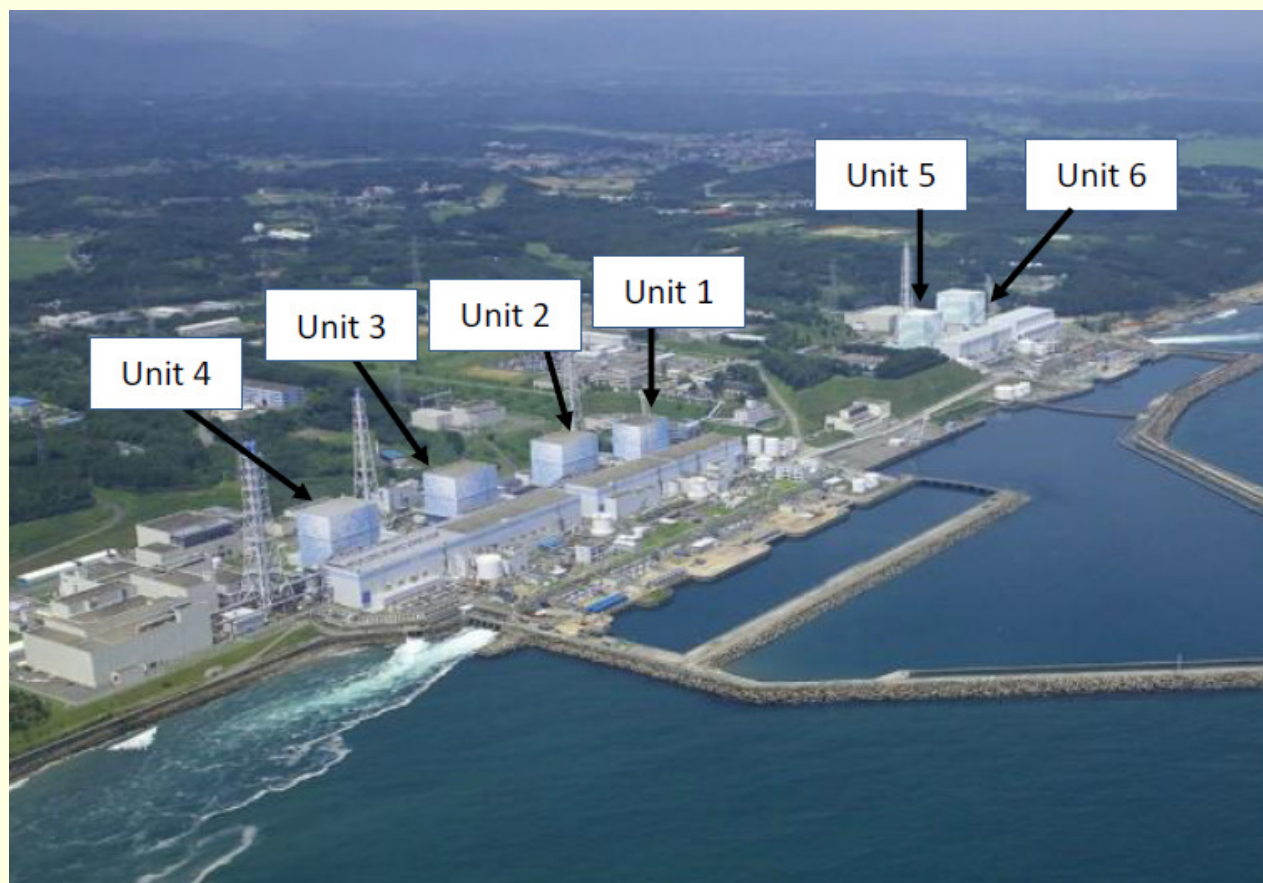


L'accident du 11 mars 2011 à la centrale de Fukushima



La SFEN : C'est quoi?

- **« Société Française d'Energie Nucléaire »**
- **Association 1901, réunissant des personnes physiques de tous horizons, intéressées par les questions liées à l'énergie, et notamment l'énergie nucléaire.**
- **Objet : Diffusion et échanges d'informations vers tous les publics, en veillant:**
 - **À la rigueur scientifique, l'objectivité et la transparence,**
 - **À l'ouverture au dialogue et au débat,**
 - **À la mise en commun des informations au sein de la communauté scientifique**
 - **Au partage des savoirs avec la société civile.**
- **Finalité de l'action :**
 - **la préservation des ressources naturelles,**
 - **le respect de l'environnement naturel et de la santé**

Le Parc de réacteurs nucléaires au Japon

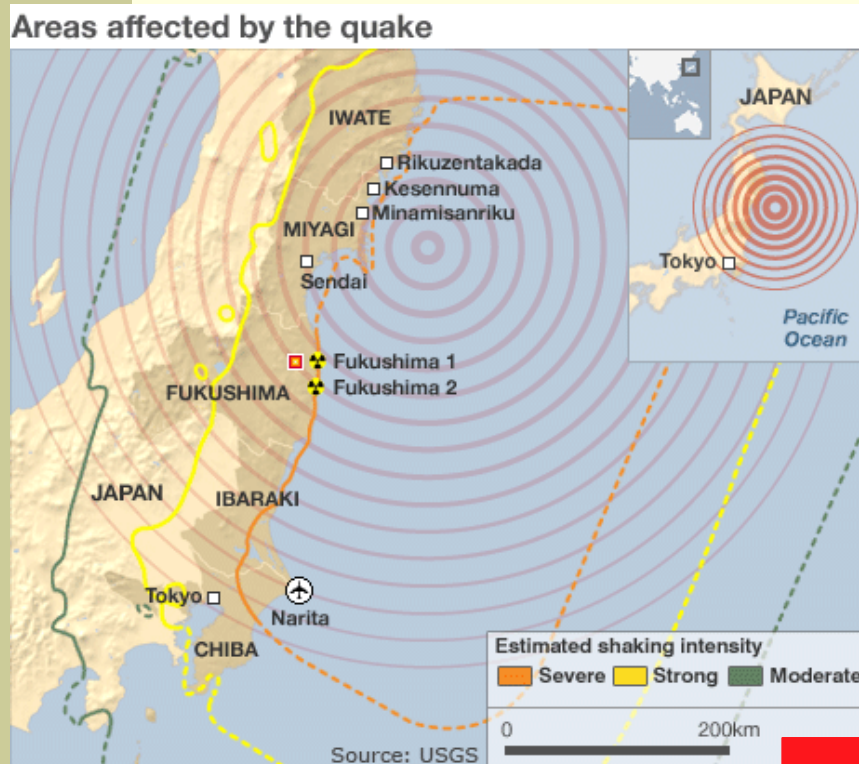
- 17 centrales
- 55 réacteurs
 - 34 REB
 - 21 REP

fournissant ~ 26% de l'électricité



Des séismes violents

11 mars 2011 à 14h46 : **séisme magnitude 9,0 / profondeur 24,4 km**

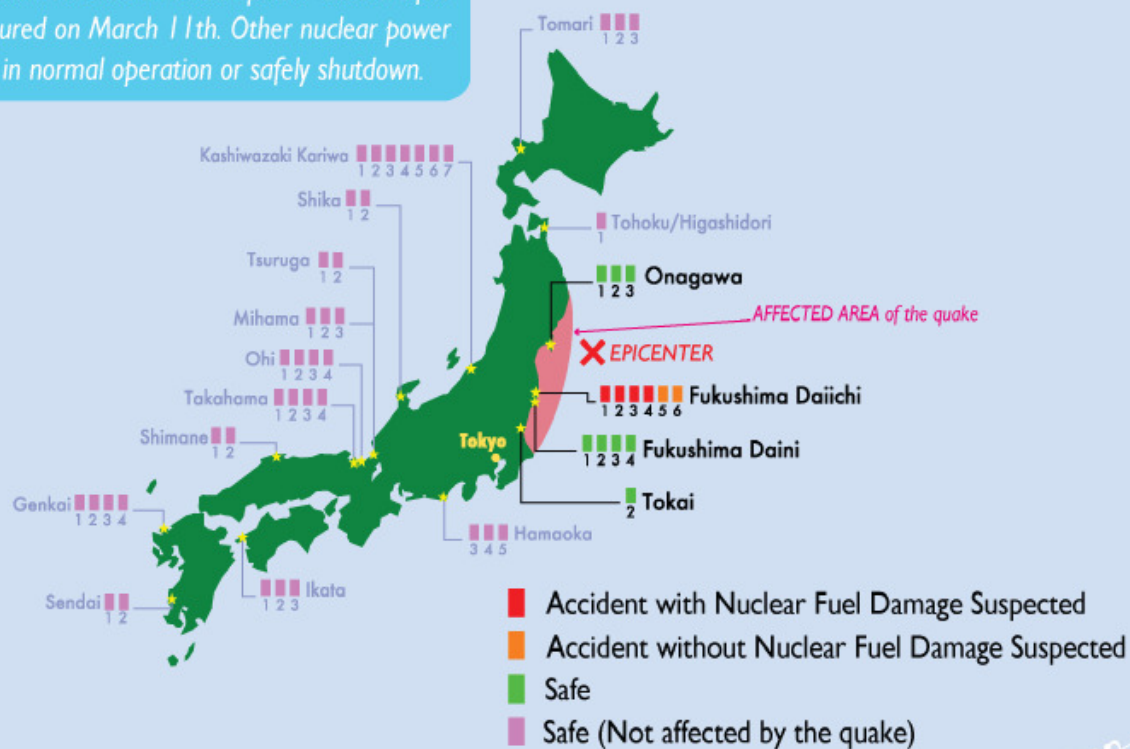


Pays	Ville / Zone	Magnitude	Date
Chili	Valdivia	9,5	22 mai 1960
Sumatra	Andaman	9,3	26 décembre 2004
États-Unis	Alaska	9,2	27 mars 1964
Alaska	Andreanof	9,1	9 mars 1957
Russie	Kamtchatka	9,0	4 novembre 1952
Japon	130 km au large de Sendai	9,0	11 mars 2011

Etat des tranches nucléaires japonaises après le séisme du 11 mars

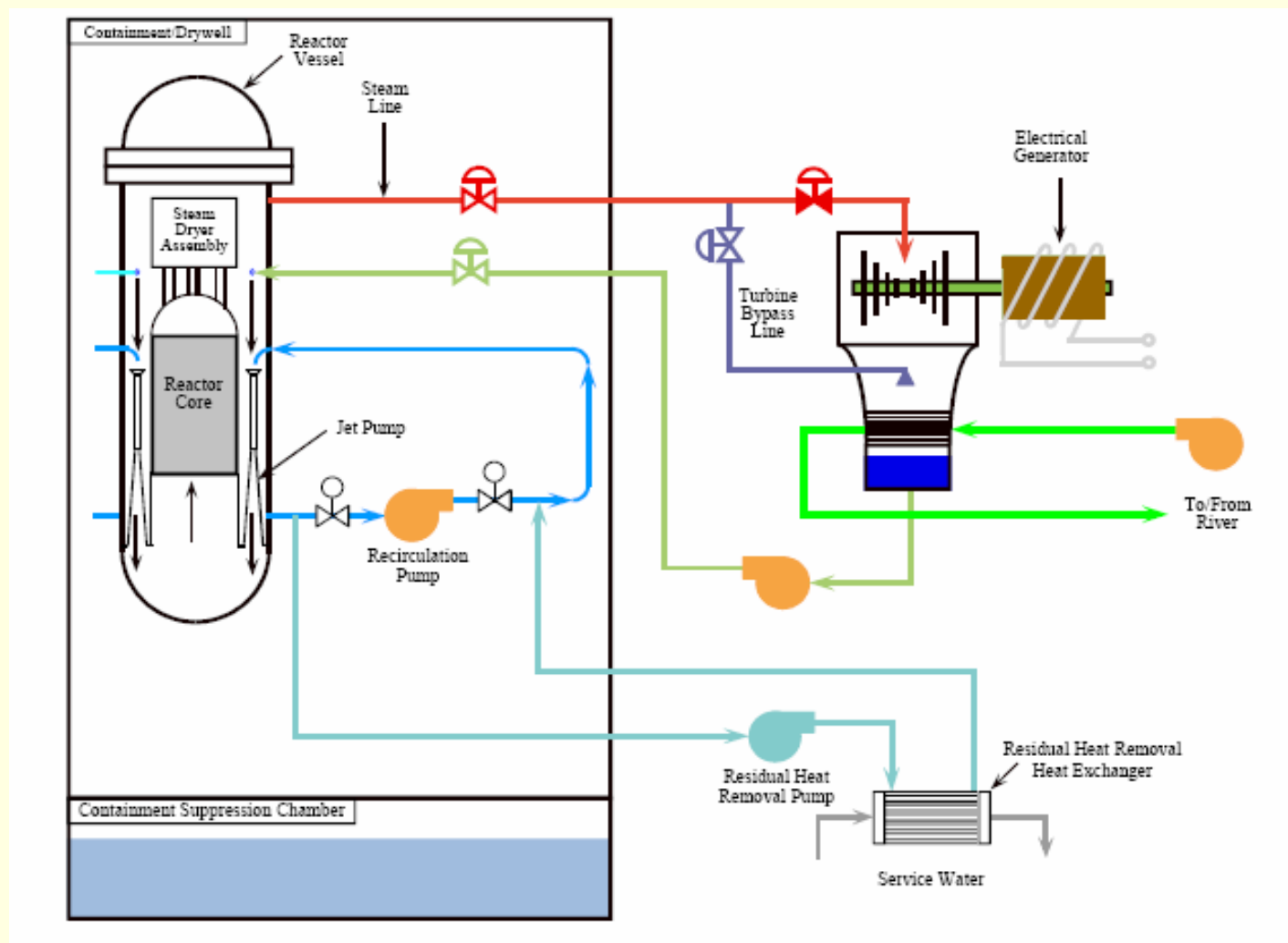
Status of the Nuclear Power Plants after the Earthquake

The accident that brings environmental impact is going on at several units in Fukushima Daiichi nuclear power Station after the earthquake occurred on March 11th. Other nuclear power plants in Japan are in normal operation or safely shutdown.



