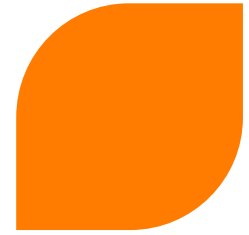




L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation
2. Progression de l'accident
3. Rejets radioactifs
4. Piscines de désactivation
5. Sources d'information

Matthias Braun
PEPA4-G, AREVA–NP GmbH
Matthias.Braun@AREVA.com



Traduction française réalisée par O. Rouyre-Cros, TRI/SSQ

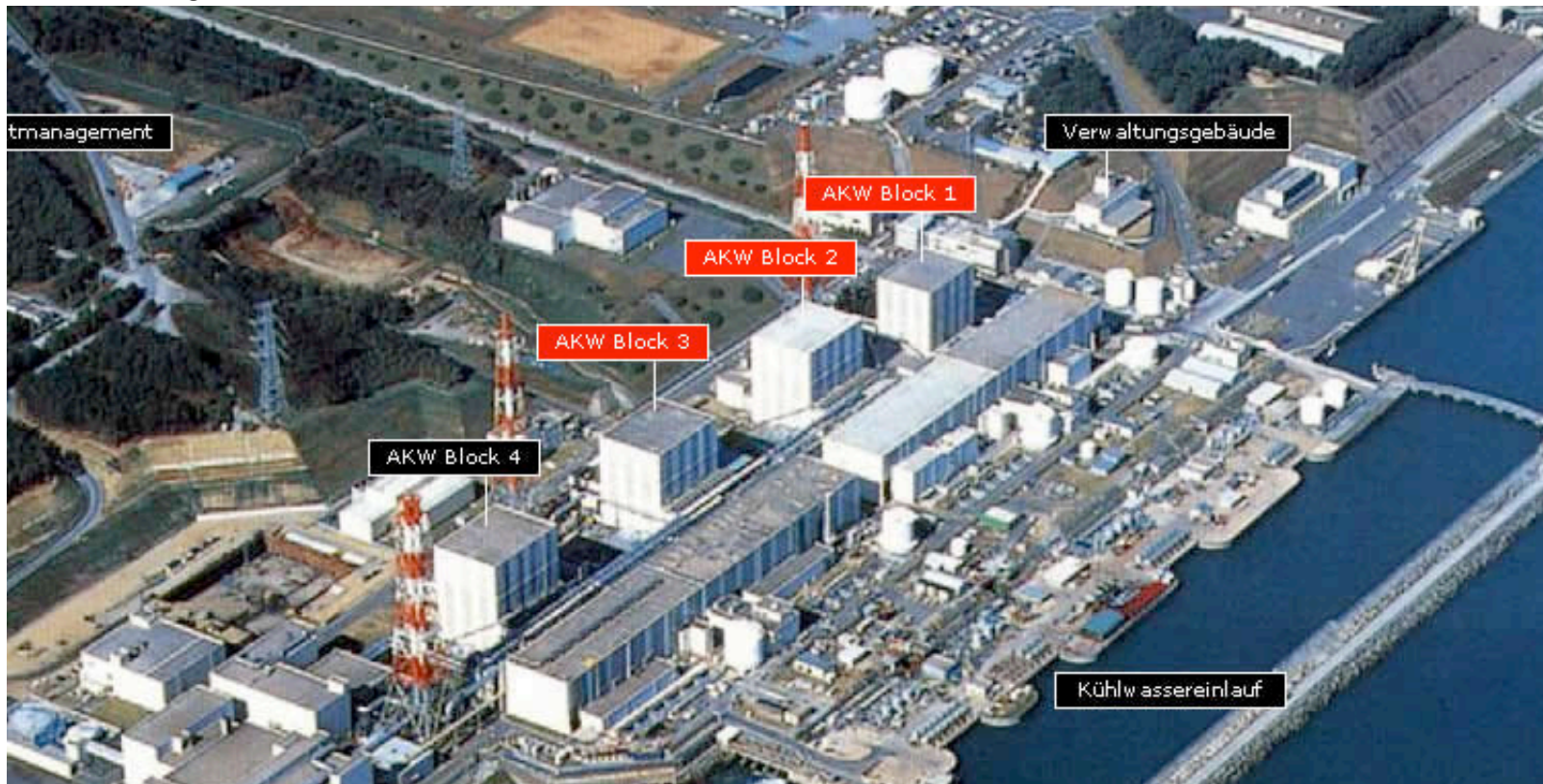
L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation



► Fukushima Daiichi (Centrale I)

- ◆ Tranche I - GE Mark I BWR (439 MW), En service depuis 1971
- ◆ Tranches II-IV - GE Mark I BWR (760 MW), En service depuis 1974

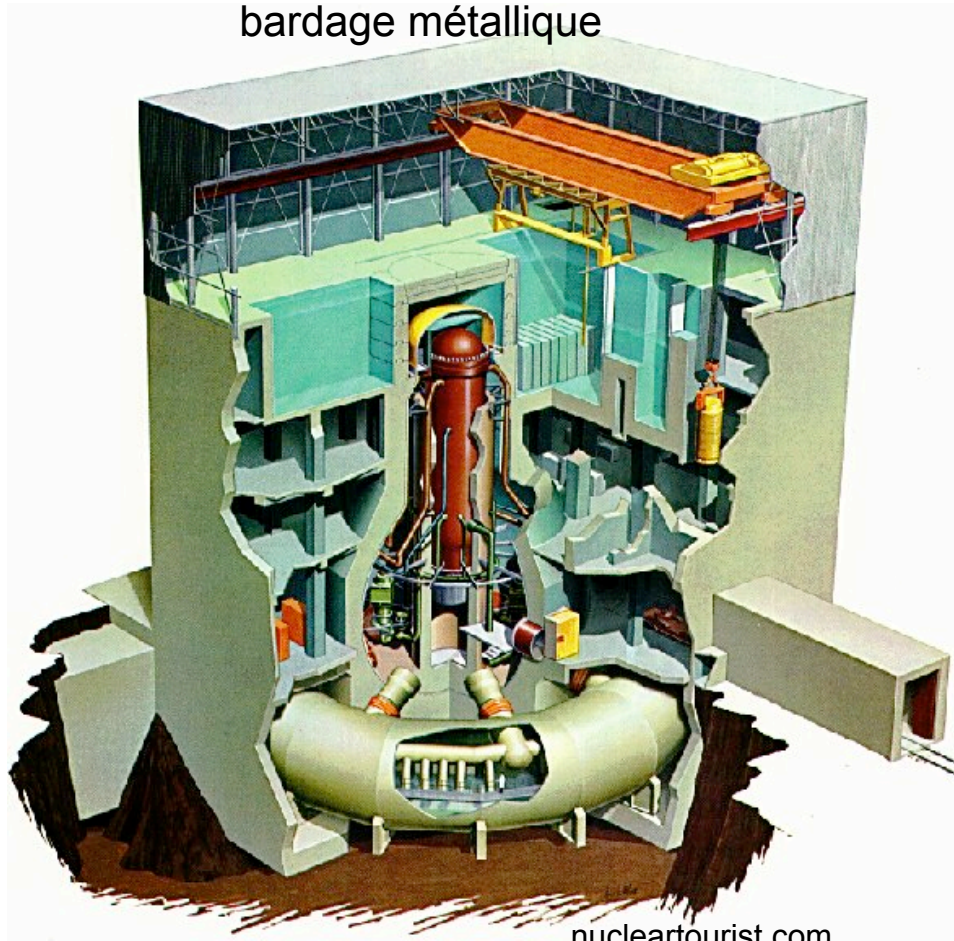


L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation

► Structure du bâtiment

- ◆ Bâtiment en béton
- ◆ Plancher de service en bardage métallique



► Enceinte de confinement

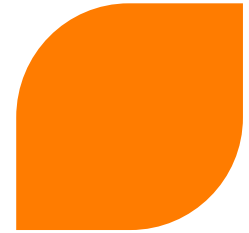
- ◆ Puits sec en forme de poire
- ◆ Puits humide en forme de tore



en.wikipedia.org/wiki/Browns_Ferry_Nuclear_Power_Plant

L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation



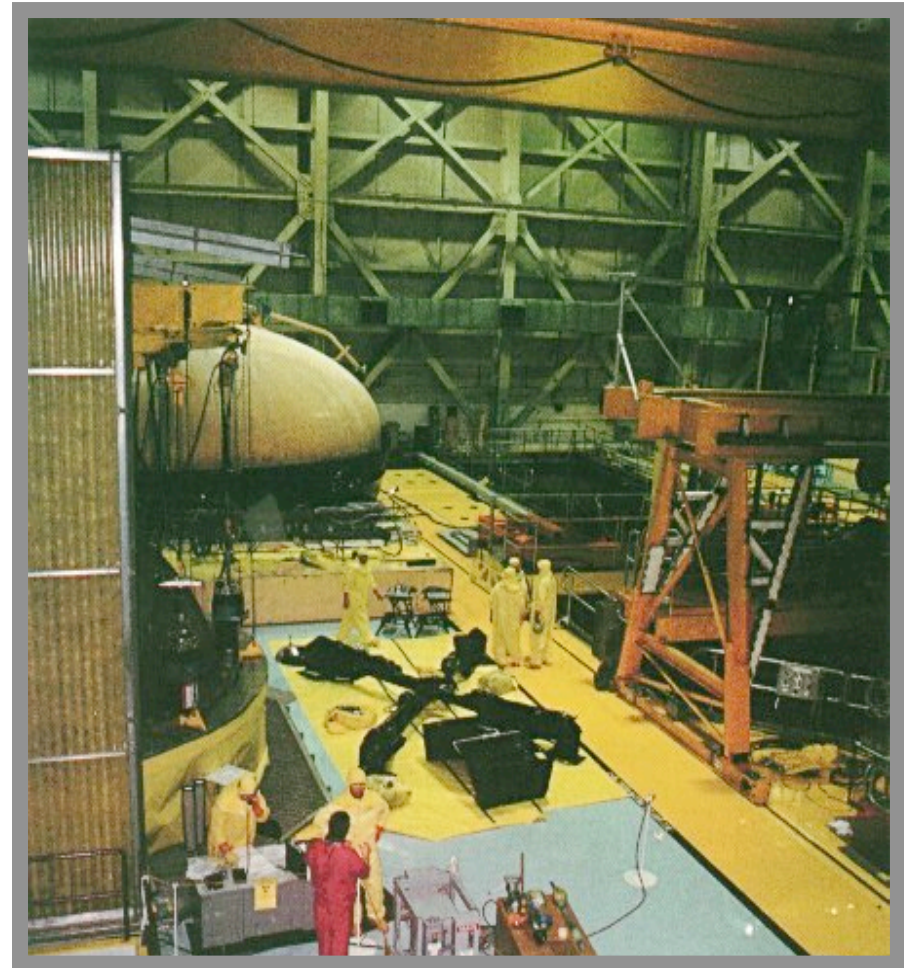
► Plancher de service



L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation

- ▶ Manutention de la coupole de fermeture de l'enceinte de confinement



L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation



▶ Plancher de service du réacteur
(construction en acier)

▶ Bâtiment réacteur en béton
(confinement secondaire)

