catalogue 2009 published by UNESCO.

Of the 2,000 events in the NGDC Historical Tsunami Database, over 1,100 confirmed tsunami source events are displayed on the map. The global distribution of these tsunami sources is 71% Pacific Ocean, 15% Mediterranean Sea, 7% Caribbean Sea and Atlantic Ocean, 6% Indian Ocean, and 1% South Sea. Most of these tsunamis were generated by earthquakes (82%), or earthquakes that caused landslides (6%). The remaining events were caused by volcanic eruptions (2%), landslides (2%), and unknown sources (2%).

Tsunamis are also classified by how far away the effects of the waves were observed. For example, the effects of a local tsunami are confined to coastal waters within about 100 km (62 miles) or less than 1 hour tsunami travel time from its source. A tsunami capable of destruction within 1,000 km (621 miles) or 1-2 hours travel time from its source is considered a regional tsunami. Most destructive tsunamis can be classified as local or regional. It follows that many tsunami-related casualties and considerable property damage result from these tsunamis (Table 1). Between 1975 and 2010 there were 27 local or regional tsunamis that resulted in deaths and property damage (Table 2). 25 of these were in the Pacific and its adjacent seas.

A distant or tele tsunami is a tsunami originating from a far away source, generally more than 1,000 km (621 miles) or more than three hours tsunami travel time away. They usually start as a local tsunami that causes

Table 2

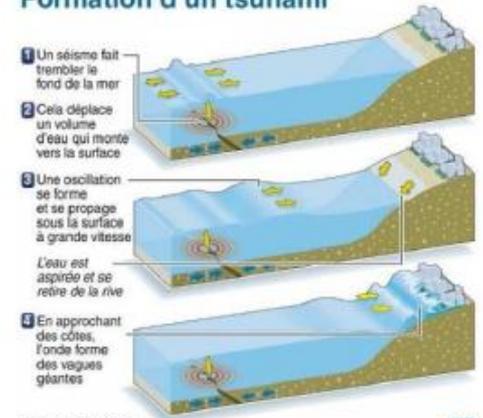
Year	Region	Deaths
1952	Japan	1000
1953	Japan	1000
1954	Japan	1000
1957	Japan	1000
1960	Japan	1000
1963	Japan	1000
1964	Japan	1000
1968	Japan	1000
1970	Japan	1000
1973	Japan	1000
1975	Japan	1000
1978	Japan	1000
1980	Japan	1000
1982	Japan	1000
1983	Japan	1000
1984	Japan	1000
1985	Japan	1000
1986	Japan	1000
1987	Japan	1000
1988	Japan	1000
1989	Japan	1000
1990	Japan	1000
1991	Japan	1000
1992	Japan	1000
1993	Japan	1000
1994	Japan	1000
1995	Japan	1000
1996	Japan	1000
1997	Japan	1000
1998	Japan	1000
1999	Japan	1000
2000	Japan	1000
2001	Japan	1000
2002	Japan	1000
2003	Japan	1000
2004	Japan	1000
2005	Japan	1000
2006	Japan	1000
2007	Japan	1000
2008	Japan	1000
2009	Japan	1000
2010	Japan	1000

NOAA's National Geophysical Data Center
 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1215
 Alexandria, VA 22304-3442
 703 748-4800
<http://www.ngdc.noaa.gov>

The International Tsunami Information Center
 1075 University Ave., Suite 1075
 University of Hawaii, HONOLULU, HI 96822
 808 953-6422 Fax: 808-953-6100
tsunami@hawaii.edu
<http://www.itic.hawaii.edu>

UNESCO
 UNESCO World Data Center for Geophysics and Marine Geology
 344 rue de la Conférence
 75008 Paris Cedex 12, France
 Tel: +33 (0)1 47 32 21 00
 Fax: +33 (0)1 47 32 21 01
tsunami@wdc-geology.fr
<http://www.wdc-geology.fr>

Formation d'un tsunami



Une vague de 7, 10 ou 14 m ? Un record ?

Source :



RATCOM : Réseau d'alerte aux Tsunamis et Côtiers en Méditerranée

Date	Hauteur de vague	Localisation	Origine
28 octobre 1562	16 m	Chili	Tremblement de terre
9 juillet 1586	24 m	Pérou	Tremblement de terre
24 novembre 1604	16 m	Pérou	Tremblement de terre
20 octobre 1687	8 m	Pérou	Tremblement de terre
8 juillet 1730	16 m	Chili	Tremblement de terre
28 octobre 1746	24 m	Lima, Pérou	Tremblement de terre
20 février 1835	15 m	Chili	Tremblement de terre
23 décembre 1854	28 m	Tokaido, Japon	Tremblement de terre
3 avril 1868	20 m	Hawaii	Tremblement de terre
13 août 1868	18 m	Chili	Tremblement de terre
2 mars 1871	25 m	Sulawesi	Tremblement de terre, éruption volcanique et glissement de terrain
10 mai 1877	21 m	Chili	Tremblement de terre
27 août 1883	9 m	Mer de Java	Eruption volcanique et glissement de terrain
6 octobre 1883	10,5 m	Alaska	Eruption volcanique et glissement de terrain
15 juin 1896	38 m	Sanriku, Japon	Tremblement de terre
10 septembre 1899	60 m	Golfe d'Alaska	Tremblement de terre et glissement de terrain
30 septembre 1899	12 m	Mer de Banda	Tremblement de terre et glissement de terrain
26 juin 1917	11 m	Îles Samoa	Tremblement de terre
2 mars 1933	29,3 m	Sanriku, Japon	Tremblement de terre
1 ^{er} avril 1946	35 m	Îles Aléoutiennes	Tremblement de terre
22 mai 1960	25 m	Chili	Tremblement de terre
28 mars 1964	70 m	Golfe d'Alaska	Tremblement de terre
16 octobre 1979	3 m	Nice, France	Glissement de terrain
1 ^{er} septembre 1992	11 m	Nicaragua	Tremblement de terre
1 ^{er} juillet 1993	5 m	Japon	Tremblement de terre
3 juin 1994	60 m	Java, Indonésie	Tremblement de terre
17 juillet 1998	10 m	Papouasie, Nouvelle-Guinée	Tremblement de terre
26 décembre 2004	20 m	Sumatra, Indonésie	Tremblement de terre