Présentation générale des BWR

Schéma de principe



L'accident de Fukushima Daiichi

Conception de l'installation

► Plancher de service du réacteur
(construction en acier)

► Bâtiment réacteur en béton
(confinement secondaire)

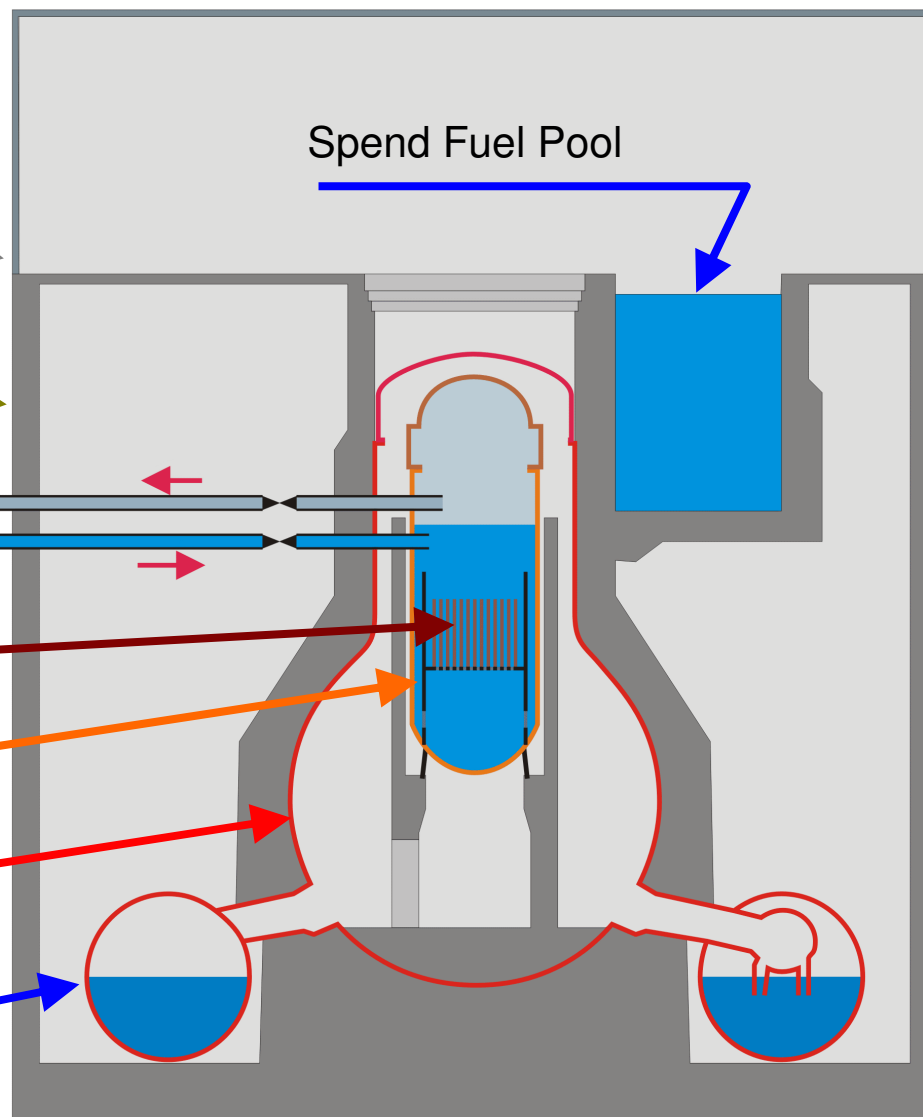
Ligne vapeur vive
 Eau alimentaire

► Coeur du réacteur

► Cuve du réacteur

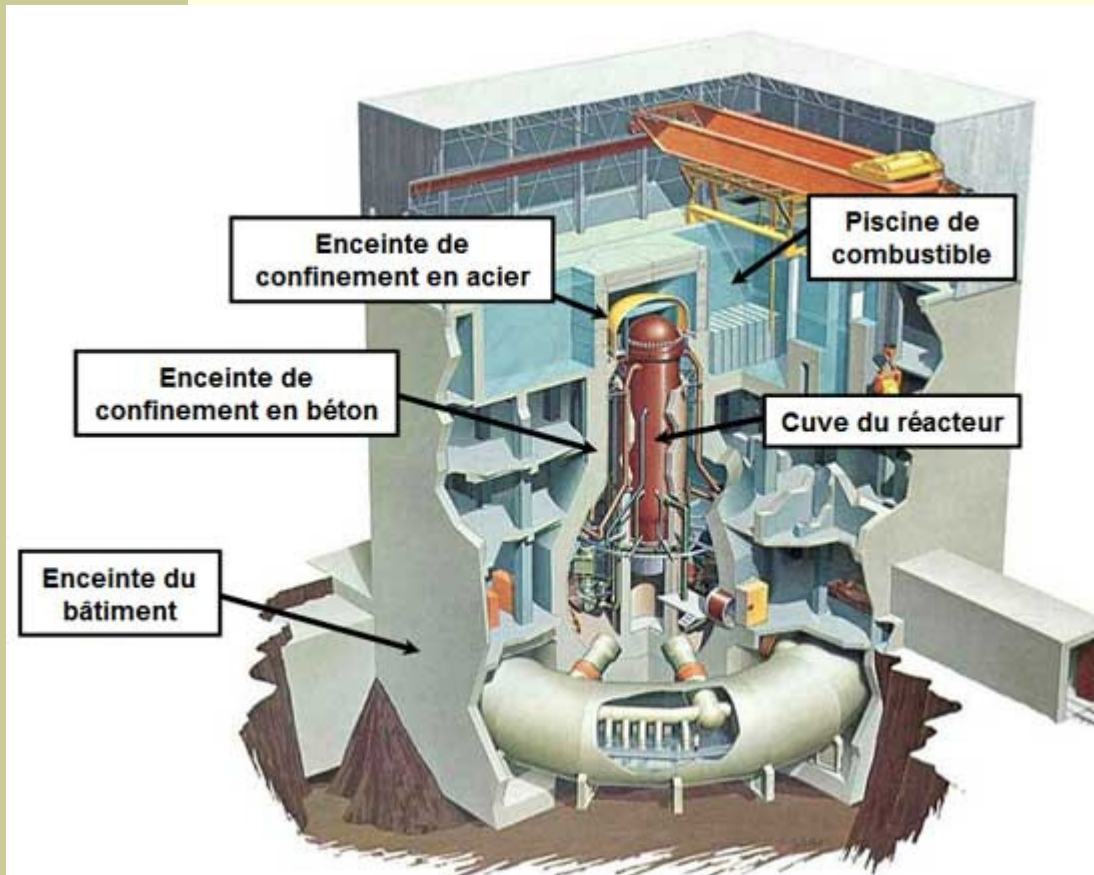
► Enceinte (Puits sec)

► Enceinte (Puits humide) / Chambre
de Condensation



Présentation générale des REB

Le confinement



L'accident de Fukushima Daiichi

Conception de l'installation

► Plancher de service



L'accident de Fukushima Daiichi

Conception de l'installation

► Manutention de la coupole de fermeture de l'enceinte de confinement



L'accident de Fukushima Daiichi

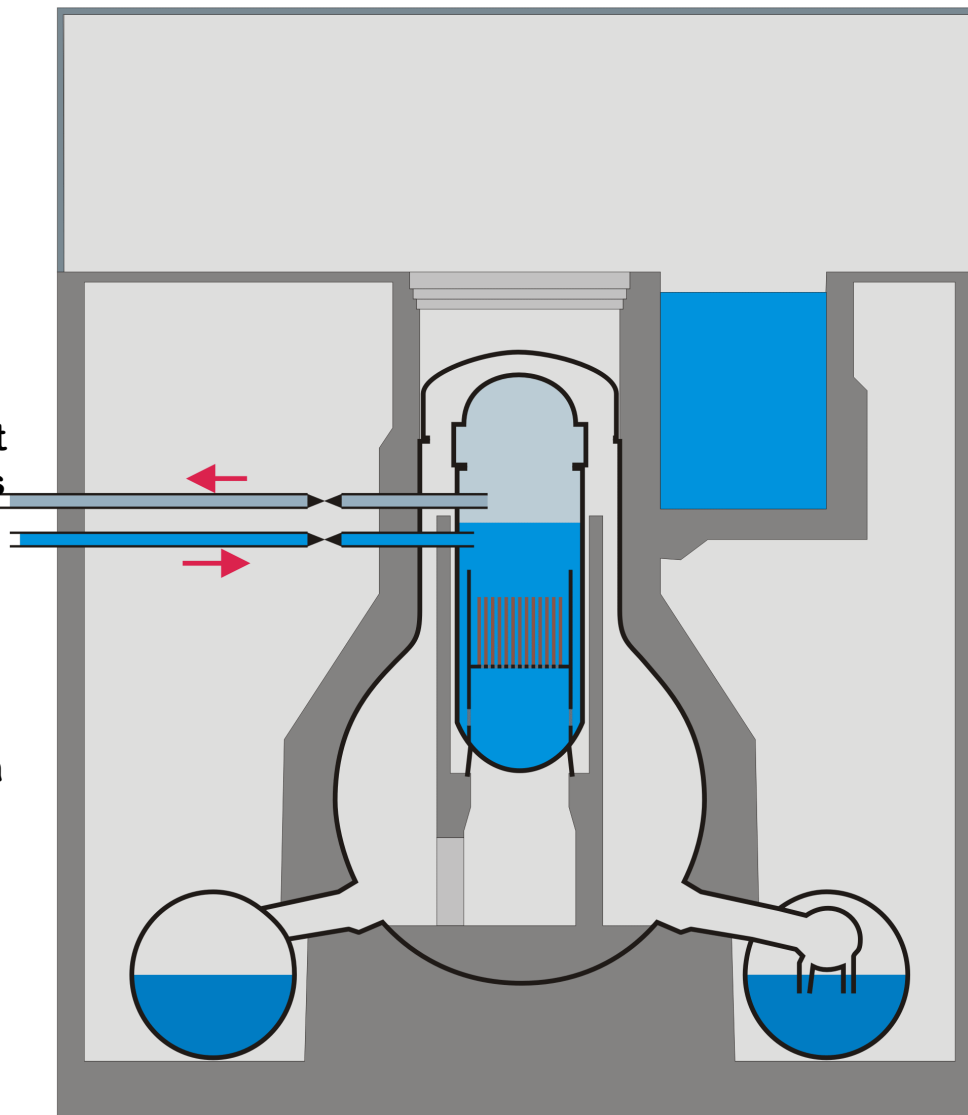
Progression de l'accident

► 11.3.2011 14:46 - Séisme

- ◆ Magnitude 9
- ◆ Ecrroulement du réseau électrique HT du nord Japon
- ◆ Les réacteurs eux-mêmes sont globalement non endommagés

► Arrêt automatique réacteur

- ◆ La puissance issue de la fission de l'uranium cesse
- ◆ Production de chaleur due à la décroissance radioactive des produits de fission



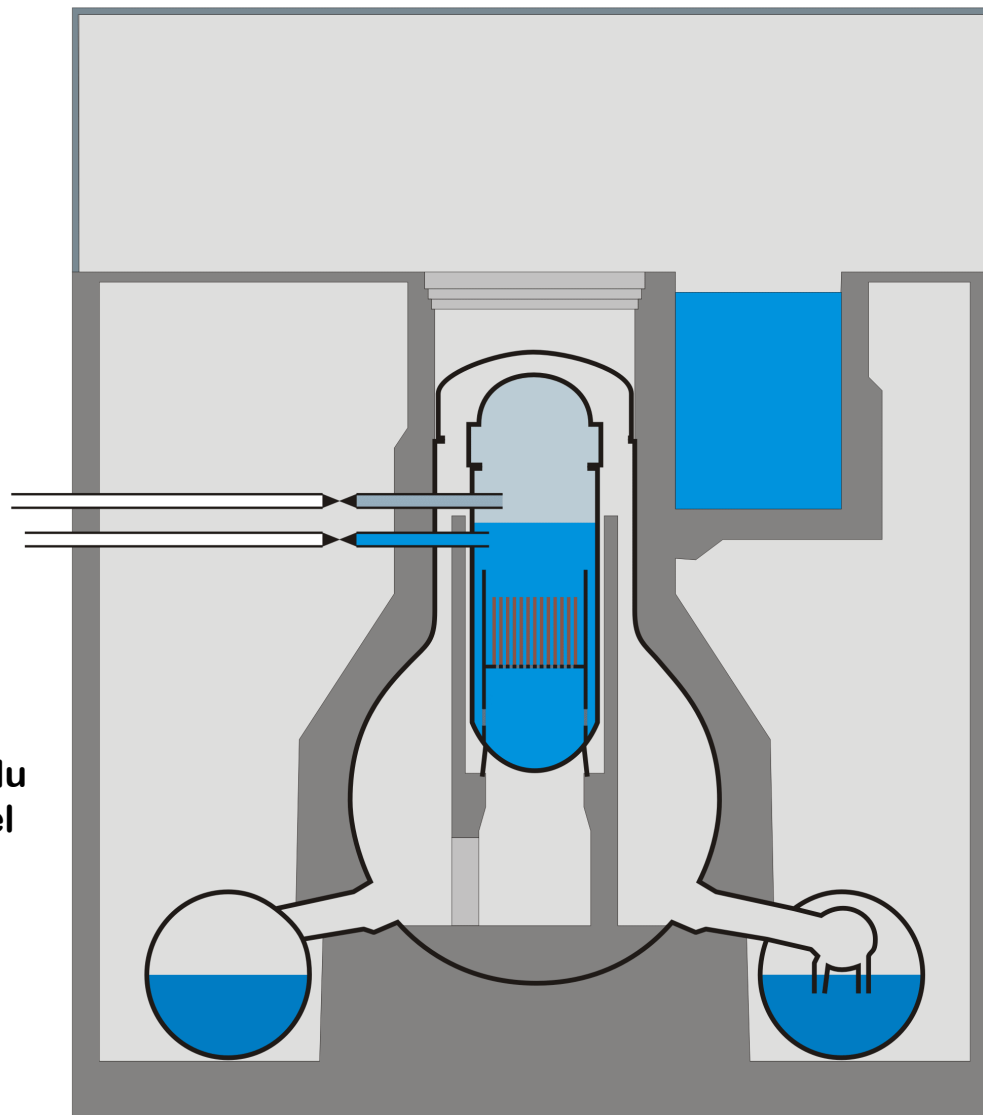
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- **Isolement de l'enceinte de confinement**
 - ◆ Fermeture de toutes les traversées enceinte non importantes pour la sûreté
 - ◆ Isolation du hall Turbo-alternateur

La radioactivité ne peut s'échapper de l'enceinte

 - ◆ Démarrage des groupes diesels
 - ◆ Système de refroidissement du réacteur à l'arrêt opérationnel
 - ◆ Les systèmes d'injection de sécurité sont alimentés
- **Le réacteur est dans un état stable et sûr**



