

La Catastrophe de Fukushima

Hervé Nifenecker

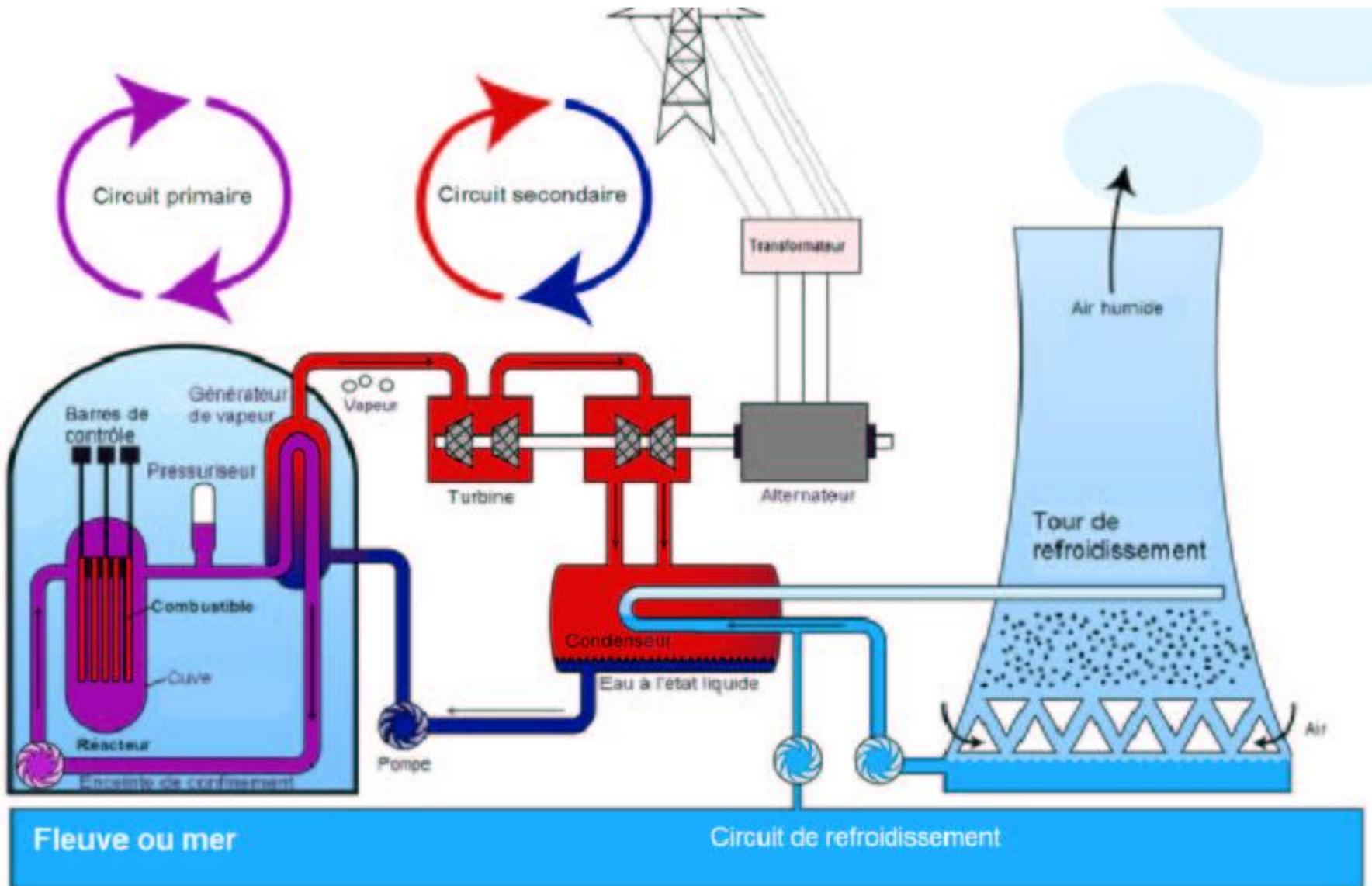
Avec l'aide du diaporama de

Matthias Braun

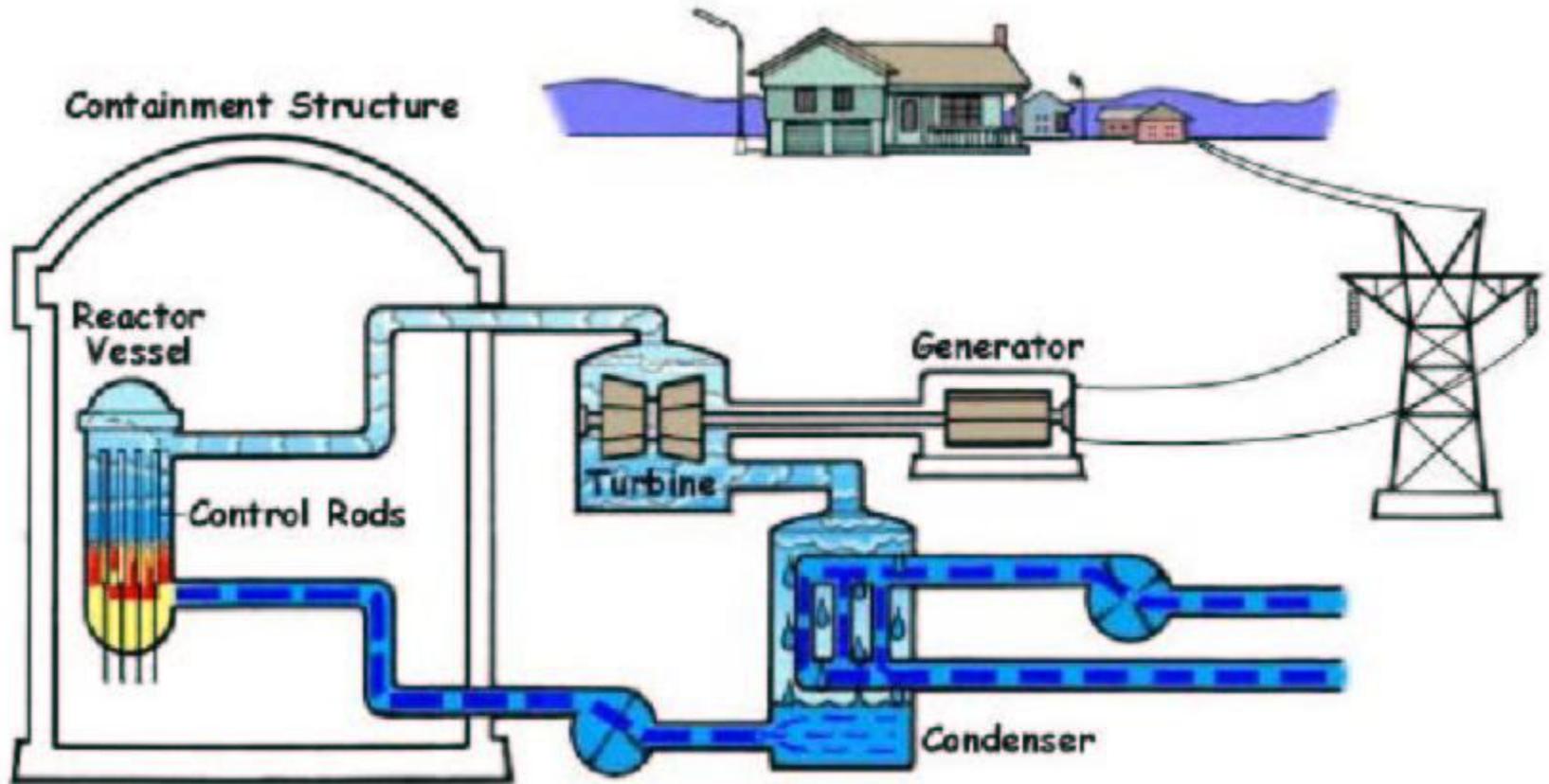
PEPA4-G, AREVA-NP GmbH

Matthias.Braun@AREVA.com

REP

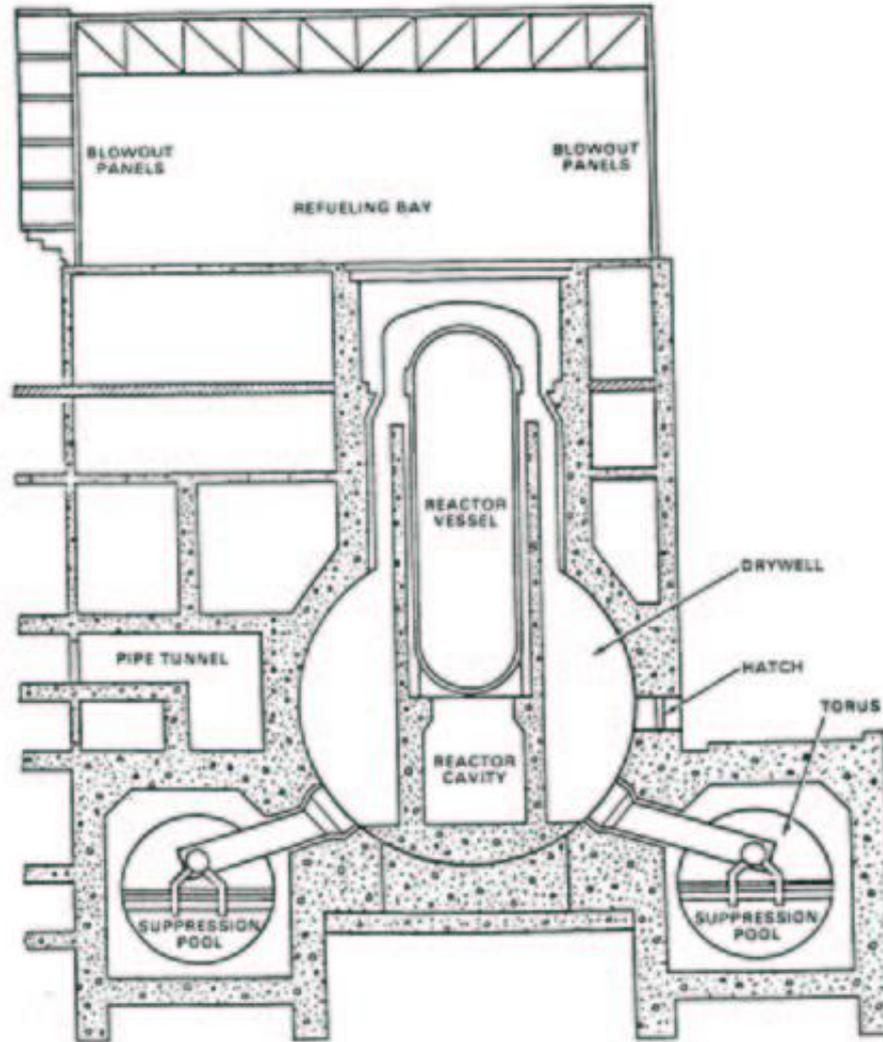


REB



Coupe

MARK I CONTAINMENT (Peach Bottom)

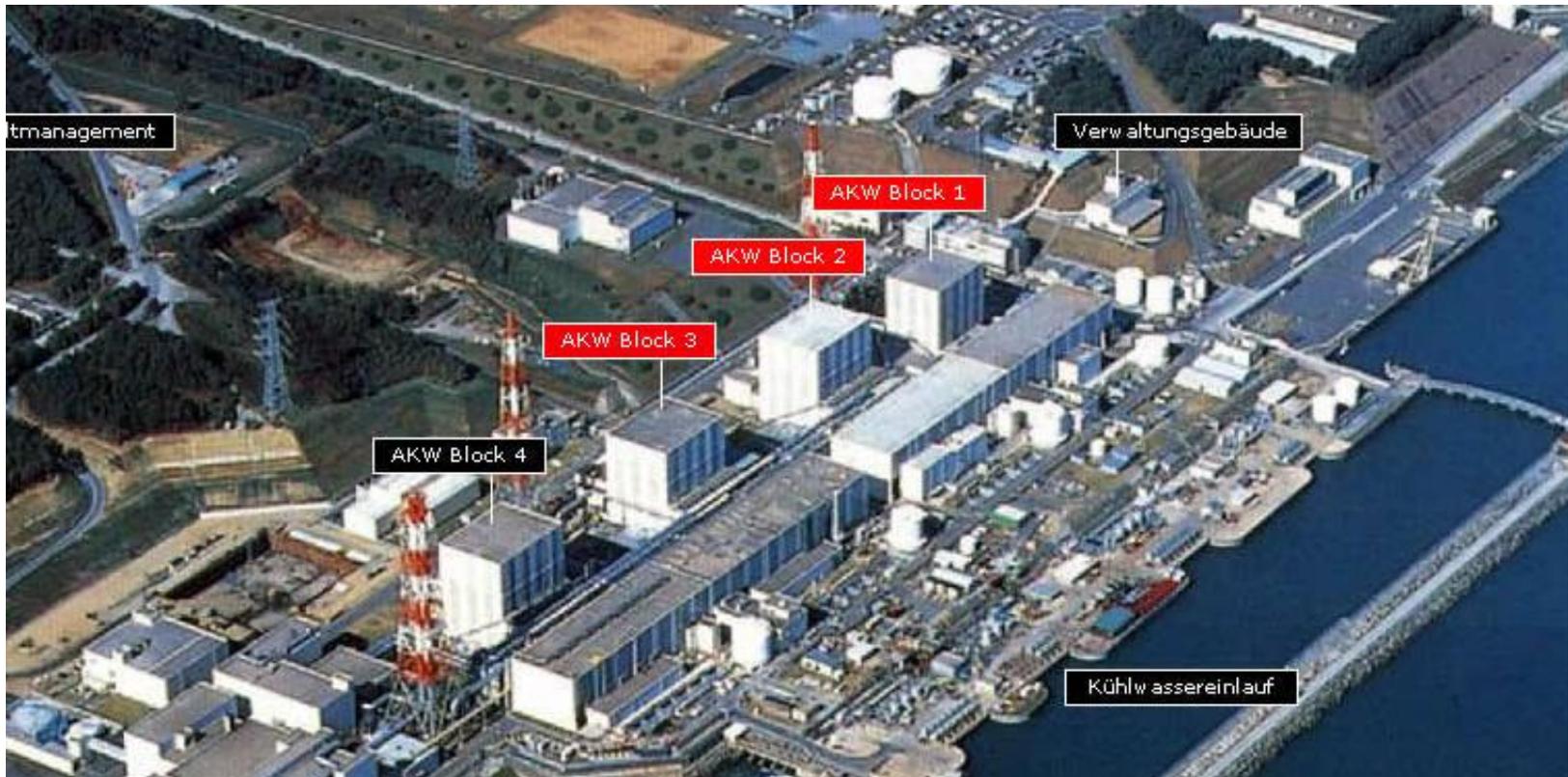


Fukushima Daiichi

La centrale (1 à 4)

► Fukushima Daiichi (Plant I)

- ◆ Unit I - GE Mark I BWR (439 MW), Démarrage 1971
- ◆ Unit II-IV - GE Mark I BWR (760 MW), Démarrage 1974