Le risque tsunami était-il prévisible?



Un risque millénaire ?

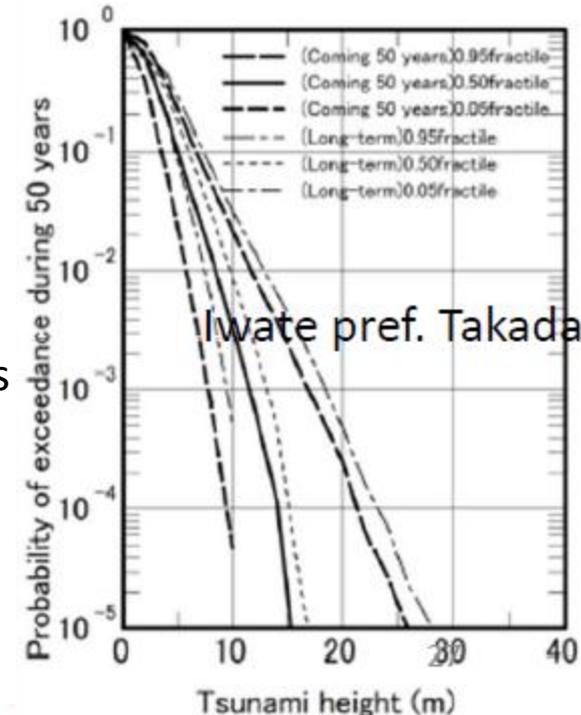


Séisme de Kantō (région de Tokyo, 1923) - magnitude 8,3.
. 140.000 morts ; Tsunami ~ 12 m

Séisme de Showa Sanriku (1933)
. 3 000 morts ; Tsunami ~ 10 m



La question posée : en un lieu donné de la côte, quelle est la probabilité par unité de temps d'observer un tsunami de hauteur donnée?



[SOURCE] T. Annaka et al, "A method Of Probabilistic Tsunami Hazard Analysis", *Earthquake Engineering Symposium, 2006*

Evaluation des risques : peut mieux faire...

- Niveau de risque d'accident grave (fusion du cœur) jugé acceptable par les autorités de sûreté nucléaires occidentales (et japonaises).

Objectif : $1.e-4$ /an (Gen II); $1.e-5$ /an (Gen III);
encore un ordre de grandeur au dessous pour la
probabilité de relâchement de radioactivité dans
l'environnement.

- A Fukushima : Probabilité de tsunami de hauteur supérieure à 7 m = quelques $e-4$ /an (cf étude AIEA sur le risque tsunami).

Après l'accident

- Il va falloir décontaminer l'eau qui a servi à refroidir les réacteurs (adsorption sur résines).
Plusieurs dizaines de milliers de m³ à traiter. En bonne voie: déjà plus de 23480 tonnes traitées avec recyclage de l'eau.
- Il faudra peut-être décontaminer les sols au voisinage de la centrale et dans le couloir d'Itate (Décapage? Autres techniques de mitigation?)
- Il va falloir démanteler les réacteurs accidentés, dans des conditions radiologiques difficiles. Ca prendra beaucoup de temps...
- Pour tout cela : techniques innovantes à développer.

Enseignements à tirer de l'accident

- Mieux prendre en compte le risque tsunami
- Diversifier les moyens de refroidissement de secours
- Diversifier les alimentations électriques de secours
- Etudier les accidents couplés
(source froide + source électrique, multi-réacteurs)
- Favoriser la sûreté passive
- Mieux instrumenter les réacteurs

Conclusions

- ✓ Il faut intégrer et assumer le risque nucléaire.
« Il y aura d'autres accidents nucléaires majeurs »
- ✓ Les évaluations du risque de tsunami ont été manifestement sous-estimées. Il faut regagner en crédibilité scientifique!
- ✓ Conséquences pour le nucléaire dans le monde : probablement limitées dans le monde (Chine, Inde, Russie); mais certains pays européens ont réagi à chaud (révision des politiques nucléaires)
- ✓ Pas de nucléaire « low cost »
- ✓ Pour la recherche : recentrage des thématiques de recherche sur la sûreté et la radioprotection.