55 minutes après le séisme... A 15h41, le tsunami frappe la centrale

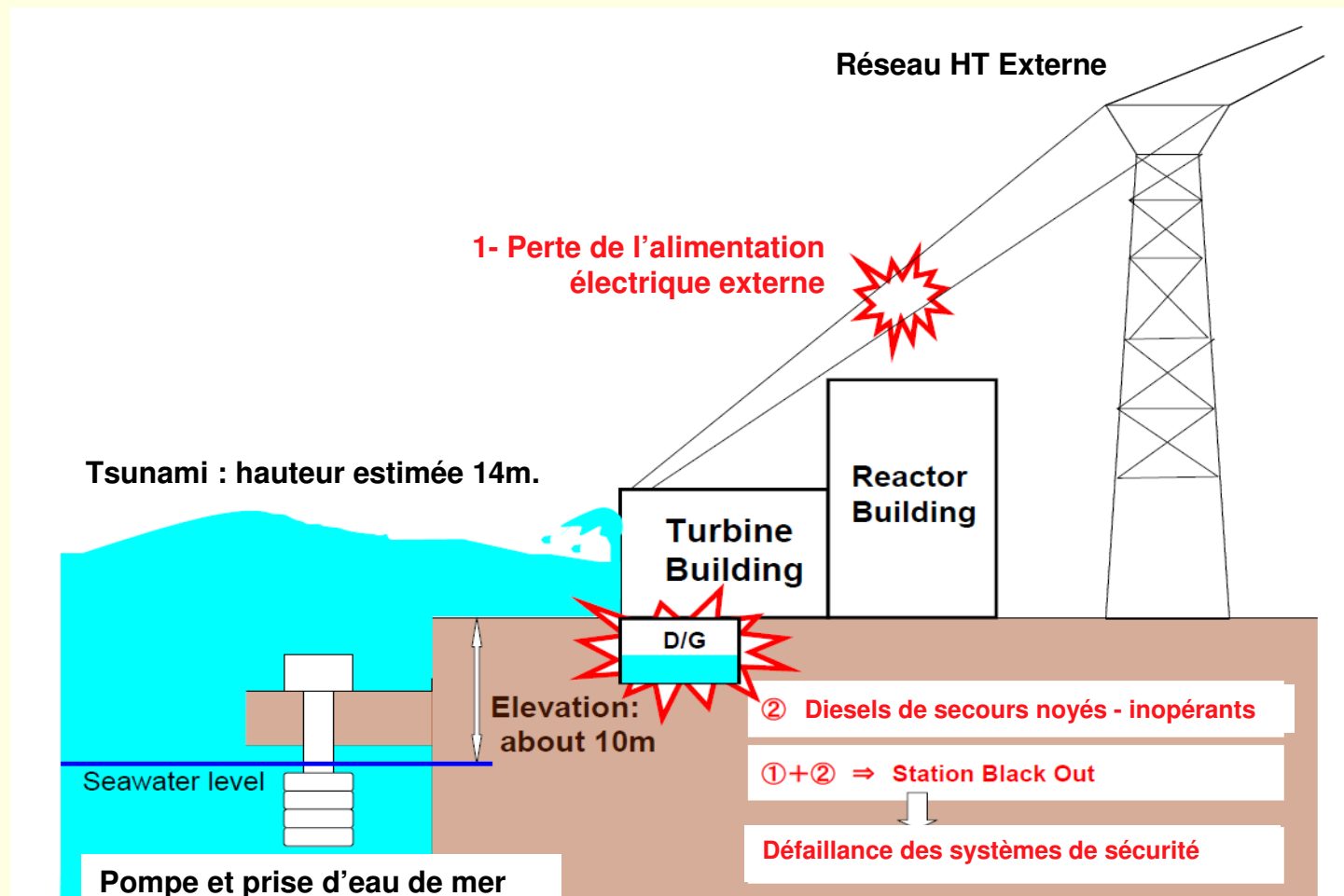


Toute une région dévastée

~30 000 morts ou disparus



Le Tsunami – 11 mars 2011 à 15h41



La zone inondée



A l'arrière des bâtiments Réacteurs

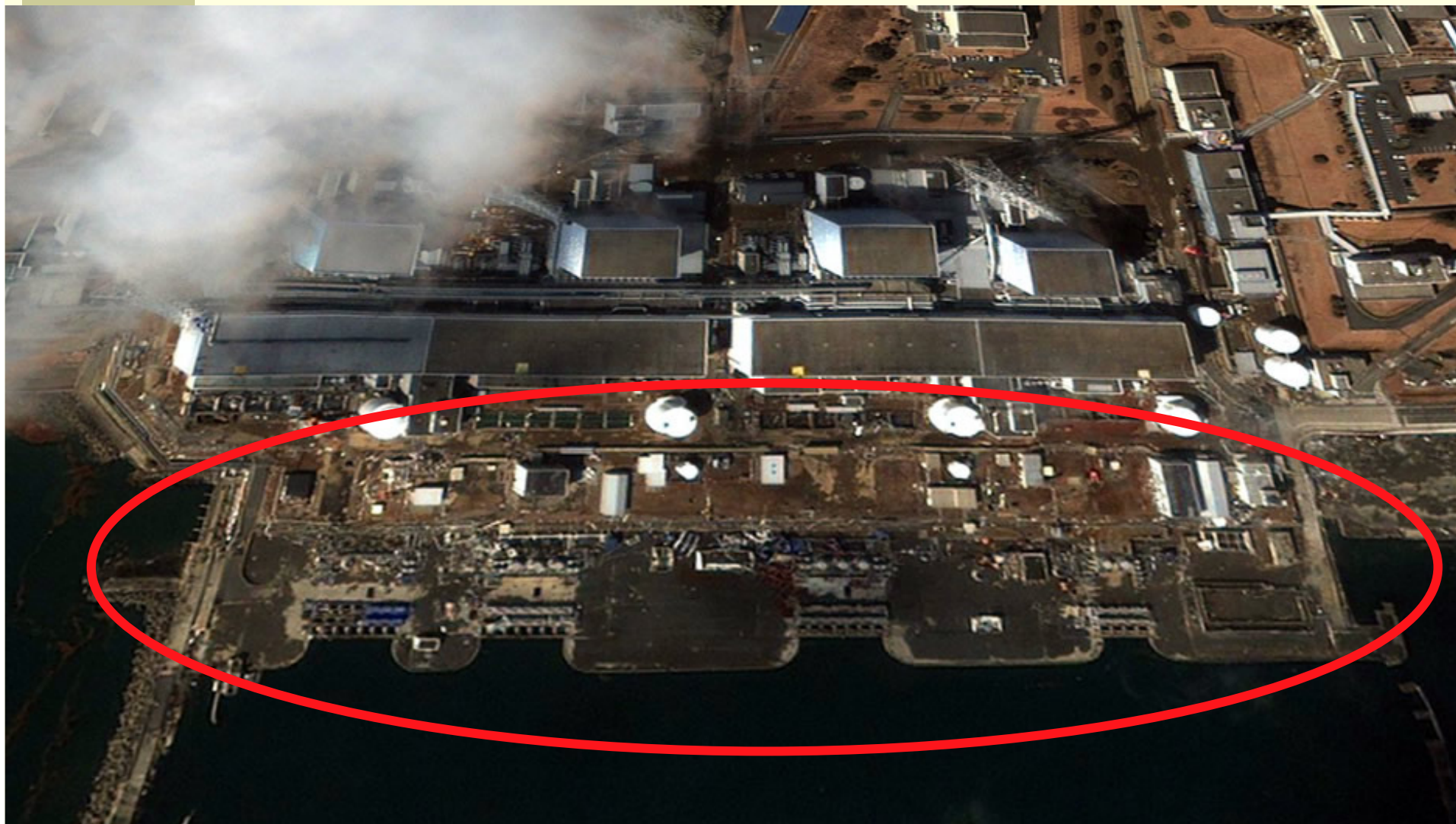


M.Simon- SFEN - Pour l'IHEDN, le 11 mai 2011

Impact du Tsunami sur le site **AVANT**



Impact du Tsunami sur le site **APRES**



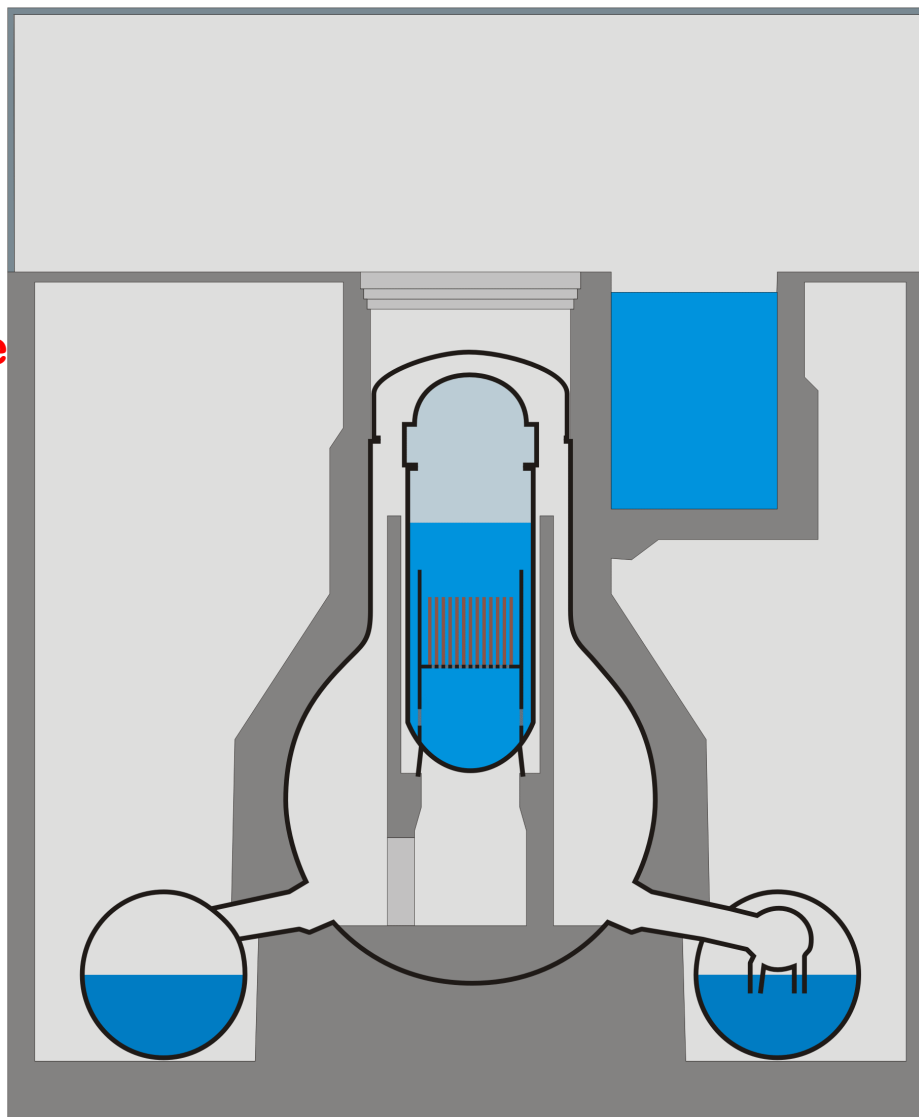
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

► 11 mars. 15:41

Le tsunami frappe la centrale

- ◆ Hauteur estimée du tsunami : 14m
- ◆ Inondation des groupes électrogènes (diesels de secours)
- ◆ Perte des réserves d'eau douce pour refroidissement des diesels

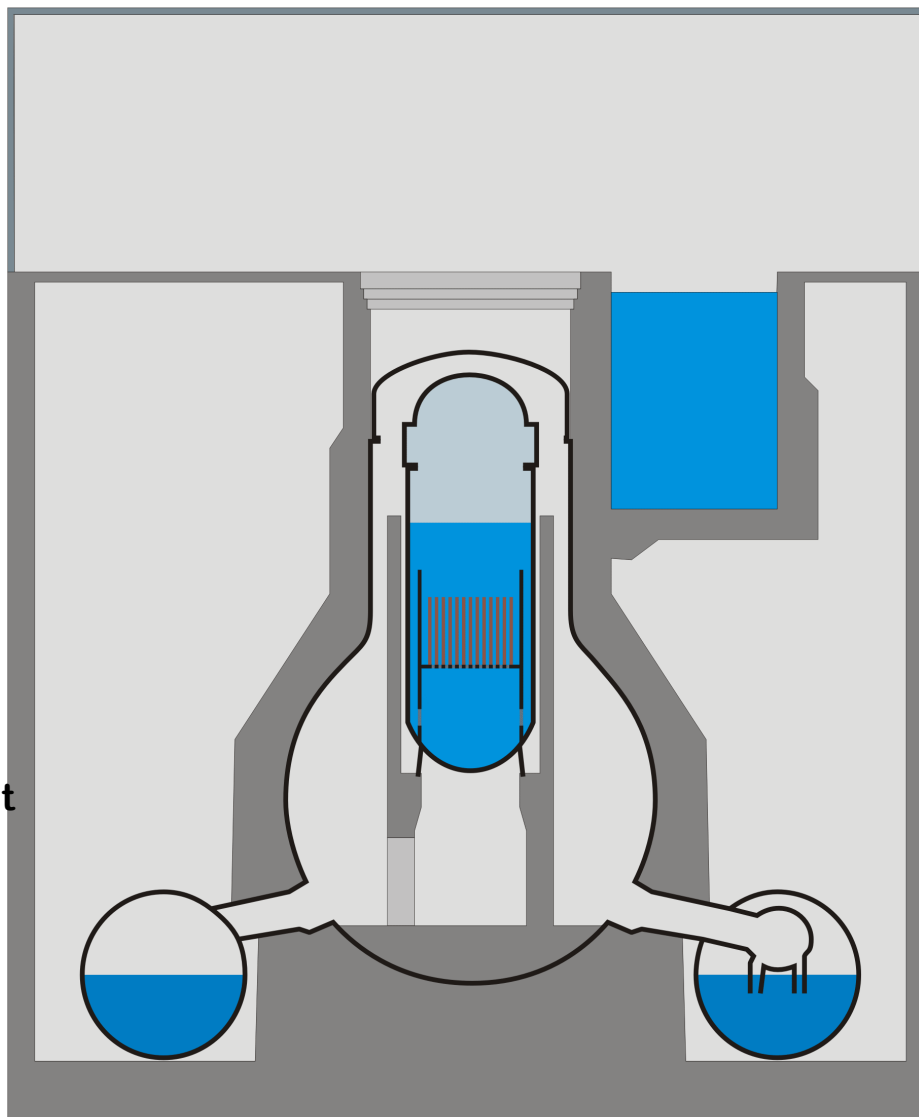


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

Conséquence:

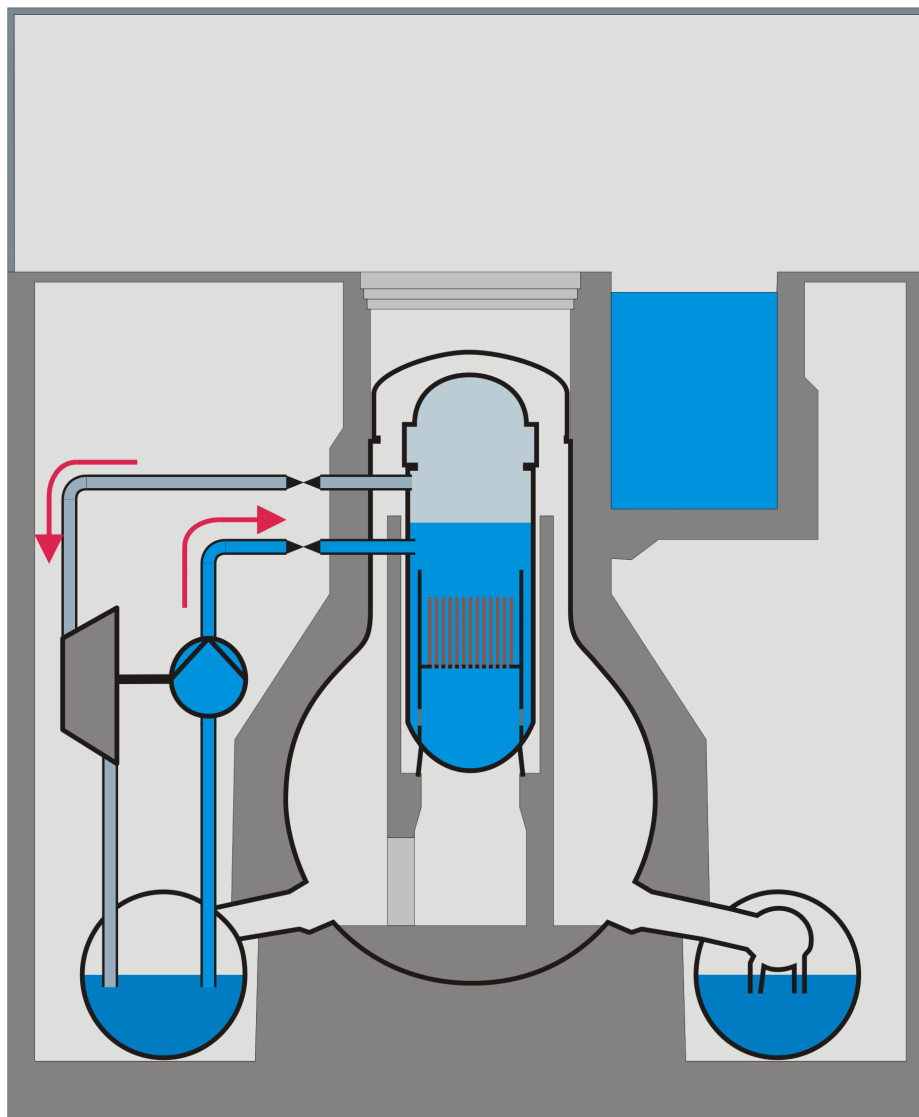
- Perte totale des alimentations électriques
 - ◆ Défaut de mode commun sur les sources électriques
 - ◆ Seules les batteries restent opérationnelles
 - ◆ Défaillance des systèmes d'injection de sécurité
 - ◆ Un système d'ultime secours peut continuer à fonctionner sur batteries.