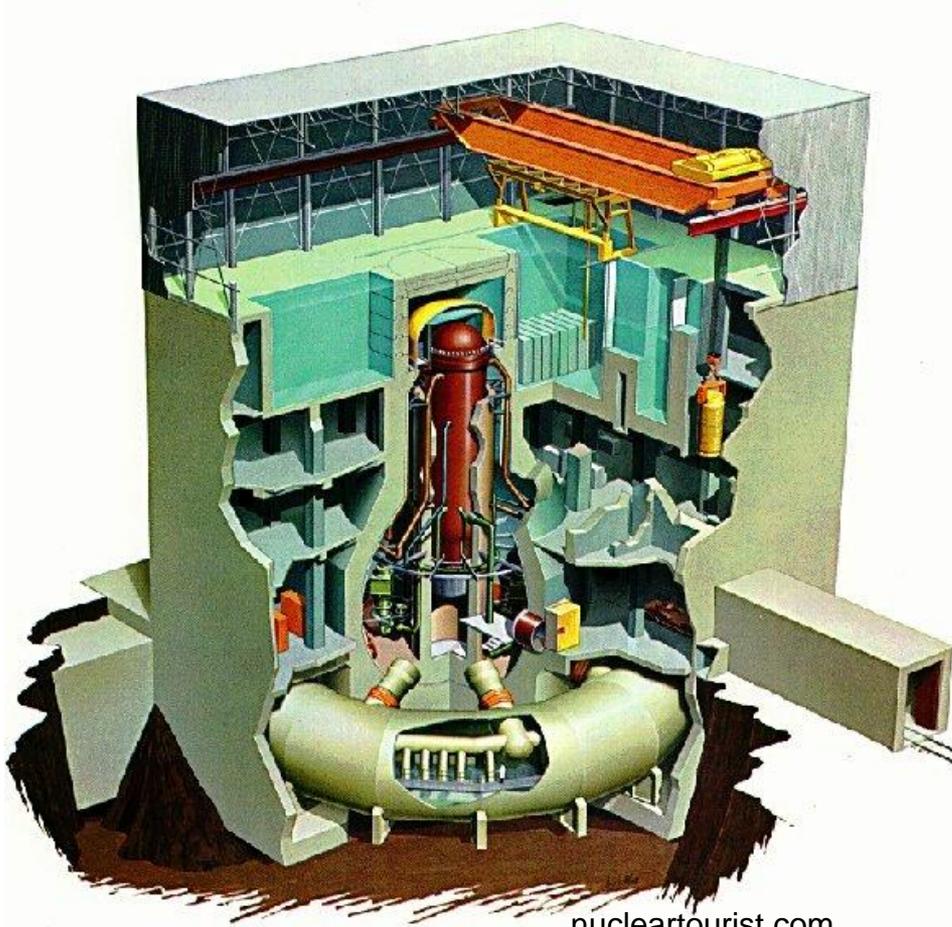


Fukushima Daiichi Incident

Vue du réacteur 1

► Bâtiment

- ◆ Bas du bâtiment en béton
- ◆ Superstructure en acier



► Enceinte de confinement

- ◆ Puits sec en forme de poire
- ◆ Puits humide torique



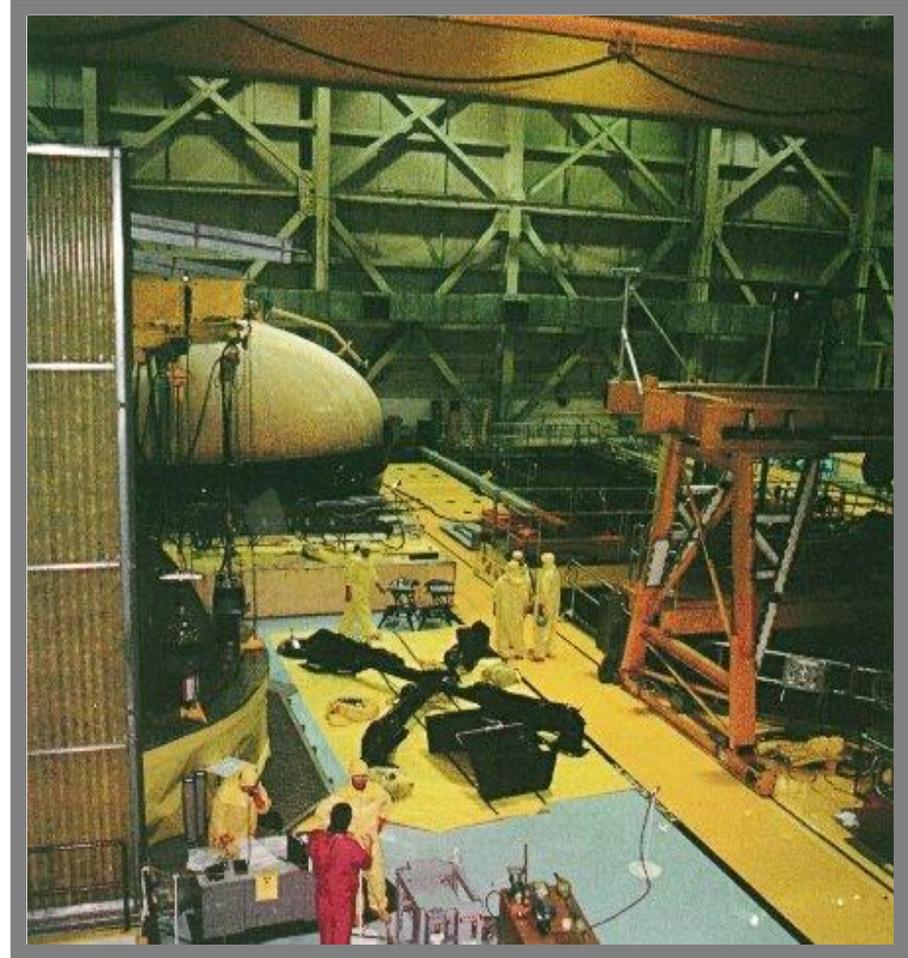
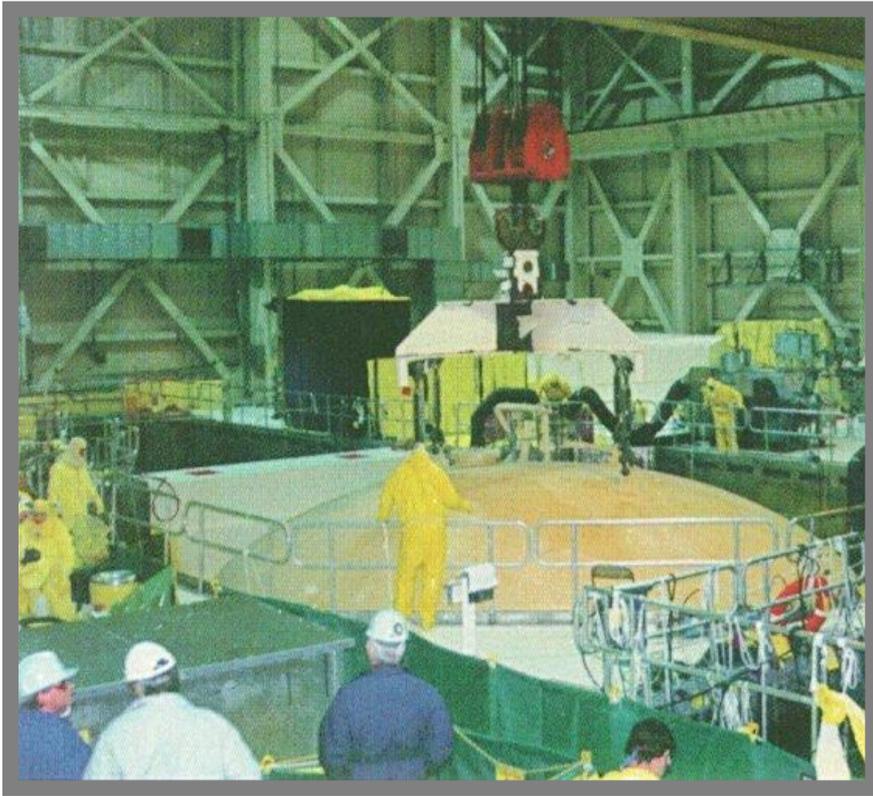
Fukushima Daiichi

Etage de service

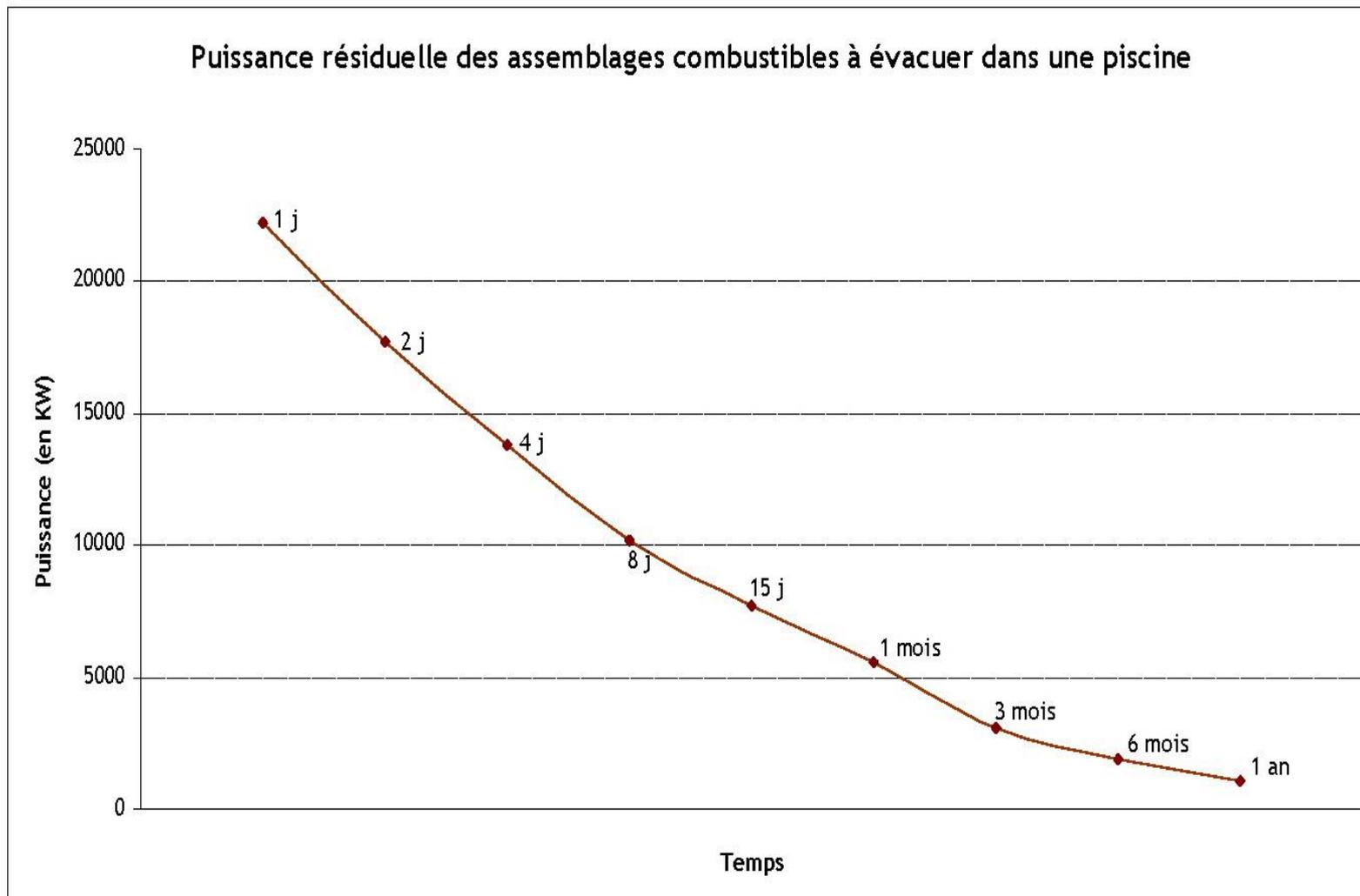


Fukushima Daiichi

- ▶ Ouverture de l'enceinte de confinement



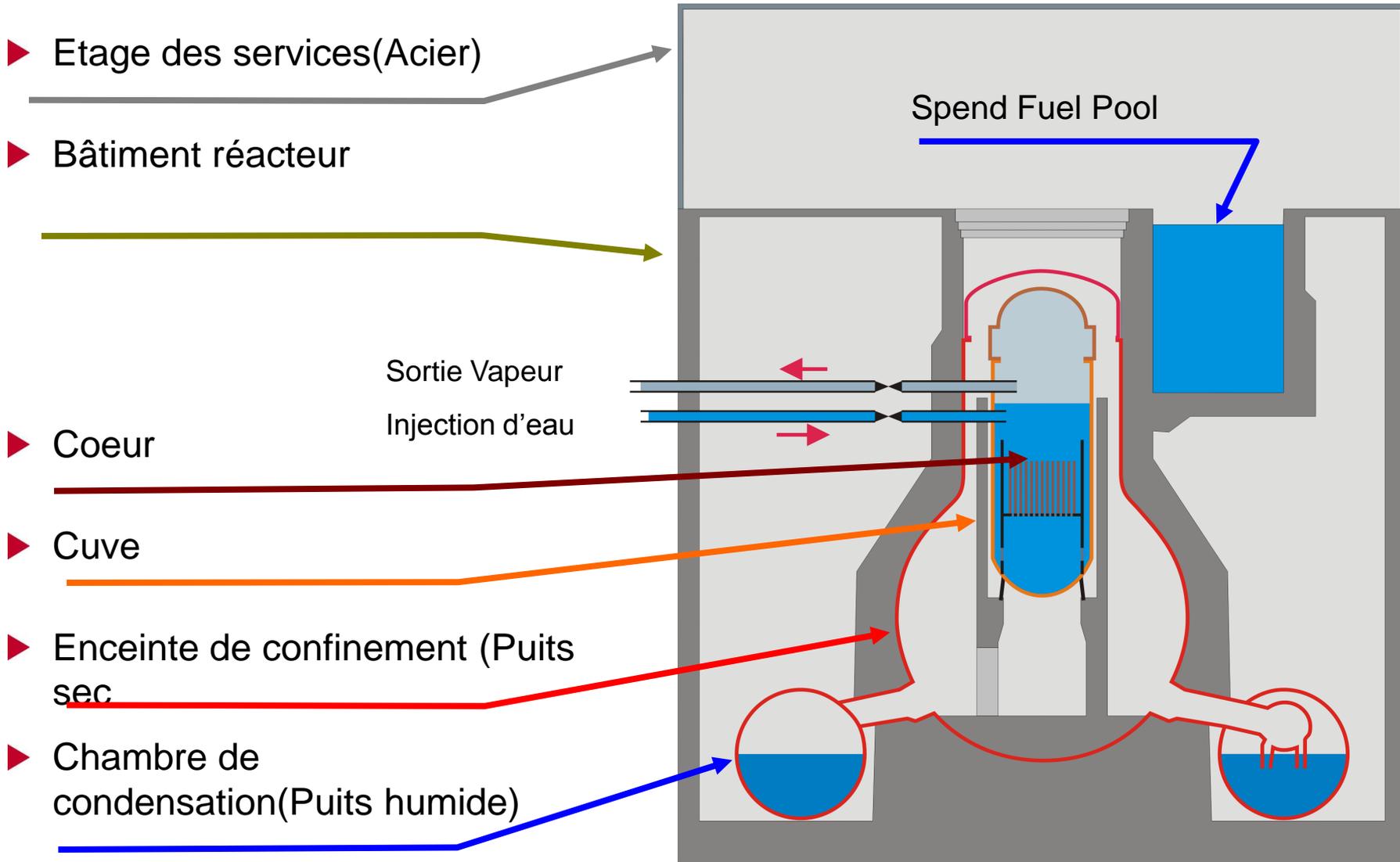
Variation de la puissance résiduelle



Animation

Fukushima Daiichi

1. Schéma du réacteur



Fukushima Daiichi

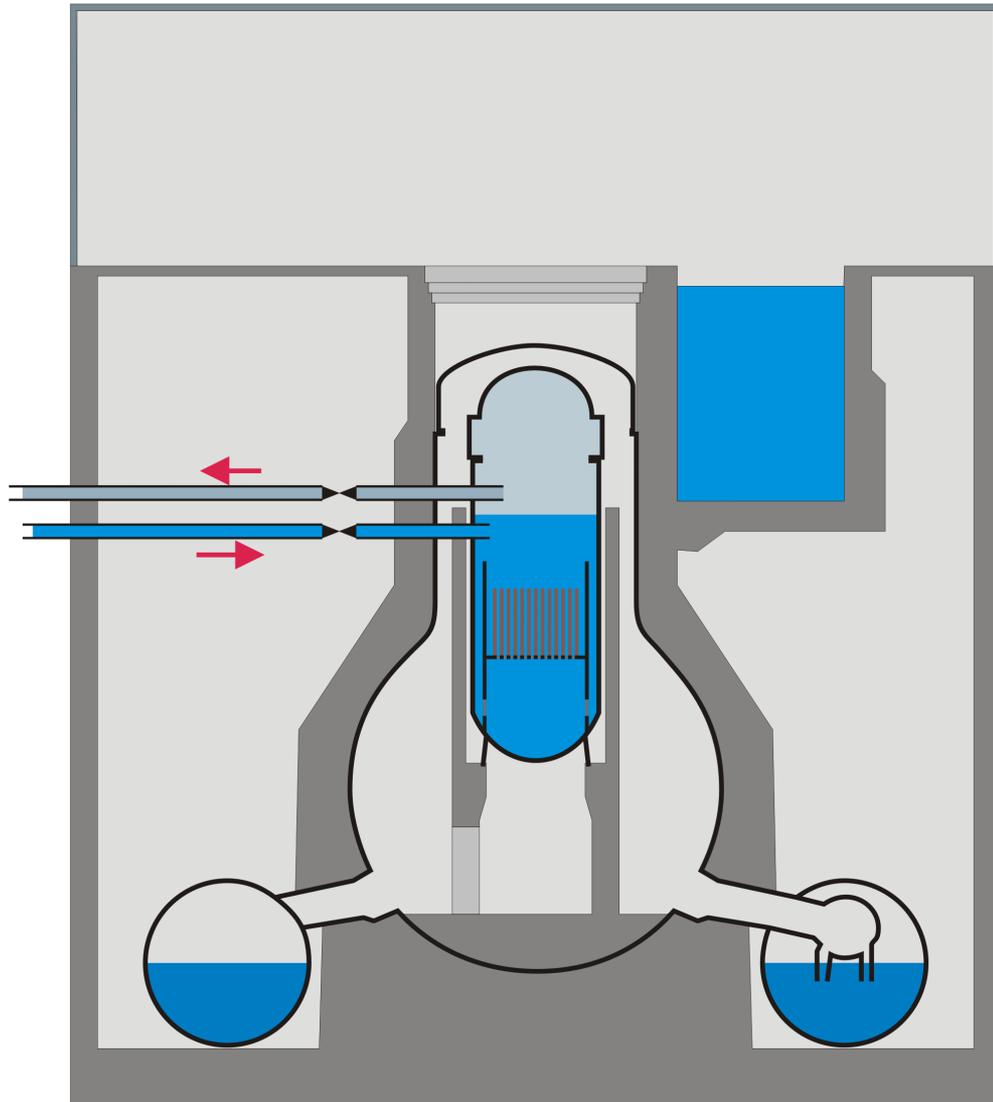
Progression de l'accident

▶ 11.3.2011 14:46 - Séisme

- ◆ Magnitude 9
- ◆ Crash du réseau électrique
- ◆ Pas de dommage aux réacteurs

▶ Arrêt d'urgence

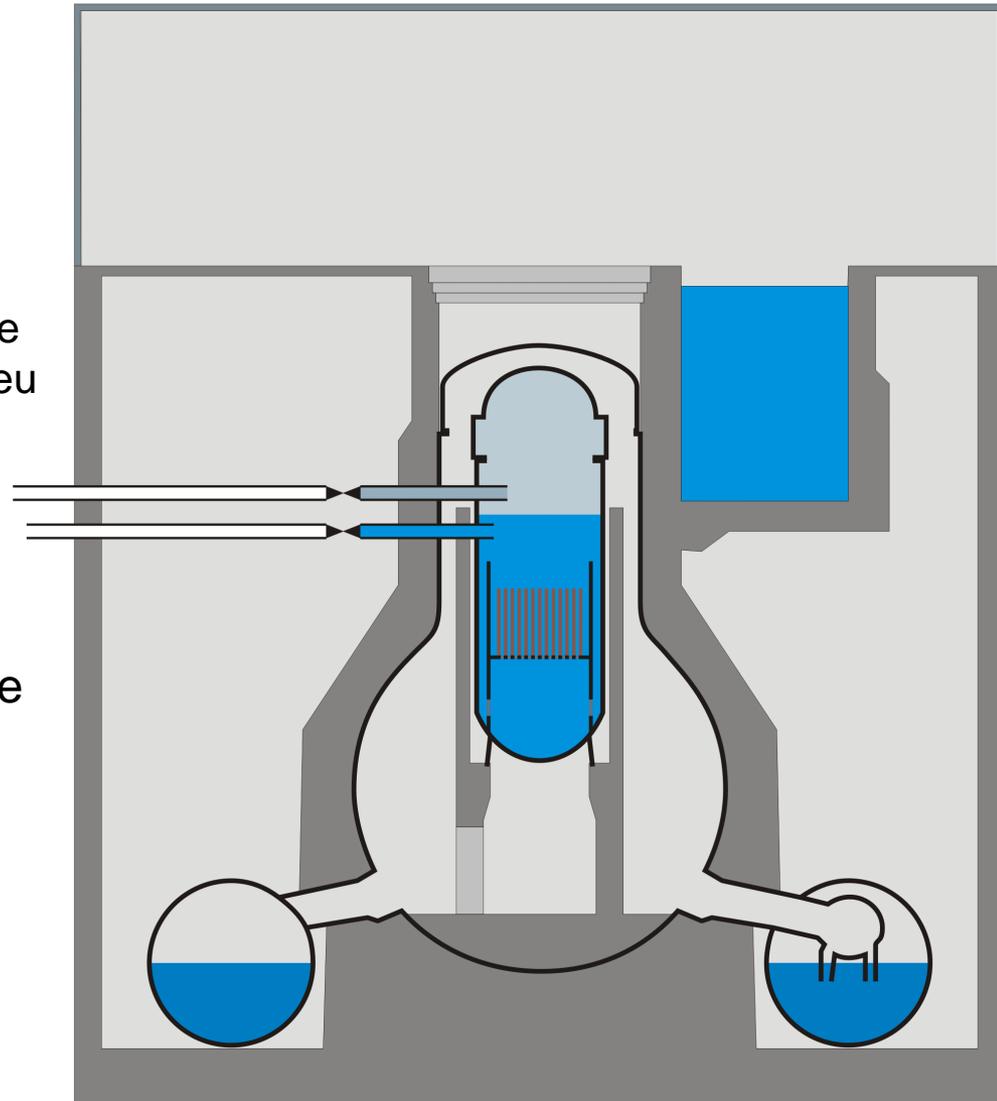
- ◆ Arrêt de la réaction en chaîne
- ◆ Production de chaleur résiduelle due à la radioactivité des PF
 - Après l'arrêt ~6%
 - Après 1 jour ~1%
 - Après 5 jours ~0.5%