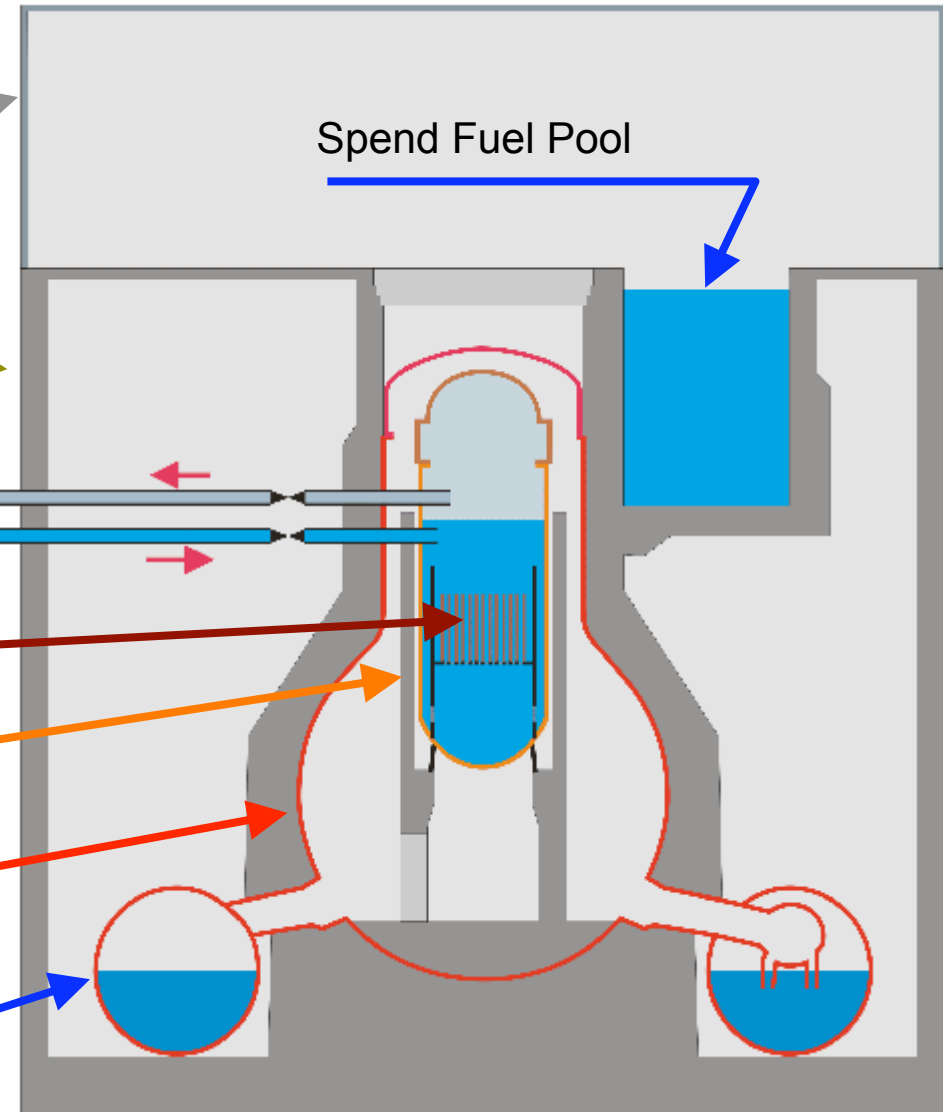
Ligne vapeur vive
Eau alimentaire

▶ Coeur du réacteur

▶ Cuve du réacteur

▶ Enceinte (Puits sec)

▶ Enceinte (Puits humide) /
Chambre de Condensation



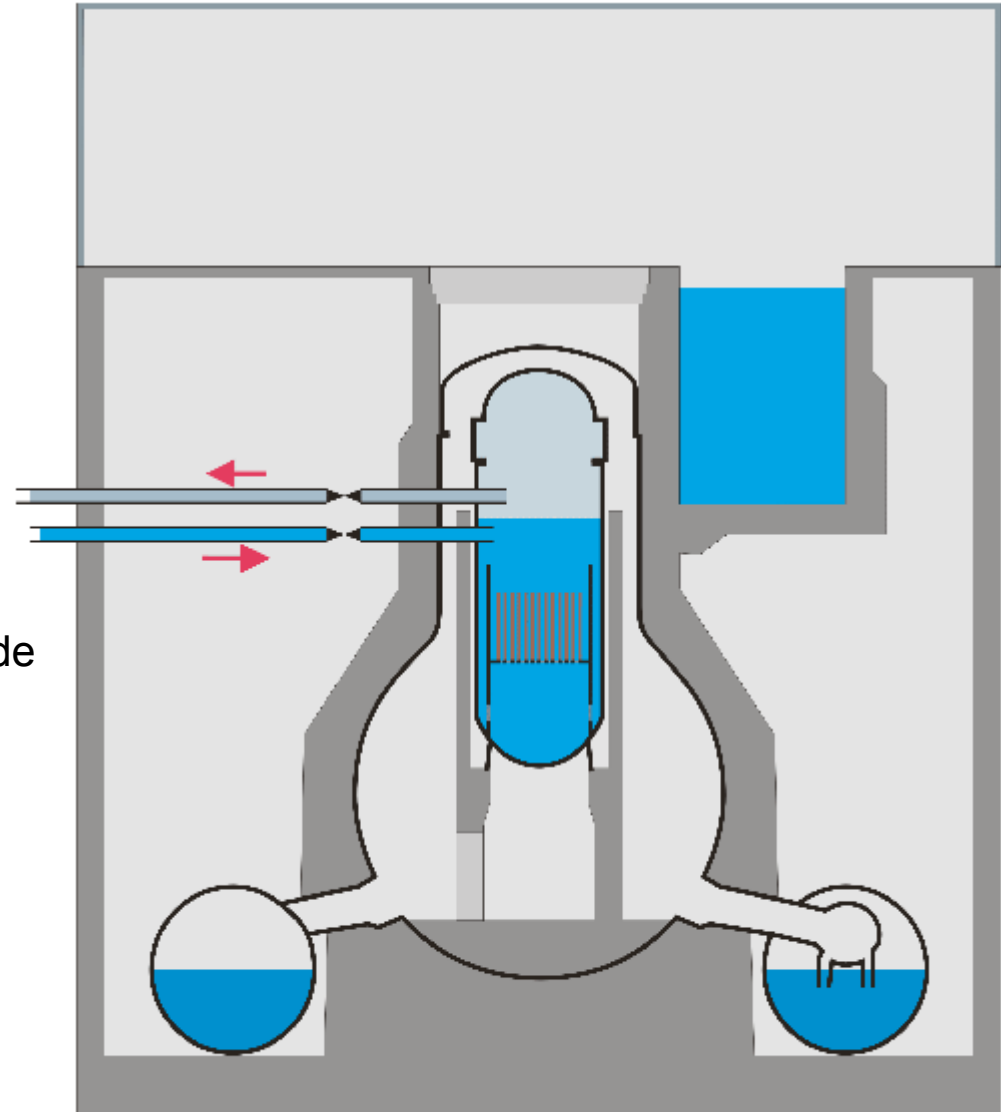
L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ 11.3.2011 14:46 - Séisme
 - ◆ Magnitude 9
 - ◆ Ecrroulement du réseau de transport d'électricité 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
 - After Scram ~6%
 - After 1 Day ~1%
 - After 5 Days ~0.5%



L'incident de Fukushima Daiichi

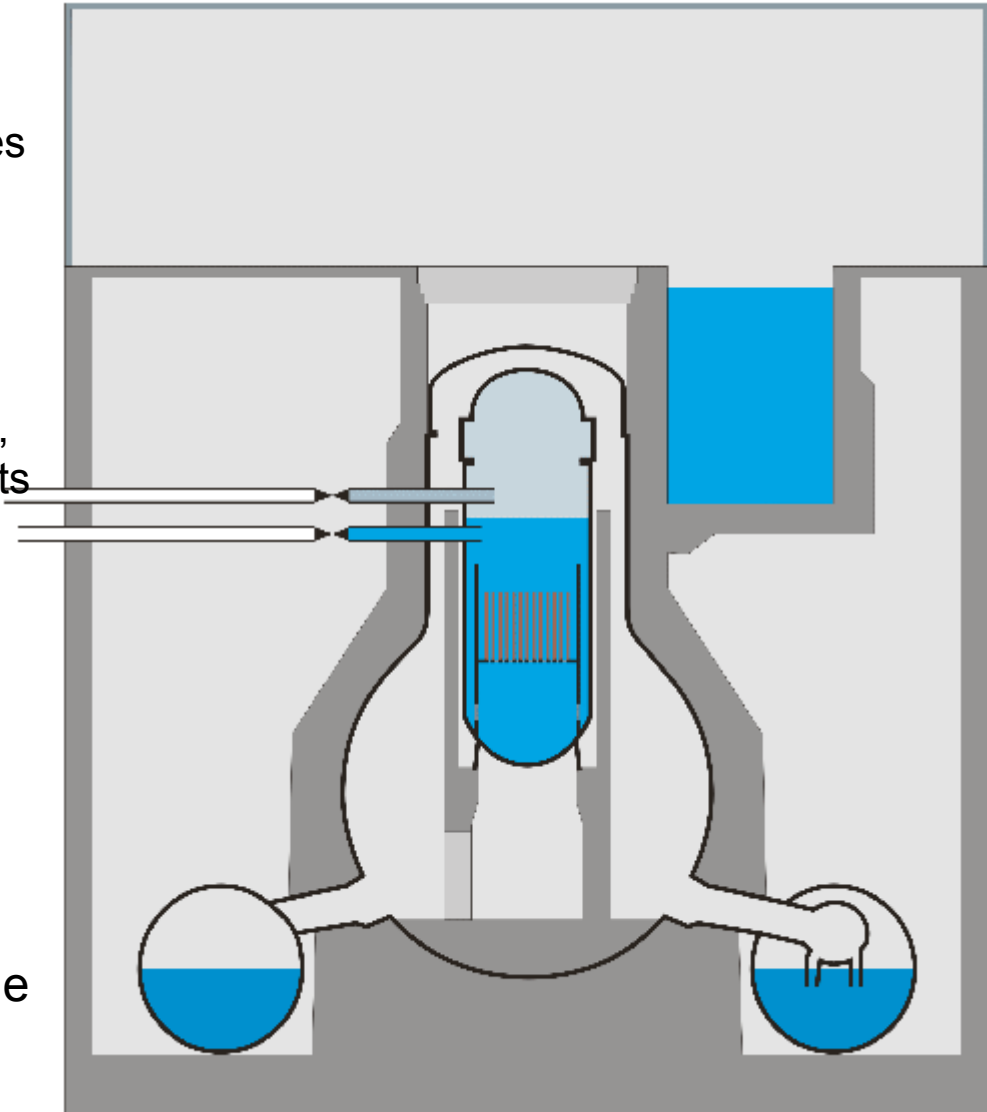
2. Progression de l'accident



- ▶ Isolement du confinement
 - ◆ Fermeture de toutes les traversées enceinte non importantes pour la sûreté
 - ◆ Séparation de la salle des machines
 - ◆ Si l'isolement enceinte fonctionne, un rejet massif précoce de produits de fissions est hautement improbable

- ▶ Démarrage des groupes diesels
 - ◆ Les systèmes d'injection de sécurité sont alimentés

- ▶ L'installation est dans un état stable et sûr



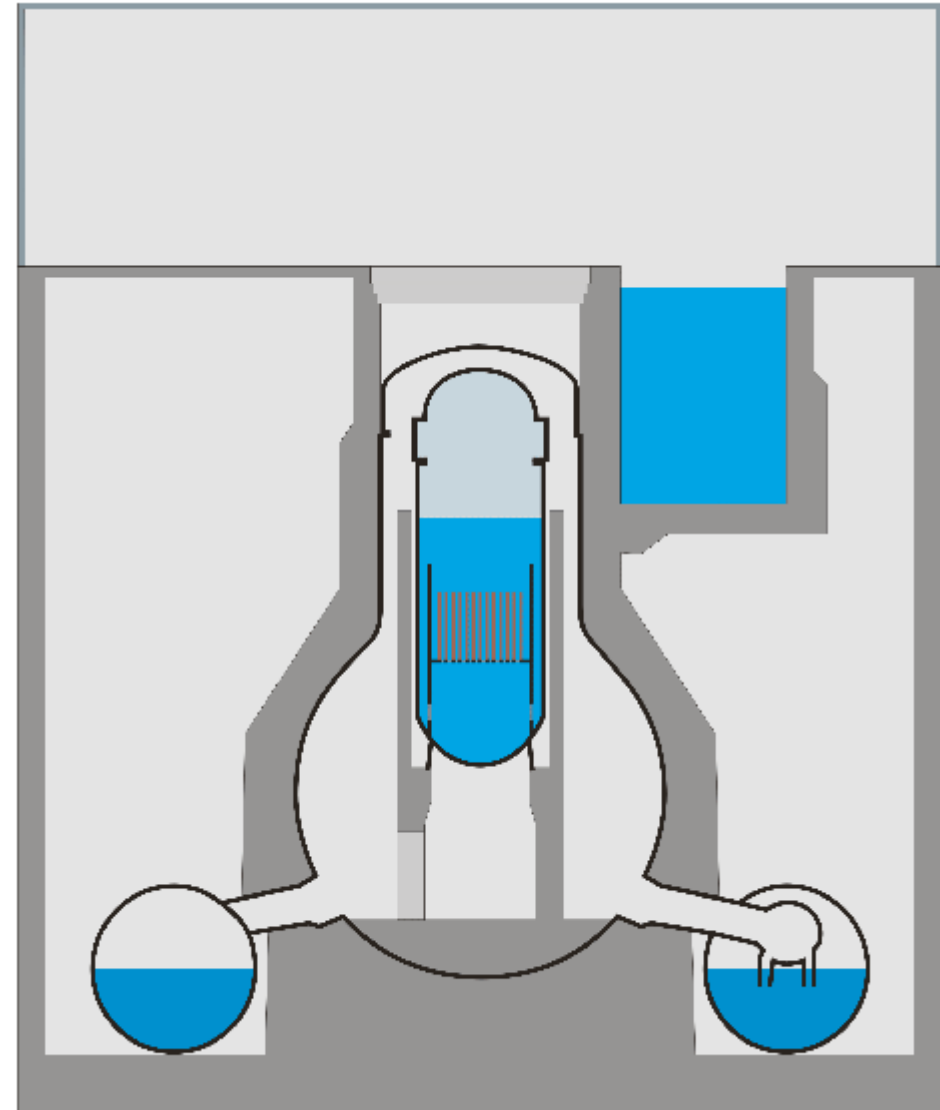
L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ 11.3. 15:41 Le tsunami frappe la centrale
 - ◆ Conception de la centrale pour une hauteur de tsunami de 6,5m
 - ◆ Hauteur réelle du Tsunami >7m
 - ◆ Inondation des
 - Groupes électrogènes diesel et/ou
 - Bâtiment essentiel d'eau de service pour le refroidissement des diesels

