

Après Fukushima...

Le nucléaire: un choix raisonnable?

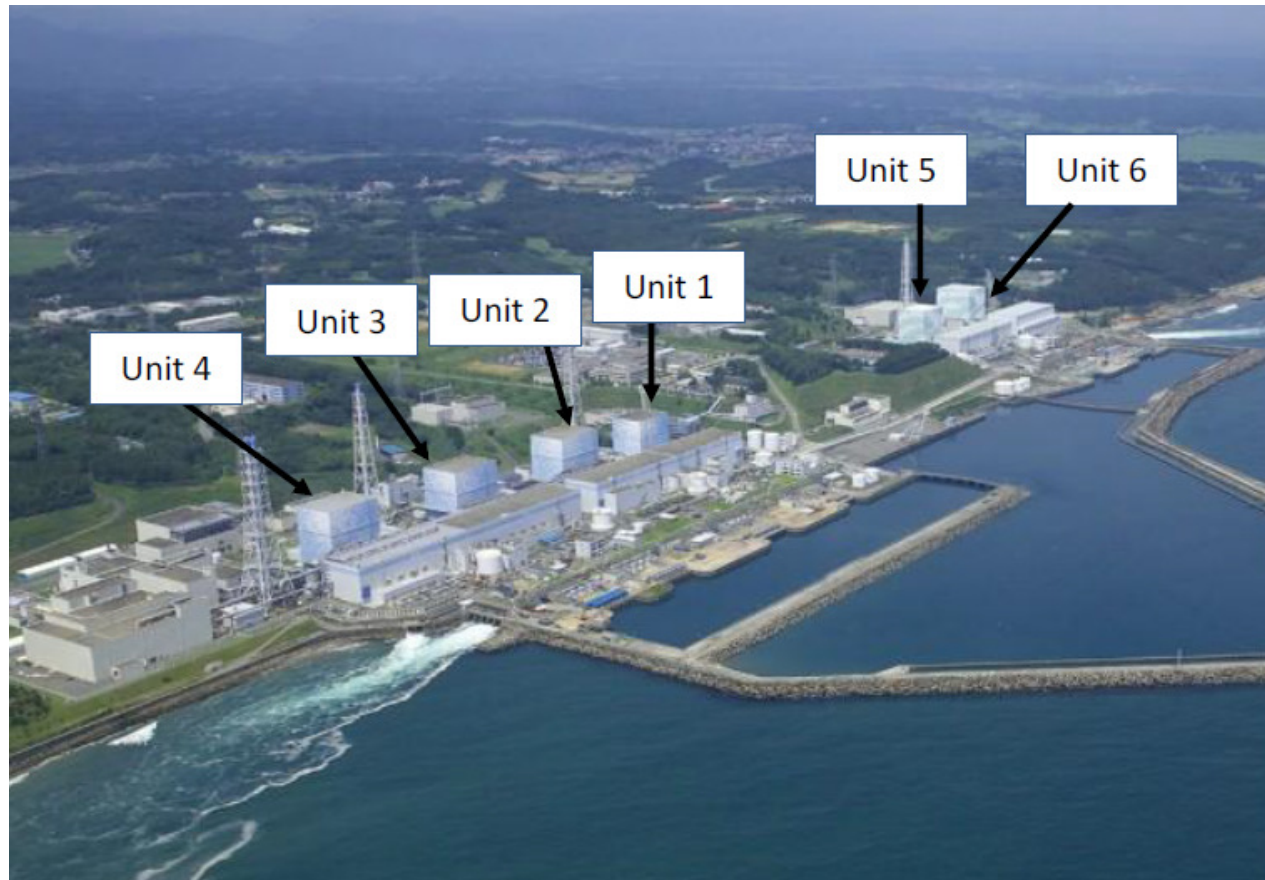
Michel Simon - Président SFEN RAL



La SFEN : C'est quoi?

- « Société Française d'Énergie Nucléaire »
- Association 1901, réunissant des personnes 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

L'accident de Fukushima Daiichi



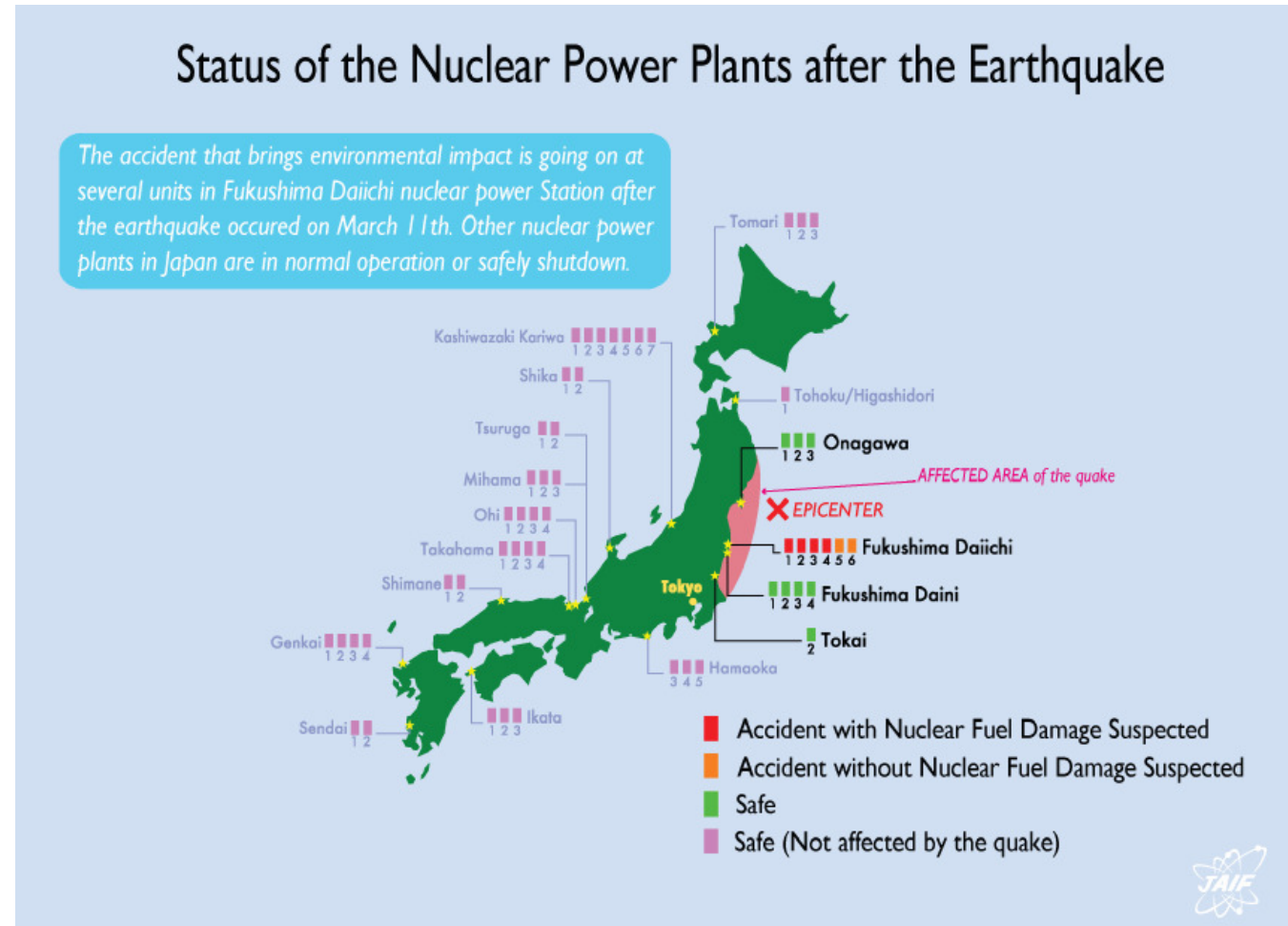
Etat des tranches nucléaires japonaises après le séisme : 11 mars 14h46