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- La pompe de refroidissement en mode isolé reste disponible
 - ◆ La vapeur issue du réacteur entraîne une turbine
 - ◆ La vapeur est condensée dans le puits humide
 - ◆ La turbine entraîne une pompe
 - ◆ L'eau du puits humide est pompée vers le réacteur
 - ◆ Cela nécessite :
 - La disponibilité des batteries
 - L'eau doit rester liquide dans le tore (puits humide): température max ~100°C
- L'eau circule en circuit fermé : pas de risque de « panne sèche », mais pas d'extraction de chaleur

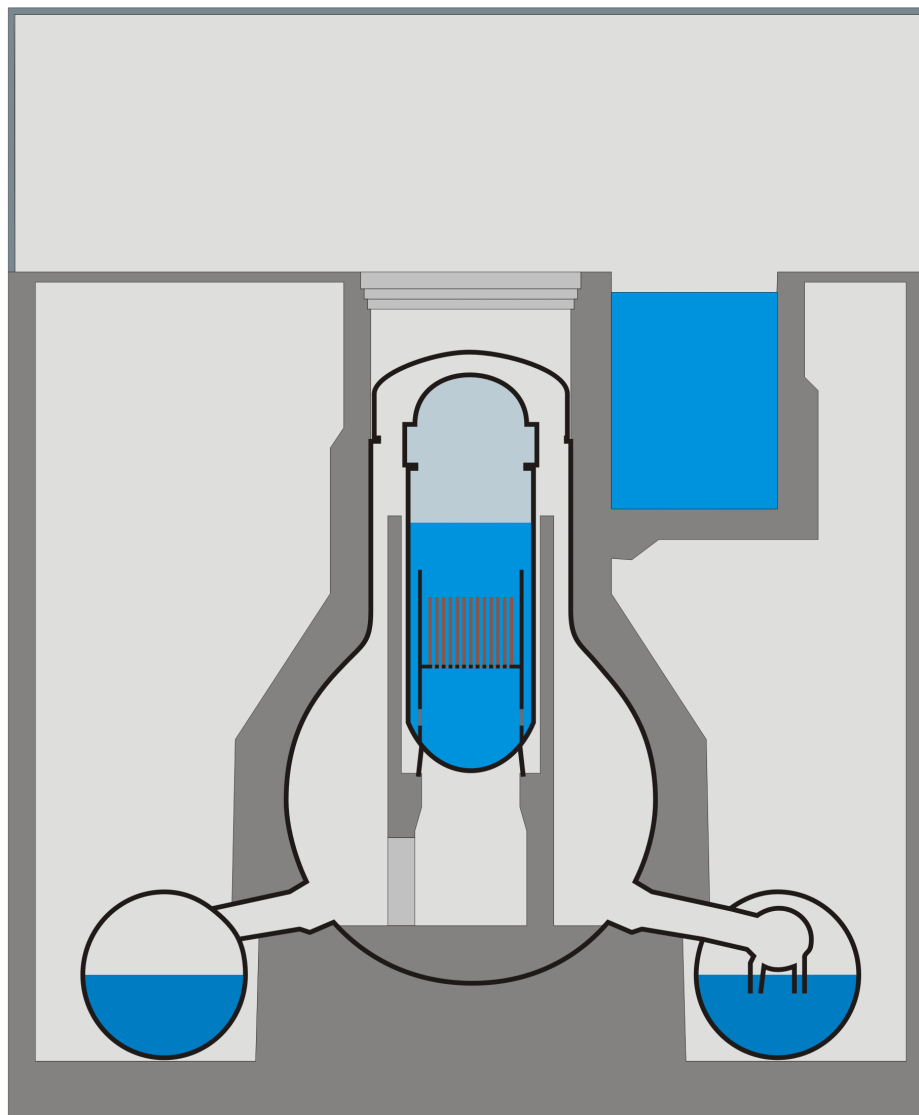


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ **La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête**
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)

- ▶ **La puissance résiduelle produit toujours de la chaleur dans la cuve**
 - ◆ La pression augmente



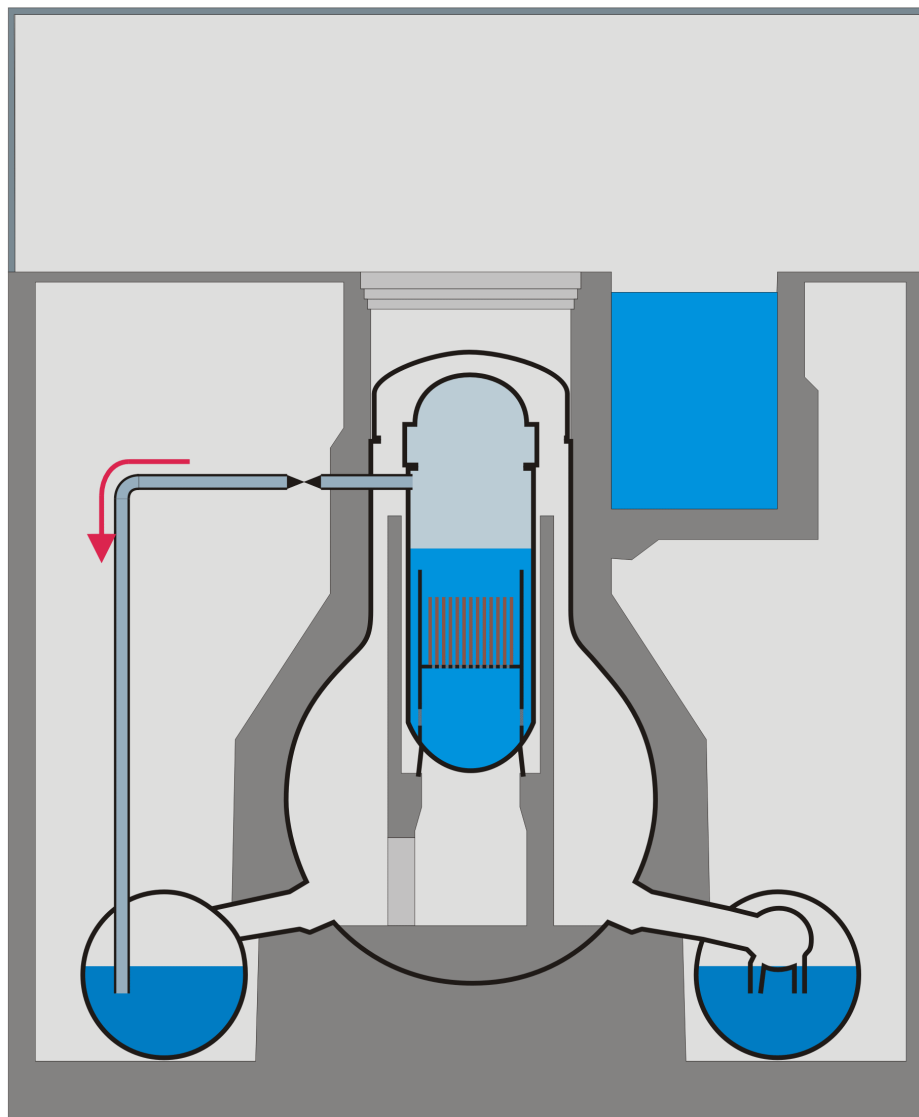
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)

- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
 - ◆ La pression augmente

- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
 - ◆ Décharge vers le puits humide



L'accident de Fukushima Daiichi

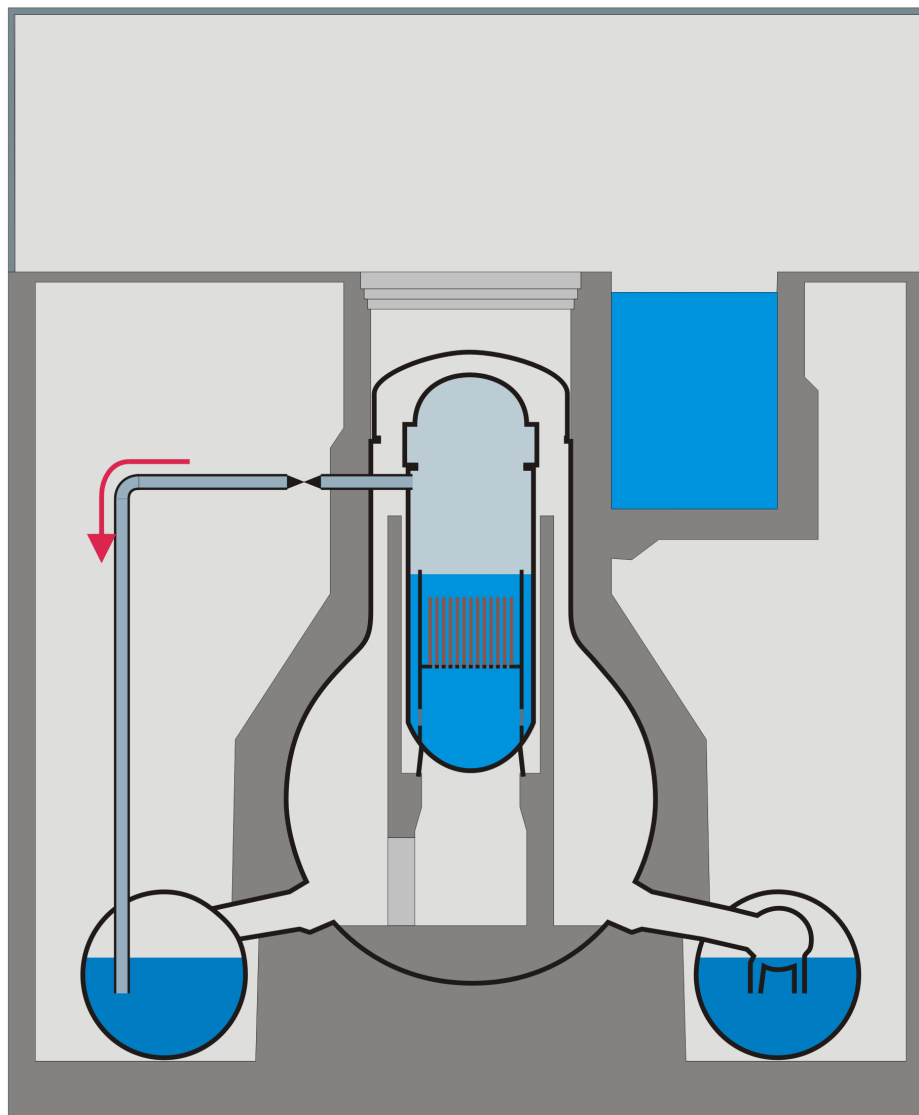
Progression de l'accident

- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)

- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
 - ◆ La pression augmente

- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
 - ◆ Décharge vers le puits humide

- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve



L'accident de Fukushima Daiichi

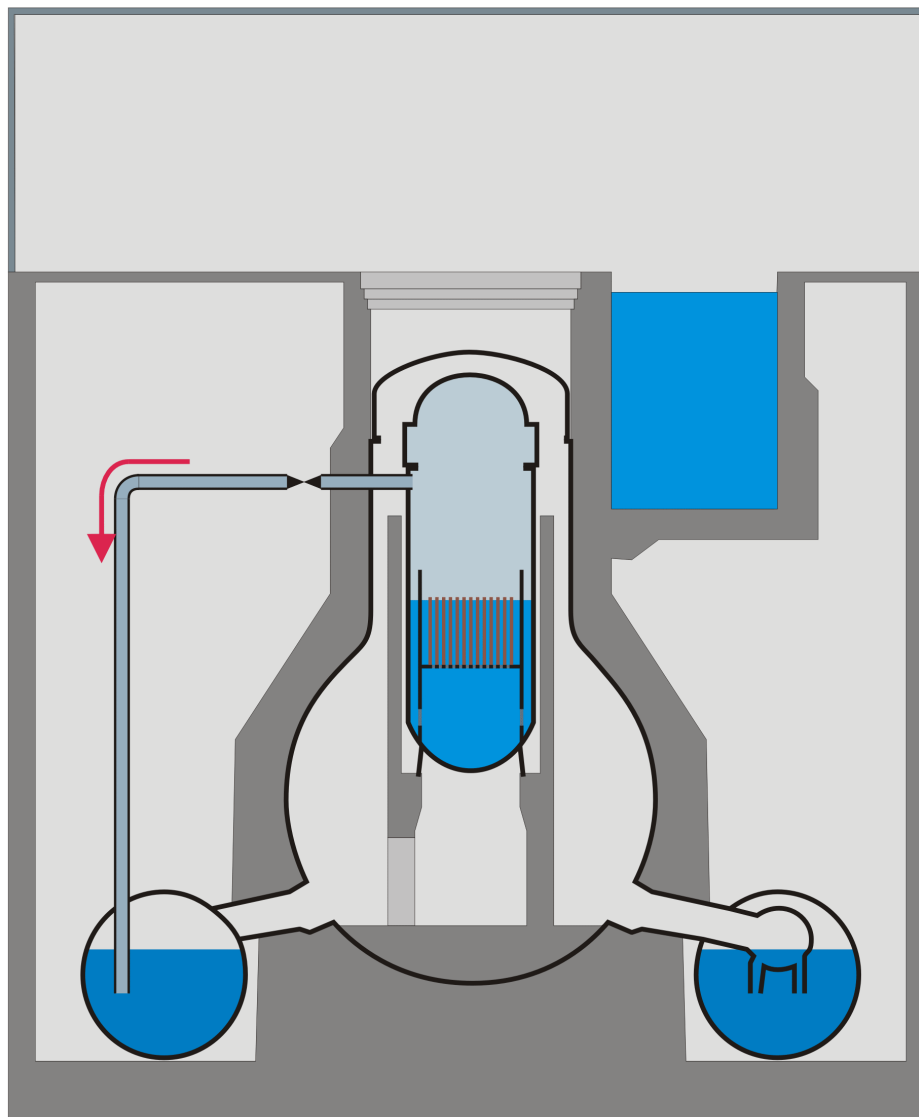
Progression de l'accident

- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)

- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
 - ◆ La pression augmente

- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
 - ◆ Décharge vers le puits humide

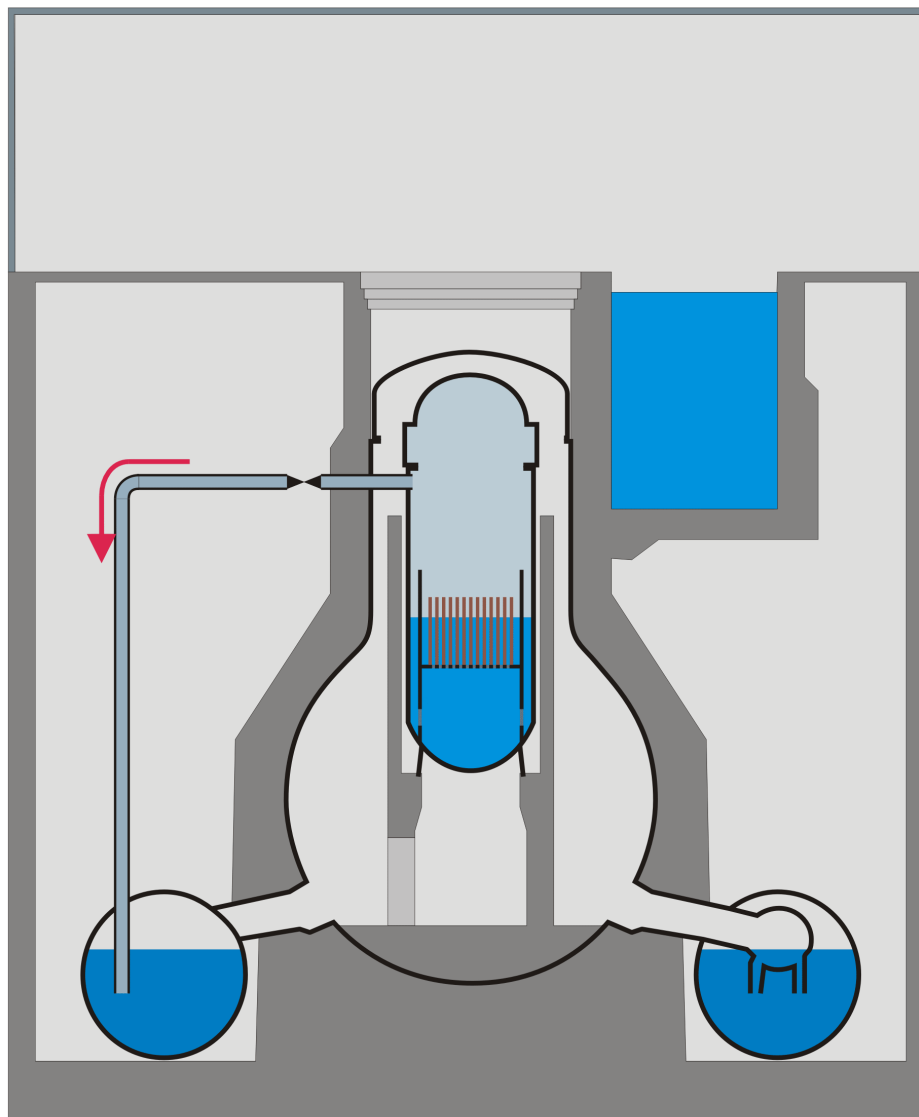
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