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

- ▶ Isolement du confinement
 - ◆ Fermeture de toutes les entrées non nécessaires
 - ◆ Clôture de la salle Machine
 - ◆ Si la mise en isolement fonctionne rejet de produits de fission très peu probable
 - ◆ Refroidissement d'urgence du coeur assuré
- ▶ Le réacteur est dans un état sûr de refroidissement d'urgence



Fukushima Daiichi

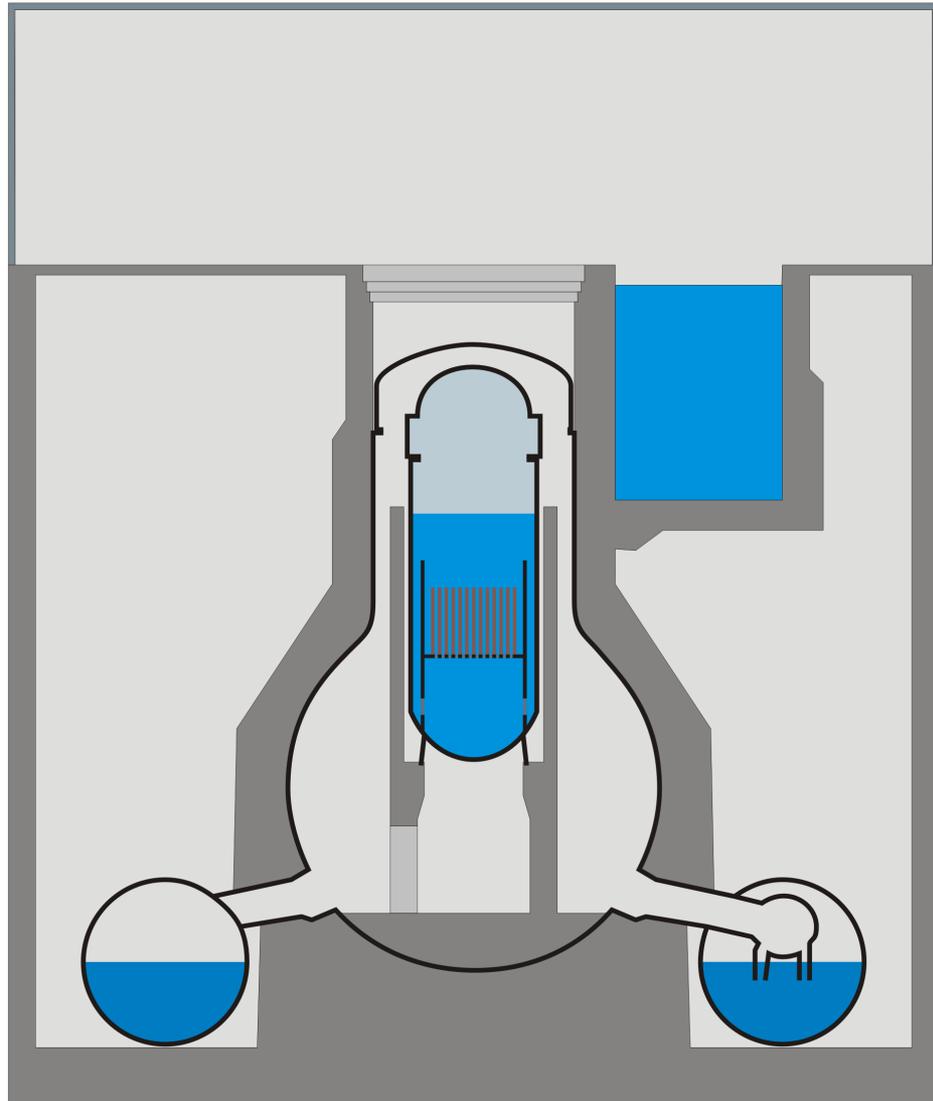
2. Progression de l' accident

▶ 11.3. 15:41 Arrivée du Tsunami

- ◆ Dimensionnement pour une vague de 6.5m
- ◆ Hauteur réelle >7m (14m?)
- ◆ Noyage des
 - Générateurs Diesel et
 - Du refroidissement des générateurs

▶ Blackout

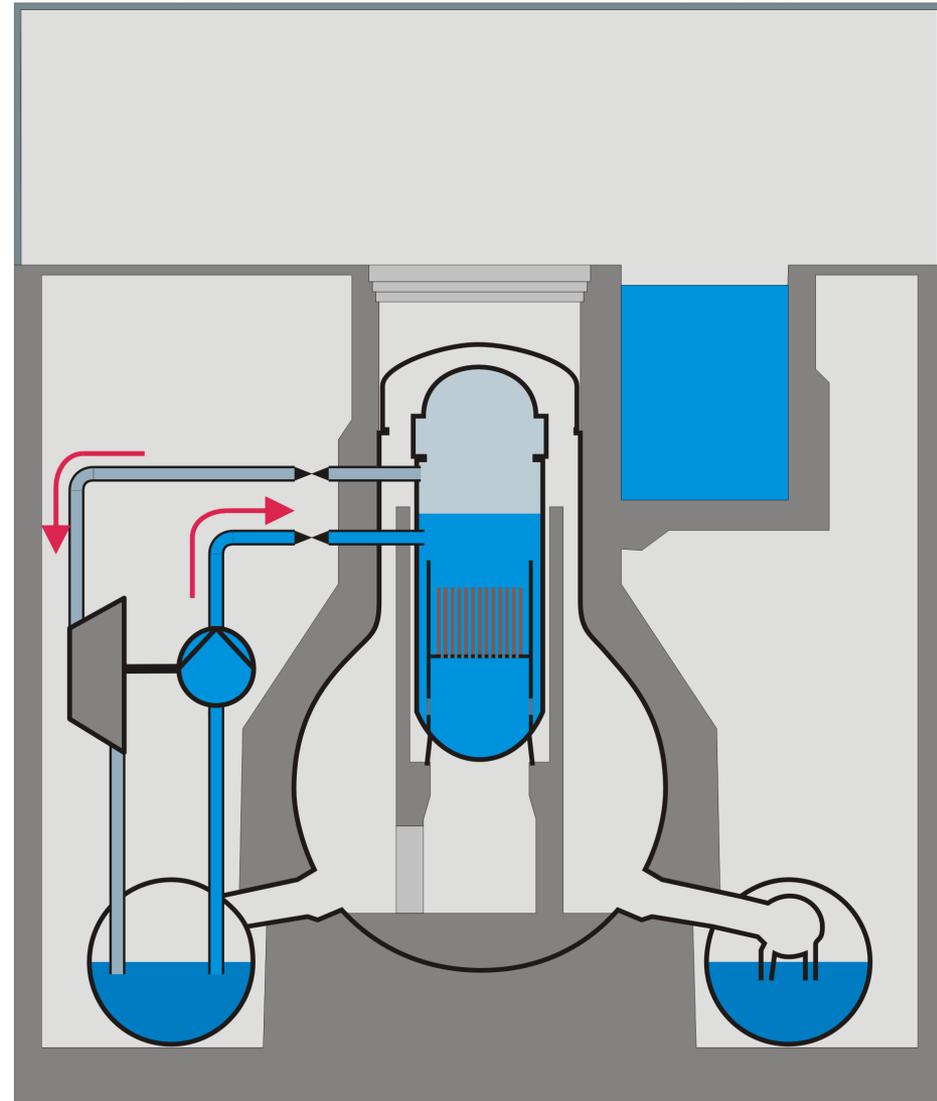
- ◆ Cause Commune de défaut de l'alimentation électrique
- ◆ Des batteries sont encore disponibles
- ◆ Défaut de tous les systèmes de refroidissement de secours sauf un



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

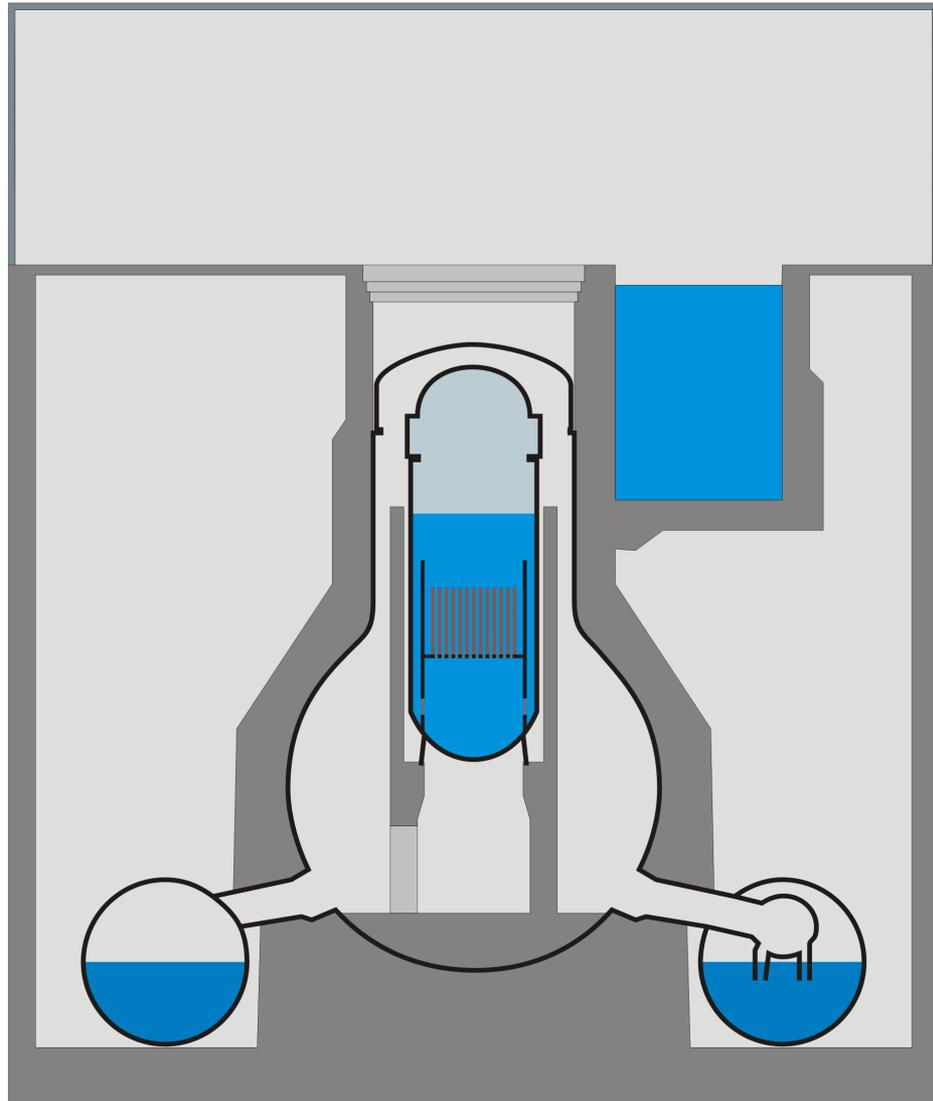
- ▶ La Pompe d'isolement du Coeur encore opérationnelle
 - ◆ La vapeur du réacteur entraîne une Turbine
 - ◆ La vapeur se condense dans le Puits humide
 - ◆ La turbine entraîne une pompe
 - ◆ L'eau du puits humide est pompée dans le Réacteur
 - ◆ Nécessaire:
 - Batterie
 - La température dans le puits humide doit être sous 100°C
- ▶ Comme il n'y a pas de refroidissement dans le bâtiment réacteur, la pompe d'isolement ne peut fonctionner indéfiniment.



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

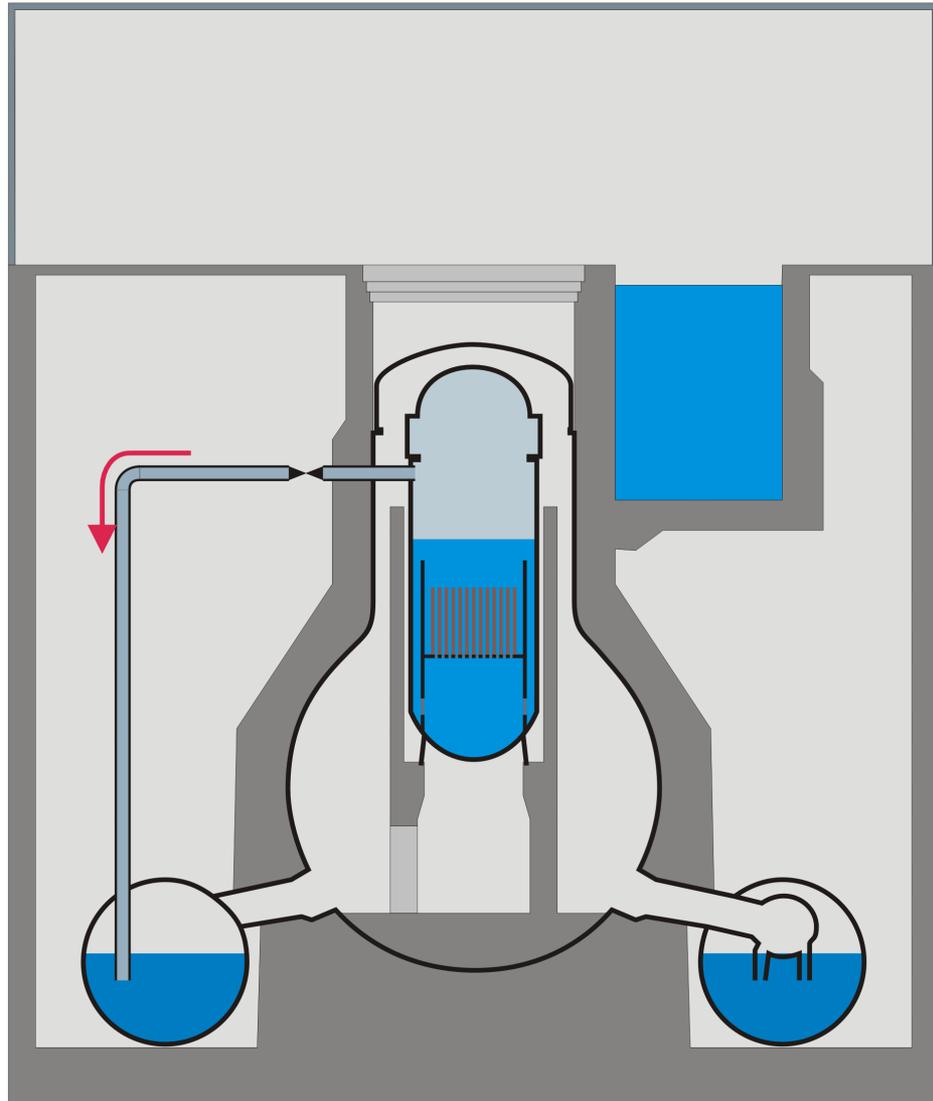
- ▶ La pompe d'isolement s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 Unité 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 Unité 2 (Panne de pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 Unité 3 (Batteries vides)
- ▶ La chaleur résiduelle produit encore de la vapeur dans la cuve
 - ◆ Augmentation de la Pression



Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

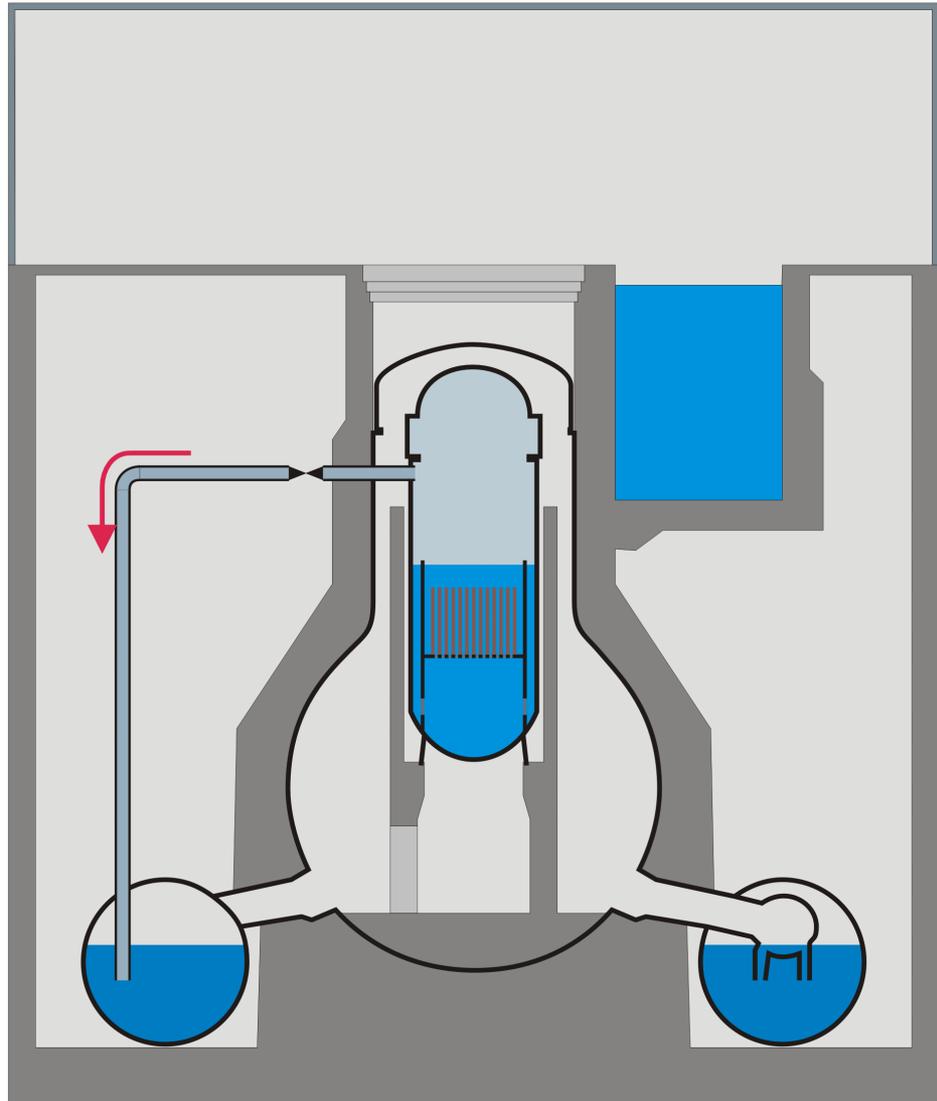
- ▶ La chaleur résiduelle produit encore de la vapeur dans la cuve
 - ◆ Augmentation de la Pression
- ▶ Ouverture des soupapes de dépression
- ▶ Décharge de vapeur dans le puits humide
- ▶ Baisse du liquide dans la cuve



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

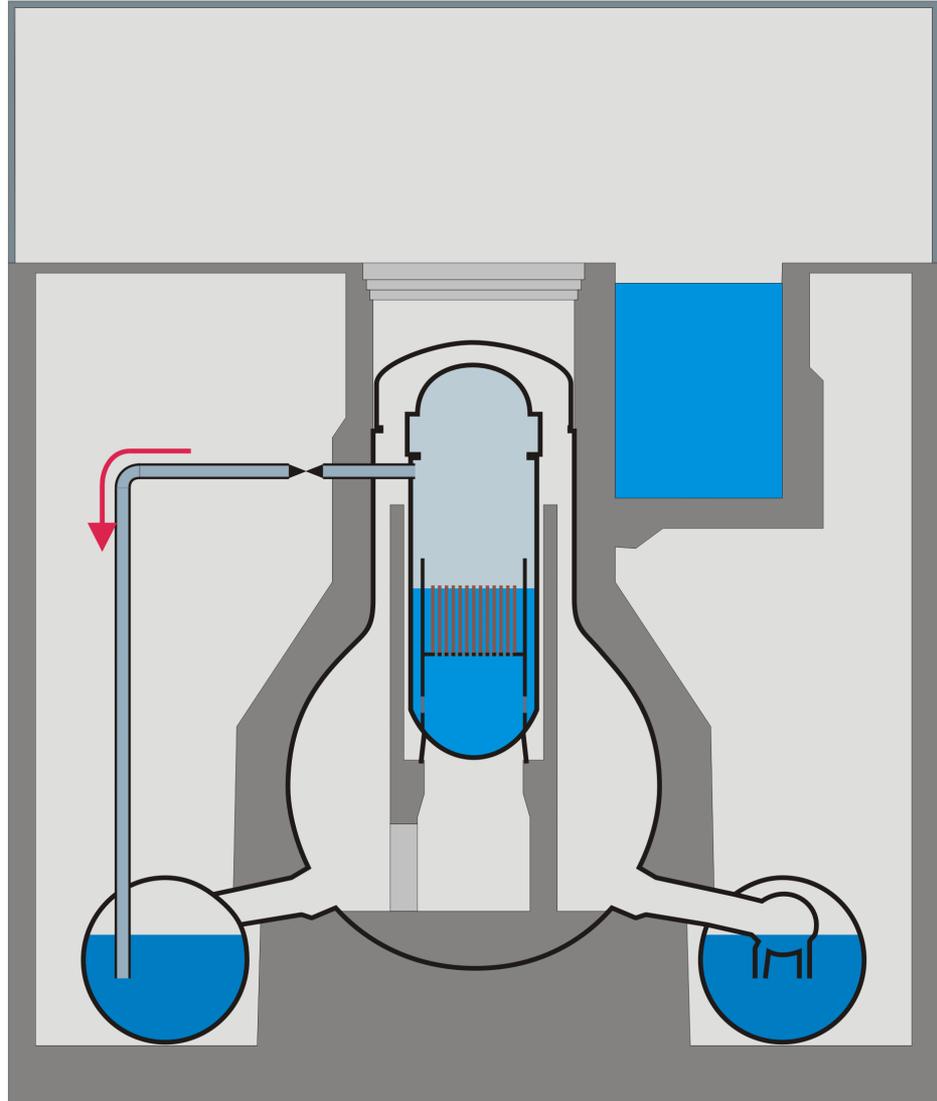
- ▶ Décharge de vapeur dans le puits humide
- ▶ Baisse du liquide dans la cuve



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

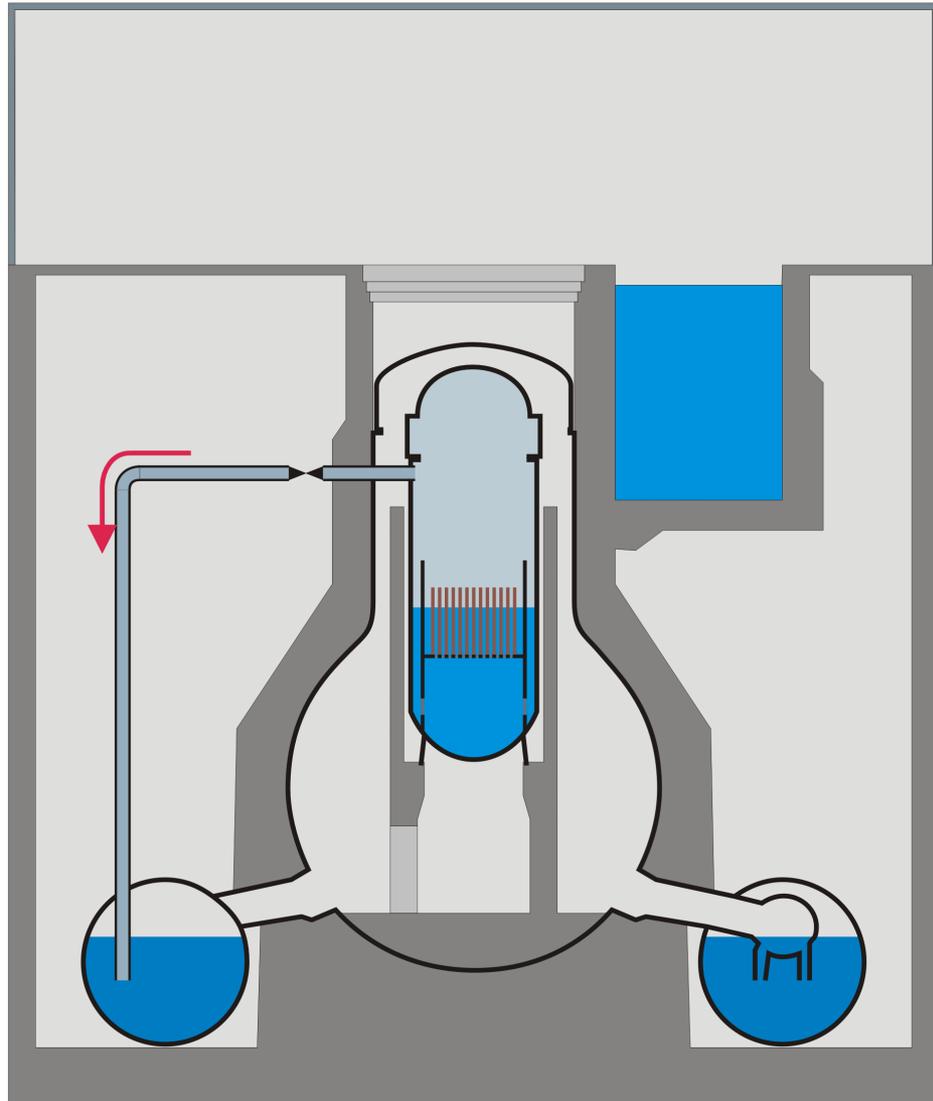
- ▶ Décharge de vapeur dans le puits humide
- ▶ Baisse du liquide dans la cuve



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

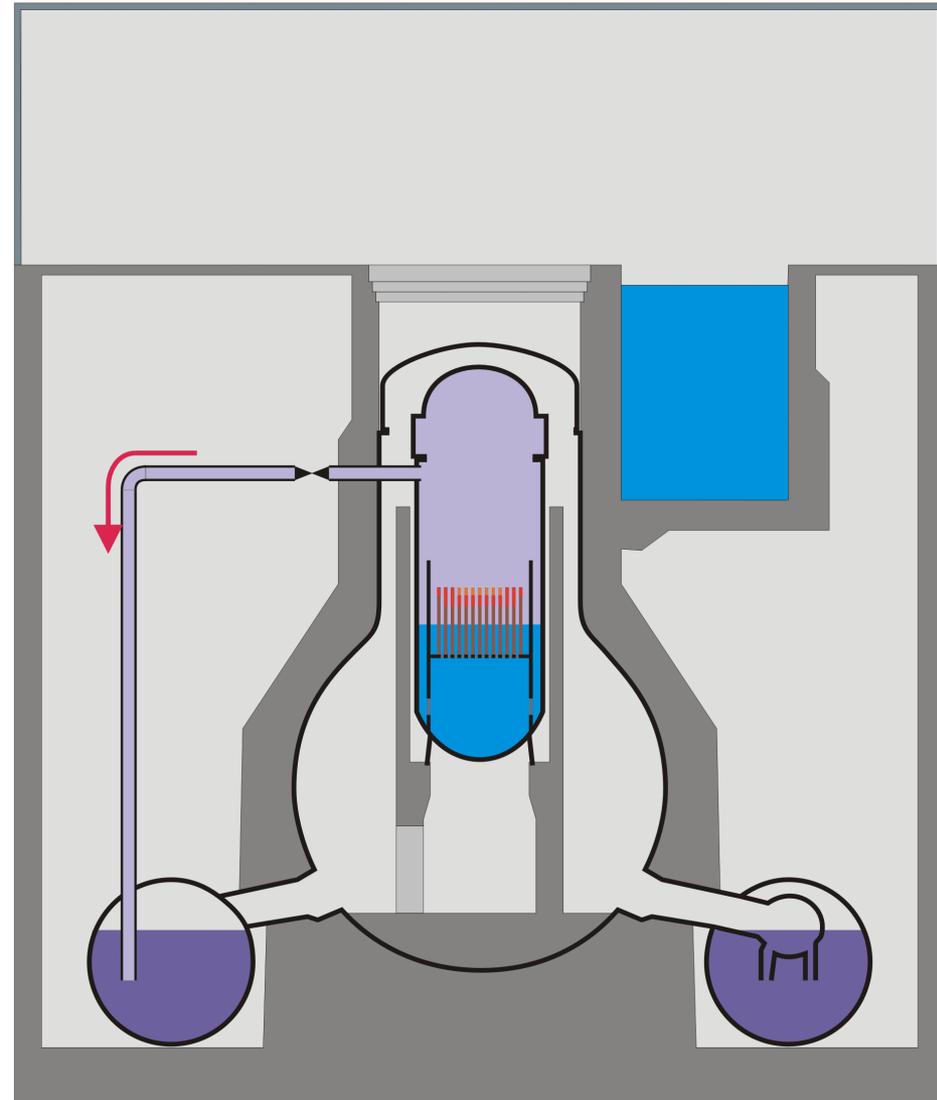
- ▶ Décharge de vapeur dans le puits humide
- ▶ Baisse du liquide Level dans la cuve



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

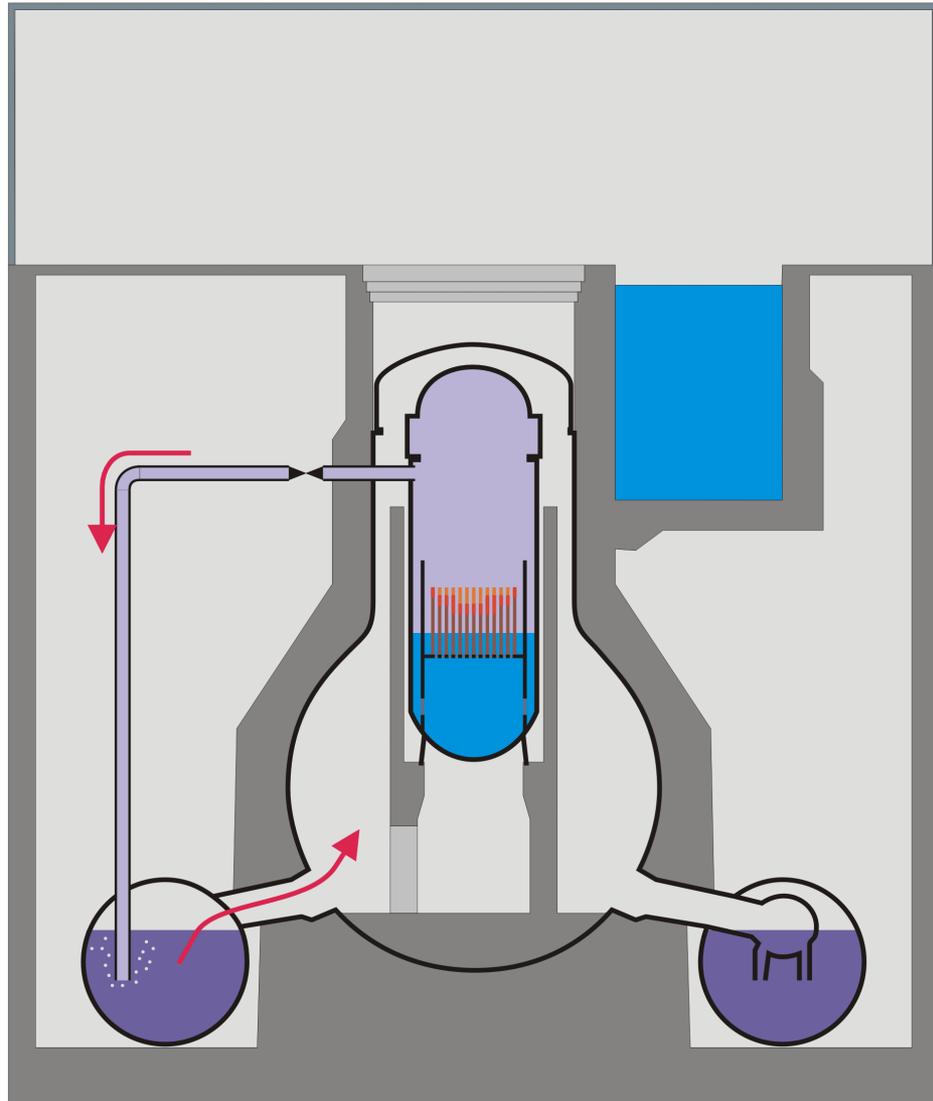
- ▶ ~50% du coeur exposé
 - ◆ La température des gaines augmente, Mais pas encore de dommage important au coeur
- ▶ ~2/3 du coeur exposé
 - ◆ La température des gaines excède $\sim 900^{\circ}\text{C}$
 - ◆ Gonflement / Rupture des gaines
 - ◆ Relâchement de produits de fission provenant des vides inter pastilles et du plenum



Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

- ▶ ~3/4 of the core exposé
 - ◆ Les gaines excèdent ~1200° C
 - ◆ Le Zirconium des gaines commence à brûler dans l'atmosphère de vapeur
 - ◆ $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$
 - ◆ Réaction Exothermique chauffant encore plus le coeur
 - ◆ Production d'hydrogène
 - Unité 1: 300-600kg
 - Unité 2/3: 300-1000kg
 - ◆ L'hydrogène est poussé à travers le puits humide vers le puits sec.