✓ 17 centrales

✓ 55 réacteurs

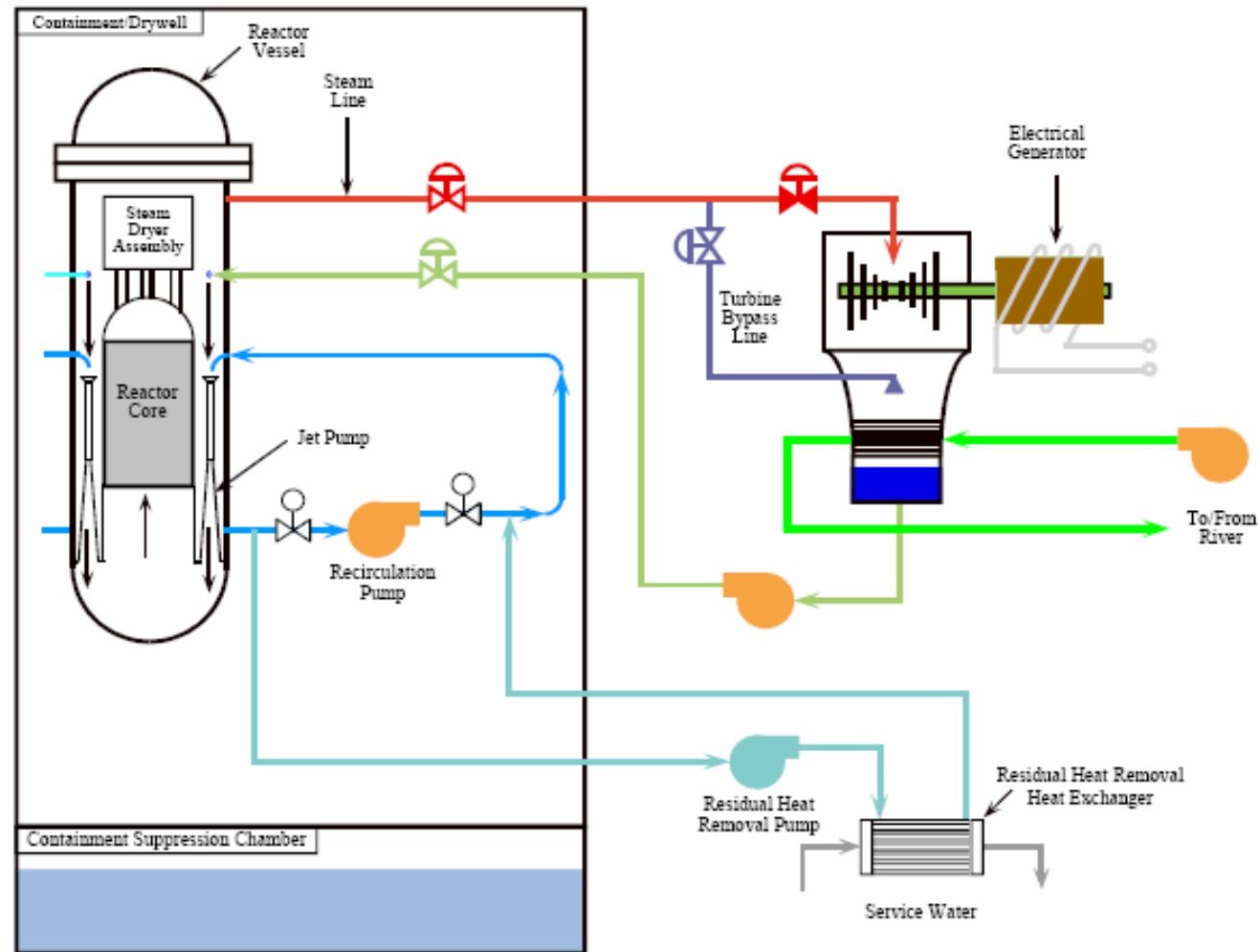
- 34 REB
- 21 REP

fournissant ~ 26%
de l'électricité



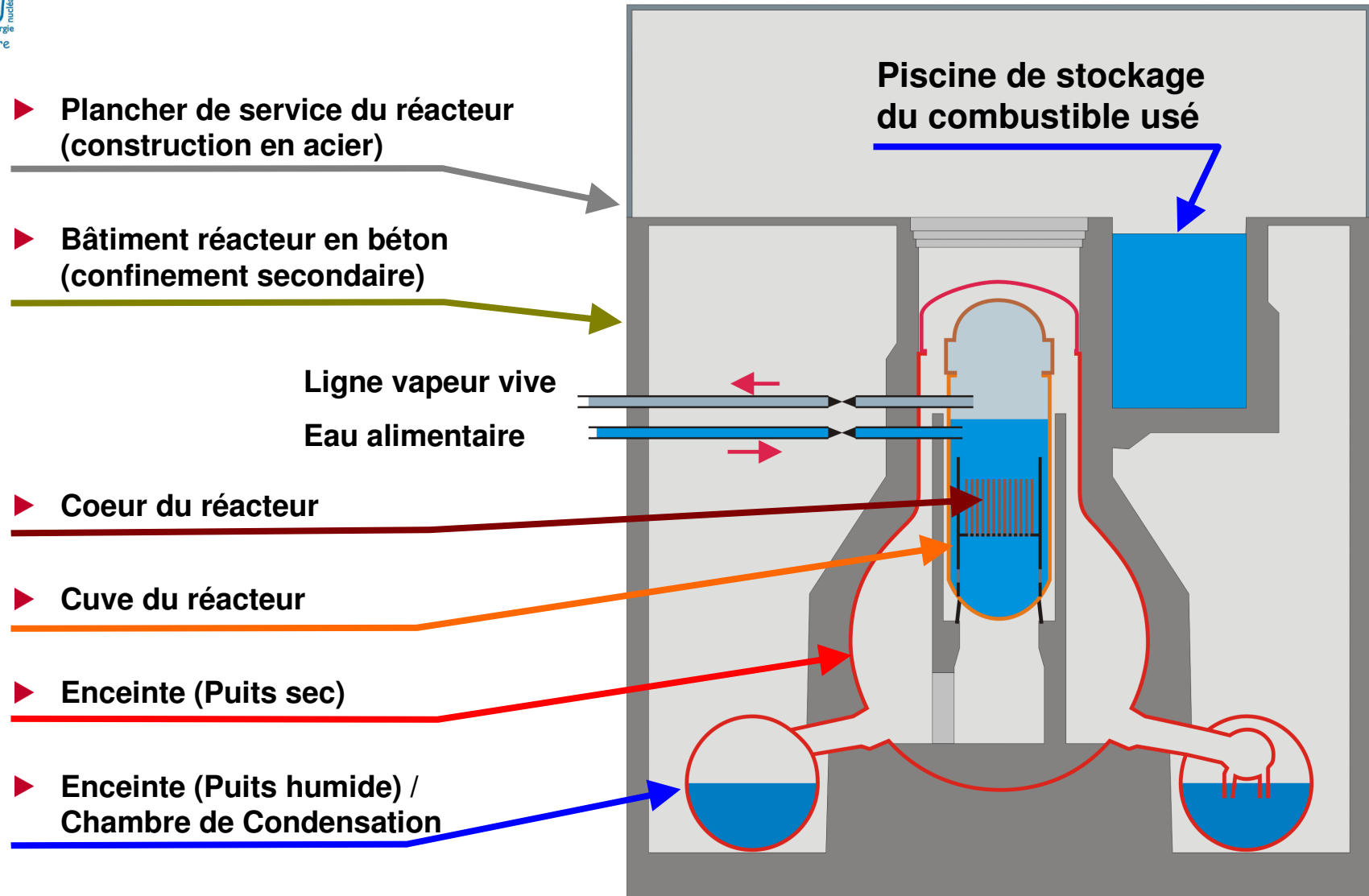
Présentation générale des REB

Schéma de principe



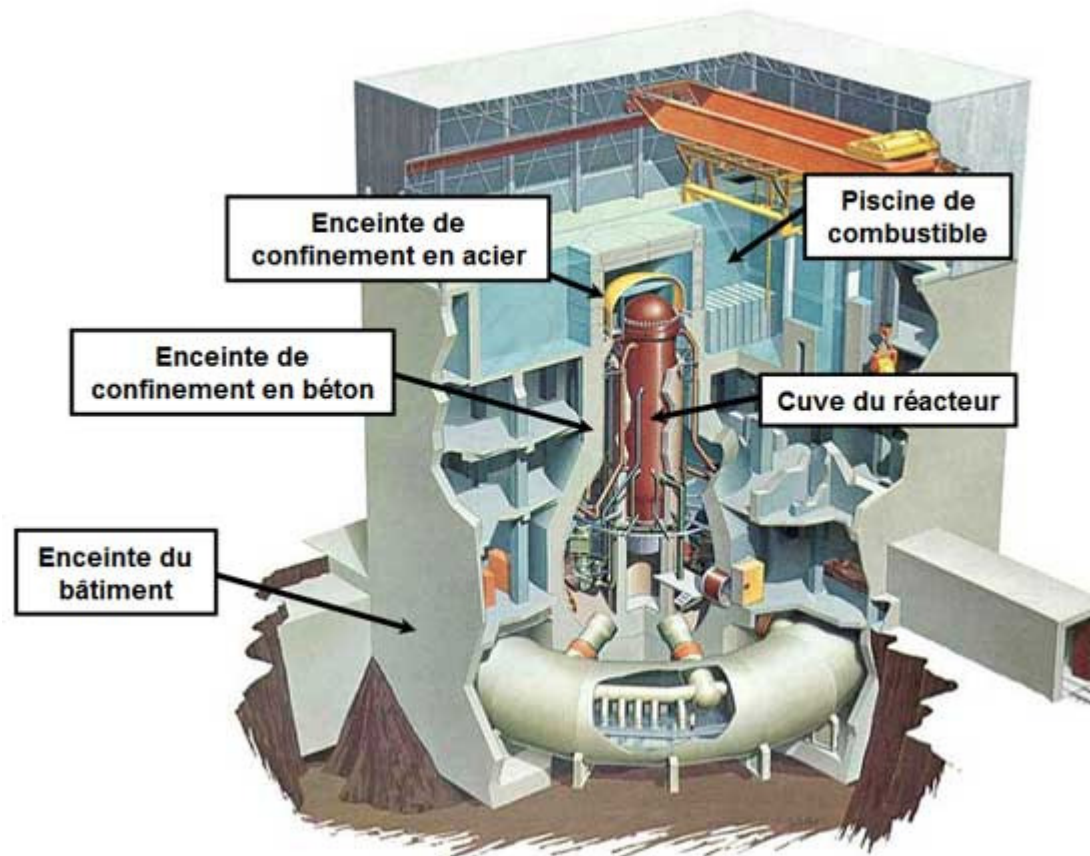
L'accident de Fukushima Daiichi

Conception de l'installation



Présentation générale des REB

Le confinement



L'accident de Fukushima Daiichi

Conception de l'installation

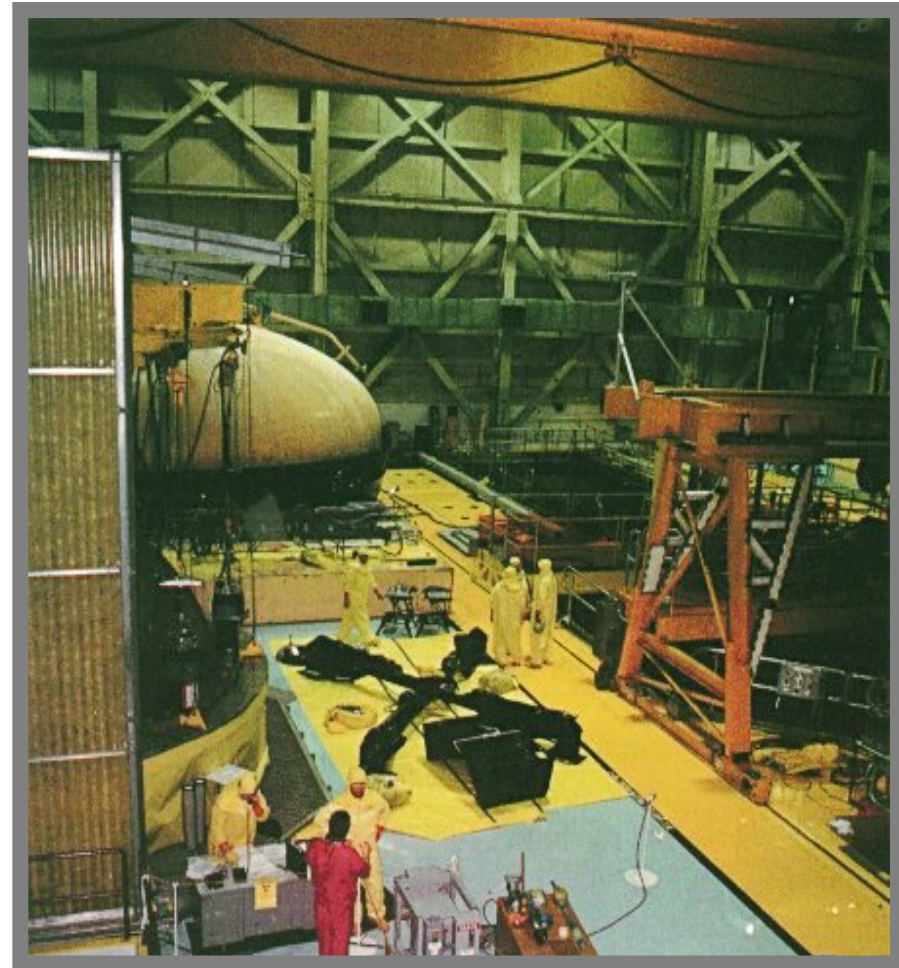
► Plancher de service



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