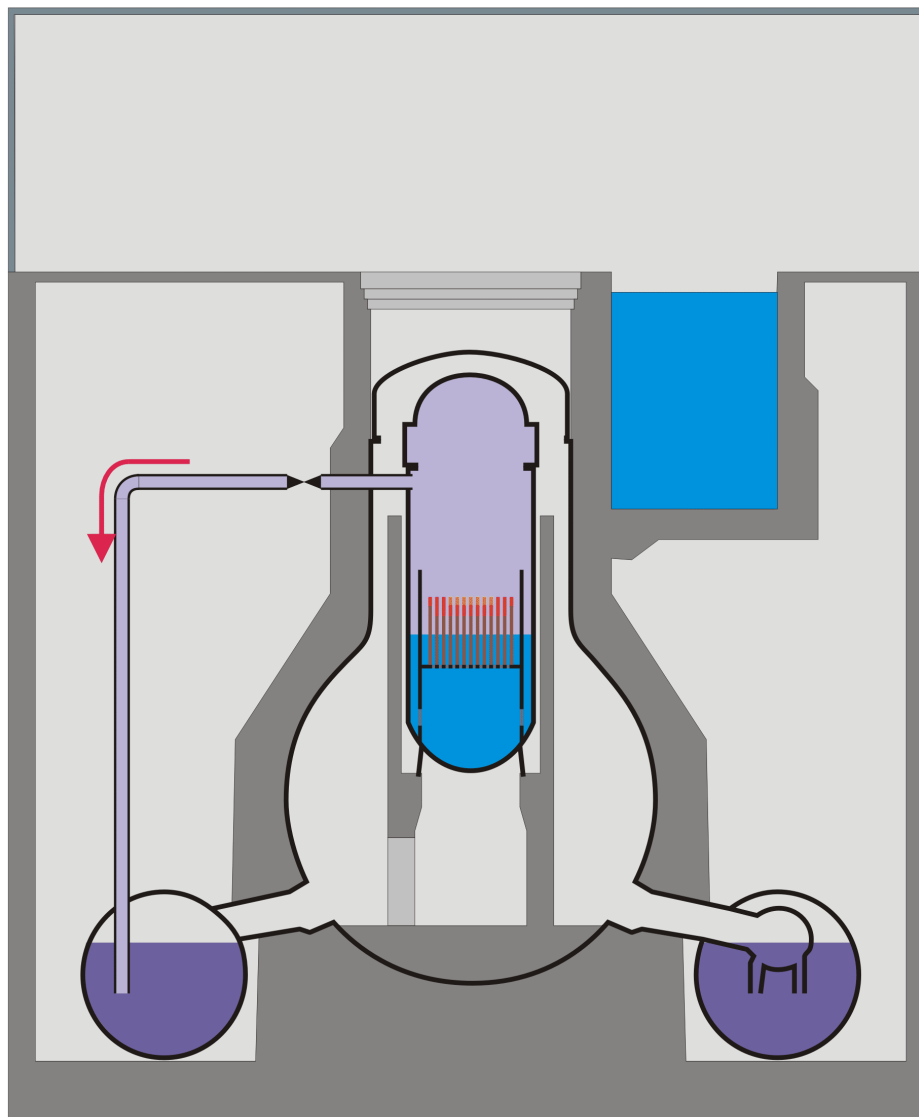
- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
 - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
 - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ Le niveau d'eau indiqué illustre le niveau de l'eau liquide. En fait, le véritable niveau est supérieur du fait des bulles de vapeur présentes dans le liquide (émulsion).
- ▶ ~50% du coeur « dénoyé »
 - ◆ La température des gaines augmente, mais sans dégât significatif au combustible
- ▶ ~2/3 du coeur « dénoyé »
 - ◆ La température des gaines dépasse ~900°C
 - ◆ Gonflement / rupture des gaines
 - ◆ Relâchement de produits de fission par les ruptures de gaines

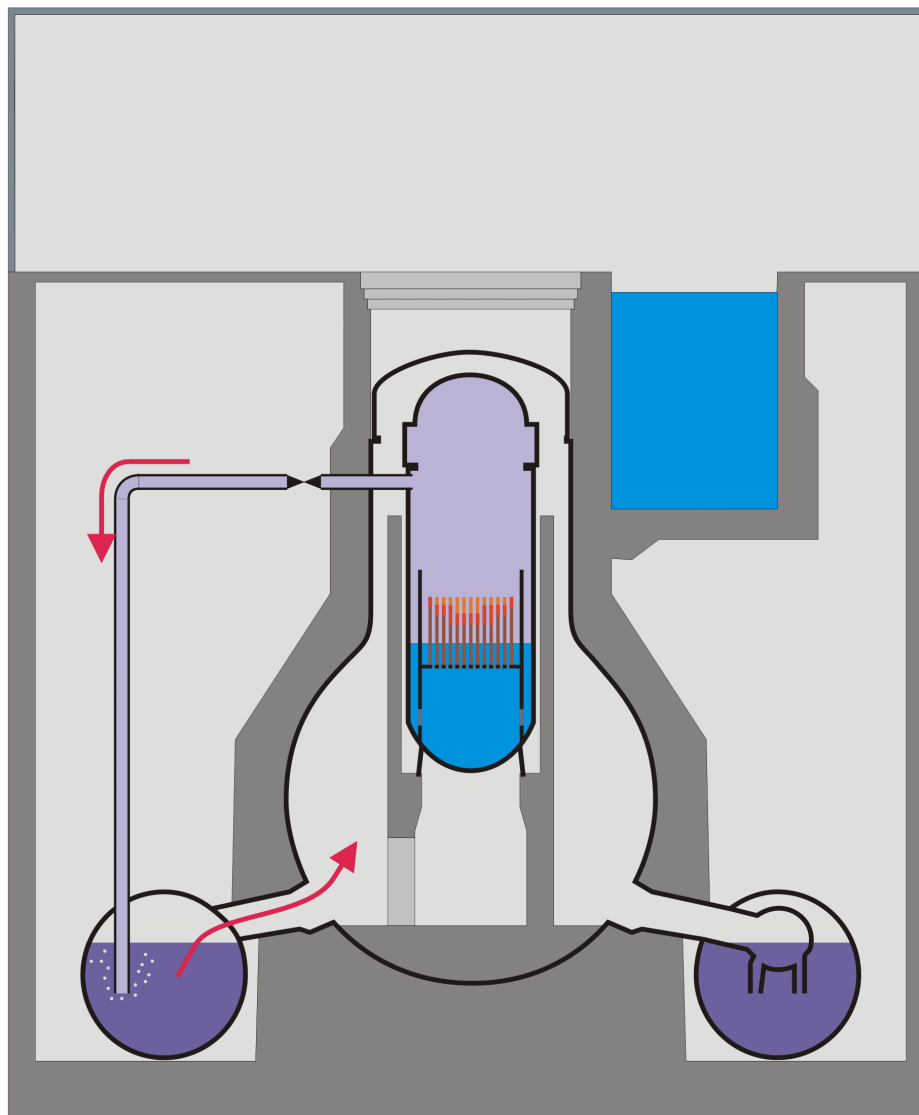


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ ~3/4 du coeur découvert
 - ◆ Les gaines dépassent ~1200°C
 - ◆ Oxydation brutale du zirconium des gaines par la vapeur d'eau :

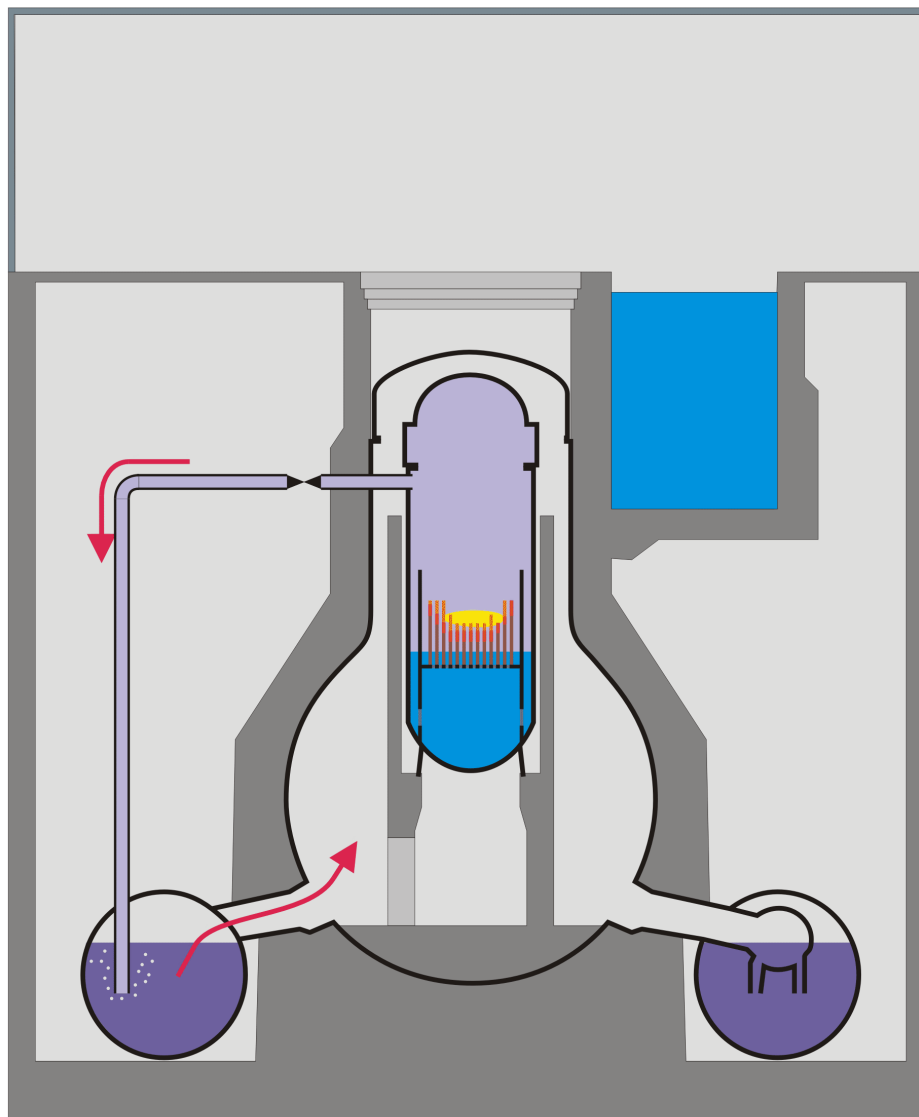
$$\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$$
 - ◆ La réaction exothermique chauffe encore plus le coeur
 - ◆ Production d'hydrogène
 - Tranche 1: 300-600kg
 - Tranches 2/3: 300-1000kg
 - ◆ L'hydrogène, les PF gazeux et les aérosols se déchargent par surpression dans l'enceinte.



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

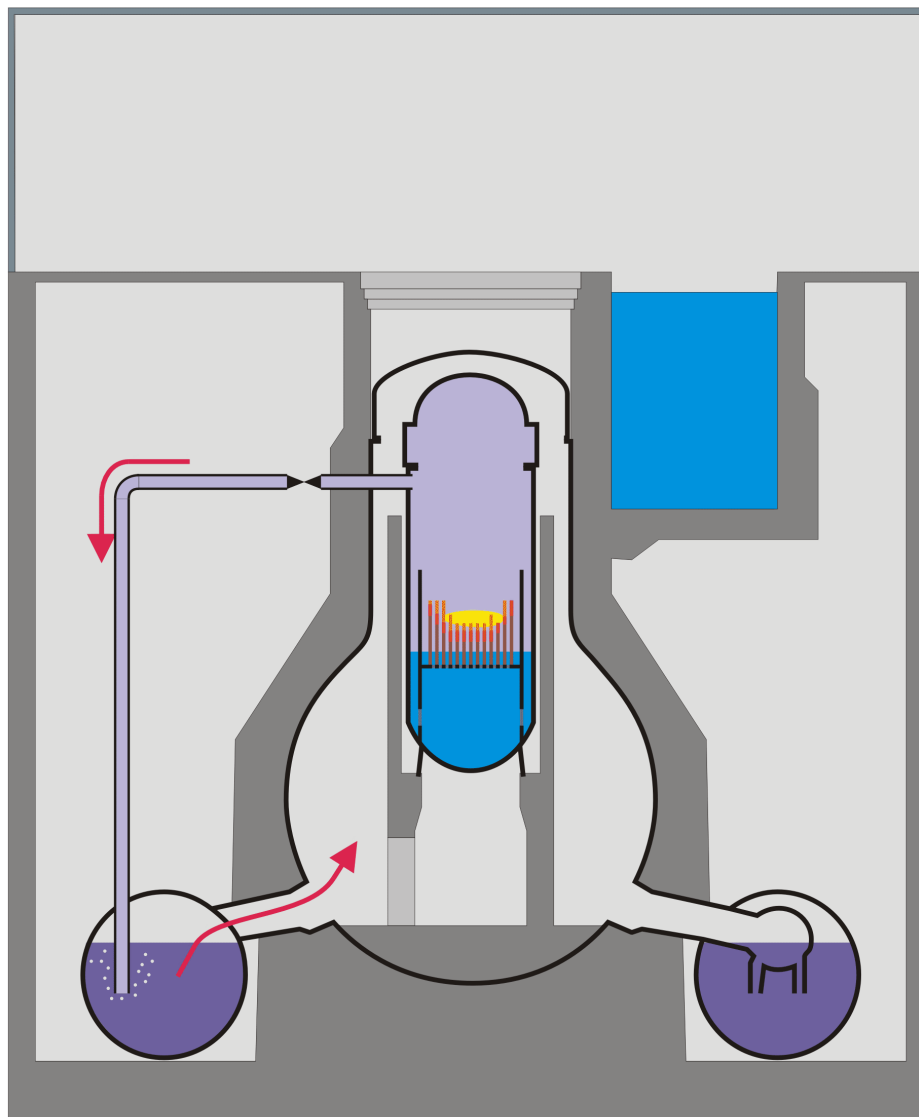
- ▶ À ~1800°C [Tranches 1,2,3]
 - ◆ Fusion des gaines et éléments de structure
- ▶ À ~2500°C [Tranches 1,2]
 - ◆ Désagrégation des pastilles
 - ◆ Débris dans le cœur
- ▶ À ~2700°C [Tranche 1]
 - ◆ Fusion d'eutectique U-Zr



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ À ~1800°C [Tranches 1,2,3]
 - ◆ Fusion des gaines et éléments de structure
- ▶ À ~2500°C [Tranches 1,2]
 - ◆ Désagrégation des pastilles
 - ◆ Débris dans le cœur
- ▶ À ~2700°C [Tranche 1]
 - ◆ Fusion d'eutectique U-Zr
- ▶ L'injection d'eau (de mer) arrête le processus sur les 3 tranches
 - ◆ TR 1: 12 mars. 20:20 (~28h sans eau)
 - ◆ TR 2: 14 mars. 16:34 (~3h sans eau)
 - ◆ TR 3: 13 mars. 13:12 (~8h sans eau)



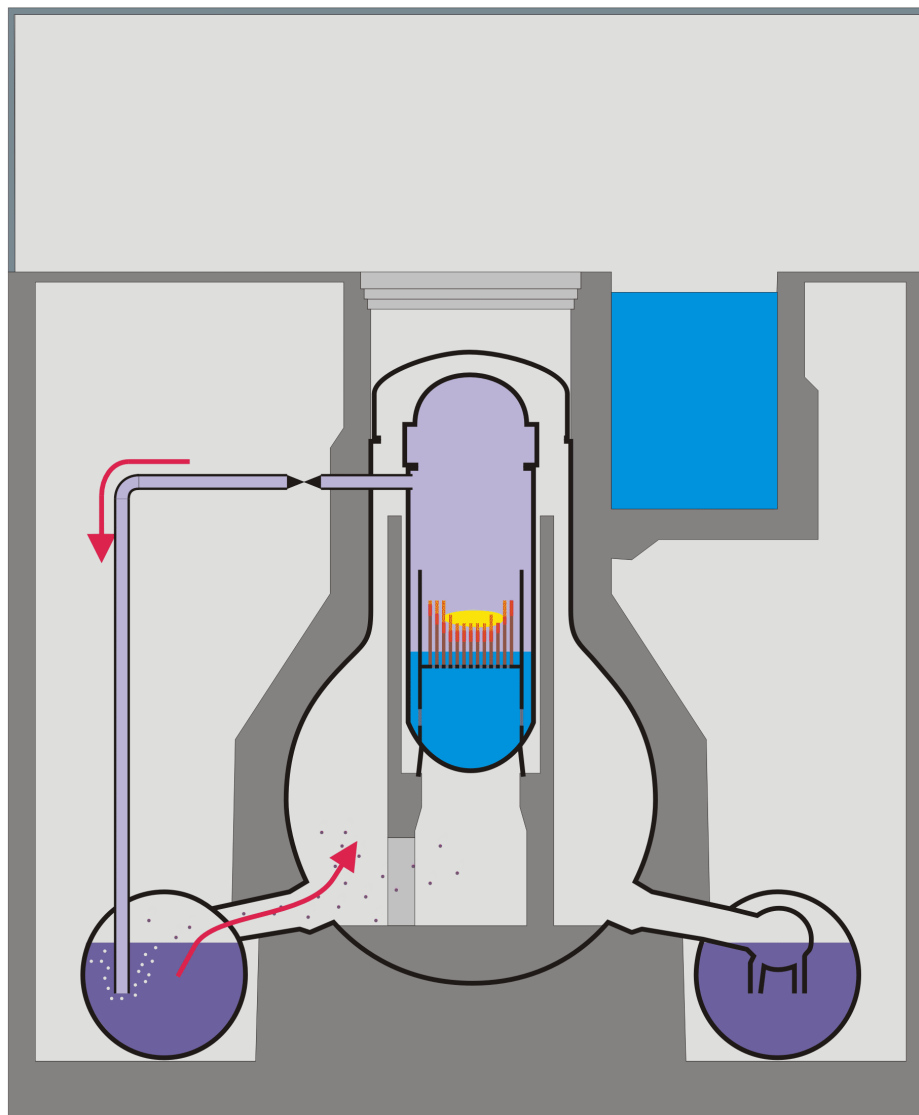
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ **Relâchement de produits de fission durant la fusion**
 - ◆ PF gazeux : Xénon, krypton,
 - ◆ PF Solides entrainés par la vapeur : Césium, Iode,...
 - ◆ Uranium/Plutonium reste en cœur

- ▶ **Décharge au travers de vannes dans l'eau de la chambre de condensation**
 - ◆ La piscine piège une partie des aérosols dans l'eau

- ▶ **Les PF gazeux, l'hydrogène et le reste des aérosols continuent à être éjectés dans l'enceinte.**
 - ◆ Piégeage partiel des aérosols par dépôt sur les surfaces.