- ▶ Perte totale des alimentations électriques
 - ◆ Défaut de mode commun sur les sources électriques
 - ◆ Ne restent que les batteries
 - ◆ Défaillance de tous les systèmes de d'injection de sécurité sauf un



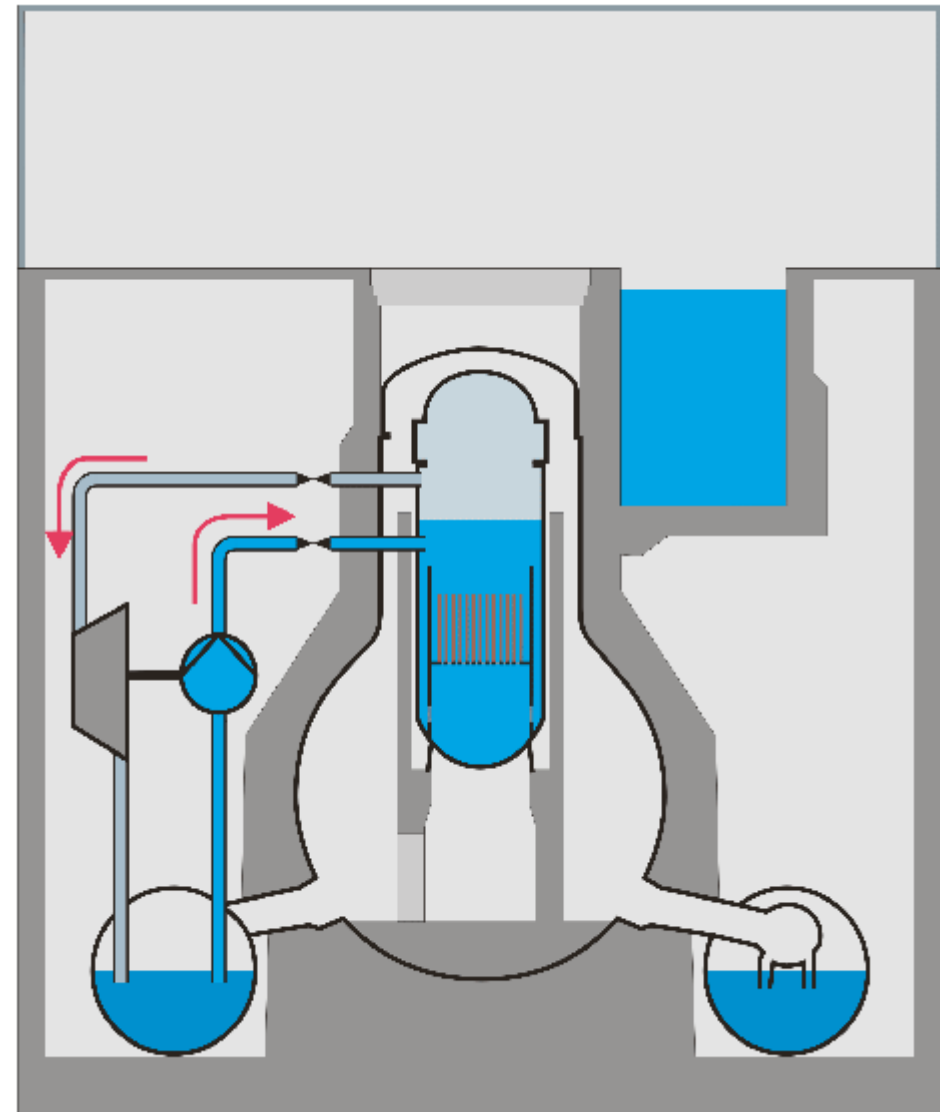
L'incident de Fukushima Daiichi

2. 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
 - La température dans le puits humide doit rester $< 100^{\circ}\text{C}$

- ▶ Comme il n'y a pas de retrait de chaleur dans le bâtiment, la pompe de refroidissement en mode isolé peut fonctionner indéfiniment.

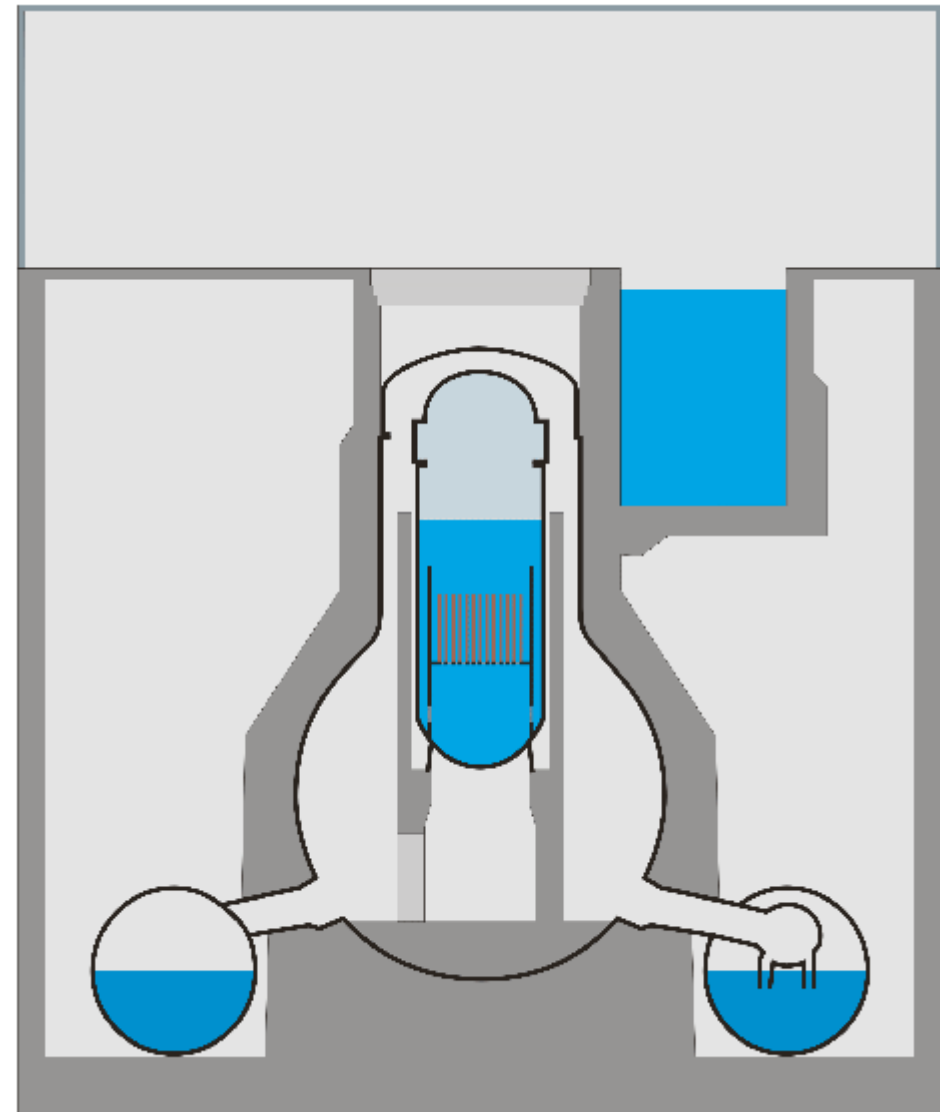


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 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

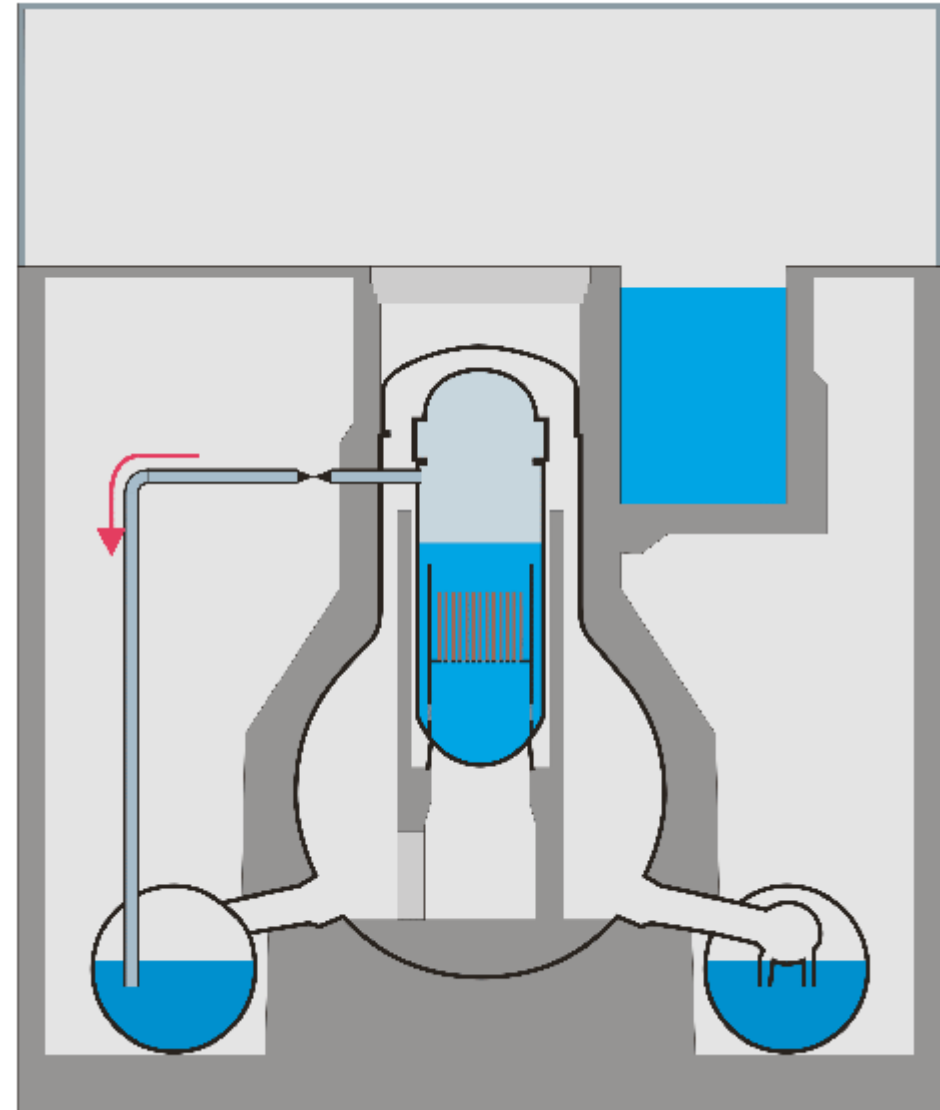


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 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

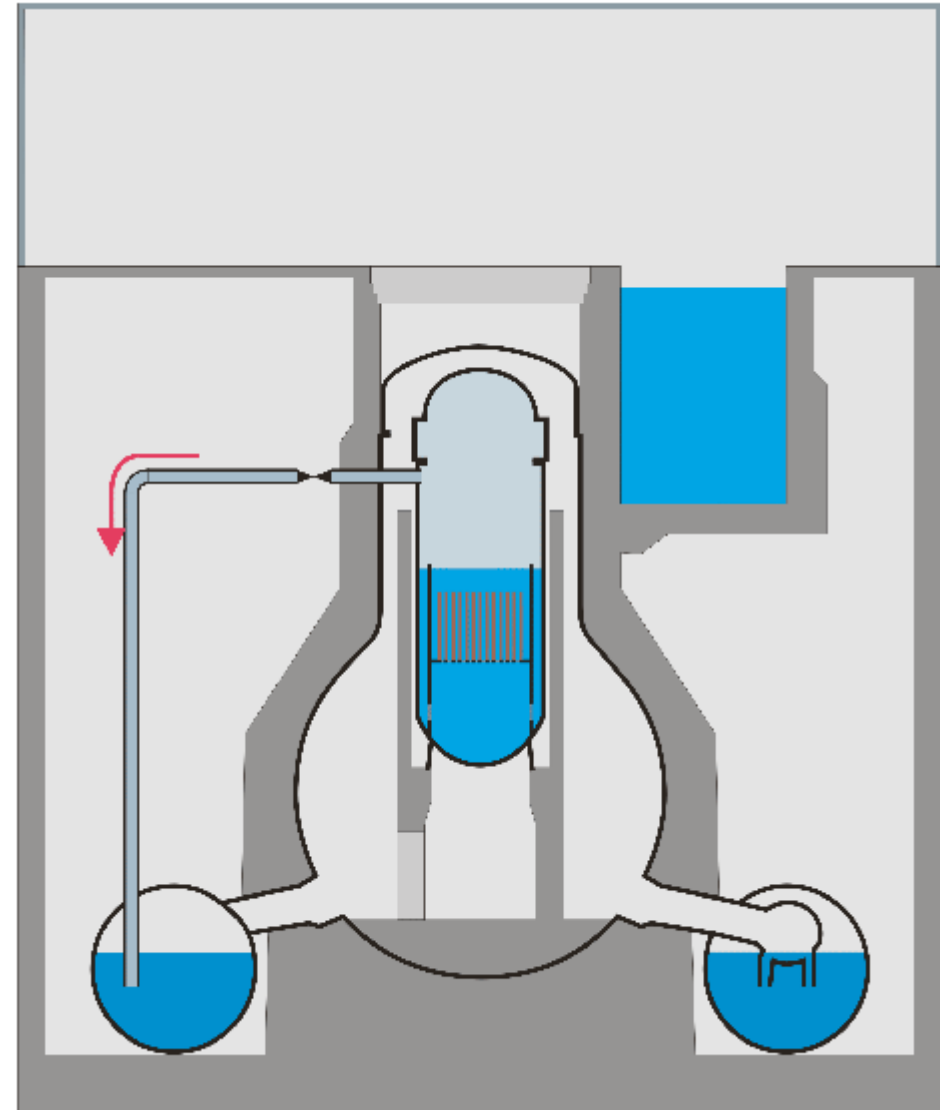


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 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