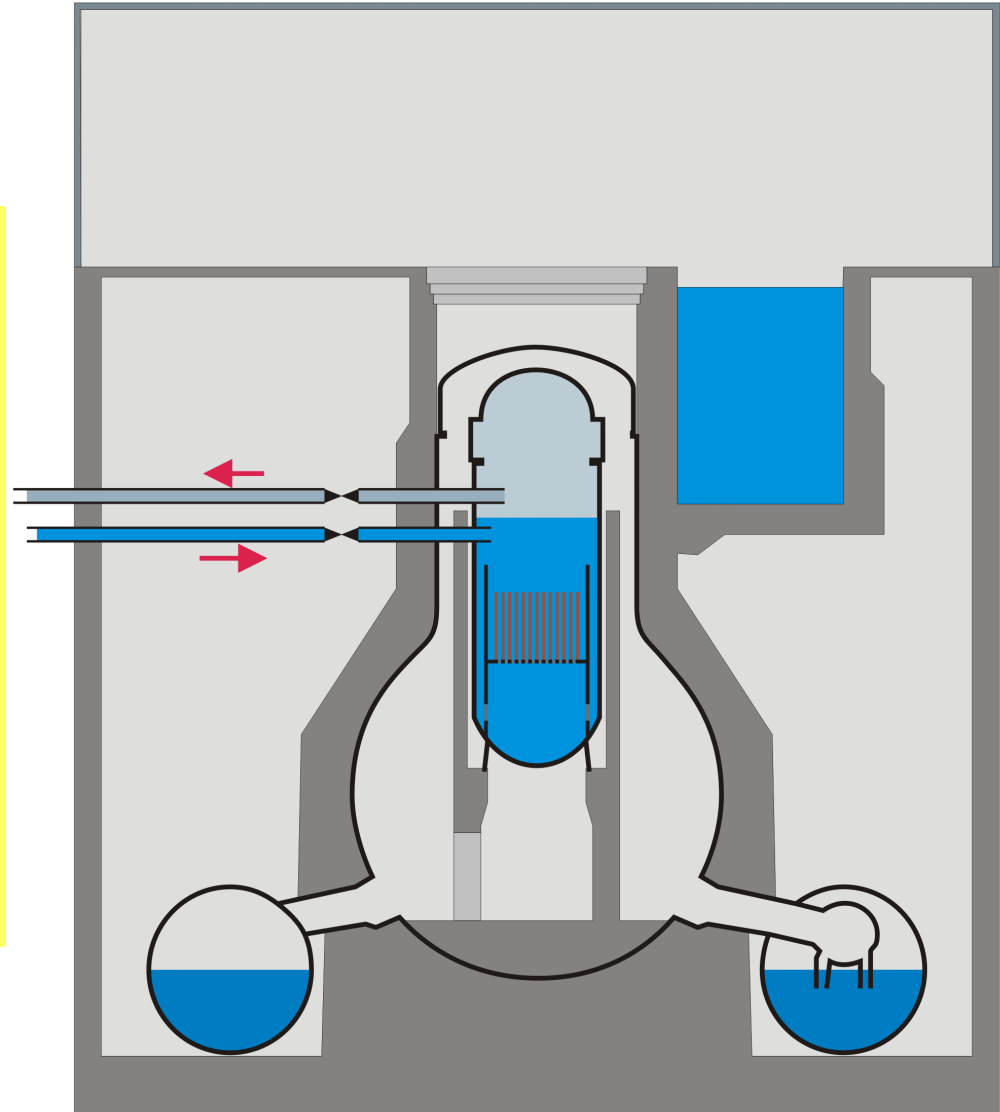
Progression de l'accident

► 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



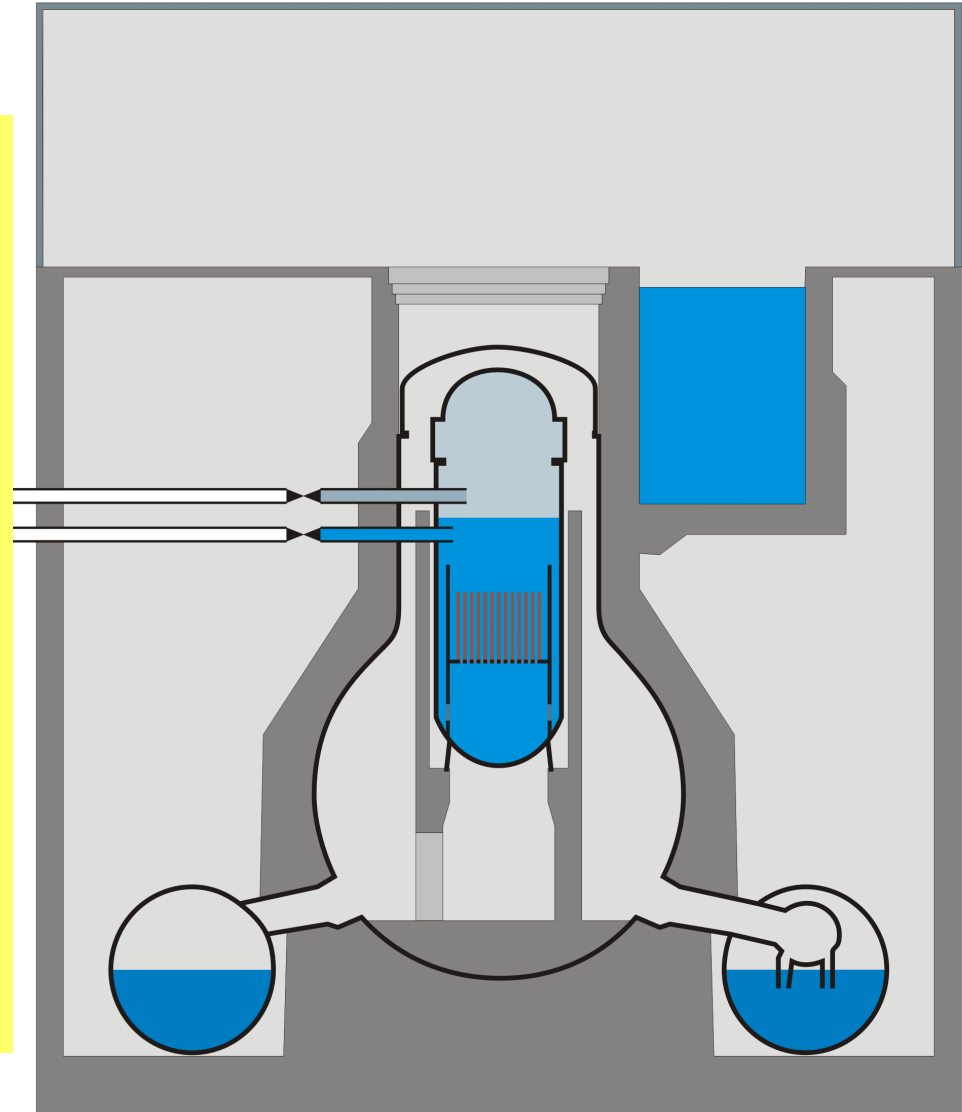
L'accident de Fukushima Daiichi

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
- ◆ 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

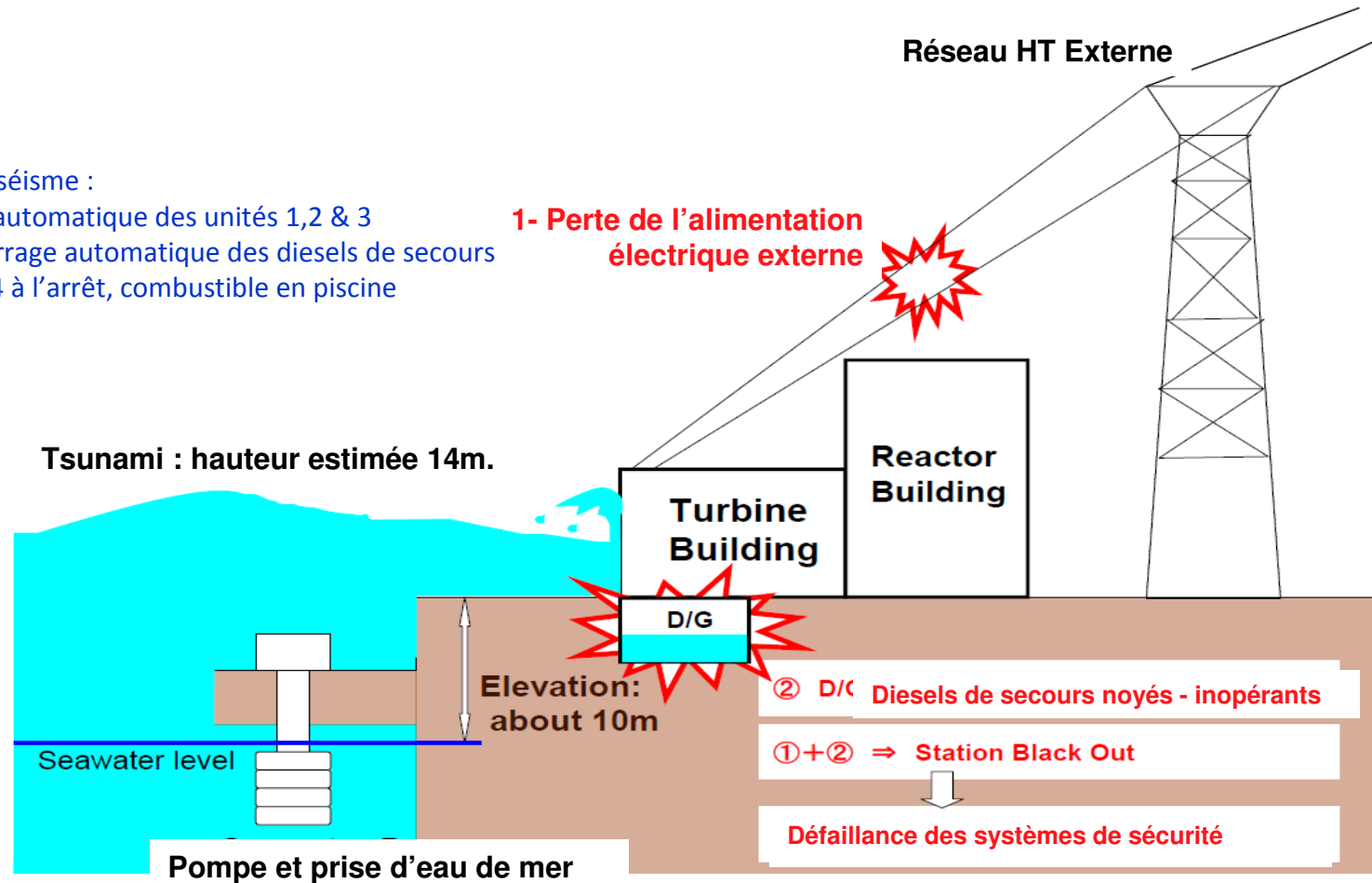
~30 000 morts ou disparus



Le Tsunami – 11 mars 2011 à 15h41

Lors du séisme :

- Arrêt automatique des unités 1,2 & 3
- Démarrage automatique des diesels de secours
- Unité 4 à l'arrêt, combustible en piscine