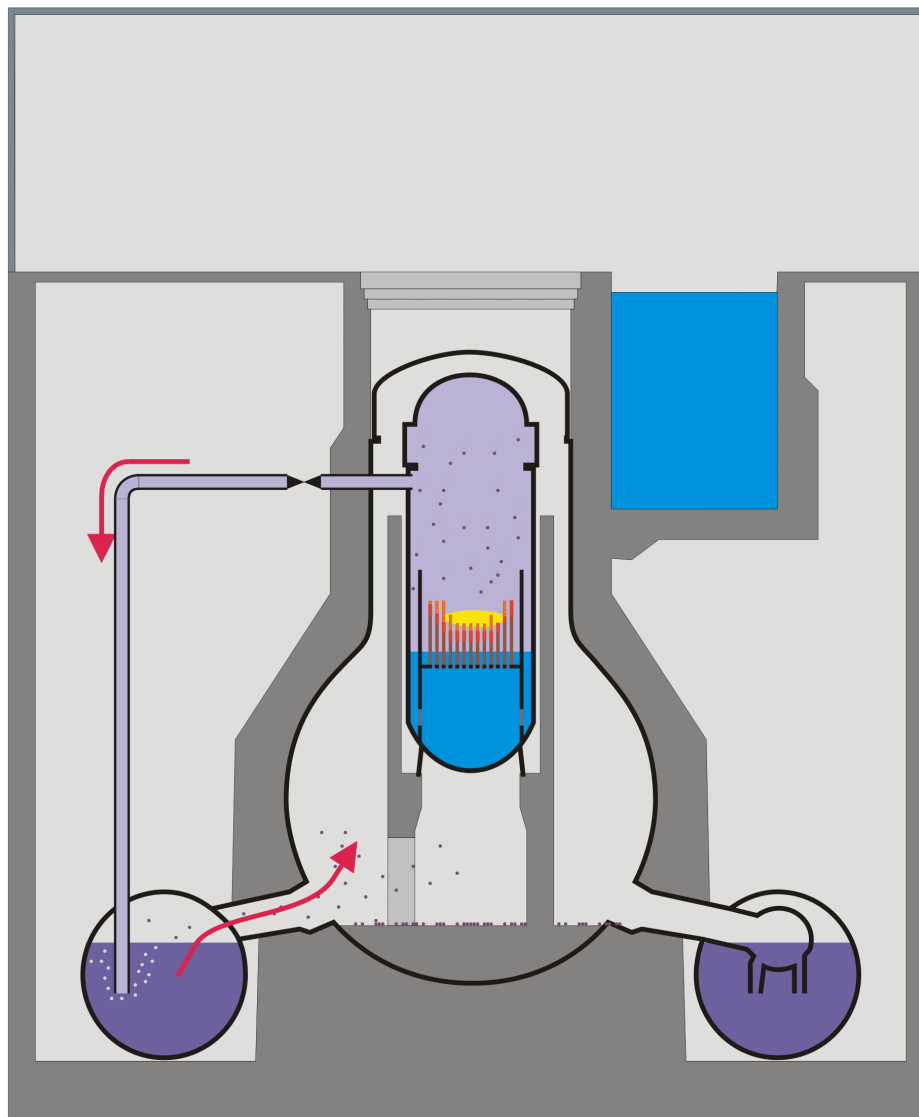


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- **Enceinte de confinement**
 - ◆ Dernière barrière entre les produits de fission et l'environnement
 - ◆ Epaisseur de la paroi ~3cm
 - ◆ Pression de calcul 4-5bar

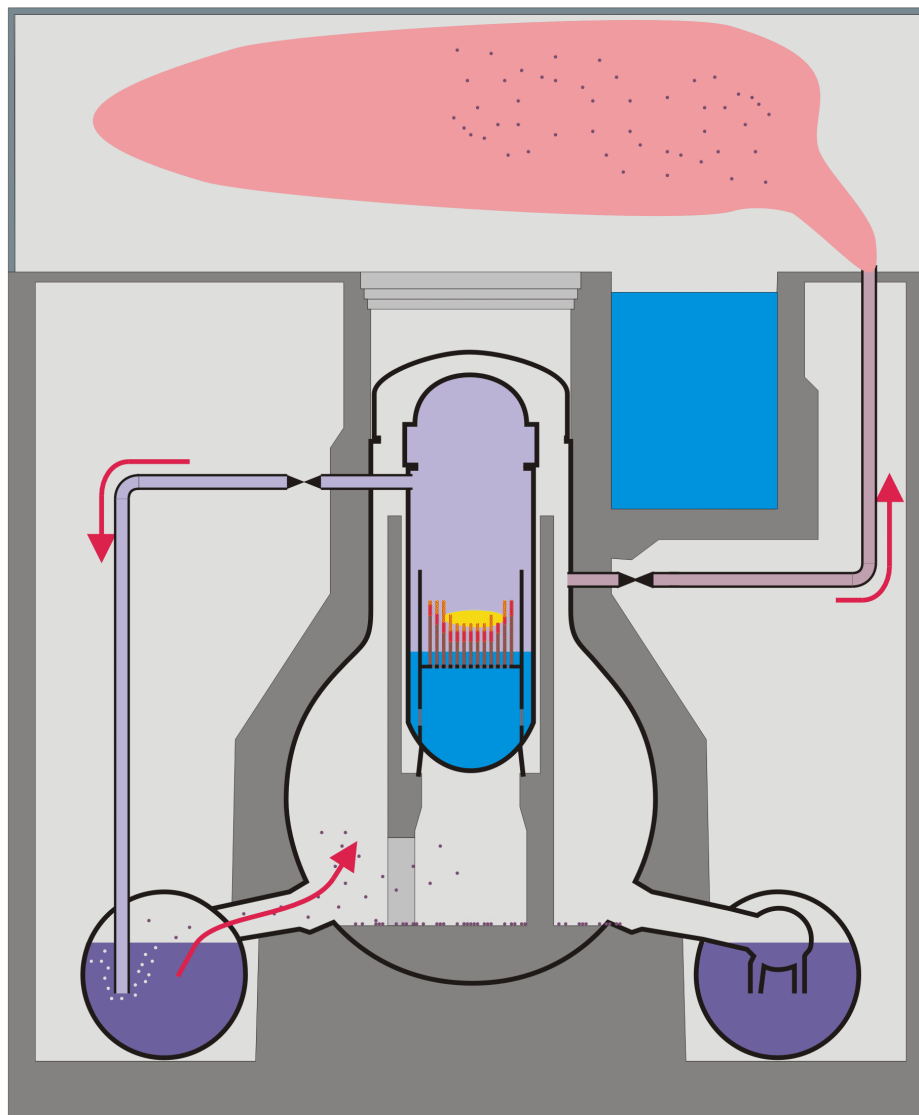
- **Pression réelle jusqu'à 8 bars**
 - ◆ Gaz d'inertage (azote)
 - ◆ Hydrogène libéré par l'oxydation du Zr
 - ◆ Eau du tore en ébullition



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ **Avantages et inconvénients de la dépressurisation de l'enceinte**
 - ◆ Retire de l'énergie du bâtiment réacteur
 - ◆ Réduction pression à ~4 bar,
 - ◆ Rejet d'aérosols (iode, césium)
 - ◆ Rejet de gaz rares
 - ◆ Rejet d'hydrogène (explosif)
- ▶ **Le mélange gazeux est rejeté vers le plancher de service du réacteur.**
- ▶ **Dépressurisation de l'enceinte:**
 - ▶ Tranche 1 : 12 mars. 14:30
 - ▶ Tranche 2 : 13 mars 11:00
 - ▶ Tranche 3 : 12 mars 20:41

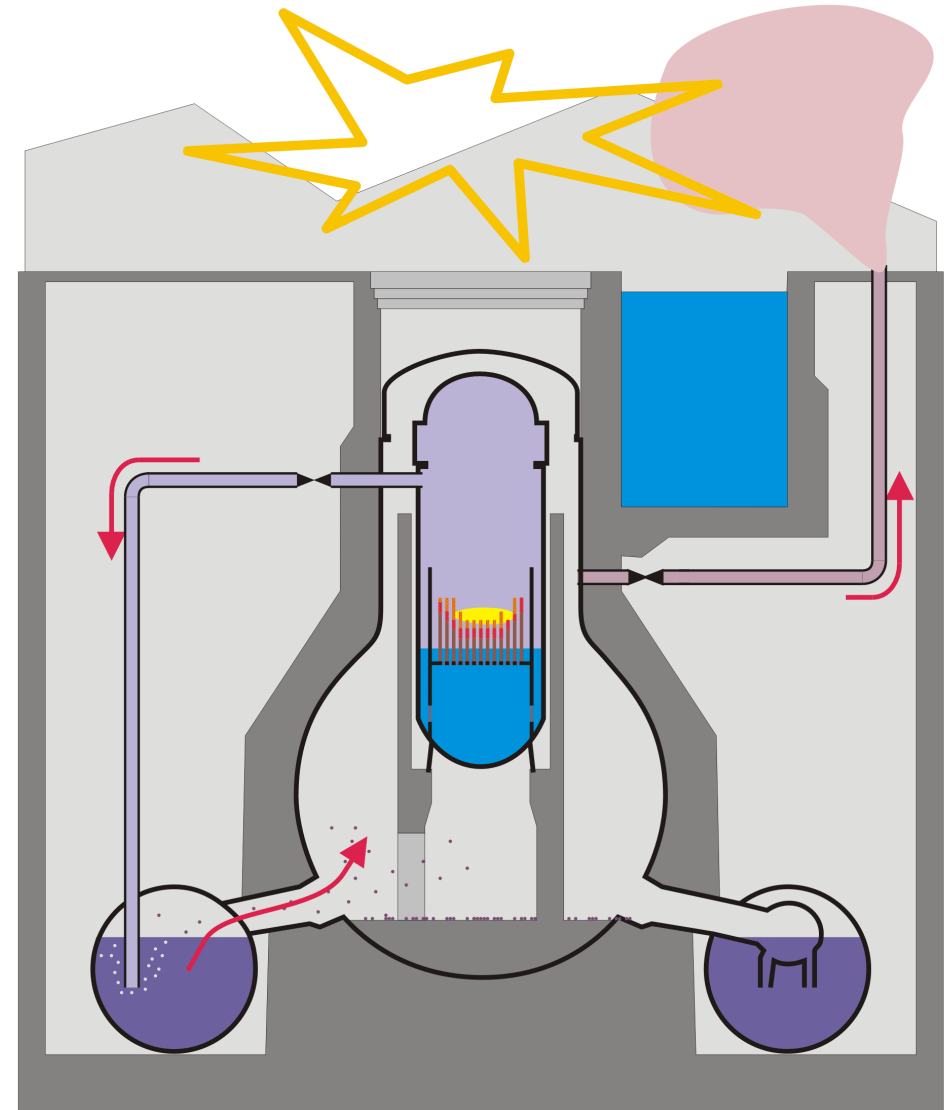


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident – Tr. 1&3

Tranches 1 et 3

- ◆ L'hydrogène explose au niveau du plancher de service du réacteur
 - ◆ Destruction du bardage
 - ◆ La bâtiment en béton renforcé semble intact
 - ◆ Spectaculaire mais impact sûreté limité.
-
- ◆ Explosions hydrogène :
 - ◆ Unité 1: 12 mars. 15:36
 - ◆ Unité 3 : 14 mars. 11.01



L'accident de Fukushima Daiichi

Explosion hydrogène en Tranche 1



La Tranche 3 après l'explosion d'hydrogène



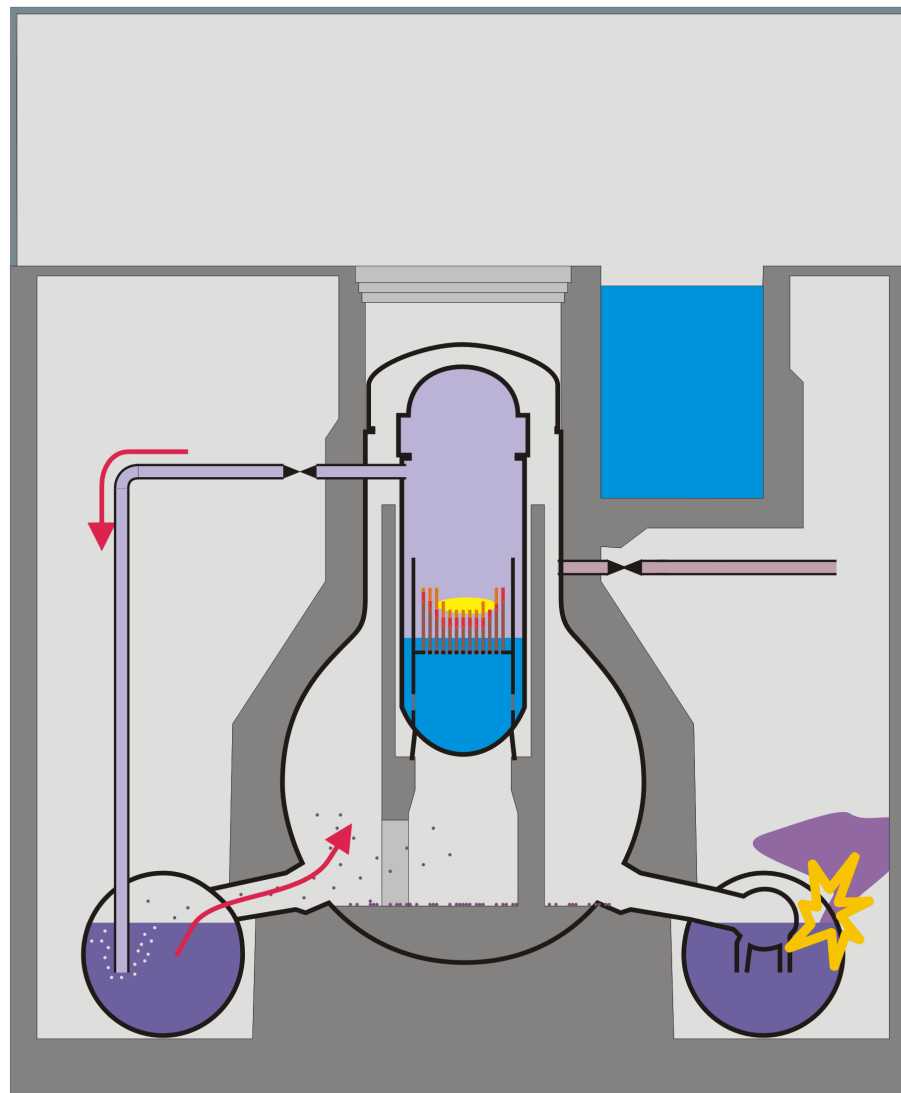
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident - Tranche 2