Fukushima Daiichi

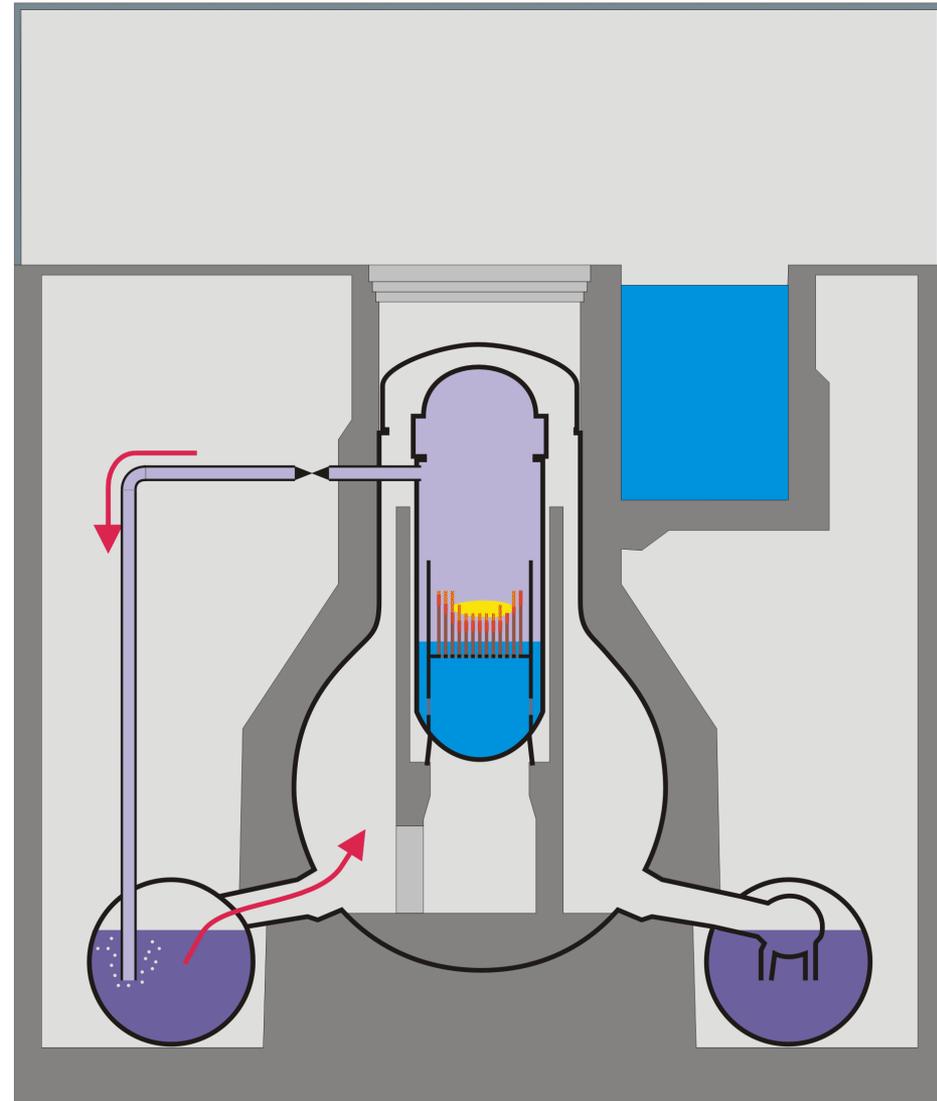
2. Progression de l'accident

- ▶ à $\sim 1800^{\circ}\text{C}$ [Unit 1,2,3]
 - ◆ Fusion des gaines
 - ◆ Fusion des structures d'acier

- ▶ à $\sim 2500^{\circ}\text{C}$ [Block 1,2]
 - ◆ Rupture des éléments combustibles
 - ◆ débris dans le coeur

- ▶ à $\sim 2700^{\circ}\text{C}$ [Block 1]
 - ◆ Fusion de l'eutectique Uranium-Zirconium

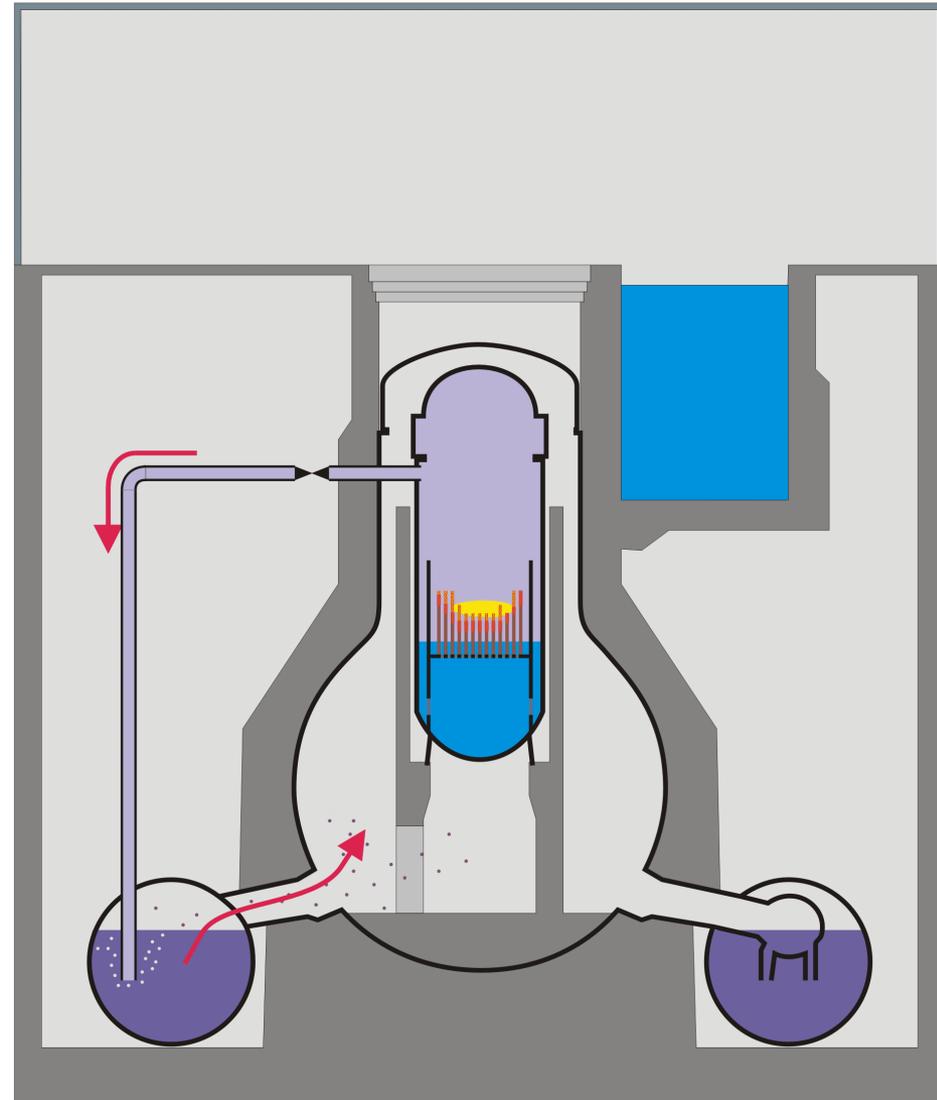
- ▶ La restauration de l'alimentation en eau arrête l'accident dans les 3 Unités
 - ◆ Unité 1: 12.3. 20:20 (27h sans eau)
 - ◆ Unité 2: 14.3. 20:33 (7h sans eau)
 - ◆ Unité 3: 13.3. 9:38 (7h sans eau)



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

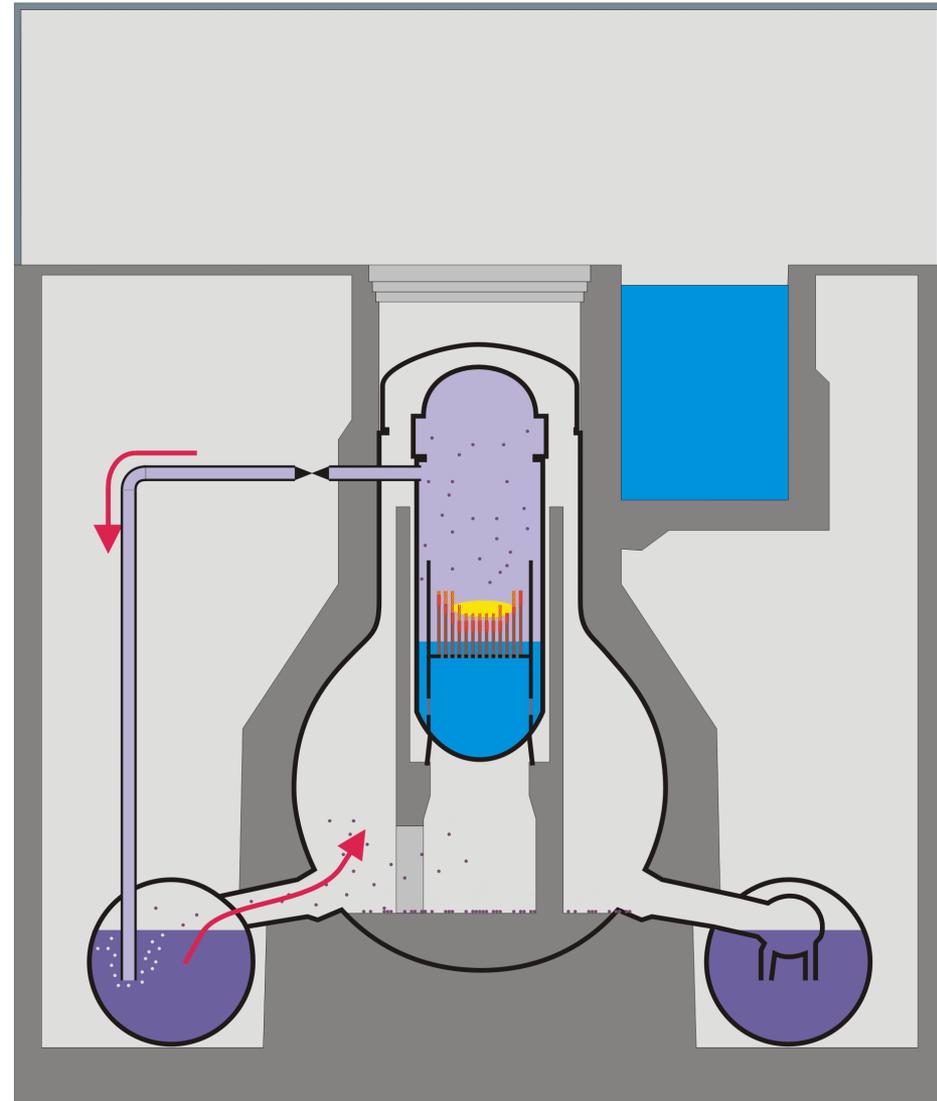
- ▶ Relâchement des produits de fission pendant la fusion
 - ◆ Xenon, Césium, Iode,...
 - ◆ Uranium/Plutonium restent dans le coeur
 - ◆ Les produits de fission se condensent en aérosols
- ▶ Décharge à travers les soupapes dans l'eau de la chambre de condensation
 - ◆ Le filtrage par la chambre retient une fraction des aérosols dans l'eau
- ▶ Le Xénon et les aérosols non filtrés entrent dans le puits sec
 - ◆ La déposition des aérosols sur les surfaces poursuivent la décontamination de l'air



Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

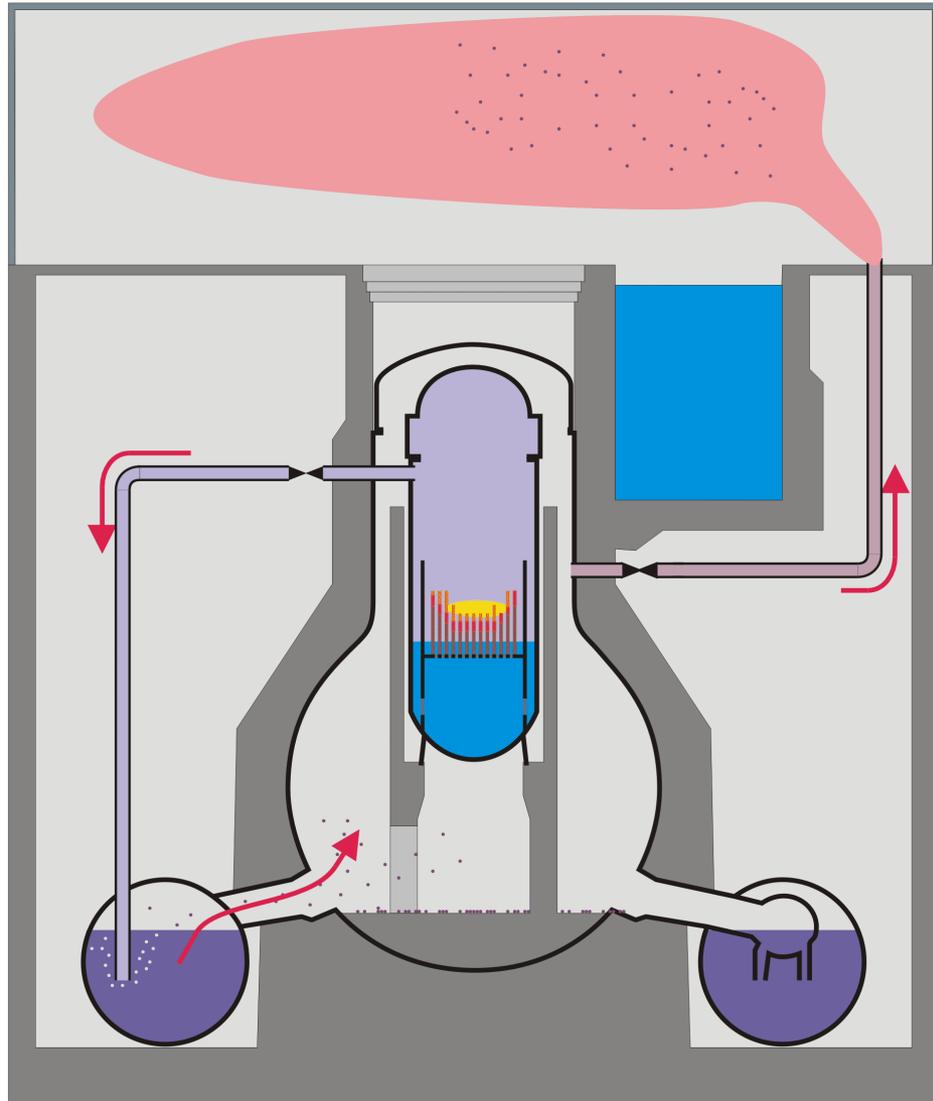
- ▶ Confinement
 - ◆ Dernière barrière entre les Produits de Fission et l'environnement
 - ◆ Epaisseur de la paroi ~3cm
 - ◆ Tenue en pression: 4-5bar
- ▶ La pression réelle a atteint 8 bars
 - ◆ Remplissage par un gaz Normal inerte (Azote)
 - ◆ Hydrogène par oxydation du coeur
 - ◆ L'eau de la chambre de condensation bout
- ▶ Dépressurisation du confinement
 - ◆ Unité 1: 12.3. 4:00
 - ◆ Unité 2: 13.3 00:00
 - ◆ Unité 3: 13.3. 8.41



Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

- ▶ Aspects positifs et négatifs de la dépressurisation du confinement
 - ◆ Extrait de l'énergie du bâtiment réacteur
 - ◆ Réduit la pression à ~4 bar
 - ◆ Relâche de petites quantités d'aérosols (Iode, Césium ~0.1%)
 - ◆ Relâche de tous les gaz nobles
 - ◆ Relâche d'hydrogène
- ▶ Le Gaz est relâché au niveau de l'étage de service
 - ◆ L'hydrogène est inflammable et peut exploser

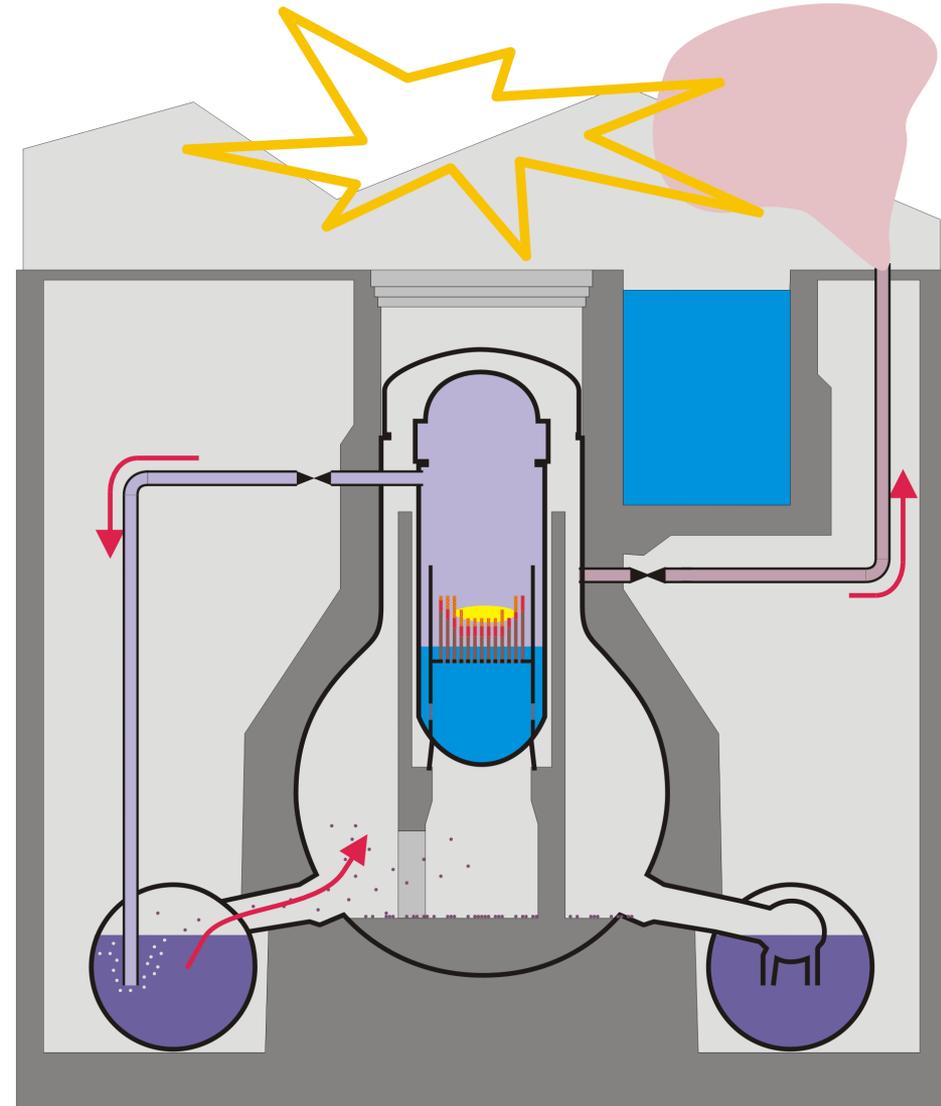


Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

► Unité 1 et 3

- ◆ L'hydrogène explose dans l'étage de service
- ◆ Destruction du toit en acier
- ◆ Les parois de béton semblent intactes
- ◆ Spectaculaire, mais faible influence sur la sûreté