La zone inondée



Impact du Tsunami sur le site **AVANT**



Impact du Tsunami sur le site **APRES**



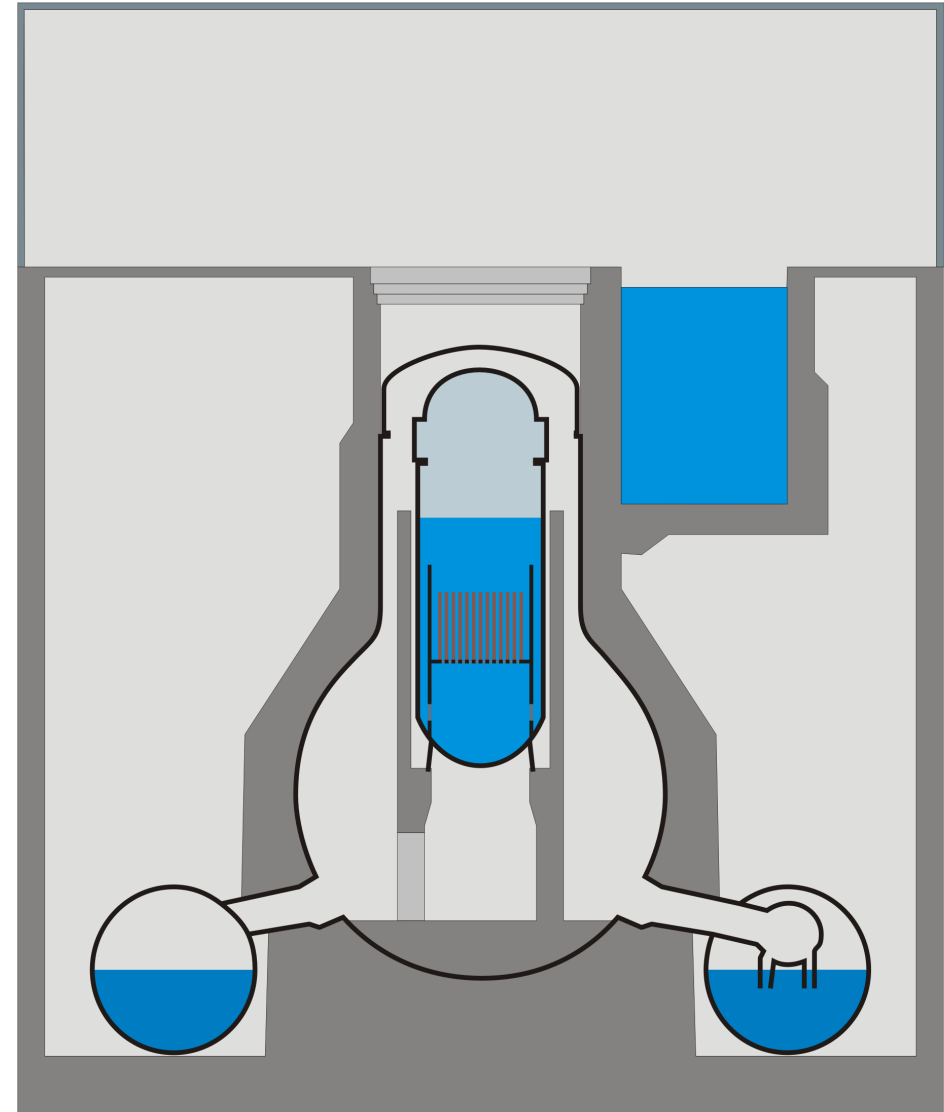
L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

► 11 mars. 15:41

Le tsunami frappe la centrale

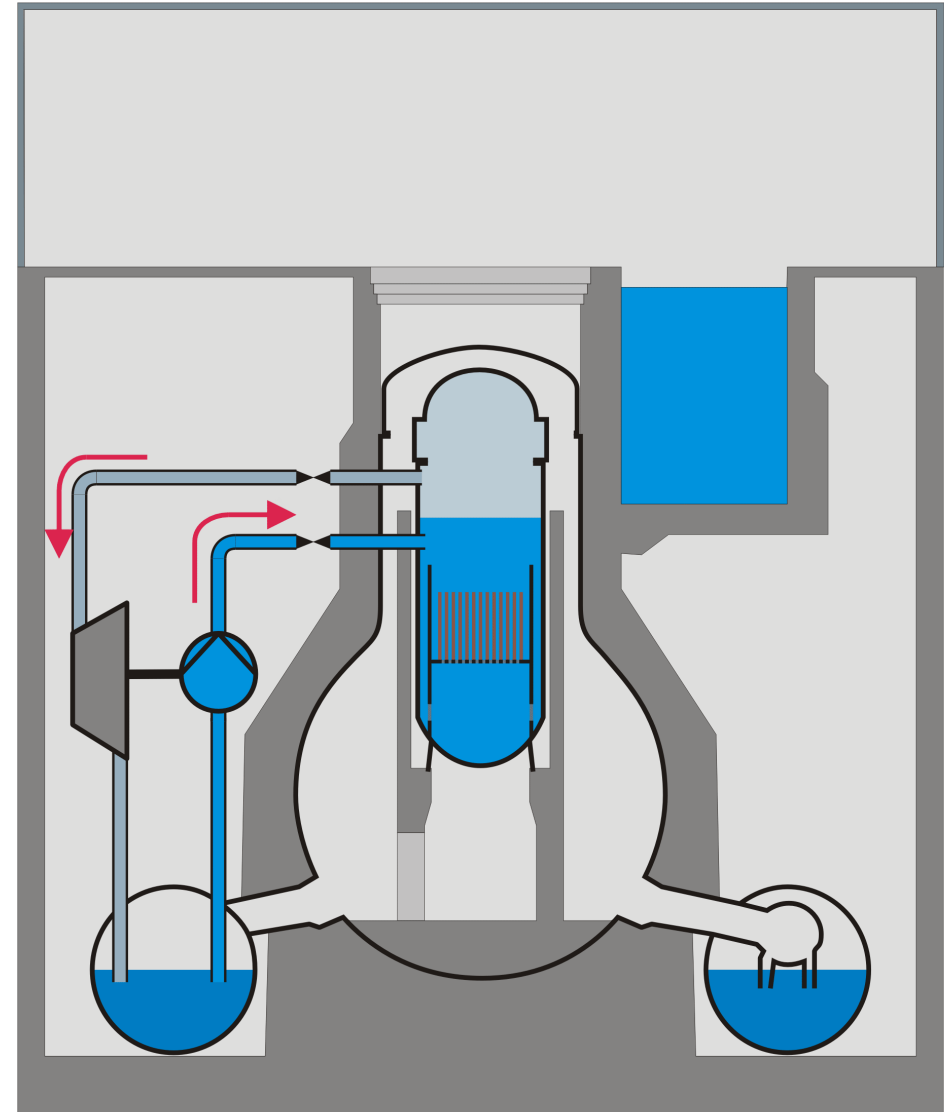
- ◆ Hauteur estimée du tsunami : 14m
- ◆ Inondation des groupes électrogènes (diesels de secours)
- ◆ Perte de l'alimentation électrique
- ◆ Défaillance des systèmes d'injection de sécurité
- ◆ Un système d'ultime secours peut continuer à fonctionner sur batteries.



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

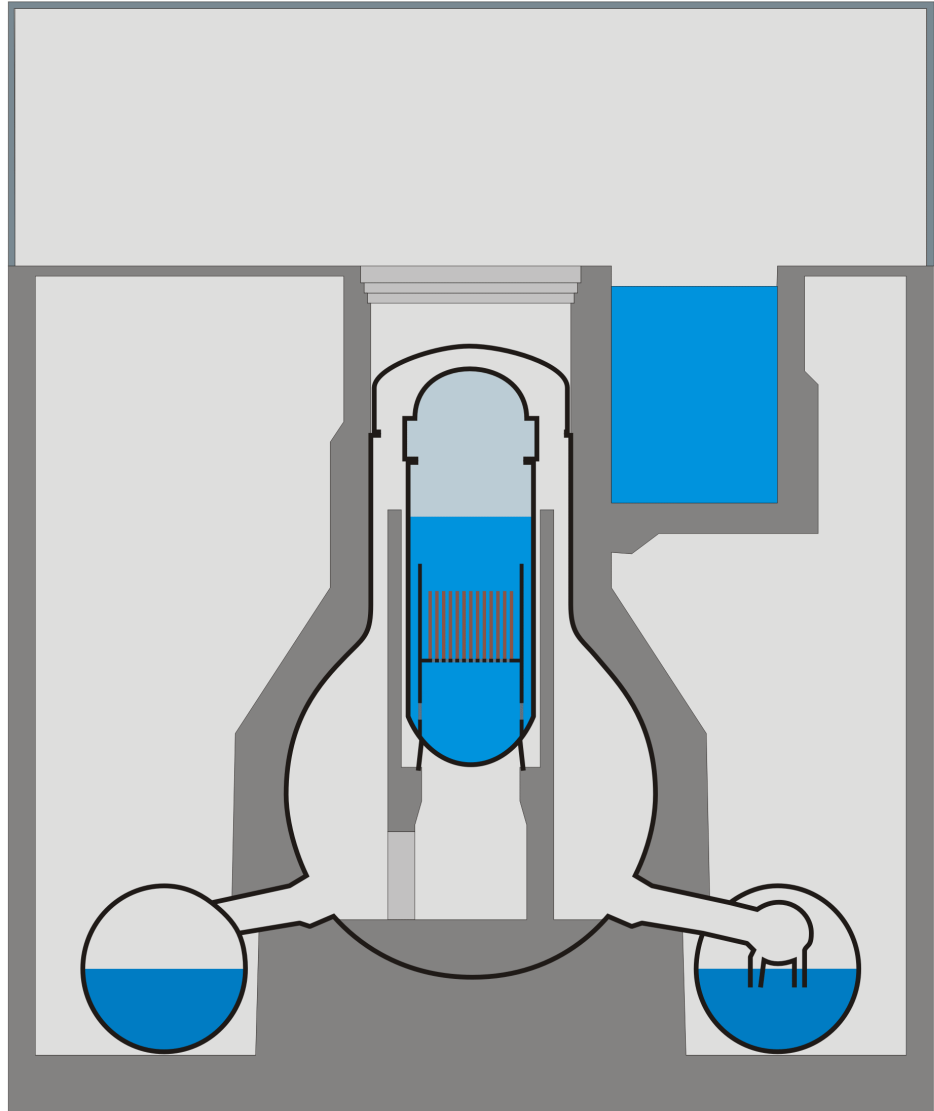
- ▶ **La pompe de refroidissement en mode isolé reste disponible :**
 - ◆ La vapeur issue du réacteur entraîne une turbine
 - ◆ La vapeur est condensée dans le puits humide
 - ◆ La turbine entraîne une pompe
 - ◆ L'eau du puits humide est pompée vers le réacteur
 - ◆ Cela nécessite :
 - La disponibilité des batteries
 - L'eau doit rester liquide dans le tore (puits humide): température max $\sim 100^{\circ}\text{C}$



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 et la température augmentent