► Tranche 2

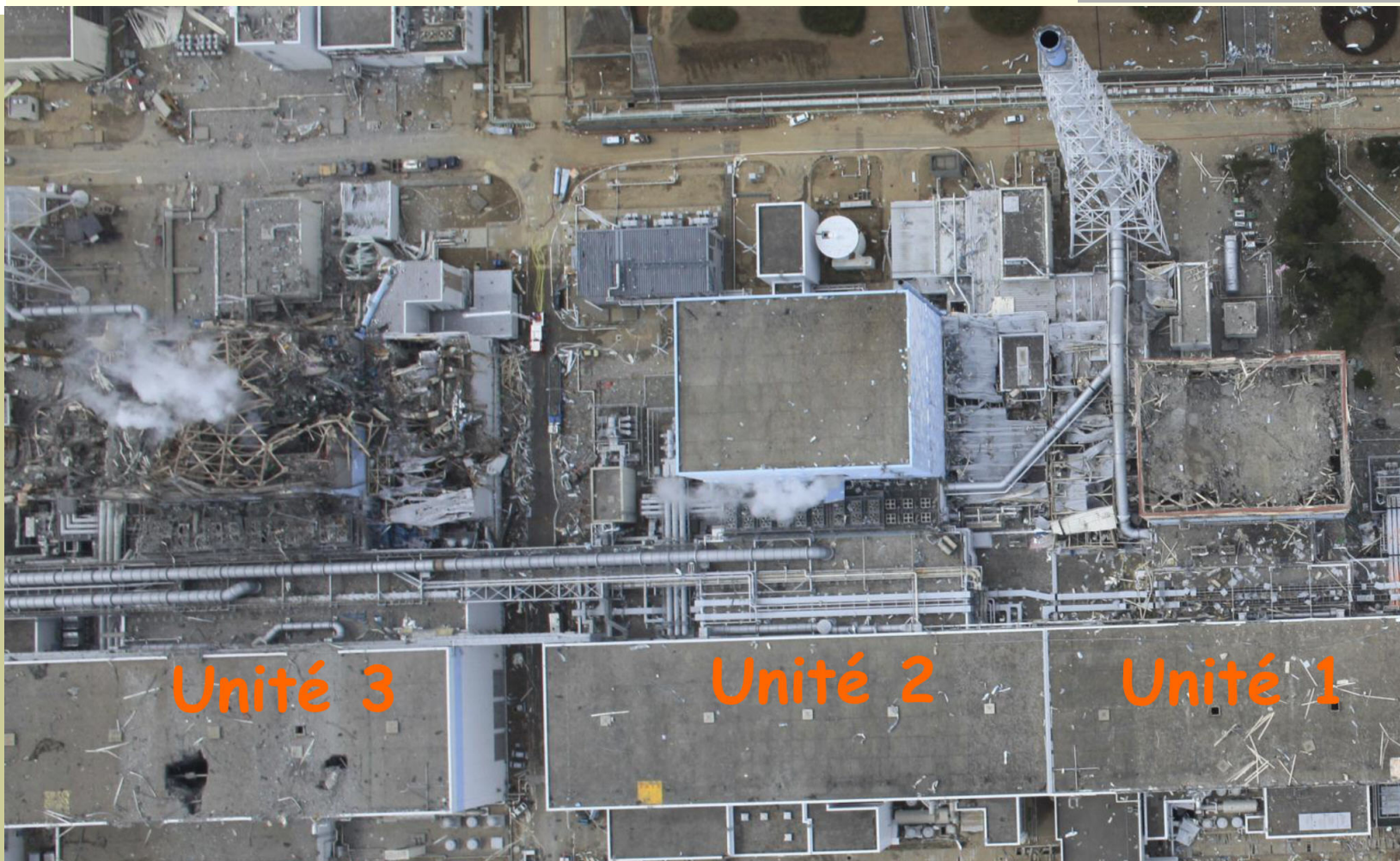
- ◆ L'hydrogène brûle dans le bâtiment réacteur : Bruit d'explosion le 15 avril à 6:10
- ◆ Endommagement probable de la chambre de condensation (eau fortement contaminée)
- ◆ Rejet de gaz incontrôlé de l'enceinte
- ◆ Rejet de produits de fission
- ◆ Evacuation temporaire du site
- ◆ Les débits de dose locaux très élevés sur site du fait de la rupture gênent les travaux de réparation

► Comportement différent de la tranche 2 inexpliqué



L'accident de Fukushima Daiichi

Tranches 1,2 et 3 après les explosions

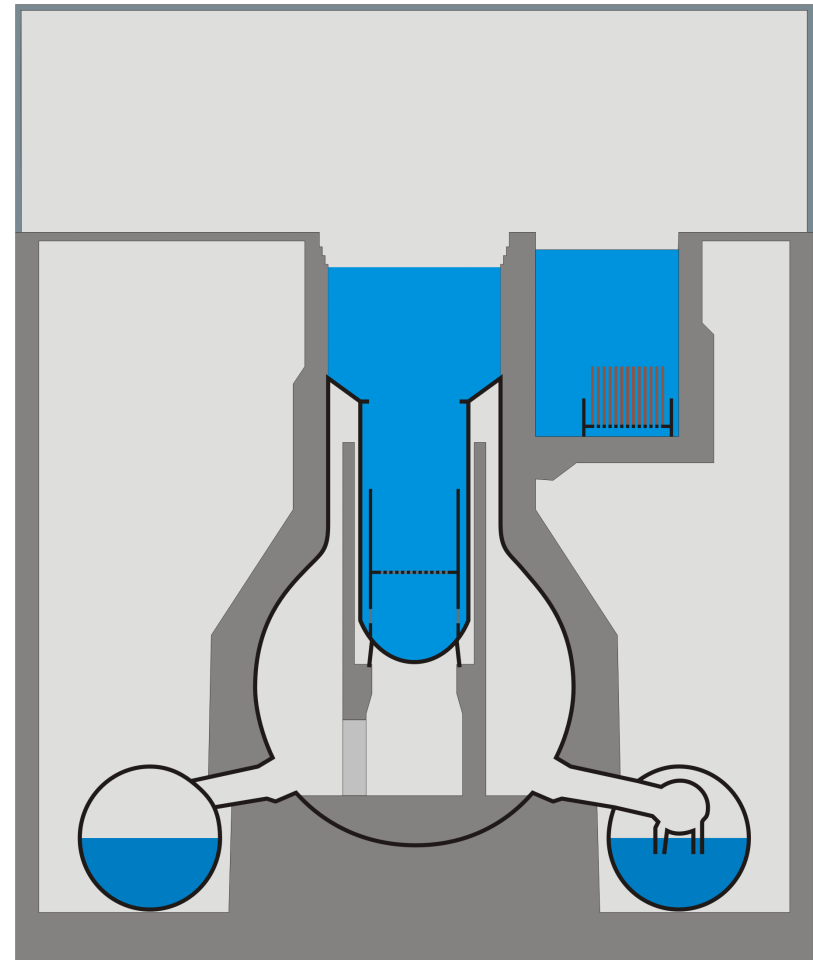


L'accident de Fukushima Daiichi

Piscines de désactivation

► La piscine de désactivation est située sur le plancher de service

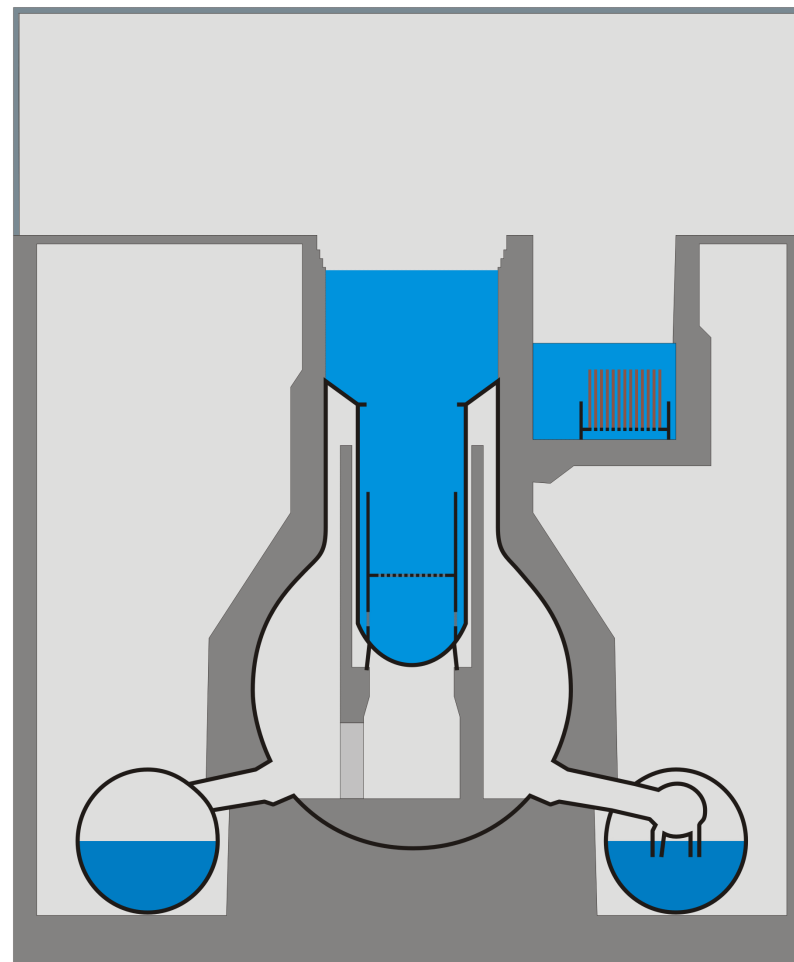
- ◆ Tranche 4 à l'arrêt : Tous les éléments du cœur en piscine de désactivation
- ◆ Vidange partielle des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1, 2 et 3, en quelques semaines
- ◆ Dysfonctionnement du circuit de refroidissement
- ◆ Fuites du fait du séisme ?



L'accident de Fukushima Daiichi

Piscines de désactivation

- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
 - ◆ Tranche 4 à l'arrêt : tous les éléments du coeur en piscine de désactivation
 - ◆ Vidange partielle des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1, 2 et 3 en quelques semaines
 - ◆ Dysfonctionnement du circuit de refroidissement
 - ◆ Fuites du fait du séisme ?



L'accident de Fukushima Daiichi

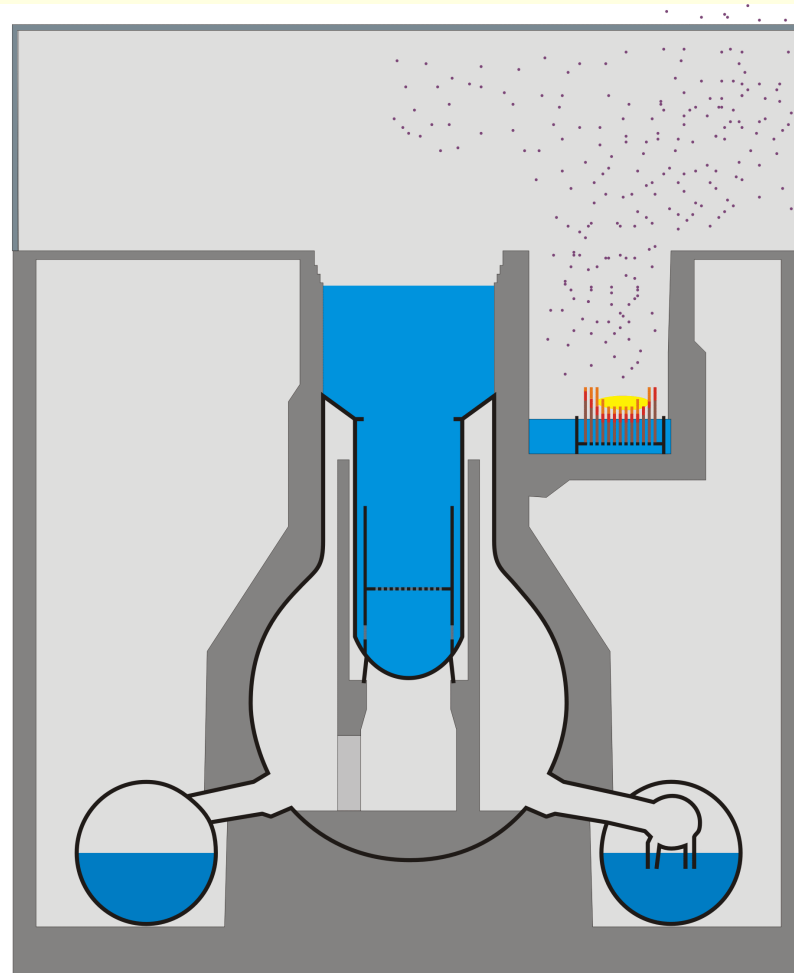
Piscines de désactivation

► La piscine de désactivation est située sur le plancher de service

- ◆ Tranche 4 à l'arrêt : tous les éléments du coeur en piscine de désactivation
- ◆ Vidange partielle des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1, 2 et 3 en quelques semaines
- ◆ Dysfonctionnement du circuit de refroidissement
- ◆ Fuites du fait du séisme ?

► Conséquences

- ◆ Risque de fusion des éléments combustibles, sans confinement
- ◆ Rejets importants



L'accident de Fukushima Daiichi

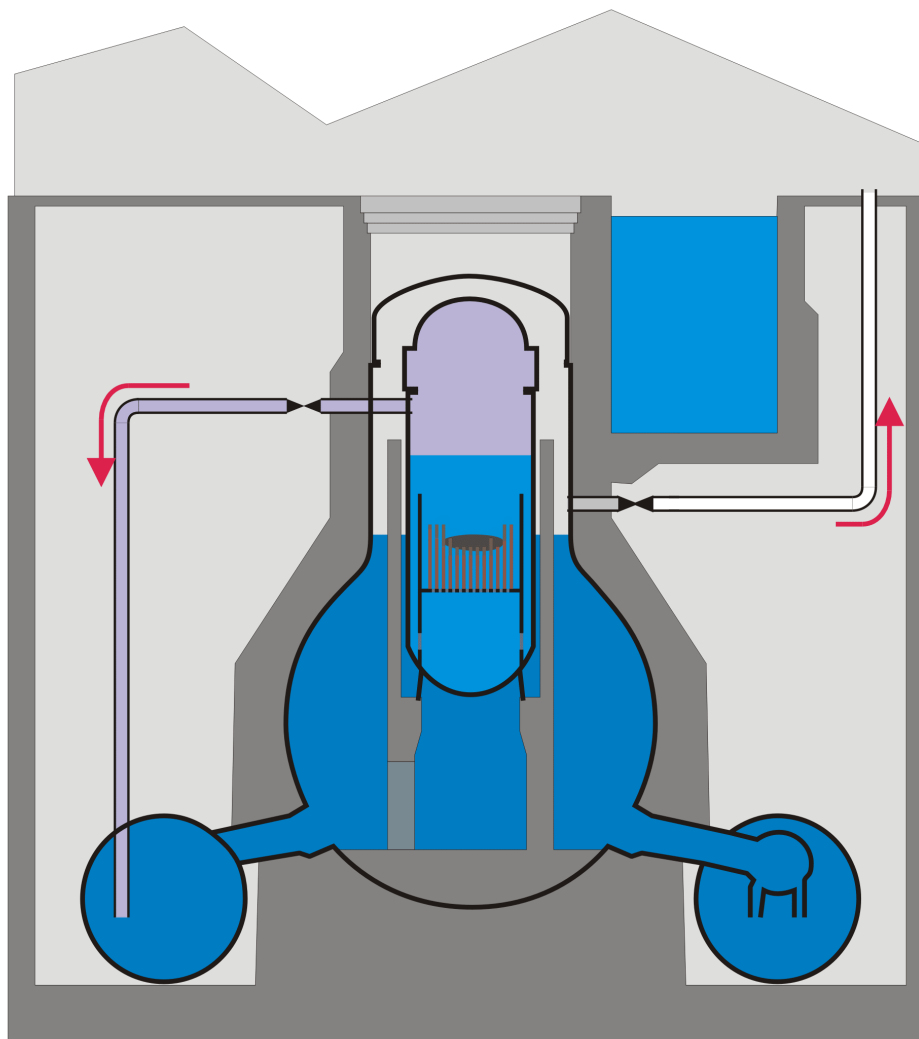
Situation actuelle

► Etat des réacteurs

- ◆ Coeur endommagé sur les tranches 1,2,3
- ◆ Bâtiments endommagés du fait d'explosions et incendies sur tranches 1 à 4
- ◆ Refroidissement du cœur assuré par pompes mobiles sur toutes les tranches
- ◆ Piscine tranche 4 peut-être non étanche, mais refroidie.