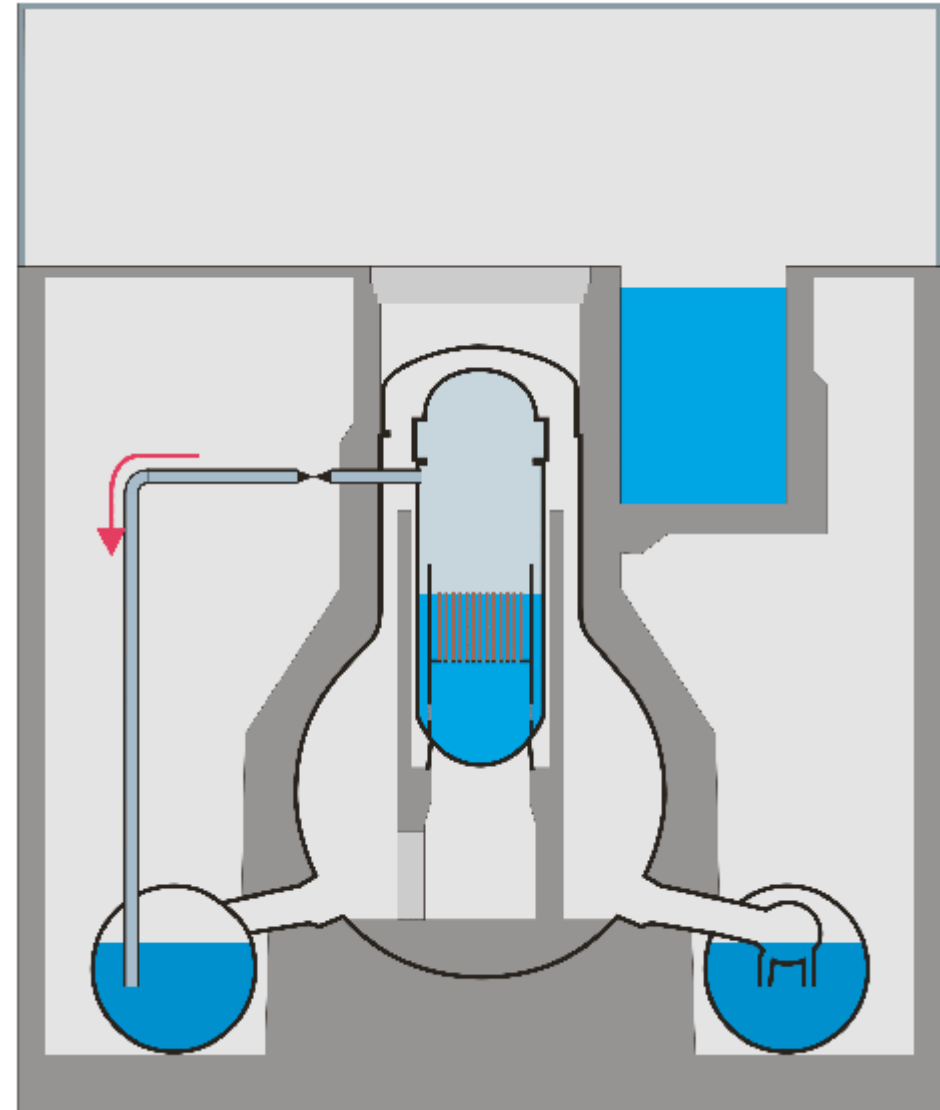


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 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

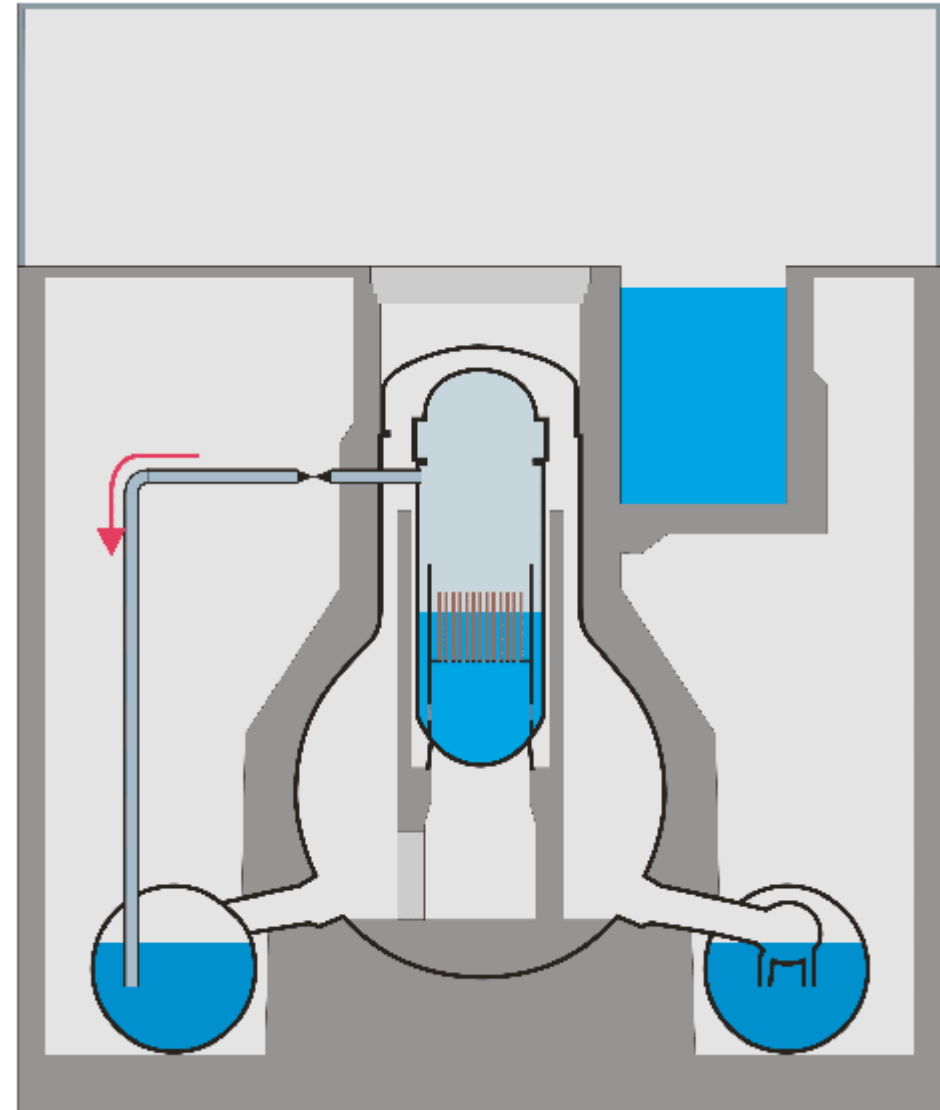


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13.3. 2:44 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

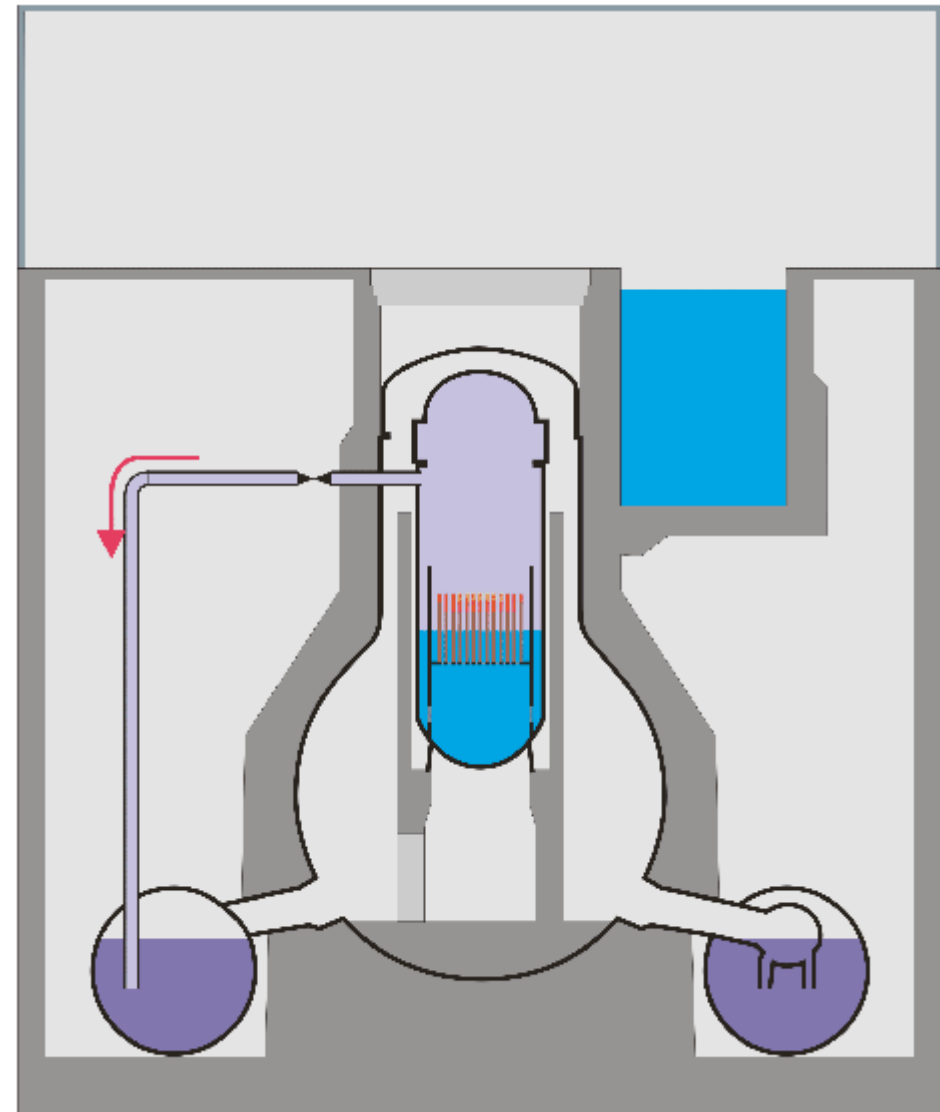


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ La mesure du niveau liquide indiquée ici est le niveau tassé. Le véritable niveau est supérieur du fait des bulles de vapeur présentes dans le liquide (émulsion)
- ▶ ~50% du coeur découvert
 - ◆ La température des gaines augmente, sans dégât significatif au coeur
- ▶ ~2/3 du coeur découvert
 - ◆ La température des gaines dépasse $\sim 900^{\circ}\text{C}$
 - ◆ Gonflement / rupture des gaines
 - ◆ Relâchement de produits de fission par les ruptures de gaines