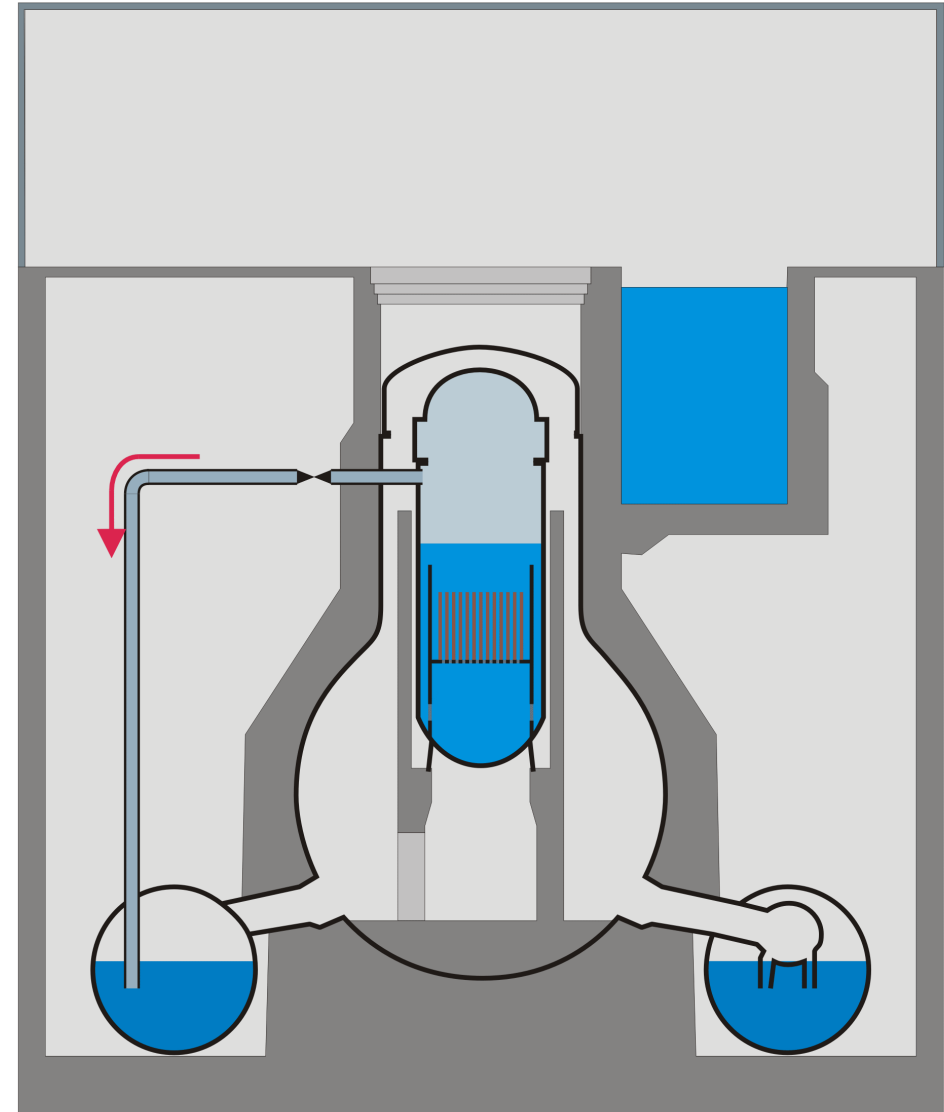
L'accident de Fukushima Daiichi

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 et la température augmentent

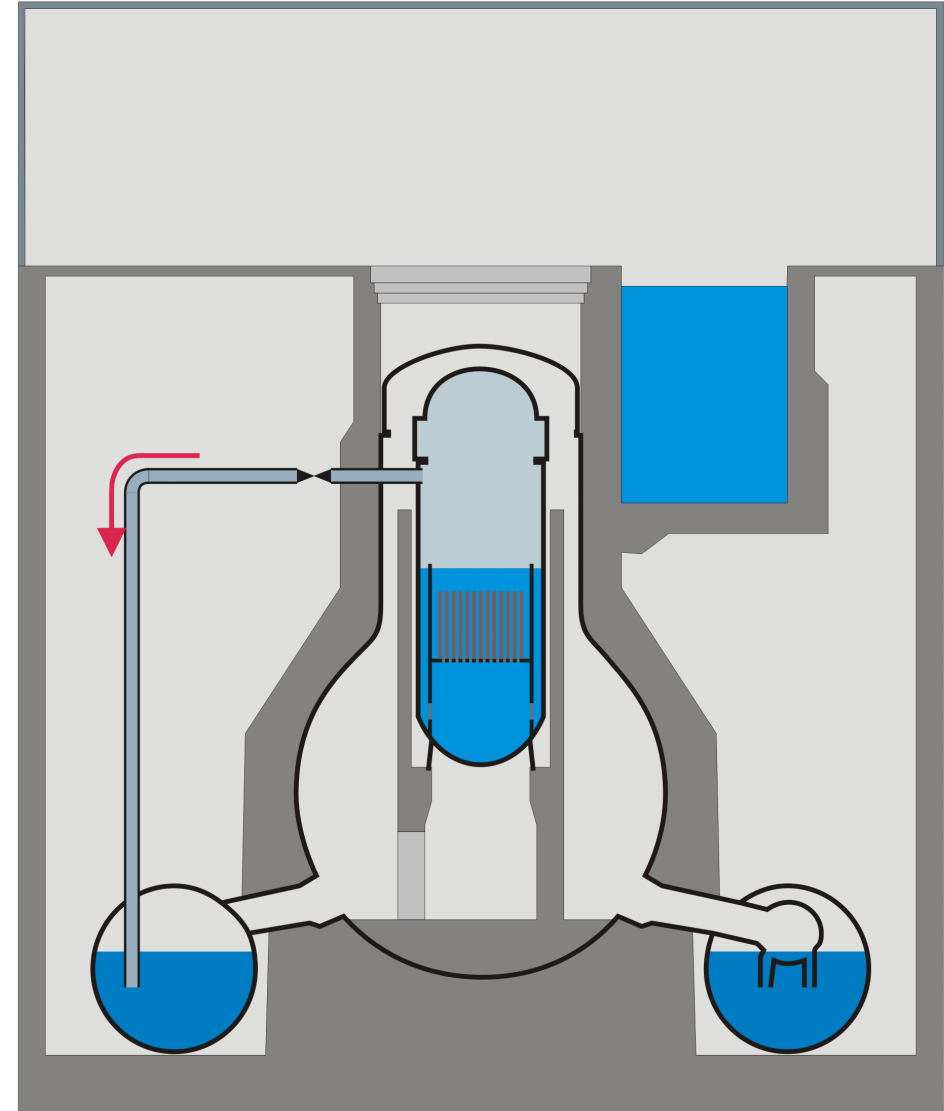
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
 - ◆ Décharge vers le puits humide