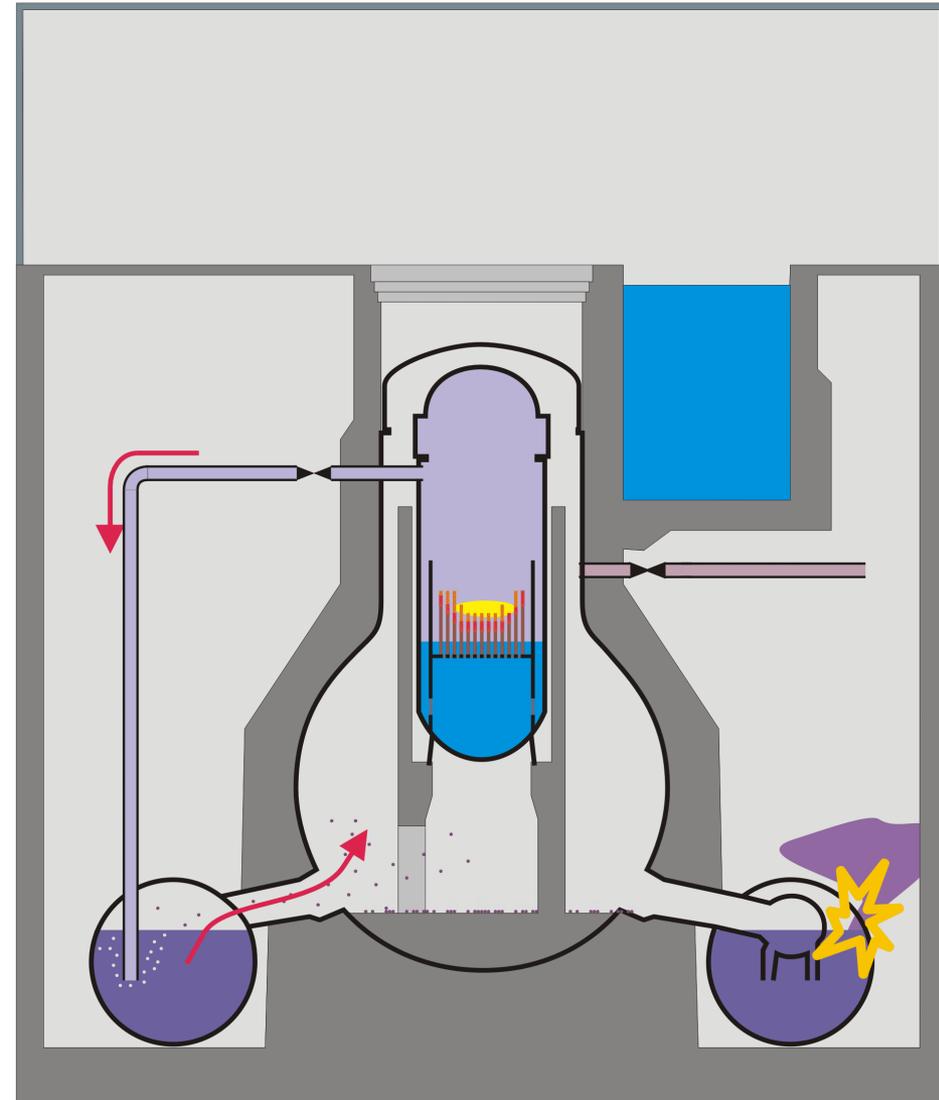


Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

► Unit 2

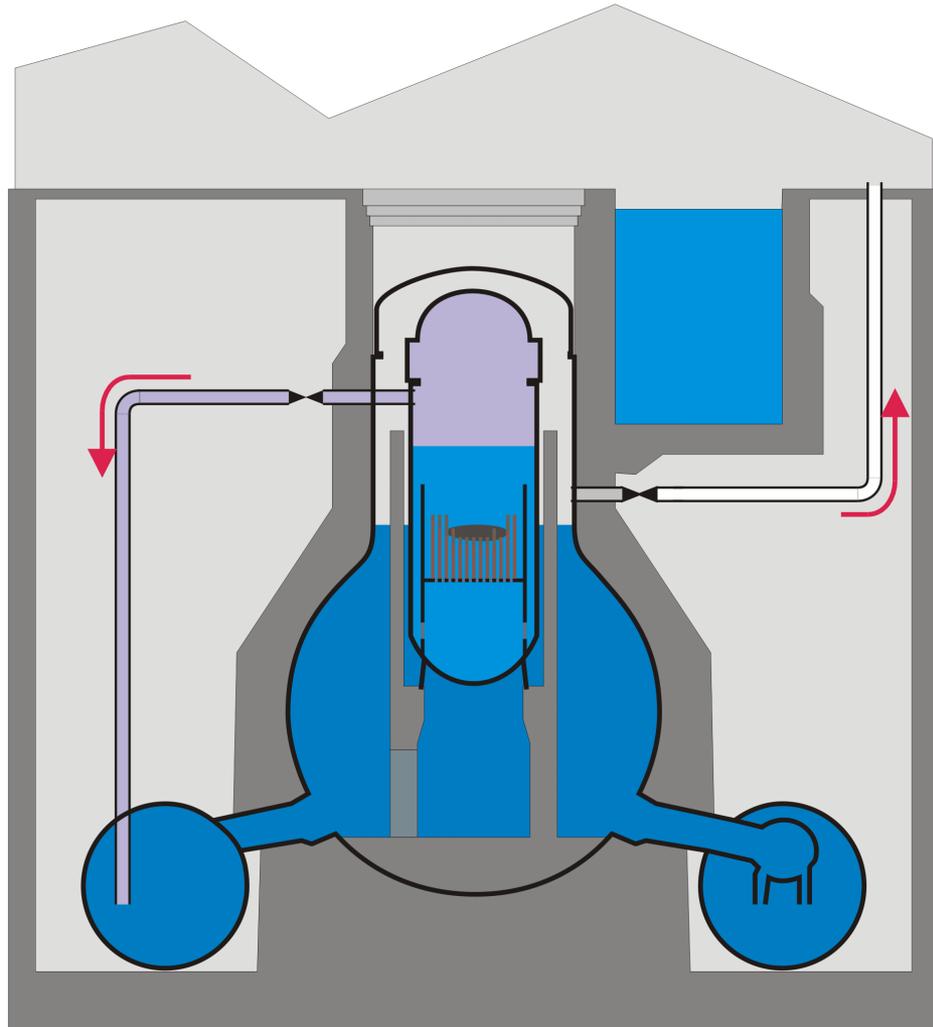
- ◆ L'hydrogène explose dans le bâtiment réacteur
 - ◆ Dommages probables à la chambre de condensation (eau très contaminée)
 - ◆ Relâchement incontrôlé de gaz de l'enceinte de confinement
 - ◆ **Relâchement de produits de fission**
 - ◆ Evacuation temporaire de la centrale
 - ◆ Les hautes doses de radiation locales restent sur le site de la centrale du fait de la destruction. Cela ralentit le travail de réparation
- On ne sait pas pourquoi l'unité 2 s'est comportée différemment



Fukushima Daiichi

2. Progression de l' accident

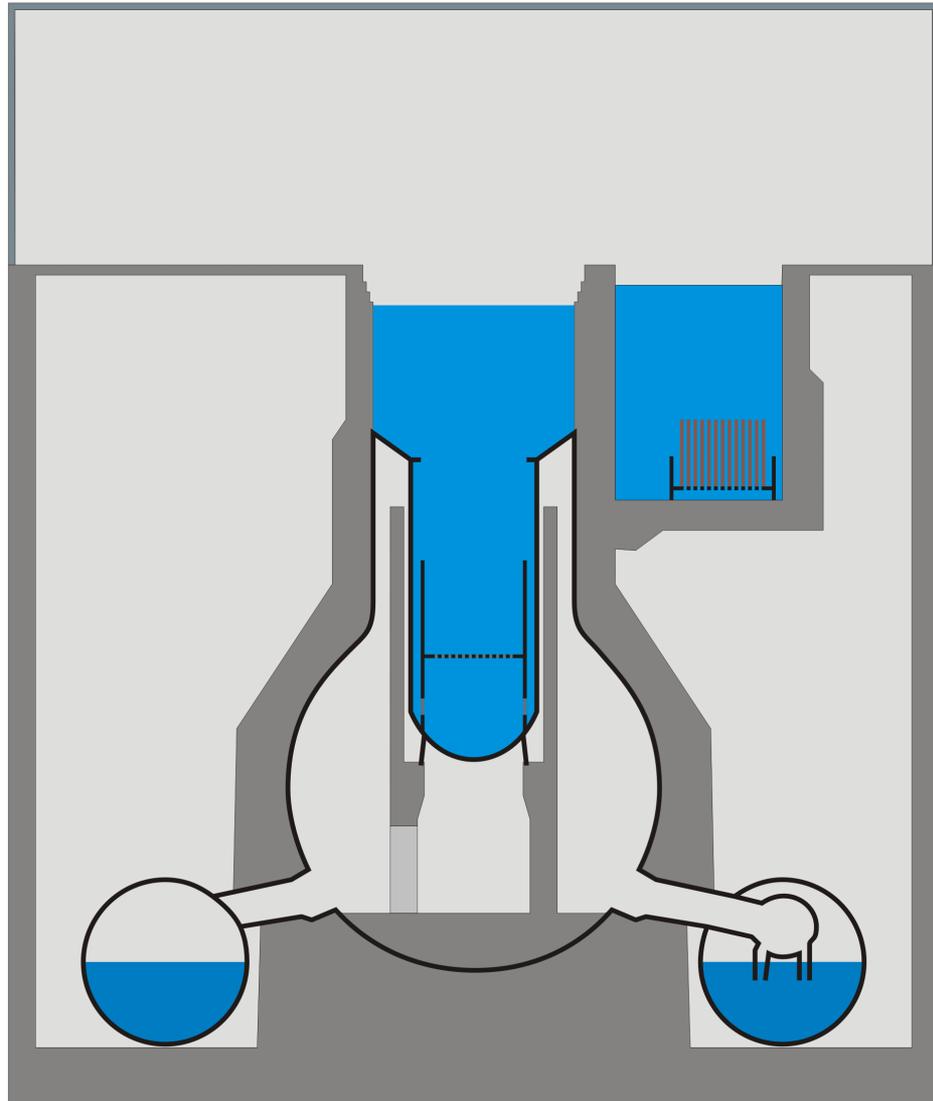
- ▶ Etat des réacteurs
 - ◆ Coeurs endommagés pour les Unités 1,2, 3
 - ◆ Bâtiments 1-4 endommagés (explosion)
 - ◆ Les cuves sont inondées grâce à des pompes mobiles
 - ◆ Au moins une enceinte de confinement inondée (unité 1)
- ▶ Refroidissement supplémentaire par relâchement de vapeur dans l'atmosphère
- ▶ Faibles rejets supplémentaires de produit de fission attendus



Fukushima Daiichi

3. Piscine de refroidissement

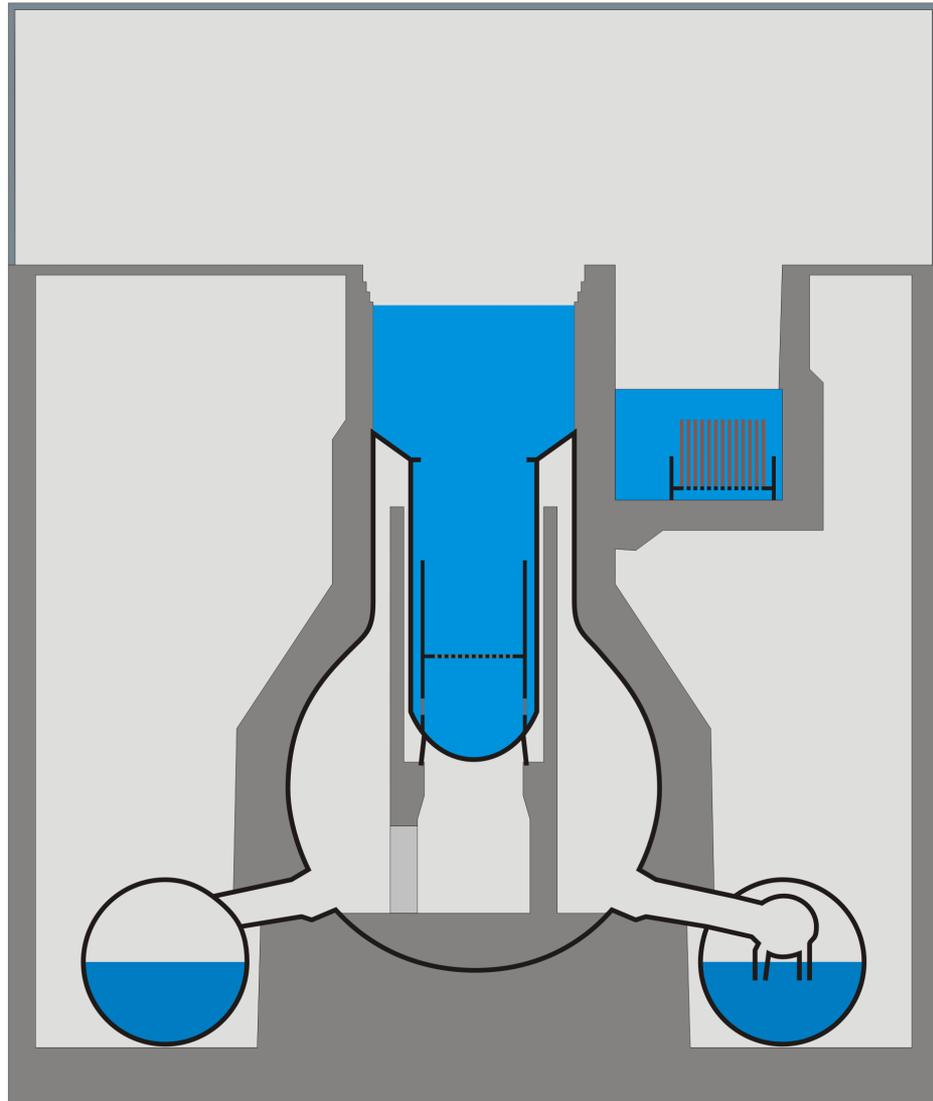
- ▶ Piscines sur l'étage de service
 - ◆ Pour la maintenance du réacteur 4 le dernier coeur était stocké dans la piscine
 - ◆ Assèchement des piscines:
 - ◆ Unité 4: en 10 jours
 - Unité 1-3,5,6 en quelques semaines
 - ◆ **Fuite due au séisme?**



Fukushima Daiichi

3. Piscine de refroidissement

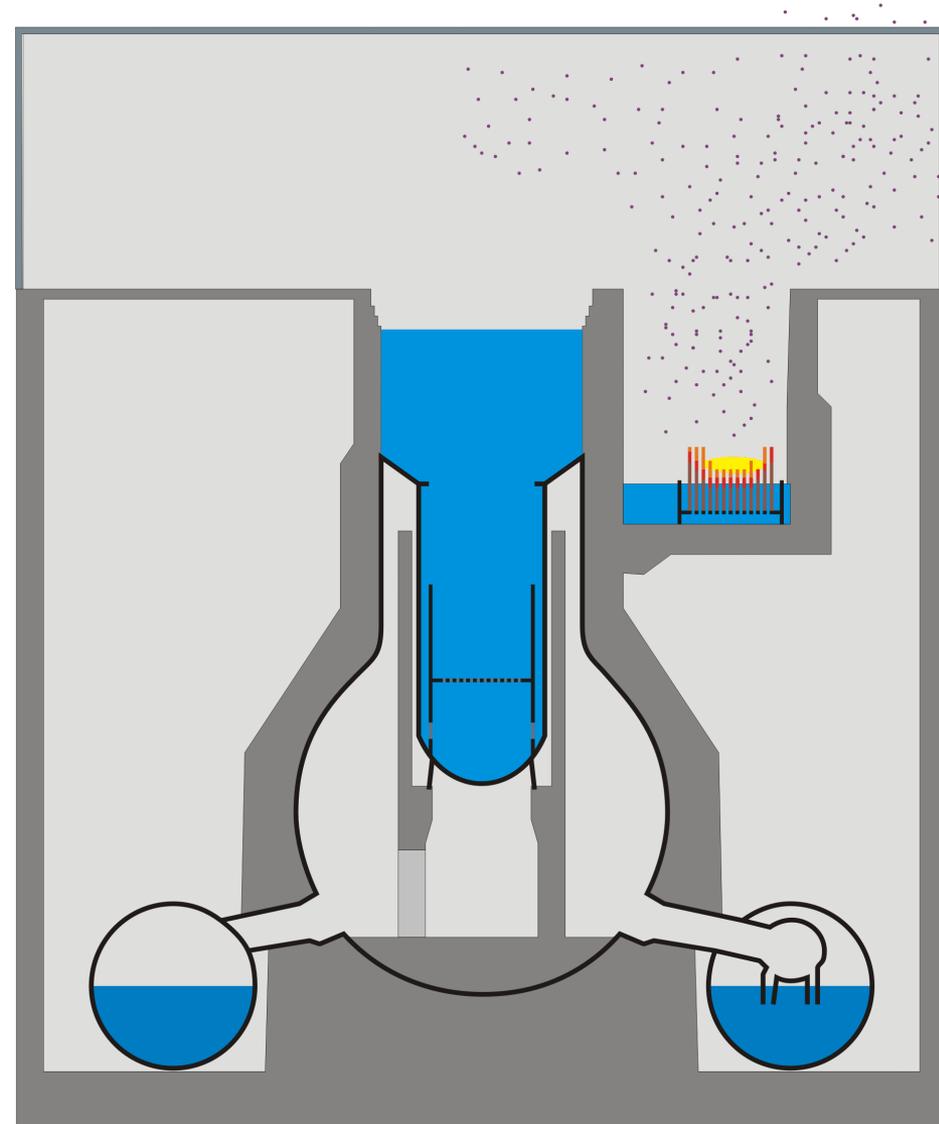
- ▶ Piscines sur l'étage de service
 - ◆ Pour la maintenance du réacteur 4 le dernier coeur était stocké dans la piscine
 - ◆ Assèchement des piscines:
 - ◆ Unité 4: en 10 jours
 - Unité 1-3,5,6 en quelques semaines
 - ◆ **Fuite due au séisme?**



Fukushima Daiichi

3. Piscine de refroidissement

- ▶ Conséquences
 - ◆ Le Coeur fond, à l'air
 - ◆ Pratiquement pas de confinement des PF
 - ◆ Rejets importants
- ▶ **On ne sait pas avec certitude si un rejet par la piscine est effectivement arrivé**