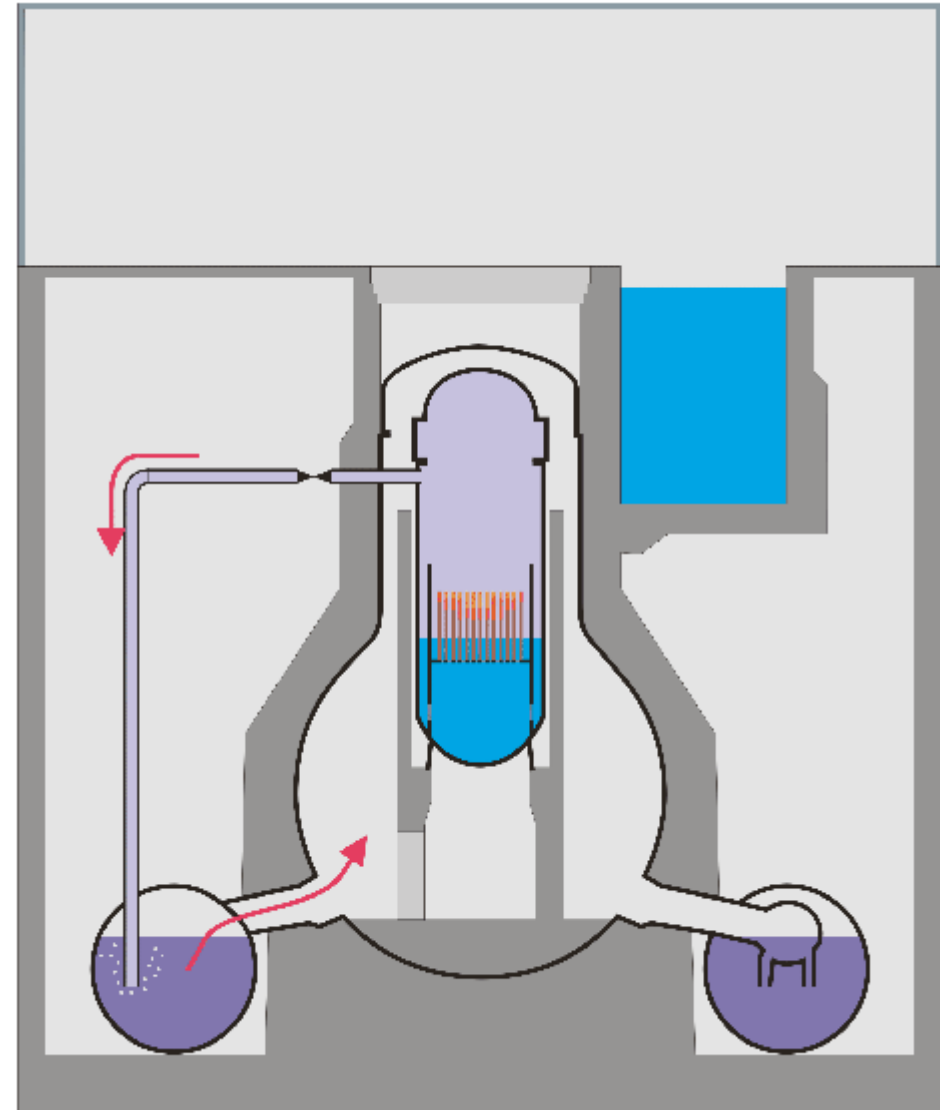


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ ~3/4 du coeur découvert
 - ◆ Les gaines dépassent ~1200°C
 - ◆ Le zirconium des gaines commence à brûler en atmosphère vapeur
 - ◆ $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$
 - ◆ La réaction exothermique chauffe encore plus le coeur
 - ◆ Production d'hydrogène
 - Tranche 1: 300-600kg
 - Tranches 2/3: 300-1000kg
 - ◆ L'hydrogène est poussé dans le puits humide, le puits humide se décharge dans le puits sec (soupape)



L'incident de Fukushima Daiichi

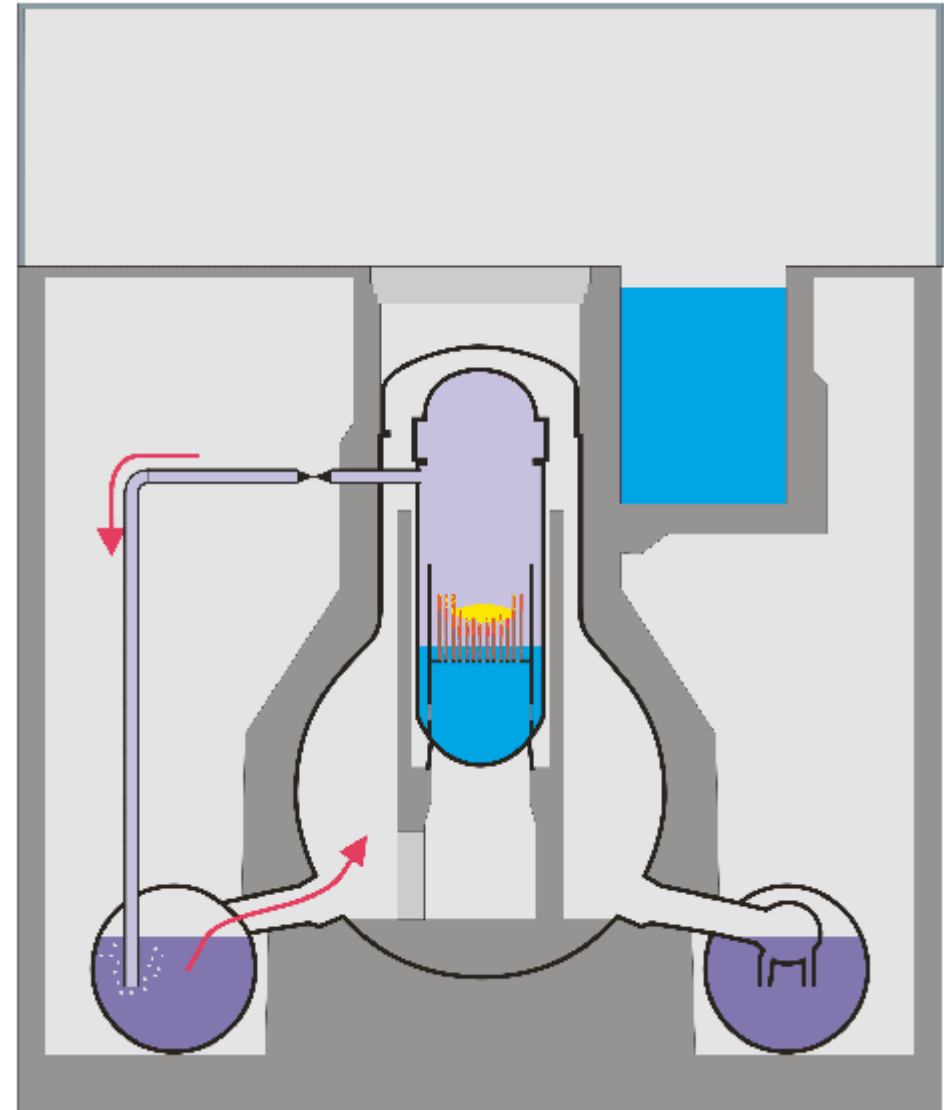
2. Progression de l'accident

- ▶ A ~1800°C [Tranches 1,2,3]
 - ◆ Fusion des gaines
 - ◆ Fusion de la structure des éléments

- ▶ A ~2500°C [Tranches 1,2]
 - ◆ Rupture des crayons combustibles
 - ◆ Couche de débris dans le coeur

- ▶ A ~2700°C [Tranche 1]
 - ◆ Fusion d'eutectiques Uranium-Zirconium

- ▶ La restauration de l'injection d'eau arrête l'accident sur les 3 tranches
 - ◆ TR 1: 12.3. 20:20 (27h sans eau)
 - ◆ TR 2: 14.3. 20:33 (7h sans eau)
 - ◆ TR 3: 13.3. 9:38 (7h sans eau)



L'incident de Fukushima Daiichi

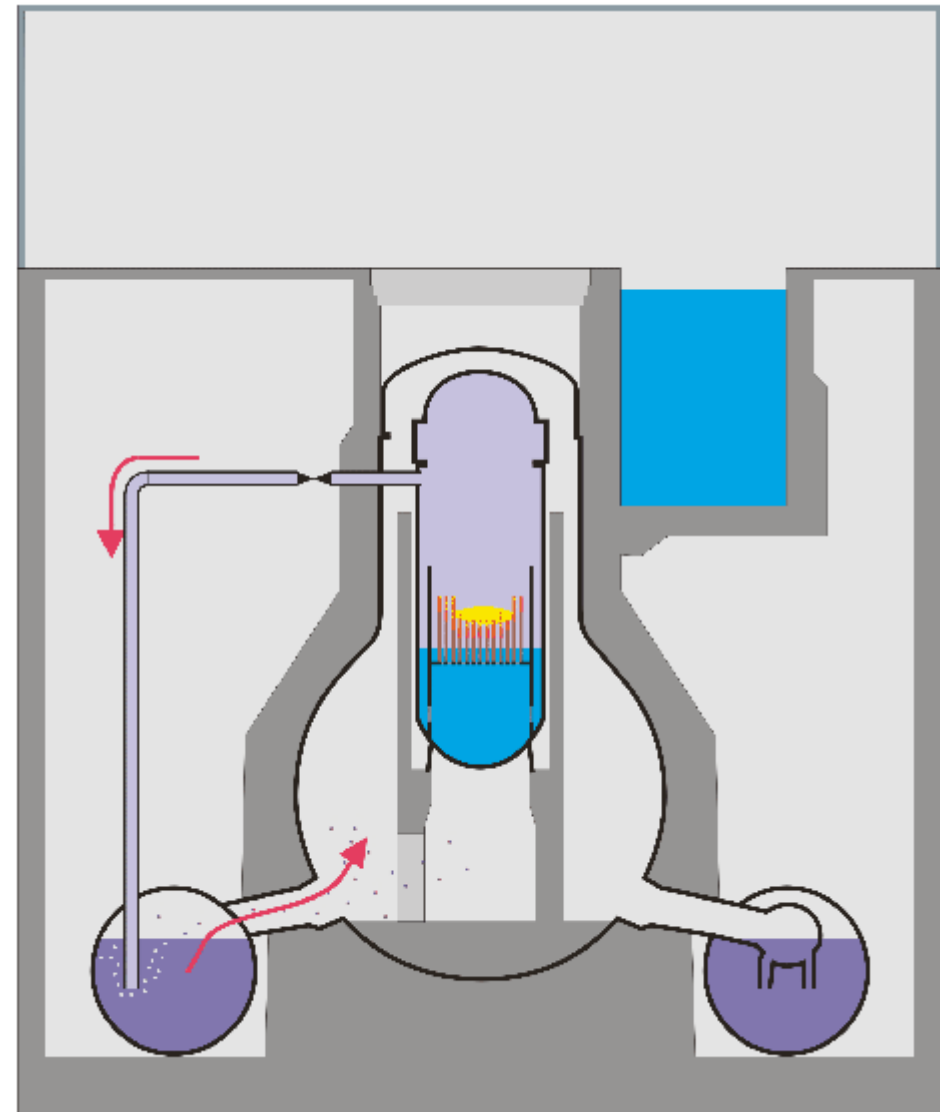
2. Progression de l'accident



- ▶ Relâchement de produits de fission durant la fusion
 - ◆ Xénon, Césium, Iode,...
 - ◆ Uranium/Plutonium reste en coeur
 - ◆ Des produits de fission se condensent sous forme d'aérosols entraînés par l'air

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

- ▶ Le xénon et le reste des aérosols pénètrent dans le puits sec
 - ◆ Le dépôt d'aérosols sur les surfaces favorise la décontamination de l'air



L'incident de Fukushima Daiichi

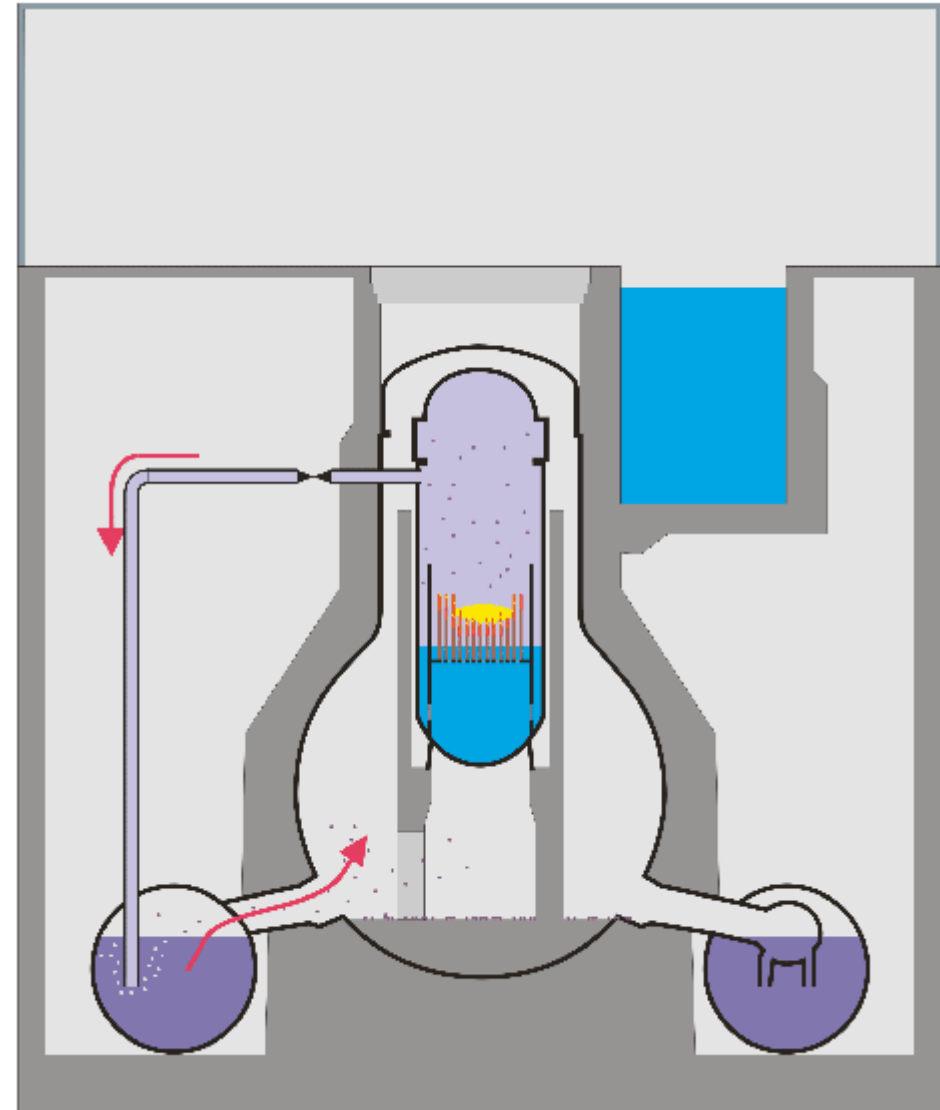
2. Progression de l'accident



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

- ▶ Pression réelle jusqu'à 8 bars
 - ◆ Gaz d'inertage normal (azote)
 - ◆ Hydrogène issu de l'oxydation du cœur
 - ◆ Chambre de condensation en ébullition (comme une cocotte)