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

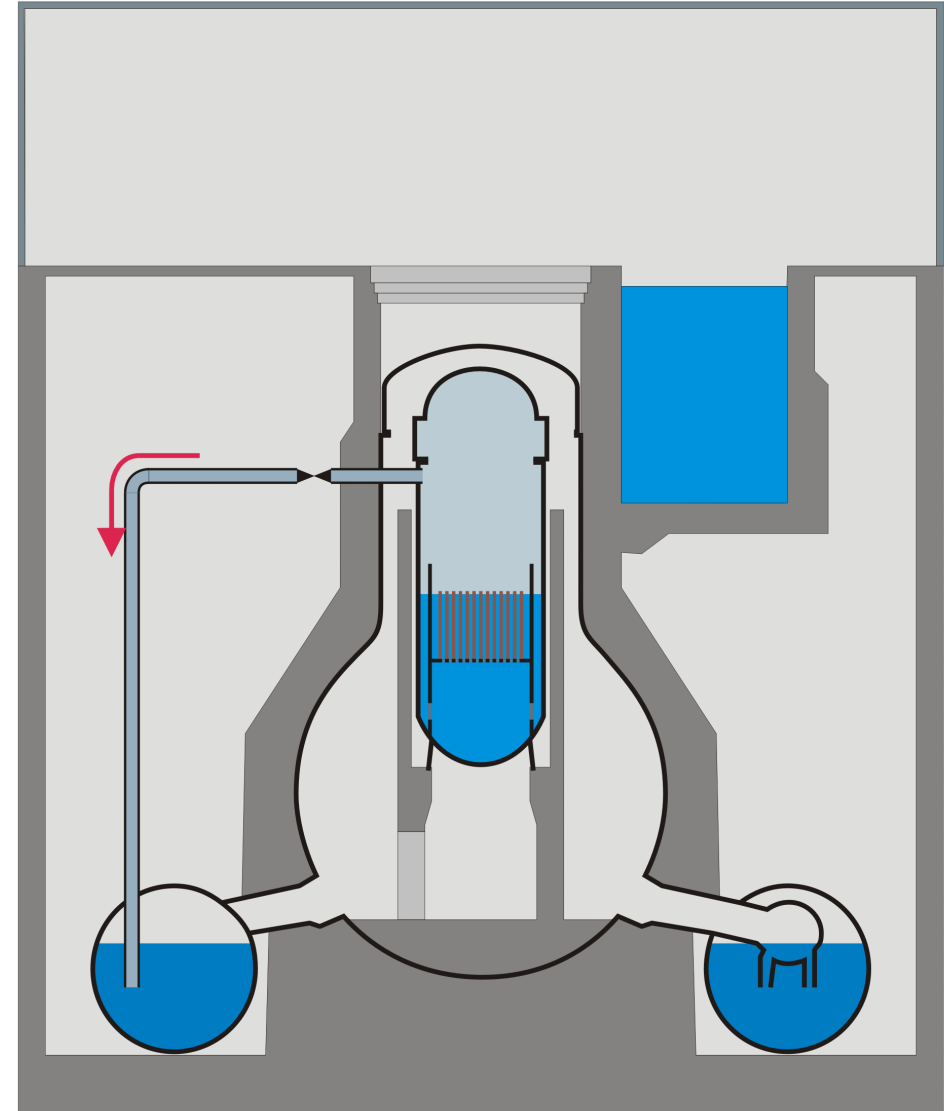
Progression de l'accident

- ▶ 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

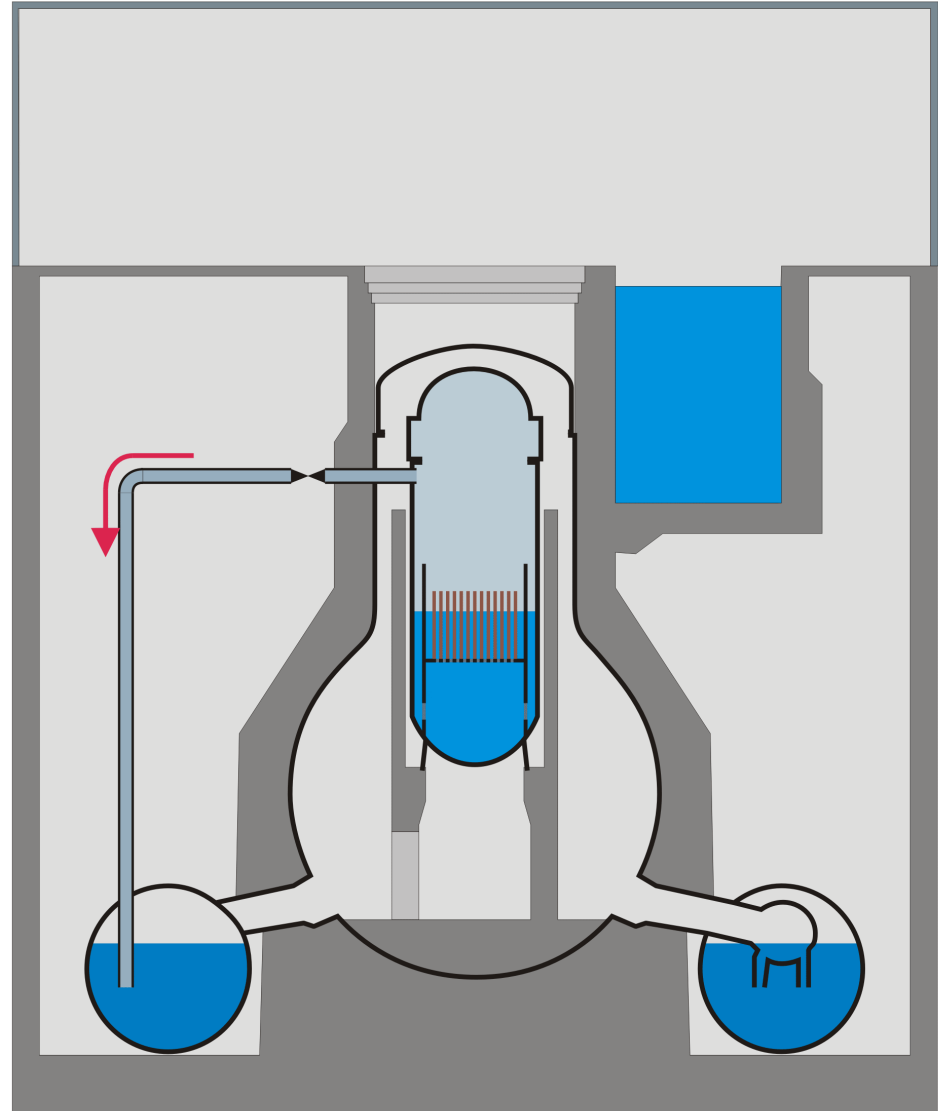
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

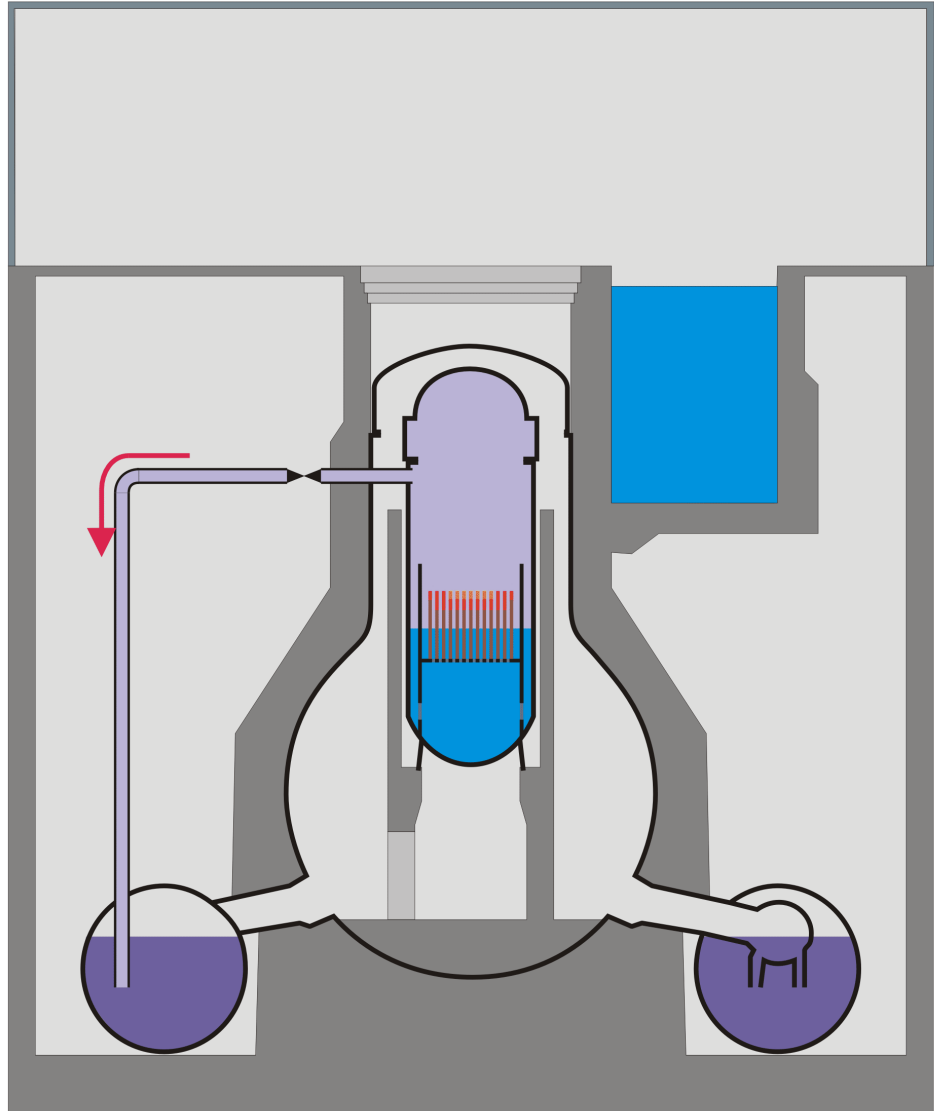
- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
 - ◆ 11 mars. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
 - ◆ 14 mars. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
 - ◆ 13 mars. 5:10 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
 - ◆ La pression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

- ▶ Lorsque ~2/3 du coeur "dénoyé" :
 - Température des gaines > ~900°C
 - Gonflement / rupture des gaines
 - Relâchement de produits de fission
- ▶ La pression et la température de l'ensemble continue à augmenter

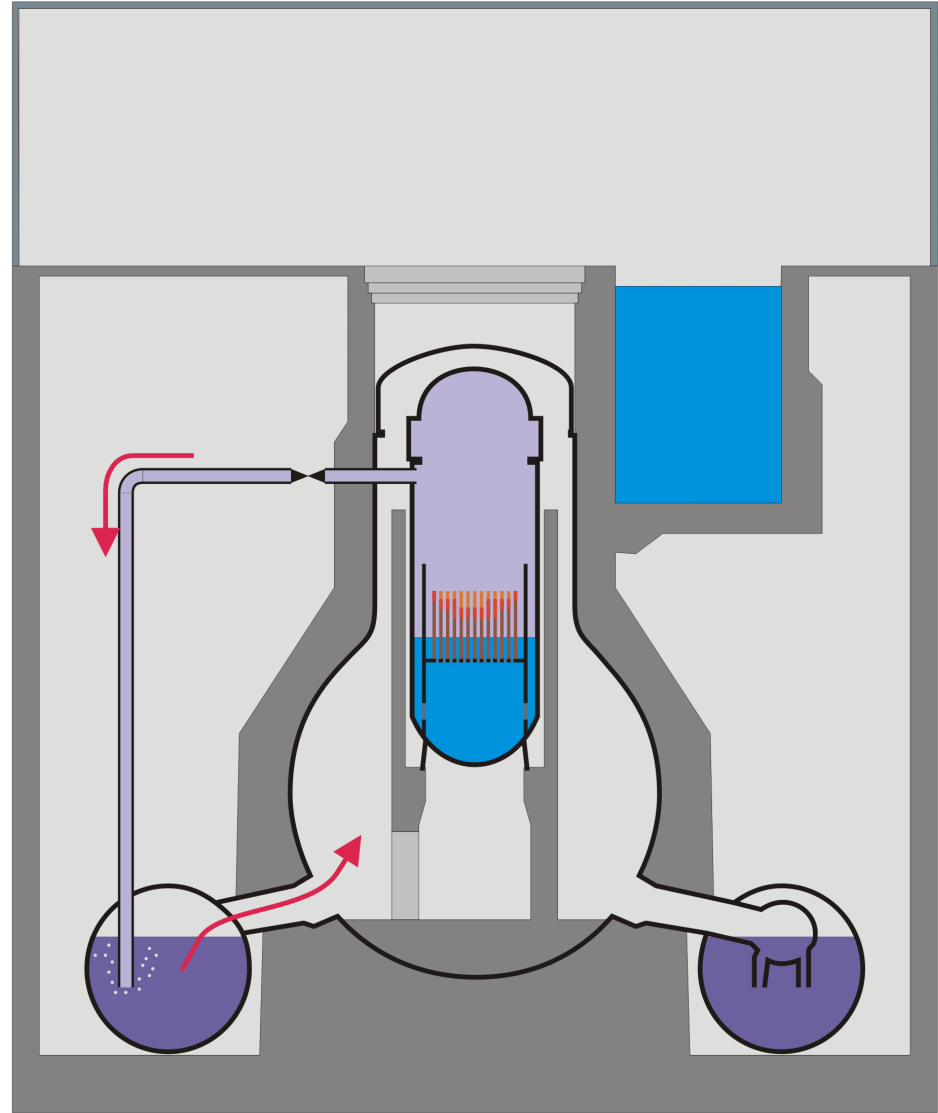


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

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

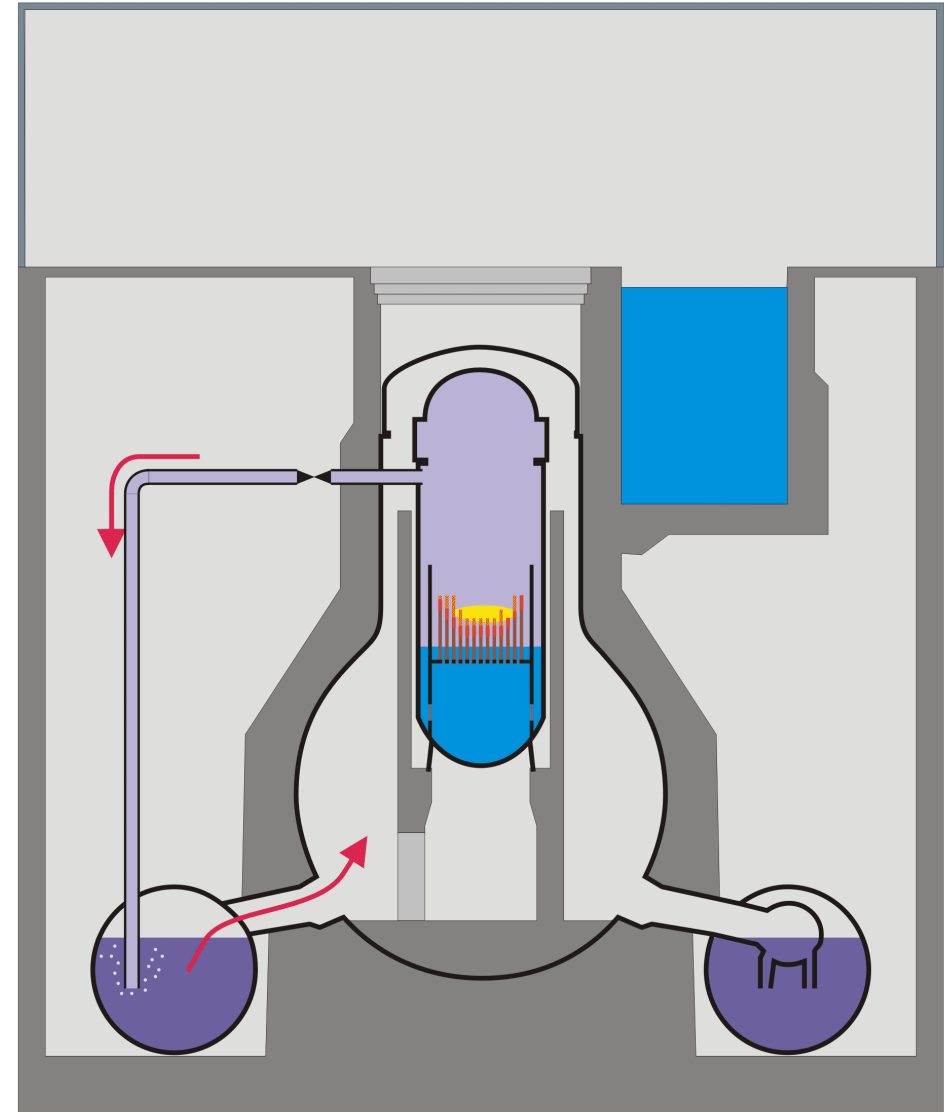
$$\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$$
 - ◆ La réaction exothermique chauffe encore plus le coeur
 - ◆ Production d'hydrogène
 - Tranche 1: 300-600kg
 - Tranches 2/3: 300-1000kg
 - ◆ L'hydrogène, les PF gazeux et les aérosols se déchargent par surpression dans l'enceinte.