► SITUATION STABILISEE, MAIS PRECAIRE

- Désormais, seuls des rejets très limités de produits de fission sont à craindre



L'accident de Fukushima Daiichi

Situation actuelle

- ▶ **Tranche 1 :**
 - Refroidissement du cœur assuré, mais précaire
 - Mise en place d'un système de ventilation contrôlée
 - Ouverture des portes dimanche 8 mai- 8 p.m. Accès ouvriers le 9/5.
 - Pas d'incidence notable sur le niveau de radioactivité sur le site : 18 μ Sv/hr
 - Débit de doses dans le bâtiment 40 à 100 mSv/hr, avec des pointes locales élevées
 - Piscine : apport d'eau douce/ Etat du combustible inconnu
- ▶ **Tranche 2 :**
 - Refroidissement du cœur assuré, mais précaire
 - Perte d'intégrité de l'enceinte suspectée, mais pression enceinte stable
 - Piscine : apport d'eau douce / Etat du combustible inconnu
- ▶ **Tranche 3 :**
 - Refroidissement du cœur assuré, mais précaire
 - Etat réacteur stabilisé / Pression enceinte stable
 - Piscine : apport d'eau douce / suspicion de dommage au combustible
- ▶ **Tranche 4 :**
 - Réacteur en état sûr (pas de combustible)
 - Inspection visuelle de la piscine par caméra le dimanche 8 mai
 - Nombreux débris visibles et dégâts apparents suite à l'explosion
 - Le niveau d'eau est satisfaisant
 - La majorité des assemblages semblent peu endommagés.
- ▶ **Tranches 5 & 6 : arrêt à froid – sous contrôle**

L'accident de Fukushima Daiichi

Et après?? : La feuille de route

Sur le site de la centrale

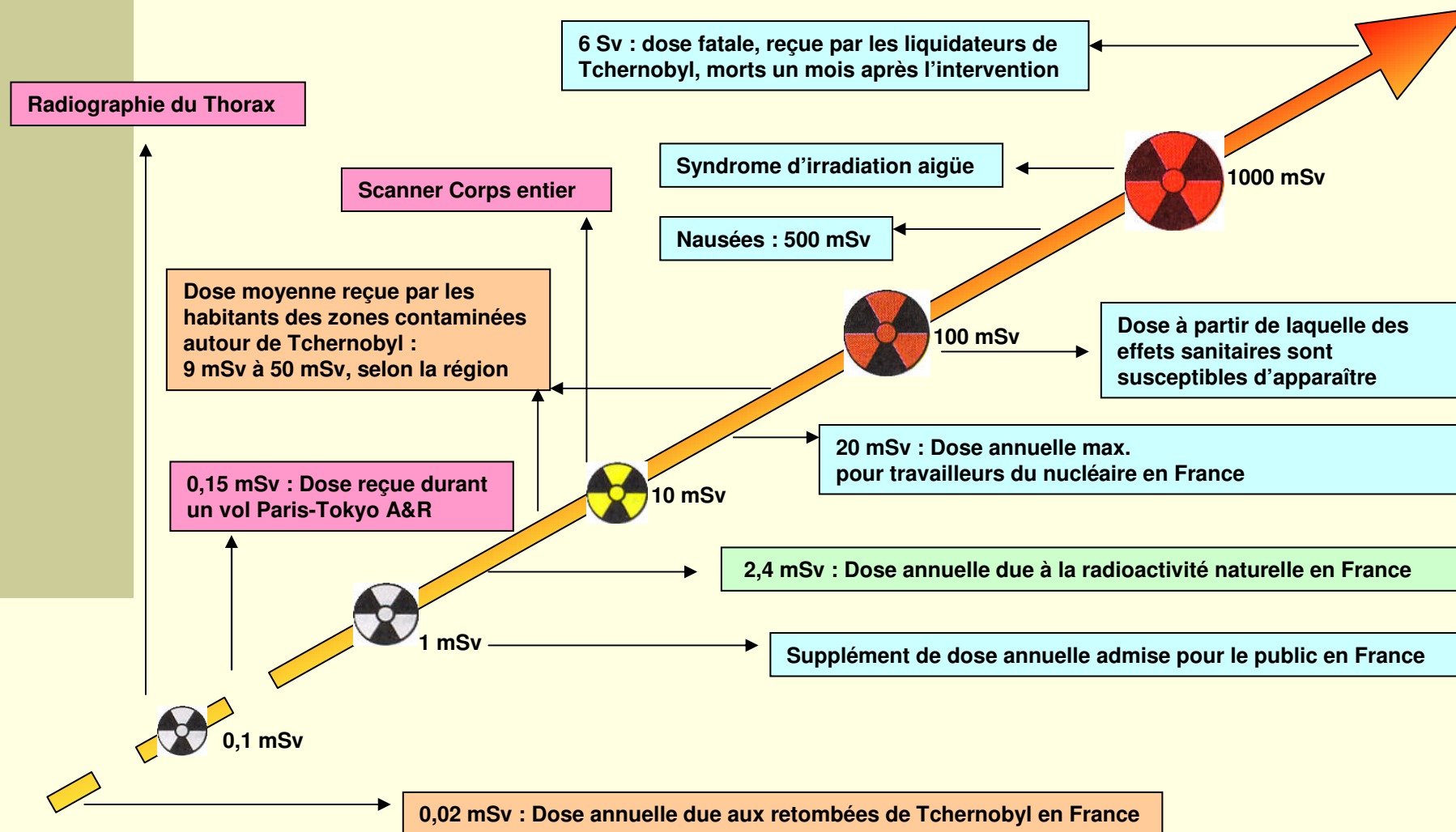
- ▶ Restaurer les conditions de refroidissement sûres des réacteurs et des piscines. Sécuriser les alimentations électriques.
- ▶ Supprimer (ou limiter) les rejets radioactifs liquides et gazeux
 - ▶ Couverture des bâtiments 1 à 4?
 - ▶ Difficulté particulière sur tranche 2 : réparation du confinement?
 - ▶ Traiter les eaux contaminées inondant les bâtiments.
- ▶ Réduire les débits de dose sur site et dans les bâtiments
 - ▶ Usage de résines inhibitrices et élimination des débris
- ▶ Sécuriser le stockage des assemblages combustibles usés.

En dehors du site

- Contrôler les niveaux de radioactivité en mer, sur terre, en l'air
- Décontamination des maisons et des sols / réhabilitation (partielle?) de la zone d'exclusion

Des années de travail, pour une centrale hors service à tout jamais.

Effets des rayonnements sur l'homme



L'accident de Fukushima Daiichi

Conséquences radiologiques et sanitaires

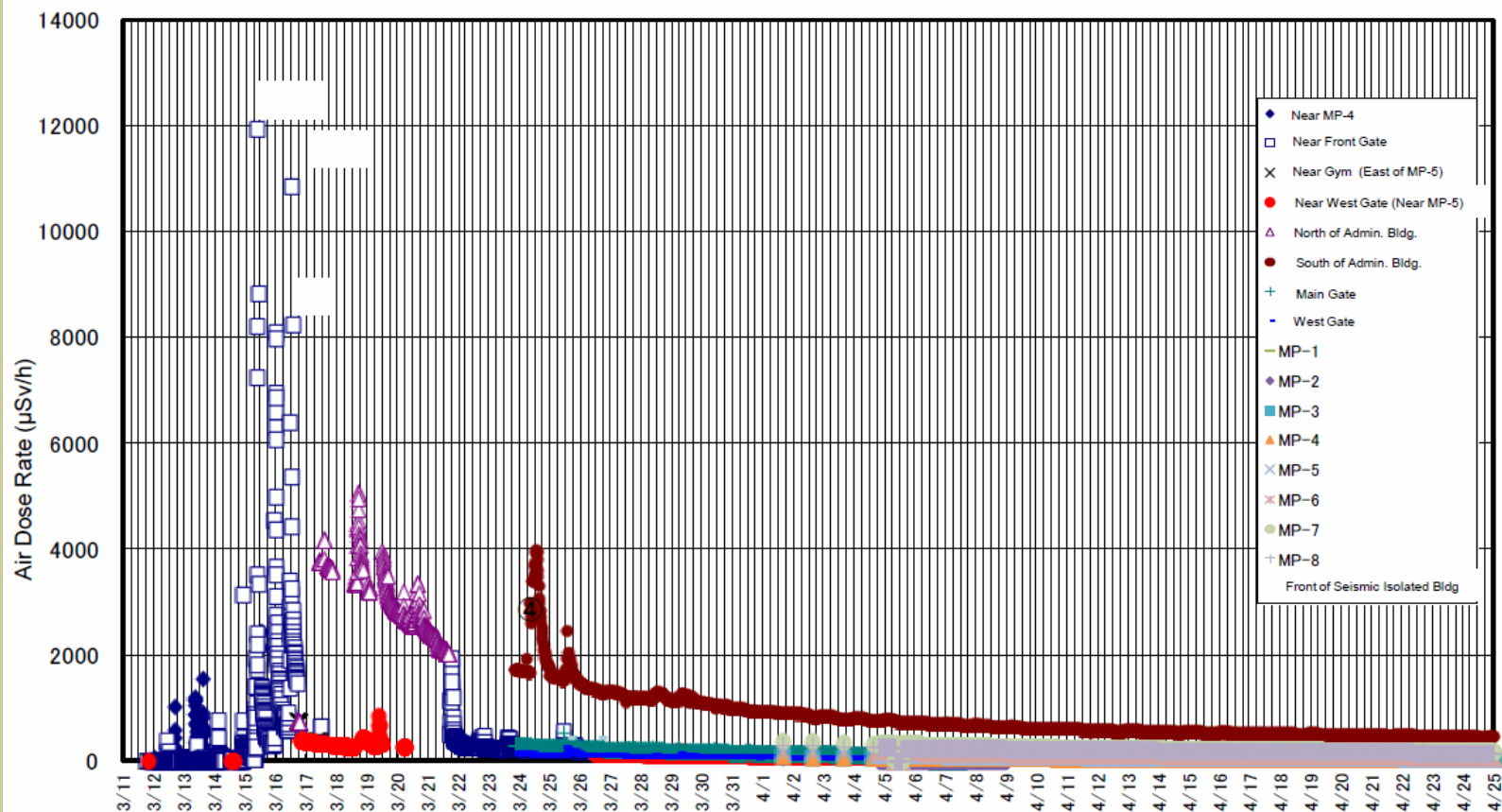
► Les travailleurs sur site

- ◆ Avant explosion de la tranche 2 (15 mars 6:20) : Débit de dose < à 2mSv / h
- ◆ Après explosion : valeurs pics à 12 mSv/hr. Pointes locales à 400 mSv.
Evacuation temporaire du site.
- ◆ Dose limite tolérée pour travailleurs à Fukushima : 250 mSv
- ◆ 21 personnes ont reçu des doses entre 100 mSv et 170 mSv, (18 TEPCO + 3 S/T)
dont 3 contaminés aux jambes par l'eau : sans conséquence après hospitalisation.
- ◆ Tendance continue à la décroissance (Cf Graphique)
- ◆ Conditions de travail difficiles dans les bâtiments et points chauds isolés.

L'accident de Fukushima Daiichi

Conséquences radiologiques et sanitaires

Evolution des débits de dose en divers points du site



L'accident de Fukushima Daiichi

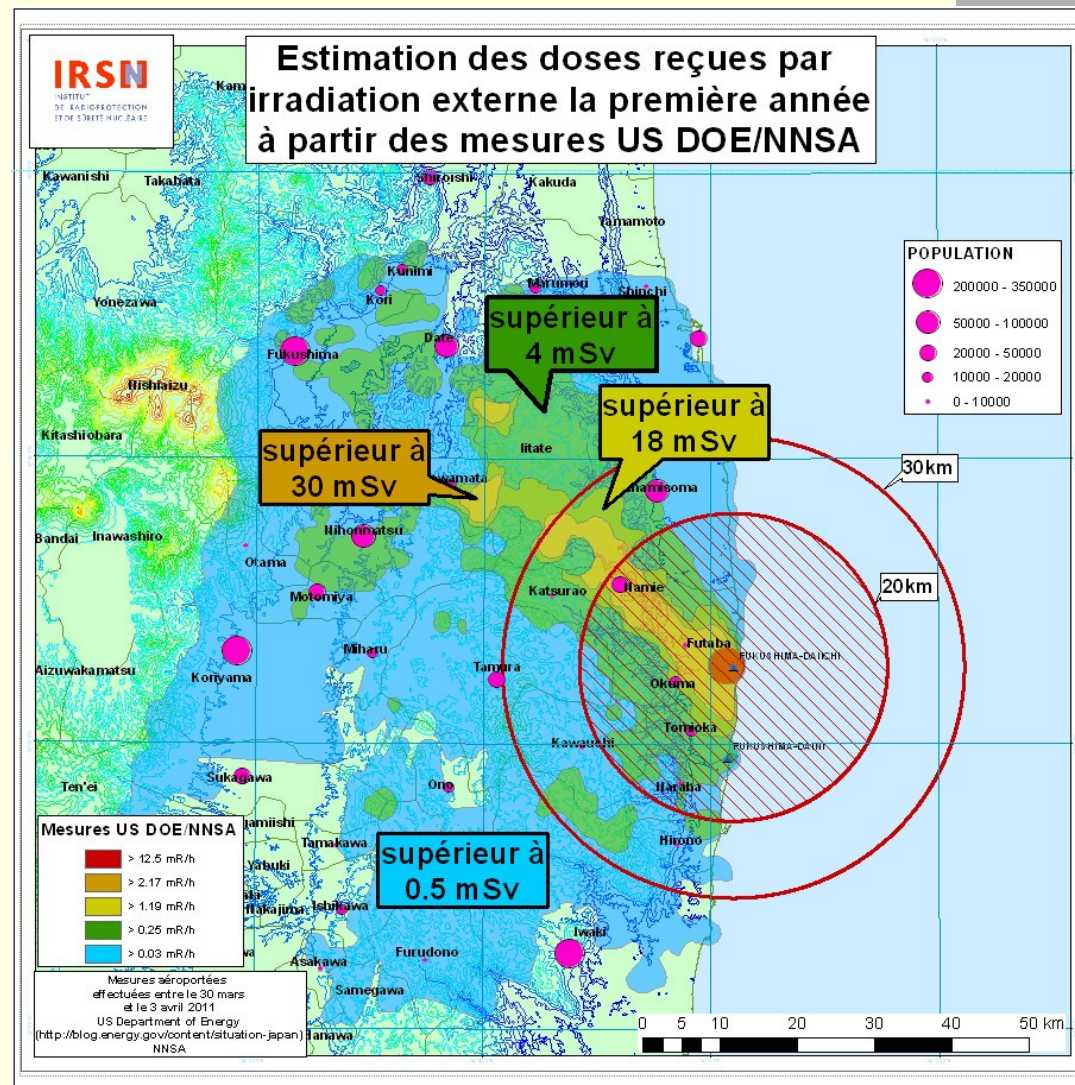
Conséquences radiologiques et sanitaires

► Les populations civiles hors site

- ◆ Décision d'évacuation dans une zone de 3km (11 mars 21:23), portée à 10 km puis à 20km (12 mars 18:25). Zone de confinement : 30km
- ◆ Distribution d'iode stable le 15 mars
- ◆ Contrôle de contamination sur 162 000 personnes déplacées du 13 au 19 avril :
102 personnes affichaient des contrôles > 100 000 cpm avec leurs vêtements
Contamination très réduite sans vêtement
Pas de conséquence sanitaire prévisible.
- ◆ Situation à surveiller dans la zone d'exclusion du fait de la contamination des sols.

L'accident de Fukushima Daiichi

Conséquences radiologiques et sanitaires



L'accident de Fukushima Daiichi

MERCI de VOTRE ATTENTION

Remerciements à Bertrand Barré, Matthias Braun, Dominique Vignon

Sources documentaires : ASN, IRSN, JAIF, JNES, NISA et TEPCO