Fukushima Daiichi

4. Rejets radioactifs

► Sur le site

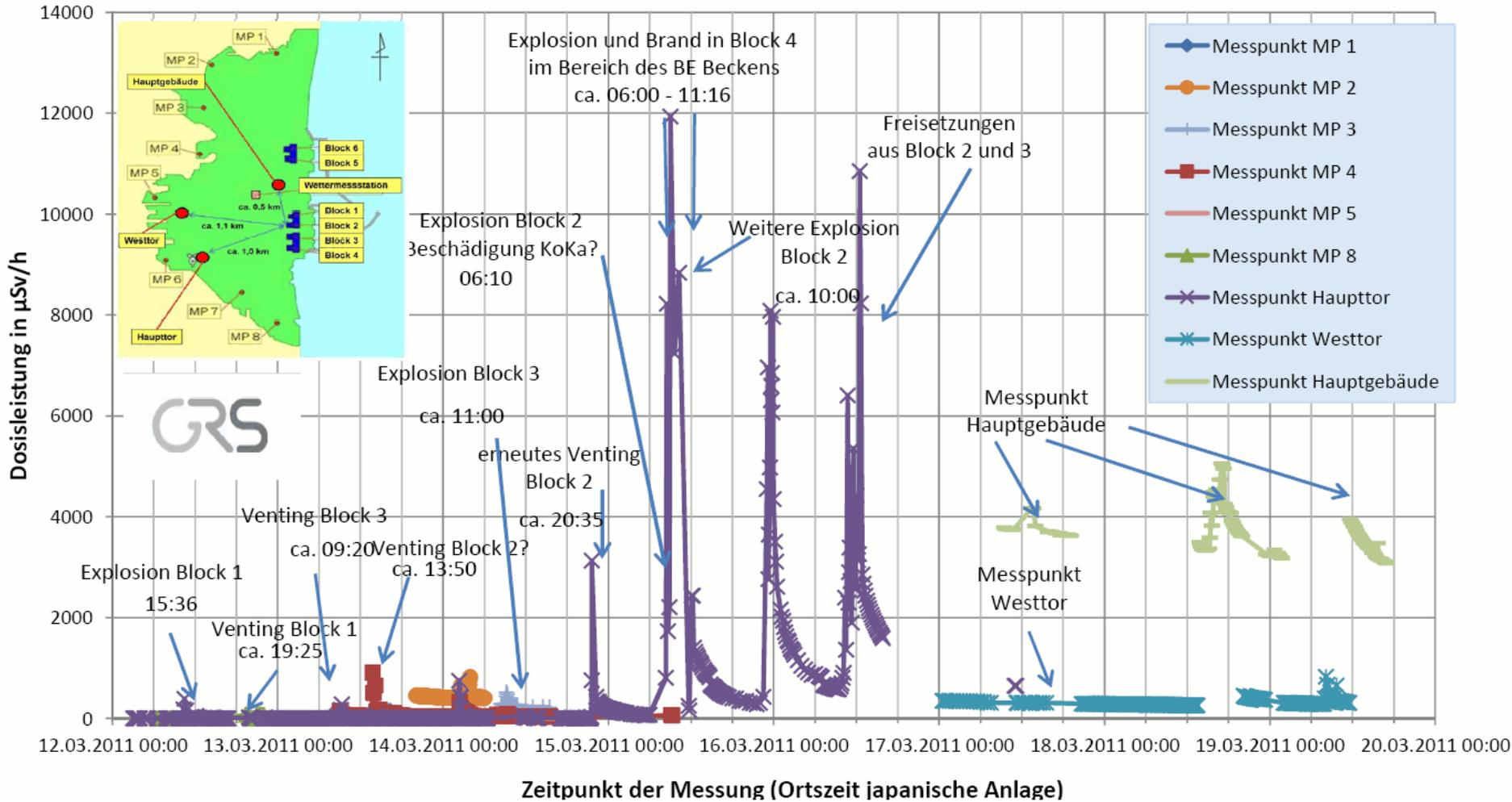
- ◆ Avant l'explosion dans l'unité 1
 - Moins de 2mSv / h
 - Essentiellement dû à l'émission des gaz rares.

- ◆ Après l'explosion de l'unité 2 (dommage à l'enceinte de confinement)
 - Valeurs pic temporairement égales à 12mSv / h
 - Localement valeurs atteignant 400mSv /h
 - Actuellement, doses sur la site aux environs de 5mSv /h
 - Beaucoup plus à l'intérieur des locaux.

- ◆ Limitation du temps de travail des employés

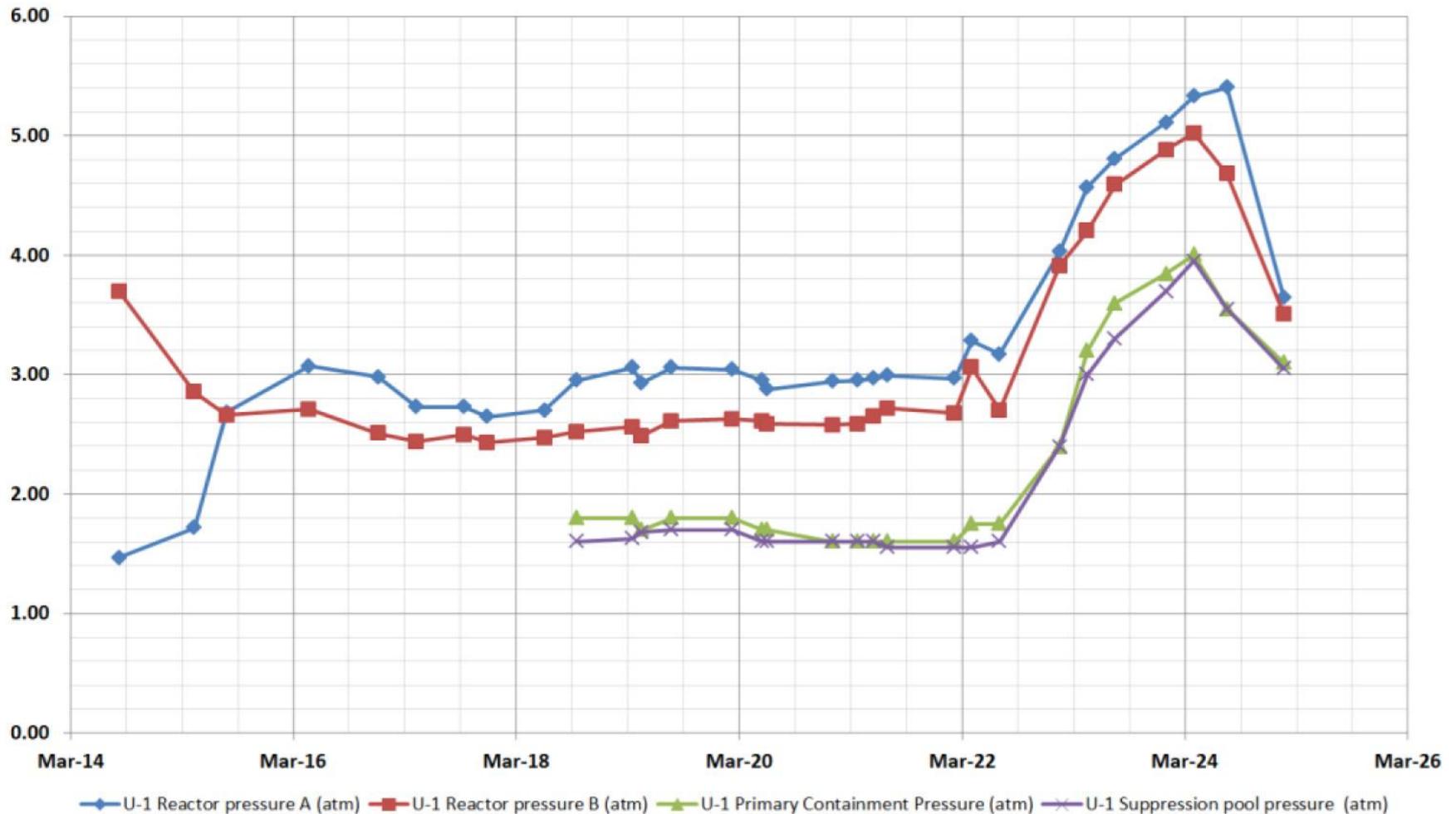
Fukushima Daiichi

4. Rejets Radioactifs



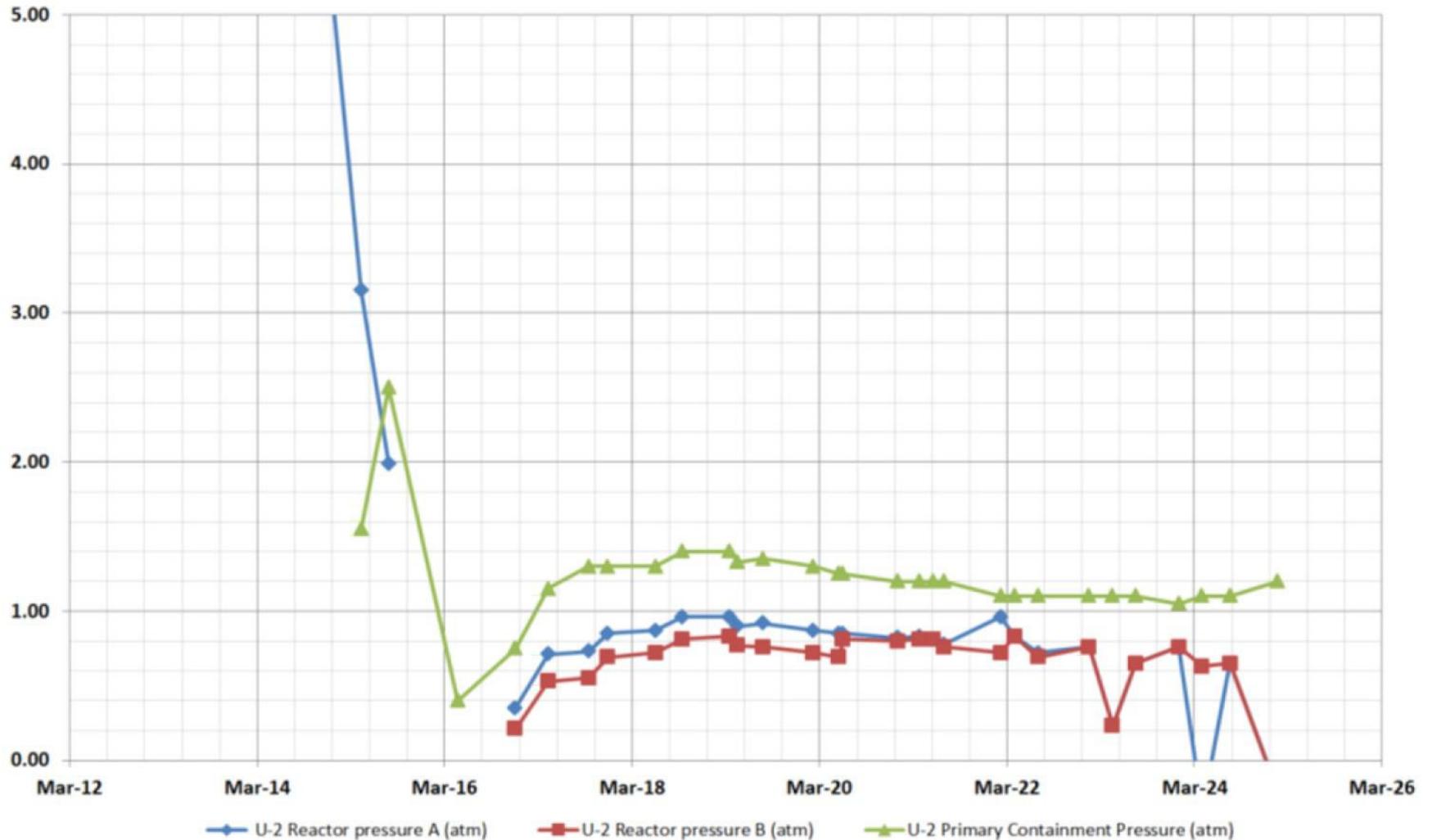
Pressions réacteur 1

Fukushima Daiichi Unit-1 Reactor Vessel, Containment Vessel & Suppression Pool Pressure



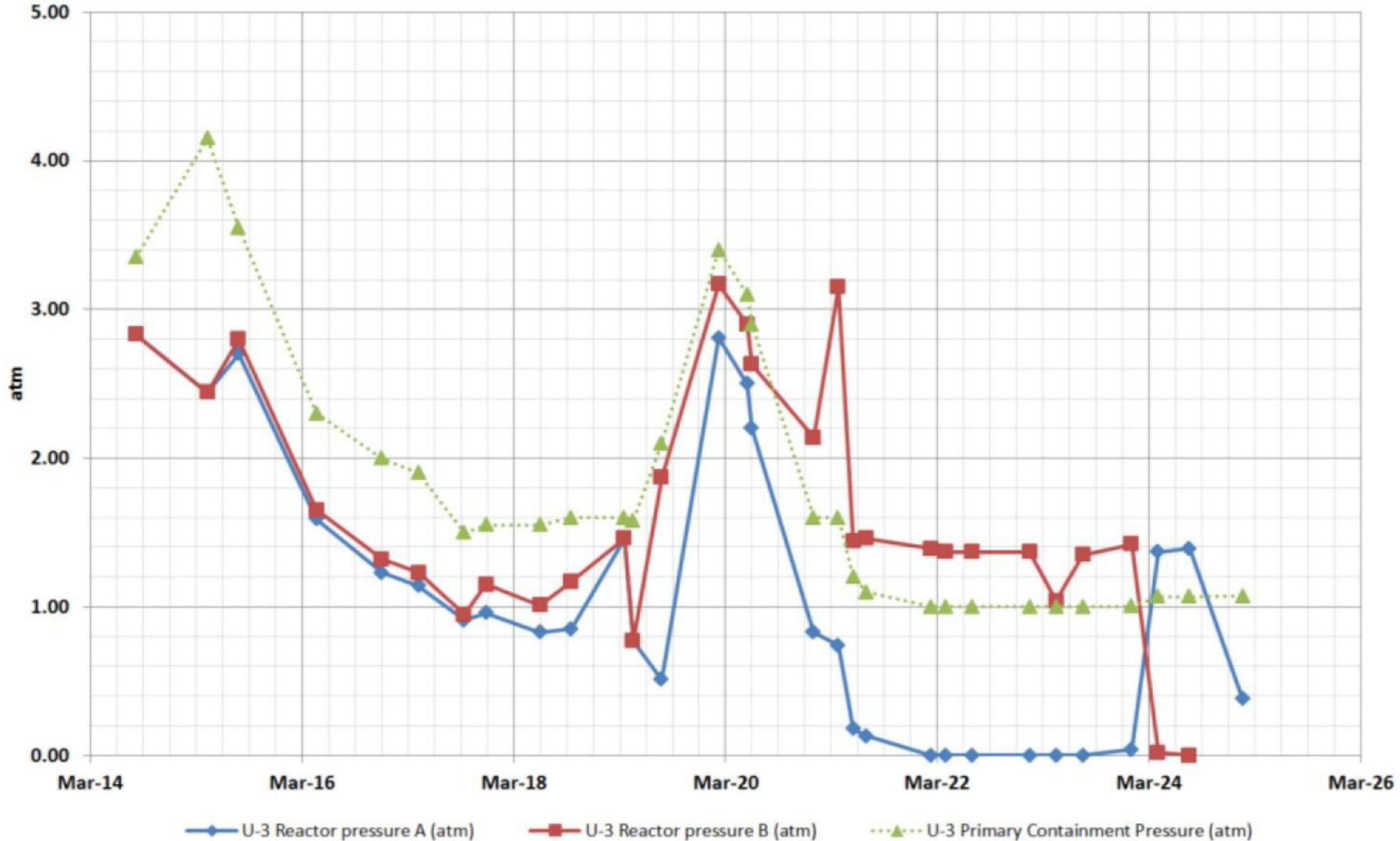
Pressions Réacteur 2

Fukushima Daiichi Unit-2 Reactor Vessel and Containment Vessel Pressure



Pressions Réacteur 3

Fukushima Daiichi Unit-3 Reactor & Containment Vessel Pressure



Fukushima Daiichi

3. Relâchements radioactifs

▶ Hors du site

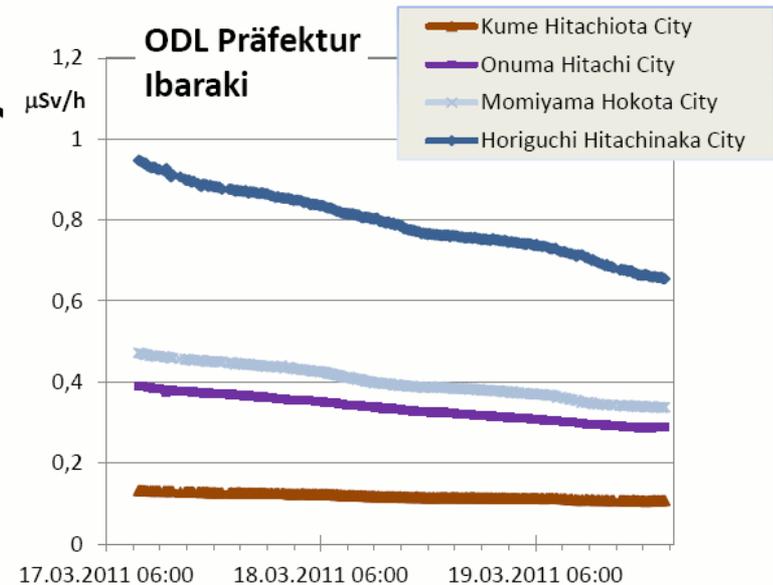
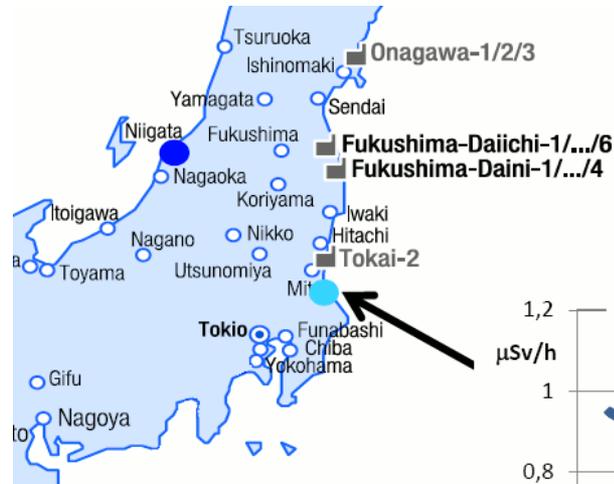
- ◆ Comme les bâtiments réacteurs sont essentiellement intacts
=> relâchement réduit d'aérosols (pas comme Tchernobyl)
- ◆ relâchement PF dans la vapeur
=> augmentation rapide des aérosols dont une grande fraction se dépose à proximité du site
- ◆ La principale contribution à la dose de radioactivité hors du site est celle des gaz nobles.
- ◆ Entraînée et diffusée par le vent, dose décroissante avec le temps
- ◆ Pas de dépôt des gaz rares, et, donc, pas de forte contamination du sol localement

▶ ~20km autour de la centrale

- ◆ Les évacuations ont été justifiées
- ◆ La dose reçue atteint 0.3mSv/h pendant une faible durée
- ◆ Possibilité de destruction des récoltes et produits laitiers cette année.
- ◆ Il ne sera probablement pas nécessaire d'évacuer de territoire à terme.