L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

- ▶ À ~1800°C
 - ◆ Fusion des gaines et éléments de structure
- ▶ À ~2500°C
 - ◆ Désagrégation des pastilles
 - ◆ Débris dans le cœur
- ▶ À ~2700°C
 - ◆ 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)

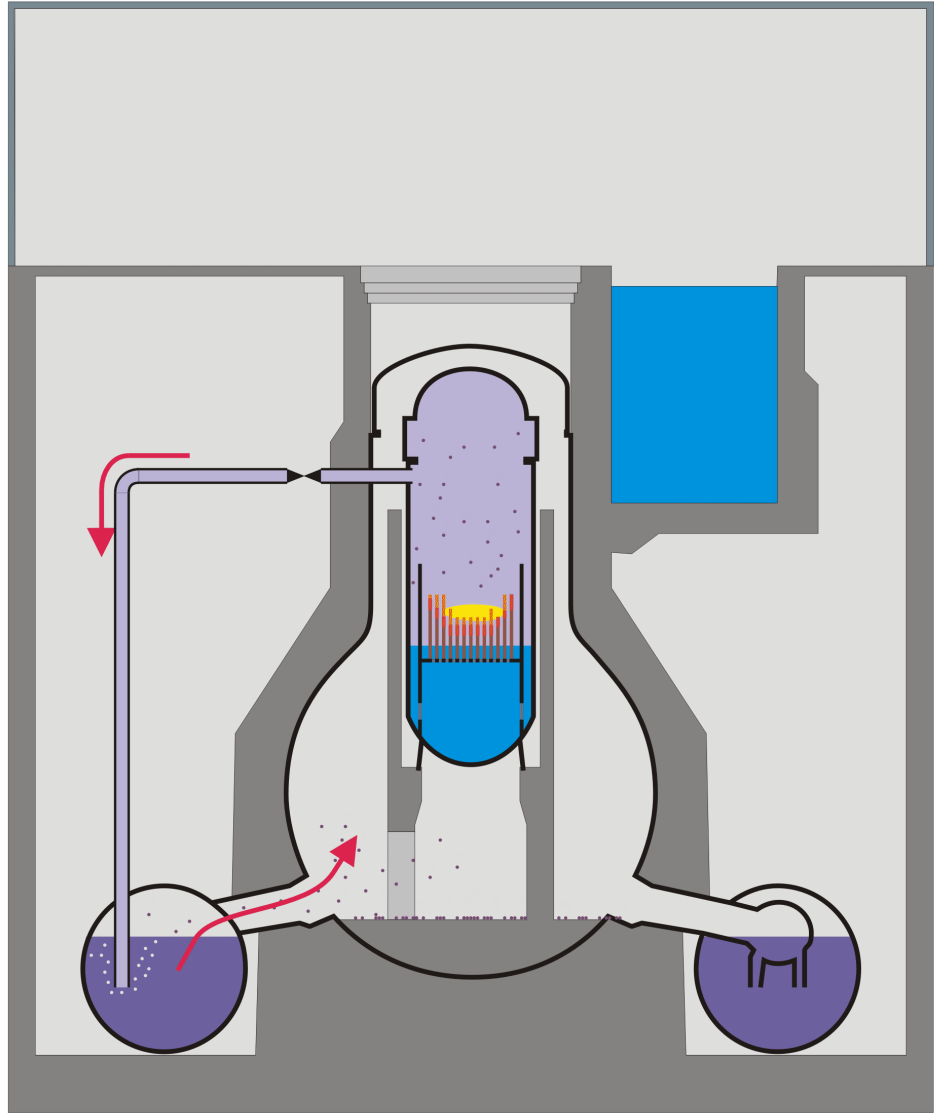


L'accident de Fukushima Daiichi

Progression de l'accident

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

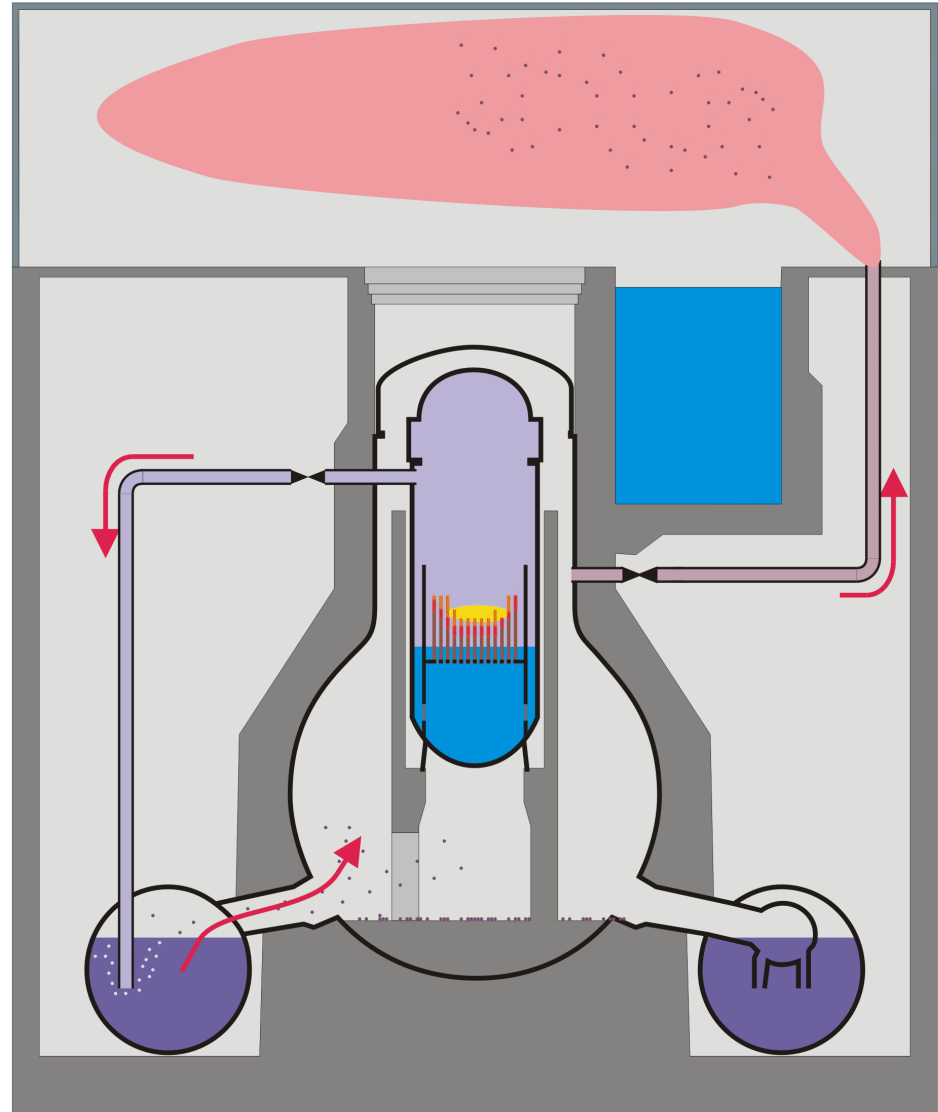
- ▶ **Pression réelle jusqu'à 8 bars**
 - ◆ Gaz d'inertage (azote)
 - ◆ Hydrogène libéré par l'oxydation du Zr
 - ◆ Eau du tore en ébullition



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

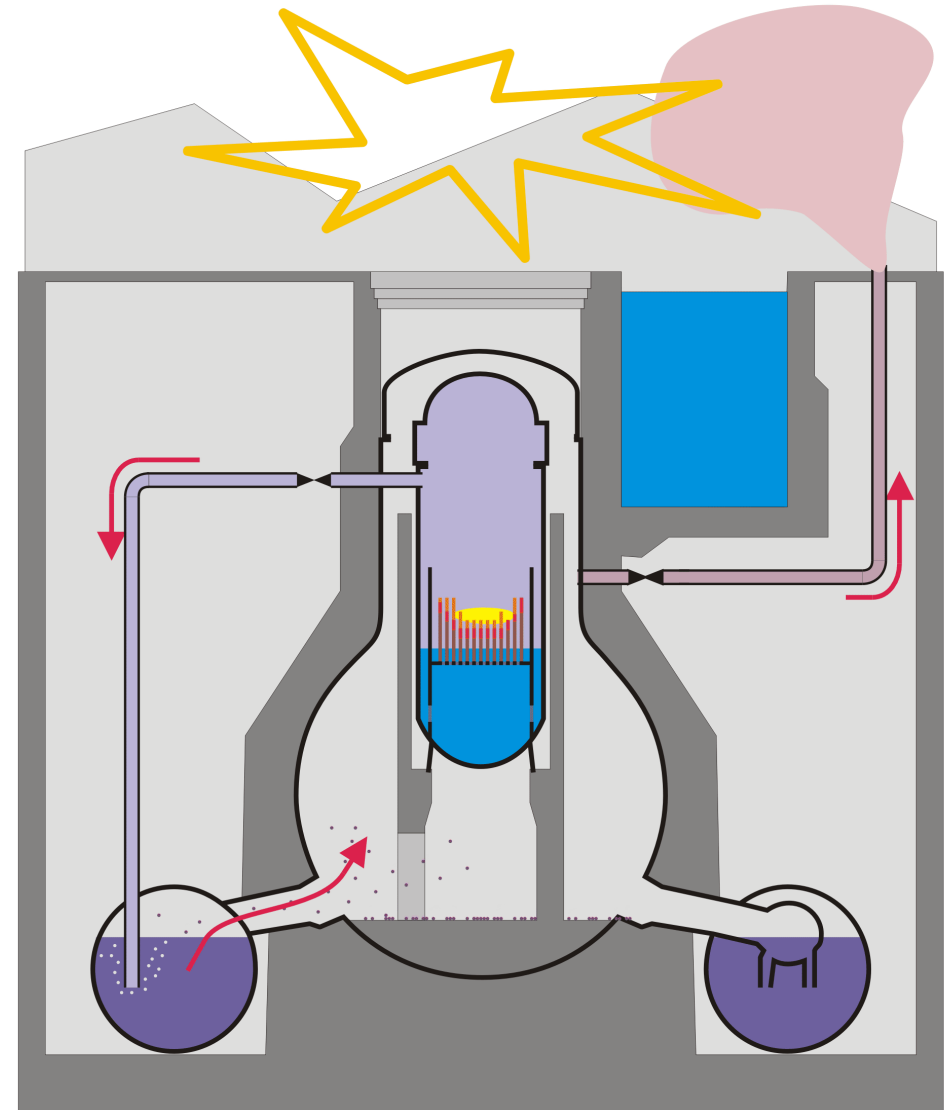


L'accident de Fukushima Daiichi

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 limité sur la sûreté de l'installation
-
- ◆ Explosions hydrogène :
 - ◆ Unité 1: 12 mars. 15:36
 - ◆ Unité 3 : 14 mars. 11.01