- ▶ Dépressurisation de l'enceinte
 - ◆ Tranche 1 : 12.3. 4:00
 - ◆ Tranche 2 : 13.3 00:00
 - ◆ Tranche 3 : 13.3. 8.41



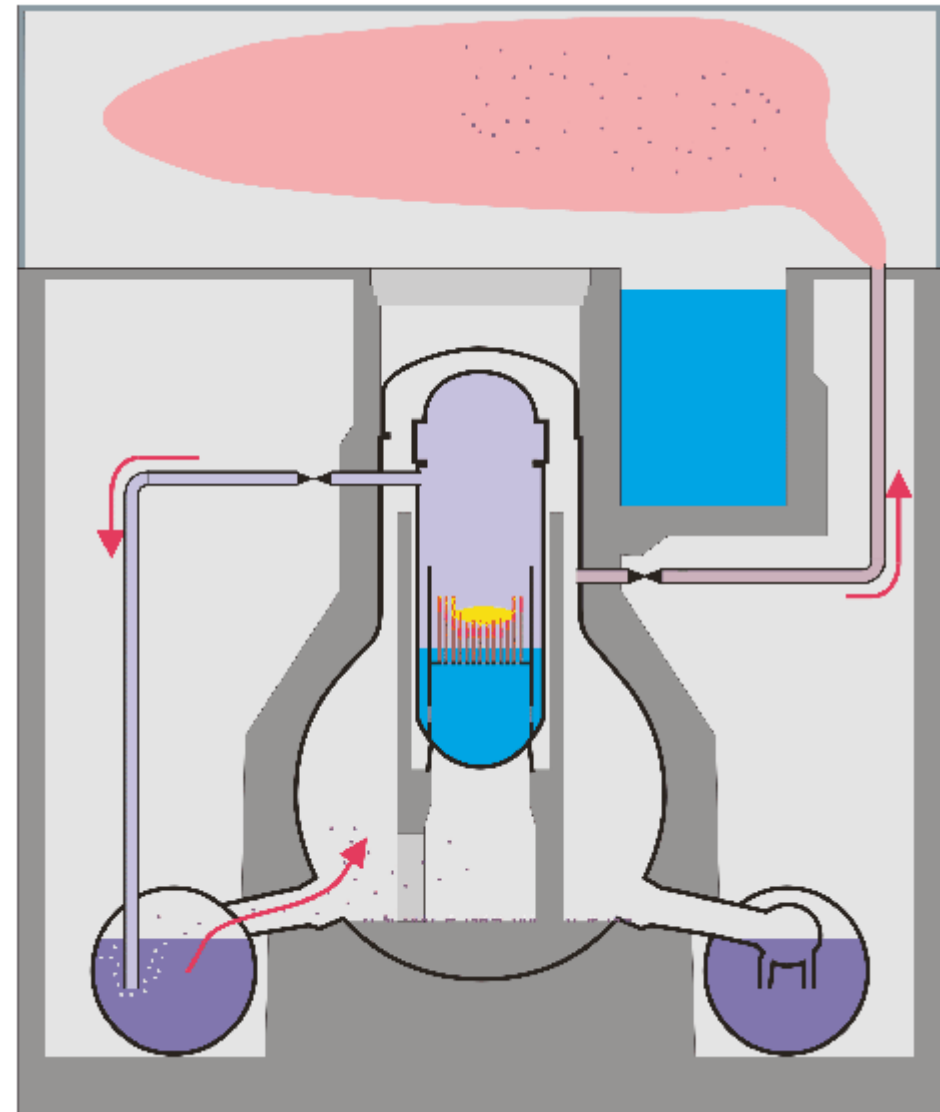
L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ Avantages et inconvénients de la dépressurisation de l'enceinte
 - ◆ Retire de l'énergie du bâtiment réacteur (seule solution restante)
 - ◆ Réduction de la pression à ~4 bar
 - ◆ Rejet de petites quantités d'aérosols (iode, césium ~0.1%)
 - ◆ Rejet de gaz rares
 - ◆ Rejet d'hydrogène

- ▶ Le mélange gazeux est rejeté vers le plancher de service du réacteur
 - ◆ L'hydrogène est inflammable

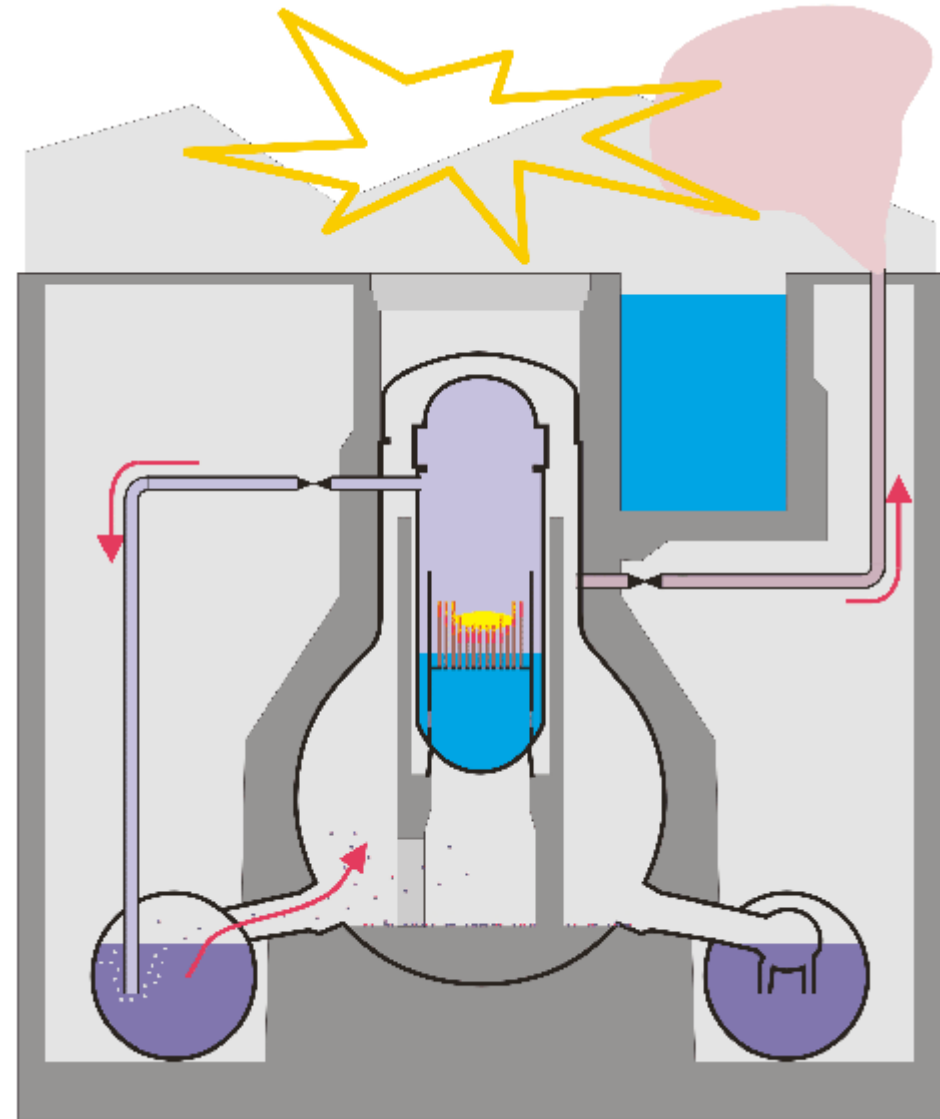


L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident

▶ Tranches 1 et 3

- ◆ L'hydrogène brûle au niveau du plancher de service du réacteur
- ◆ Destruction du bardage
- ◆ La bâtiment en béton renforcé semble intact
- ◆ Spectaculaire mais impact sûreté faible



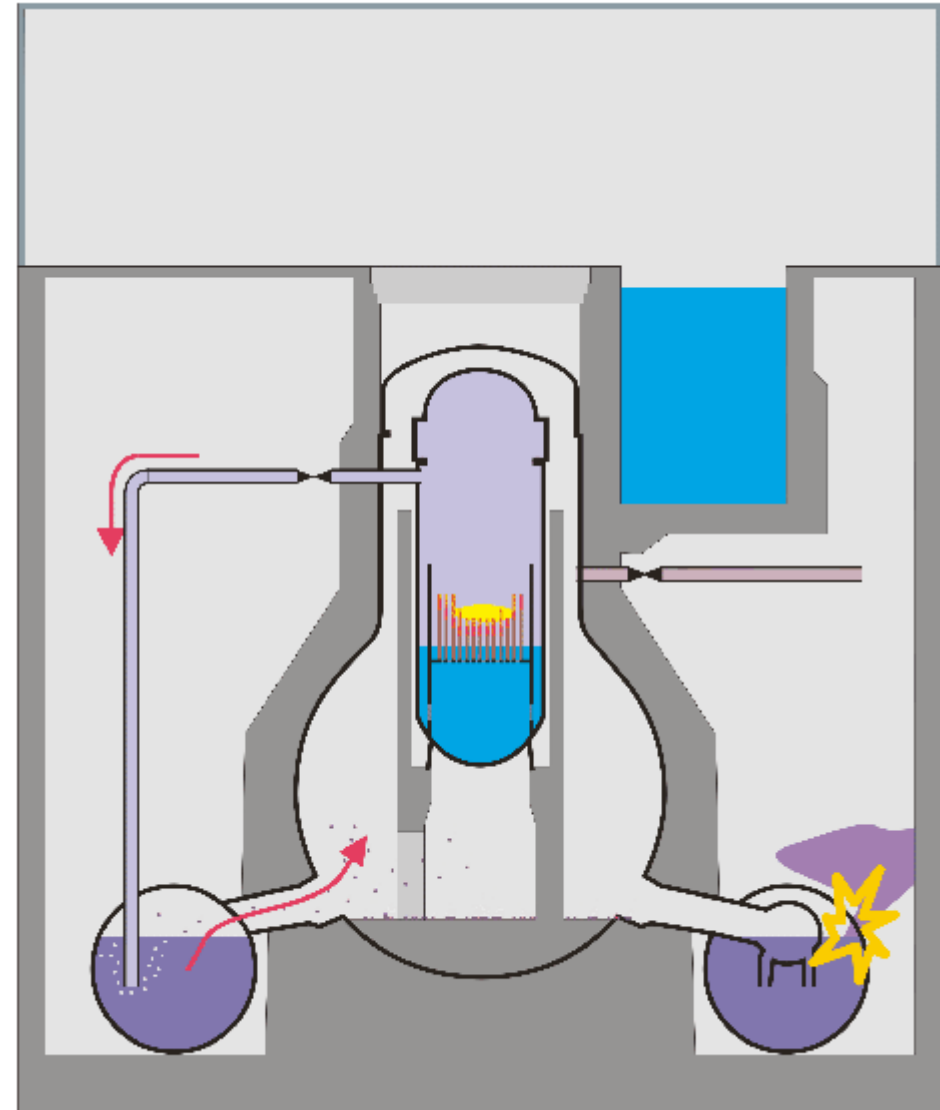
L'incident de Fukushima Daiichi

2. Progression de l'accident



- ▶ Tranche 2
 - ◆ L'hydrogène brûle dans le bâtiment réacteur
 - ◆ 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