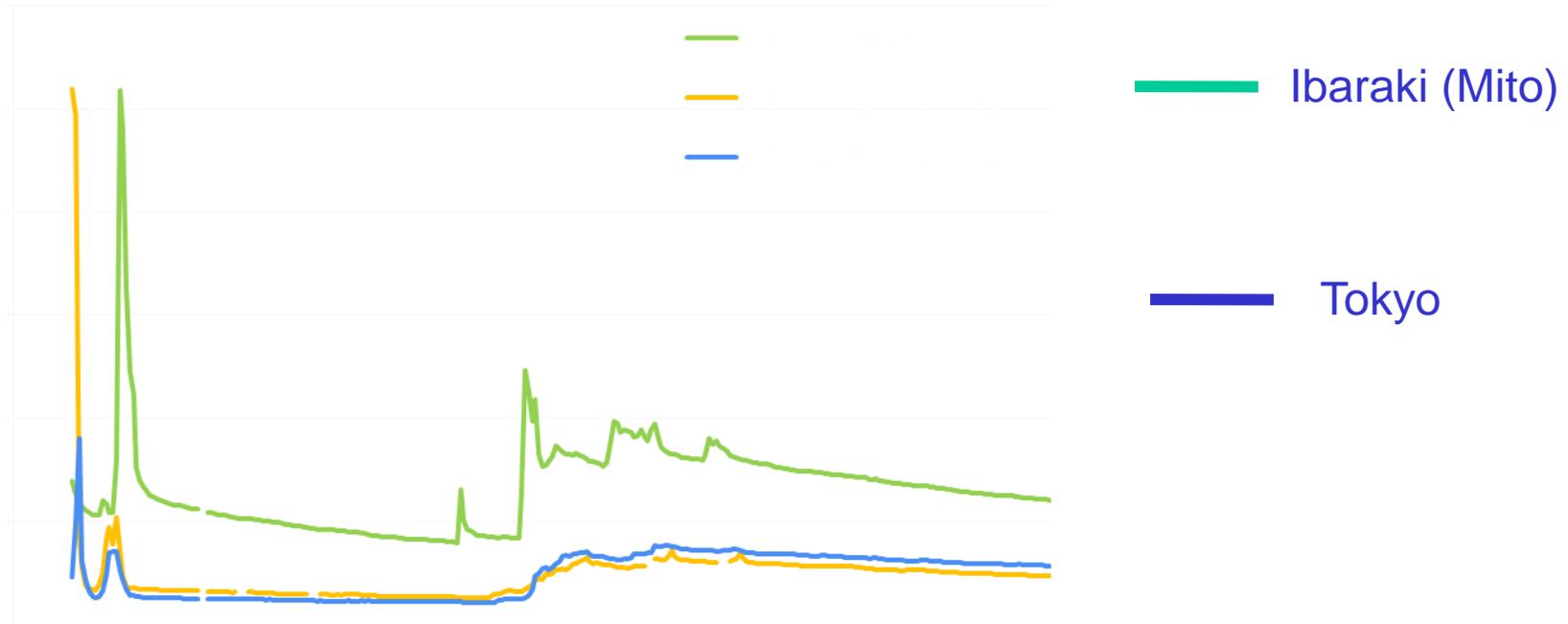
Fukushima Daiichi

3. Relâchements Radioactifs



- ▶ ~50km autour de la centrale
 - ◆ Contrôle des produits agricoles
 - ◆ Utilisation de pilules d'iode (Attention, les pilules peuvent interférer avec des traitements cardiaques)

Débit de doses Gamma en $\mu\text{Sv/h}$ 15-27 Mars



Dose naturelle: $0,1 \mu\text{Sv/h}$

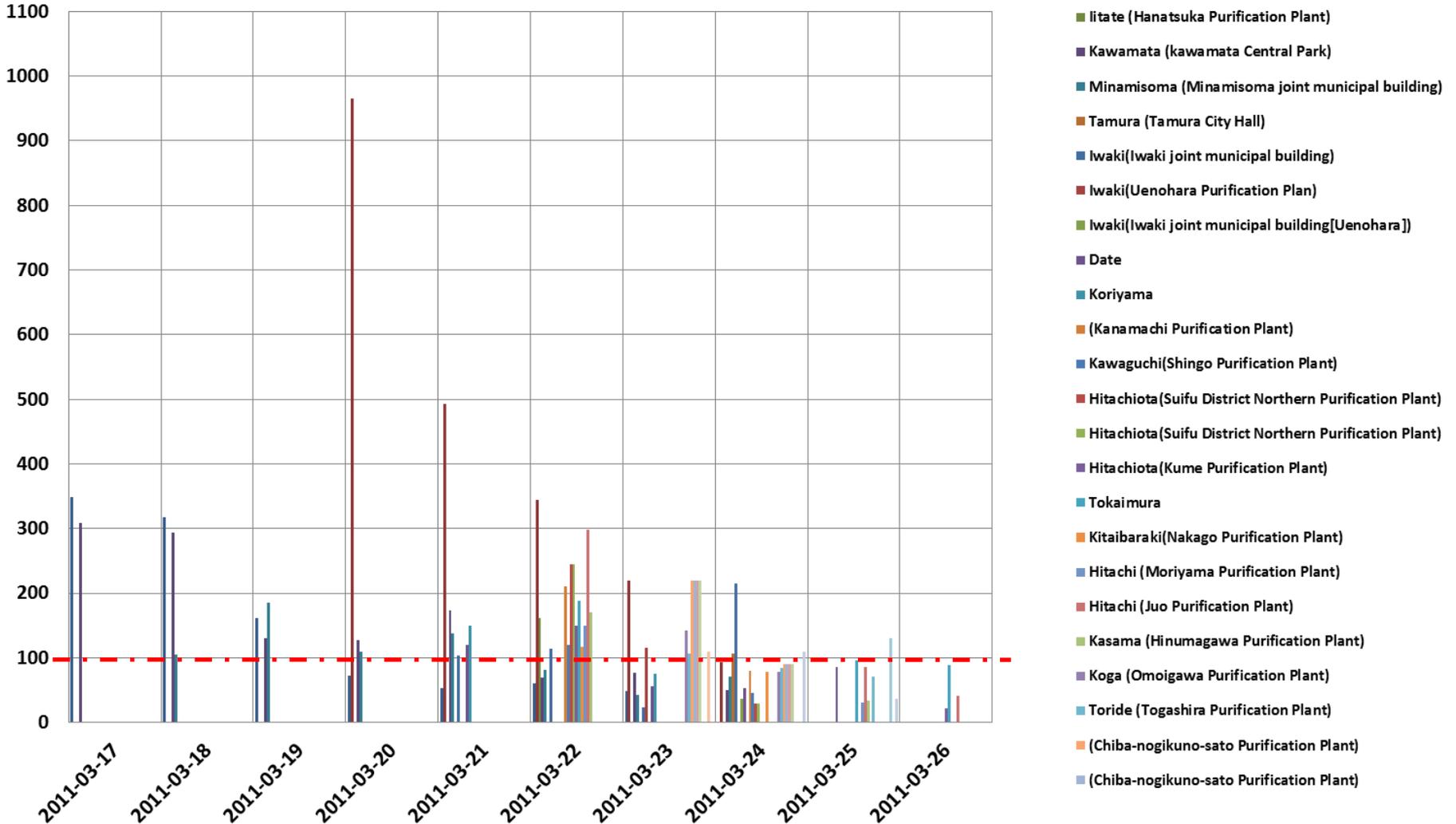
Iode-eau

limite- autorisée au Japon:



Adulte: 300 Bq/l; Enfants/100 Bq/l

I-131 concentration (Bq/L) in drinking water
(source : Prime Minister report)



Doses et activité

Irradiation interne Césium

$D(\text{msieverts/an})=0.04A(\text{kilobecquerels}).$

Dose en fonction de l'activité surfacique

$D(\text{millisieverts/an})=0.03A(\text{kilobecquerels/m}^2)$

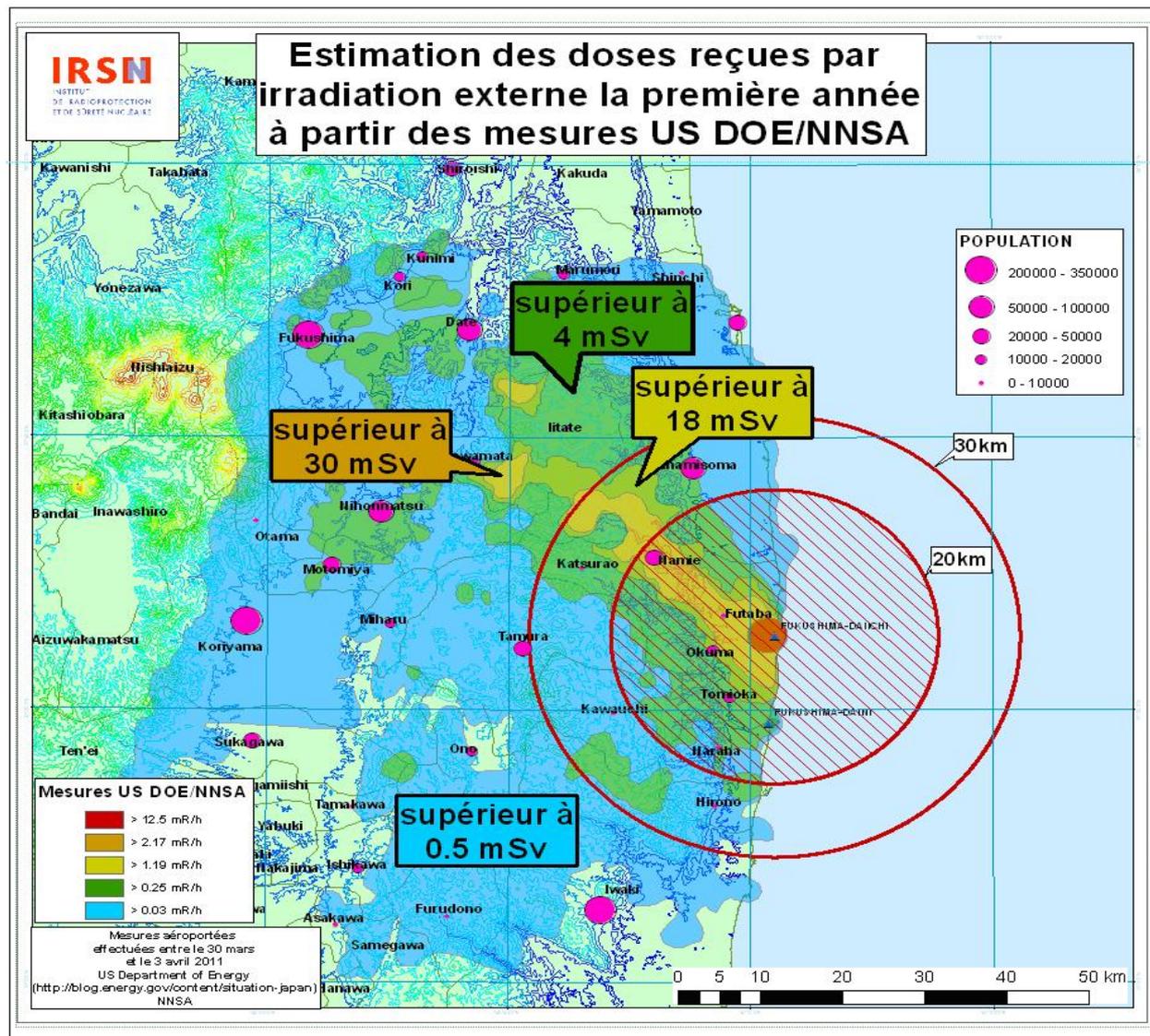
Retombées

Retombées total
5 10¹⁴ Bq Césiums

Dose mSv/an	Perte vie mois
5	0,17(0)
18	0,58(0)
30	1,03(0)

Dose mSv/an	Activité kBq/m ²
5	170
18	600
30	1000

Perte de vie « fossiles »
En France: 8 mois
44000 morts



Rejets Tchernobyl

Dose mSv/ an	Activi té kBq/ m ²
2	70
12	400
45	1500
90	3000

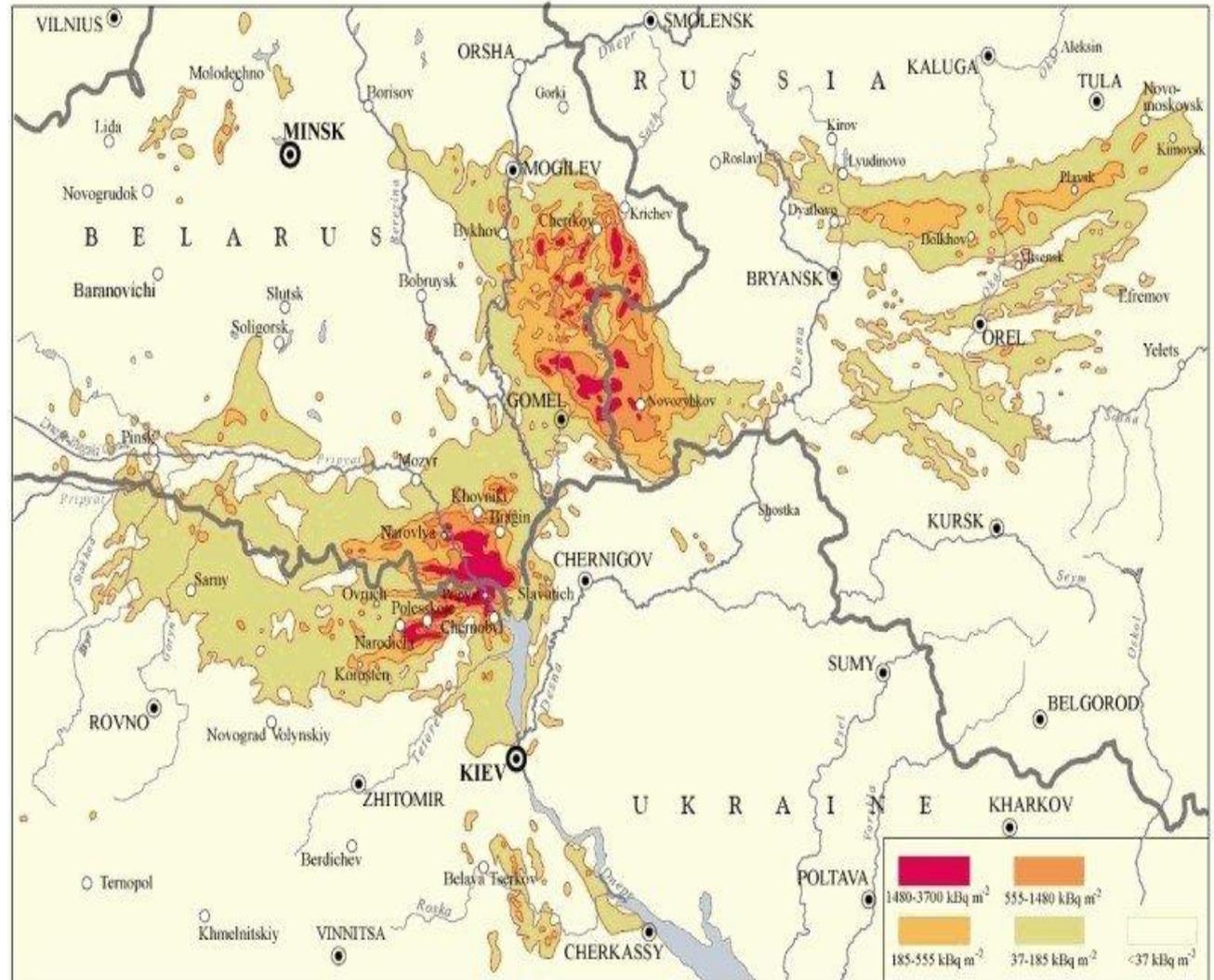


Figure VI. Surface ground deposition of caesium-137 released in the Chernobyl accident [1, 13].

Comparaisons

Nature	Fukushima	Fukushima (« bande »)	Tchernobyl	Tchernobyl (« taches »)
Gaz rares	$2 \cdot 10^{18}$		$6,5 \cdot 10^{18}$	
Iodes	$2 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{15}$	$4,25 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{18}$
Césiums	$3 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{14}$	$1,40 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{16}$
Tellures	$9 \cdot 10^{16}$	$15 \cdot 10^{14}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	$7 \cdot 10^{16}$

Comparaisons

Nature	Fukushima	Fukushima (« bande »)	Tchernobyl	Tchernobyl (« taches »)
Gaz rares	$2 \cdot 10^{18}$		$6,5 \cdot 10^{18}$	
Iodes	$2 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{15}$	$4,25 \cdot 10^{18}$	$1,8 \cdot 10^{18}$
Césiums	$3 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{14}$	$1,40 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{16}$
Tellures	$9 \cdot 10^{16}$	$15 \cdot 10^{14}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	$7 \cdot 10^{16}$