- ▶ Aucune information claire sur le comportement différent de la tranche 2



L'incident de Fukushima Daiichi

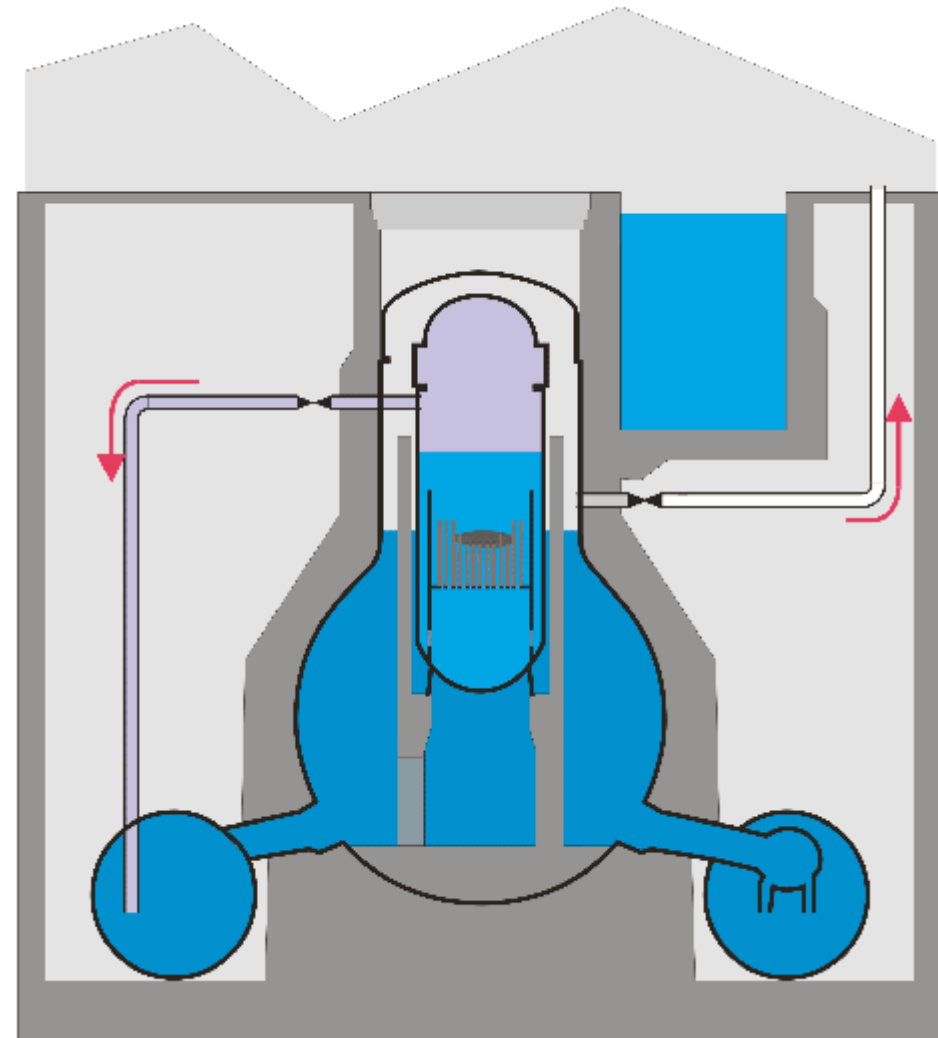
2. Progression de l'accident



- ▶ Etat actuel des réacteurs
 - ◆ Coeur endommagé en tranches 1,2,3
 - ◆ Bâtiments endommagés du fait d'incendies divers en tranches 1-4
 - ◆ Cuves du réacteur remplis avec des pompes mobiles sur toutes les tranches
 - ◆ A minima, enceinte de confinement remplie sur la tranche 1

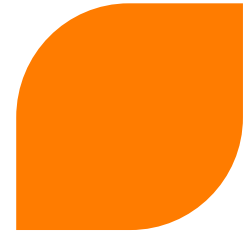
- ▶ Poursuite du refroidissement des réacteur via rejet vapeur à l'atmosphère

- ▶ Désormais, seuls de petits rejets de produits de fission peuvent être envisagés



L'incident de Fukushima Daiichi

3. Rejets radioactifs



► Directement sur le site

◆ Avant explosion de la tranche 2

- Inférieur à 2mSv / h
- Essentiellement du au rejet de gaz rares
- Balises côté ouest. La mesure peut être sous-estimée du fait du vent.

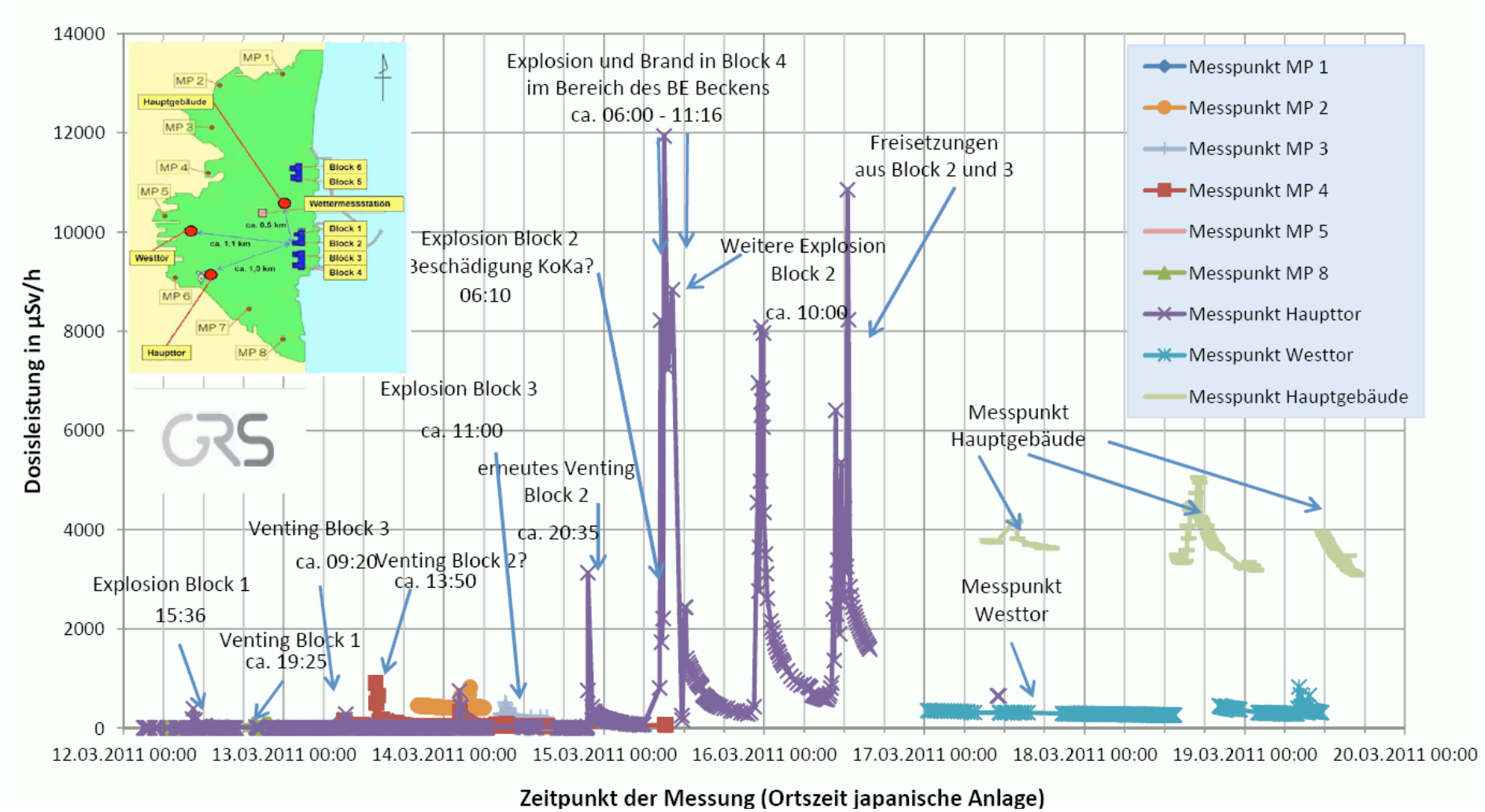
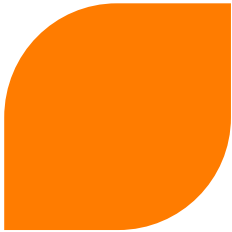
◆ Après explosion de la tranche 2 (endommagement de l'enceinte)

- Valeurs pics temporaires 12mSv / h
- (Origine pas complètement éclaircie)
- Valeurs pics locales sur le site jusqu'à 400mSv /h (rupture enceinte / fragments?)
- Dose stable actuelle sur le site à 5mSv /h
- Beaucoup plus à l'intérieur des bâtiments

◆ La limitation du temps d'exposition des intervenants est nécessaire

L'incident de Fukushima Daiichi

3. Rejets radioactifs



L'incident de Fukushima Daiichi

3. Rejets radioactifs

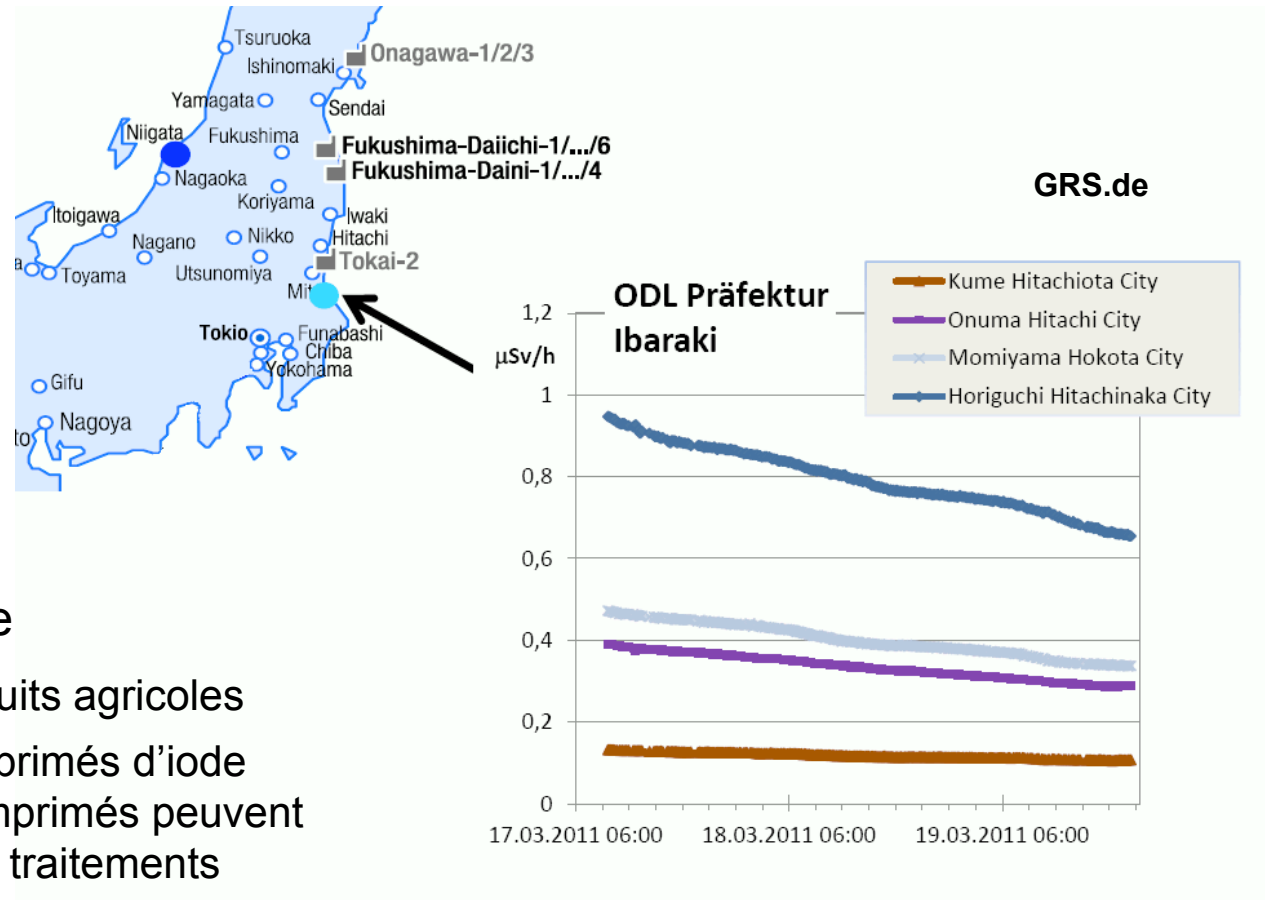
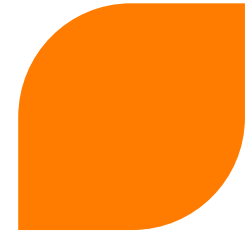


- ▶ En dehors du site
 - ◆ Comme les bâtiments réacteurs sont globalement intacts
=> rejet réduit d'aérosols (pas comme Tchernobyl)
 - ◆ Les produits de fission sont relâchés via la vapeur
=> augmentation des aérosols rapide, mais une large fraction tombe à proximité du site
 - ◆ La dose à l'extérieur du site est principalement due aux gaz rares
 - ◆ Transport / diffusion par le vent, baisse de la dose dans le temps
 - ◆ Pas de "retombée" des gaz rares, donc pas de forte contamination locale des sols

- ▶ ~20km autour du site
 - ◆ Les évacuations sont adaptées
 - ◆ Des débits de dose maximaux de 0,3mSv/h ont été mesurés sur de courtes périodes
 - ◆ Destruction de produits végétaux / animaux possible cette année
 - ◆ Evacuation permanente de la zone probablement non nécessaire

L'incident de Fukushima Daiichi

3. Rejets radioactifs



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

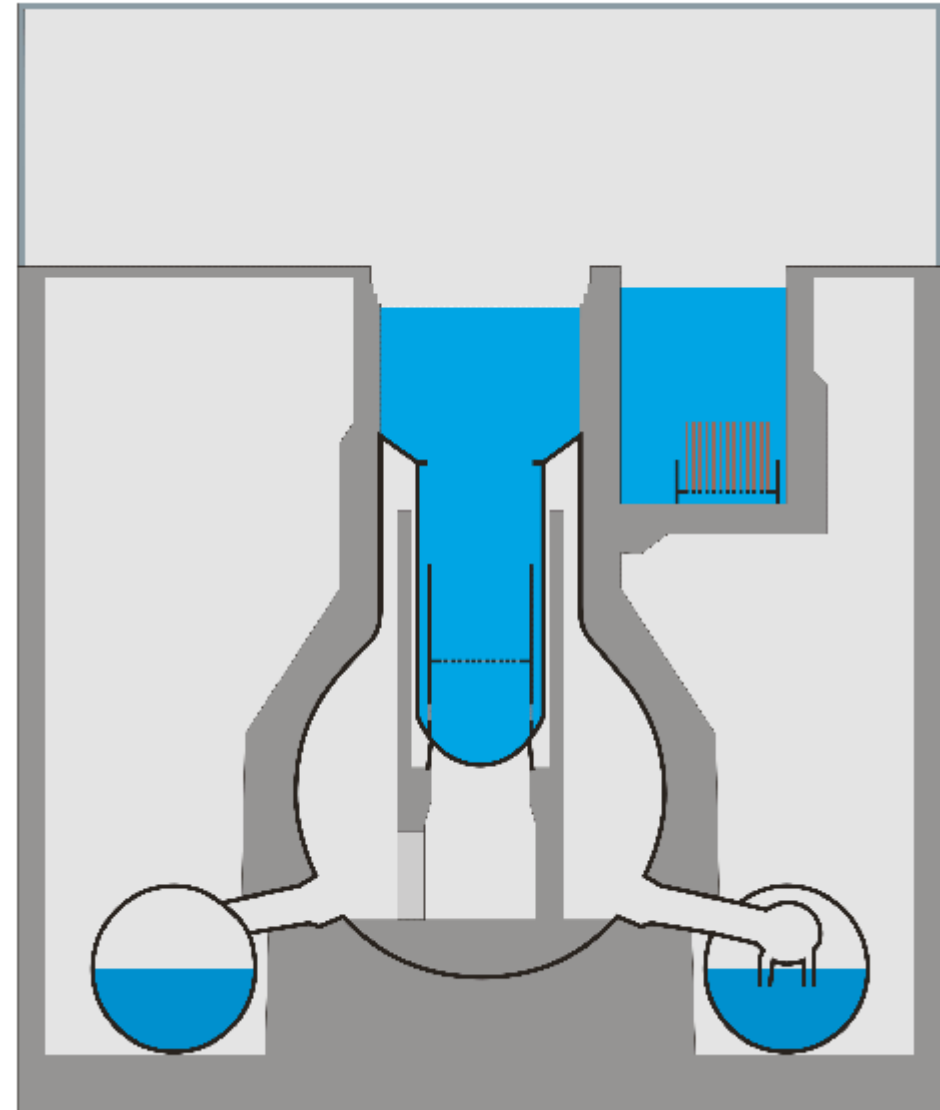
L'incident de Fukushima Daiichi

4. Piscines de désactivation



- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
 - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
 - ◆ Assèchement des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
 - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**

- ▶ Conséquences
 - ◆ Fusion du coeur en air
 - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
 - ◆ Rejets importants



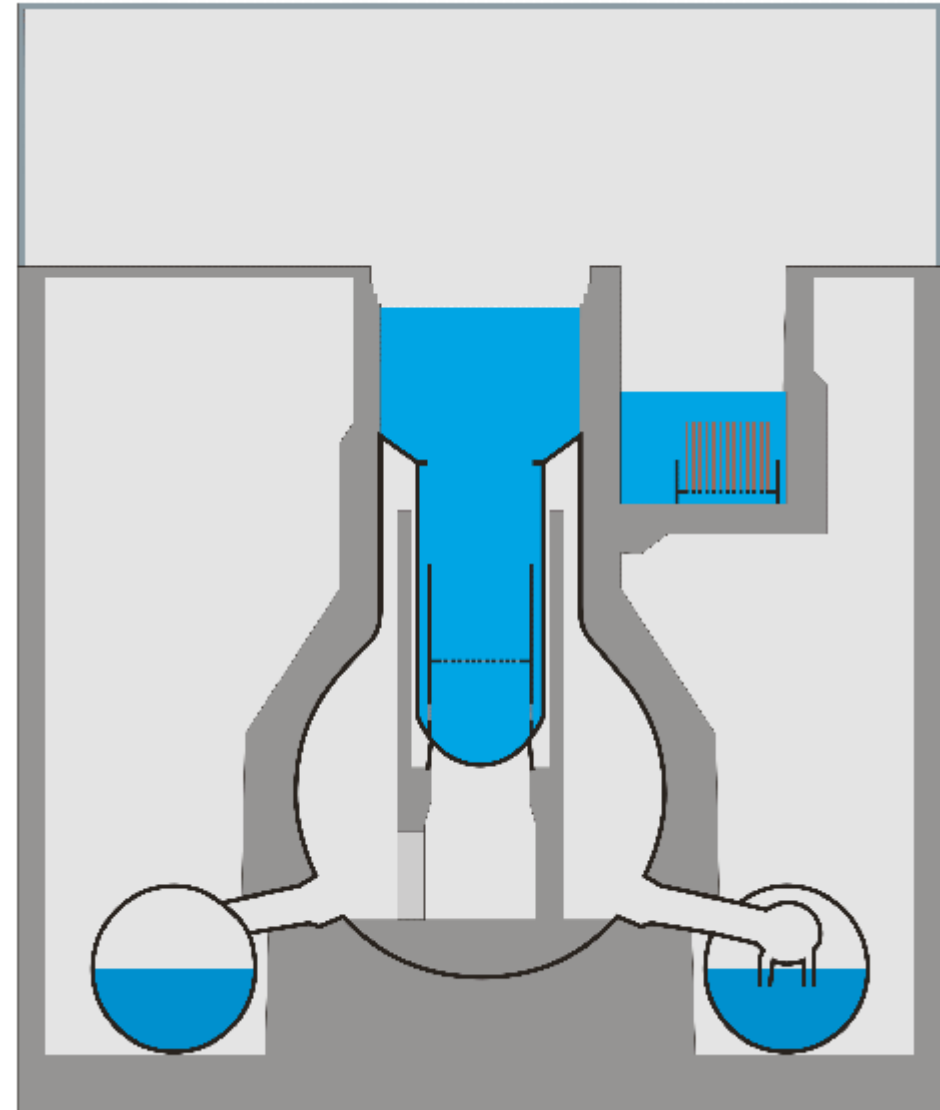
L'incident de Fukushima Daiichi

4. Piscines de désactivation



- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
 - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
 - ◆ Assèchement des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
 - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**

- ▶ Conséquences
 - ◆ Fusion du coeur en air
 - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
 - ◆ Rejets importants



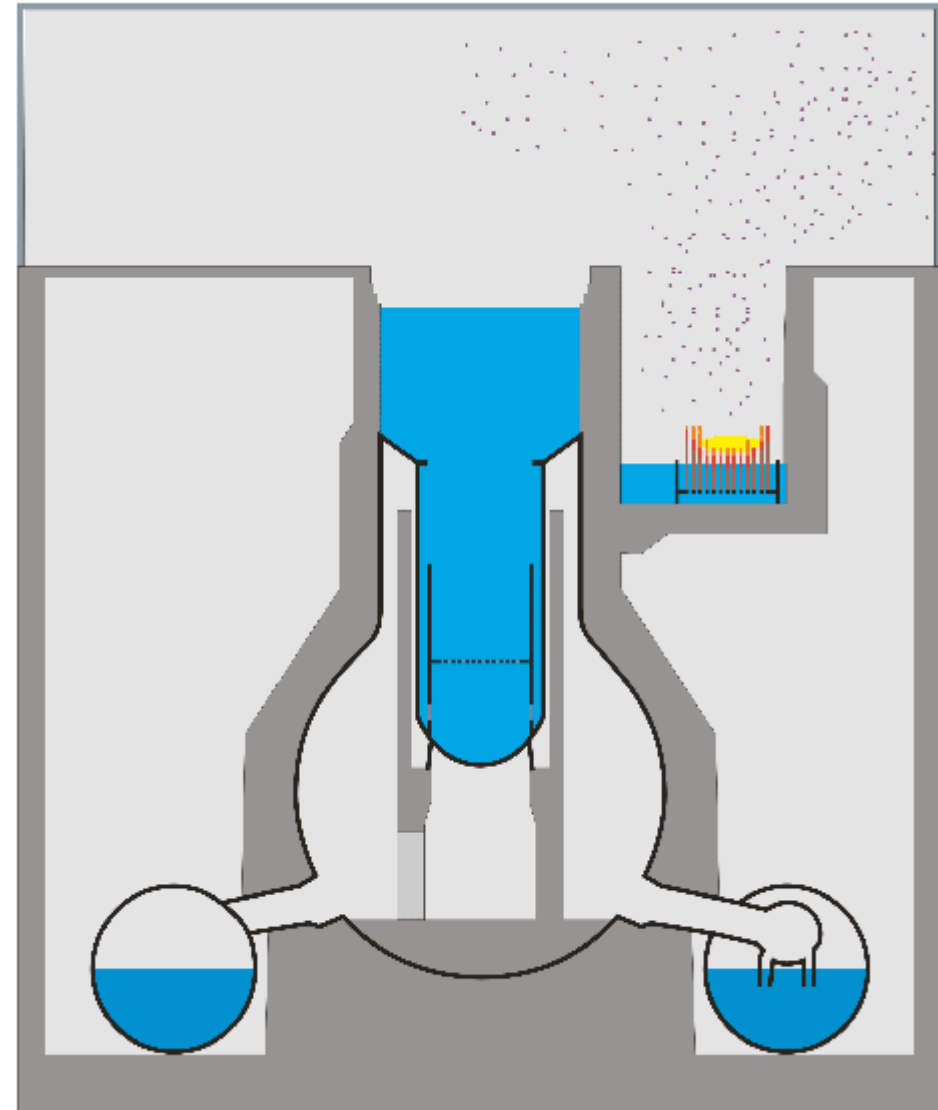
L'incident de Fukushima Daiichi

4. Piscines de désactivation



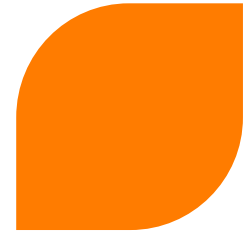
- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
 - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
 - ◆ Assèchement des piscines
 - Tranche 4: en 10 jours
 - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
 - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**

- ▶ Conséquences
 - ◆ Fusion du coeur en air
 - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
 - ◆ Rejets importants
 - ◆ **Il n'est pas clair actuellement s'il y a déjà eu des rejets depuis les piscines**



L'incident de Fukushima Daiichi

5. Sources d'information



▶ Bonnes sources d'information

- ◆ Gesellschaft für Reaktorsicherheit [GRS.de]
 - A jour
 - Publication des données radiologiques
 - Traduction en allemand des pages web en japonais ou anglais

- ◆ Japan Atomic Industrial Forum [jaif.or.jp/english/]
 - Etat courant des tranches
 - Des mesures issues des réacteurs (pression et niveau)

- ◆ Tokyo Electric Power Company [Tepco.co.jp]
 - Etat des travaux de réparation
 - Victimes

▶ Il est probable que trop peu d'information soit diffusée par TEPCO, l'exploitant de la centrale