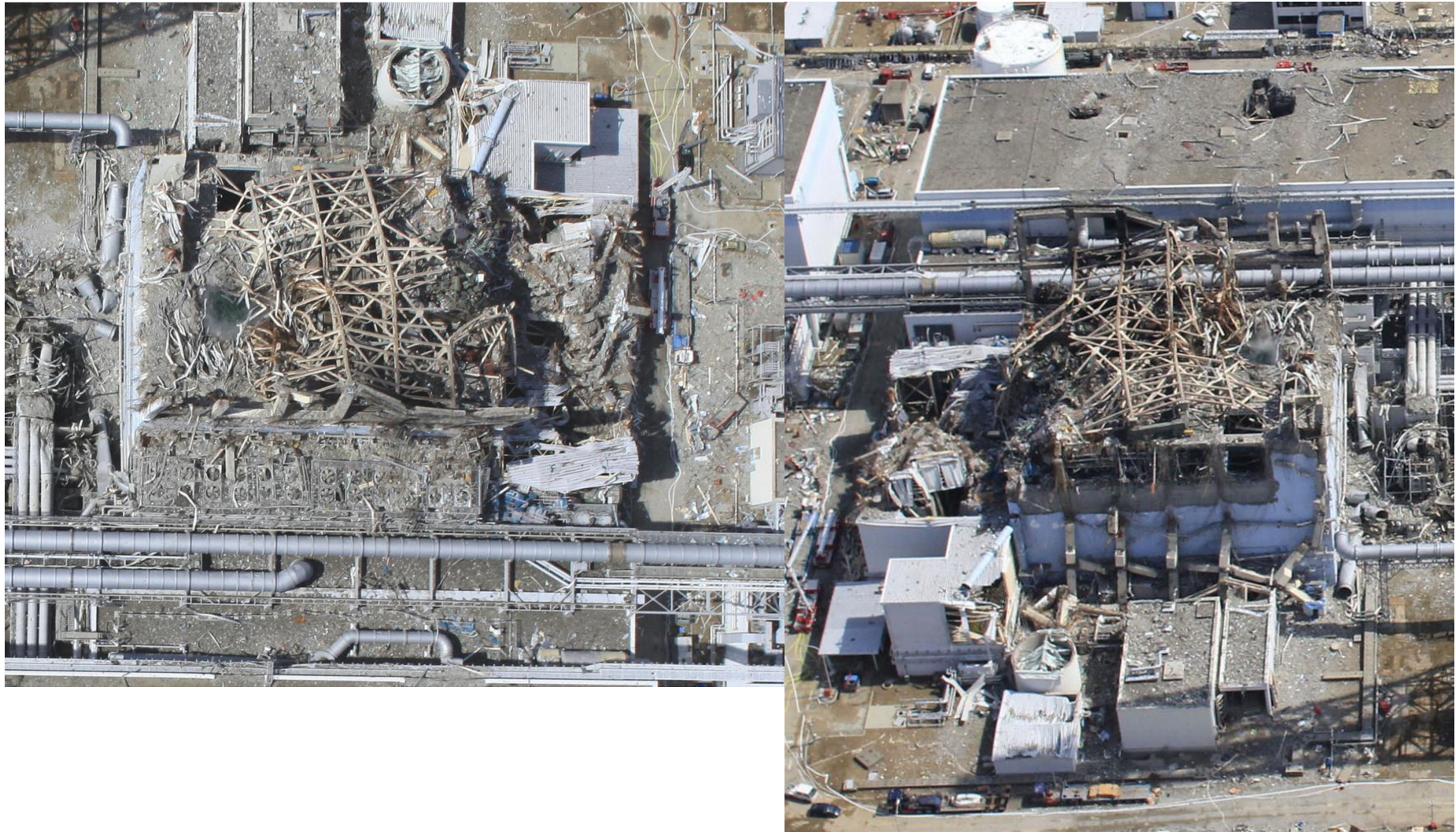


L'accident de Fukushima Daiichi

Explosion hydrogène en Tranche 1



La Tranche 3 après l'explosion d'hydrogène



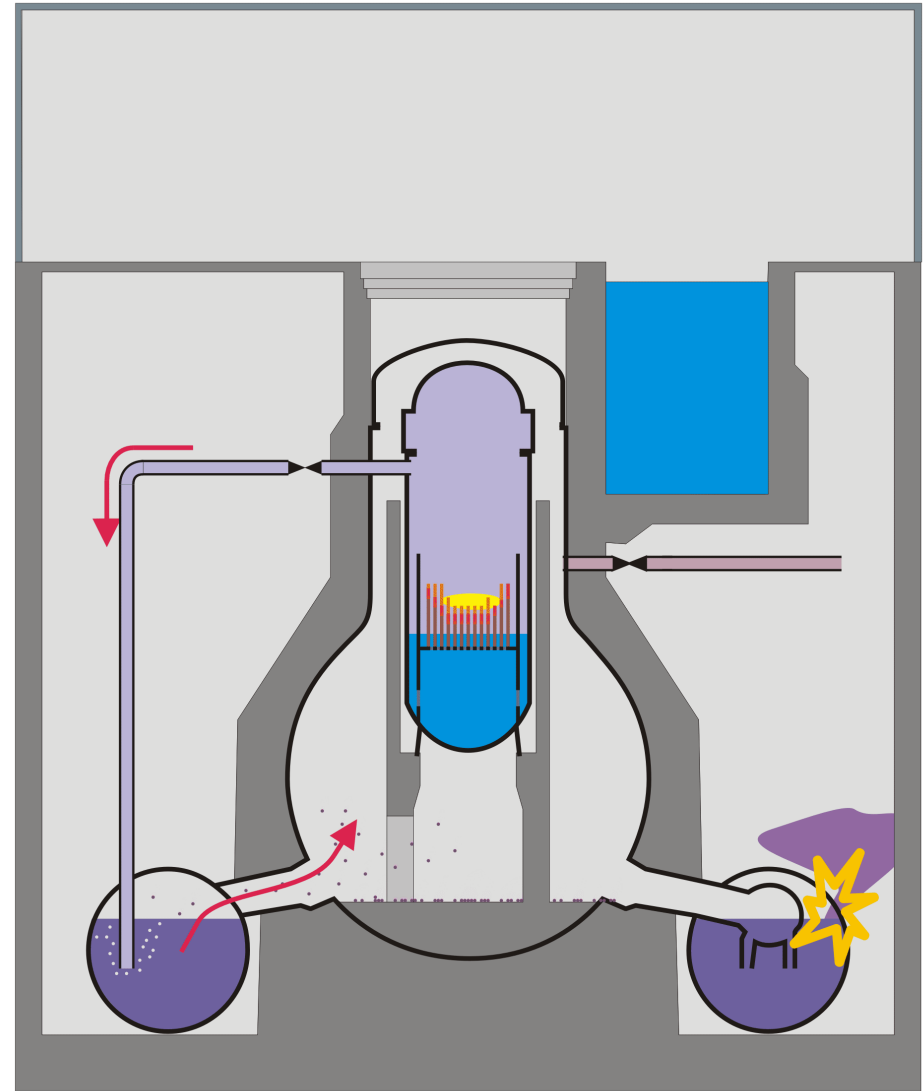
L'accident de Fukushima Daiichi

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

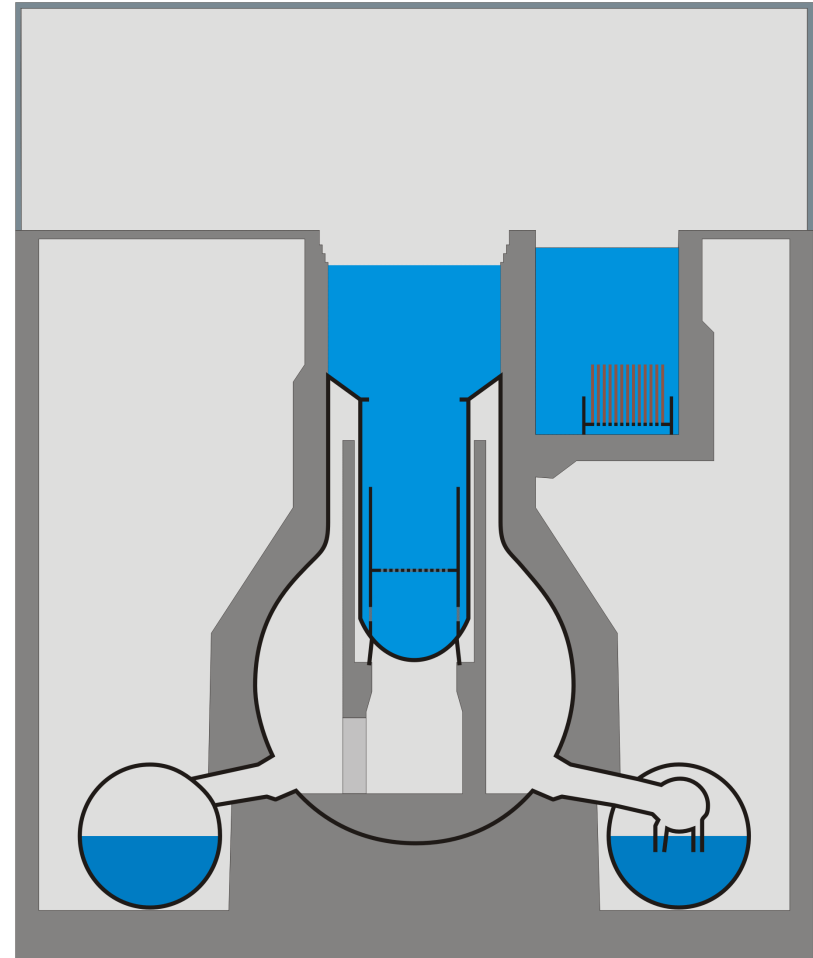
Tranches 1,2 et 3 après les explosions



L'accident de Fukushima Daiichi

Piscines de désactivation

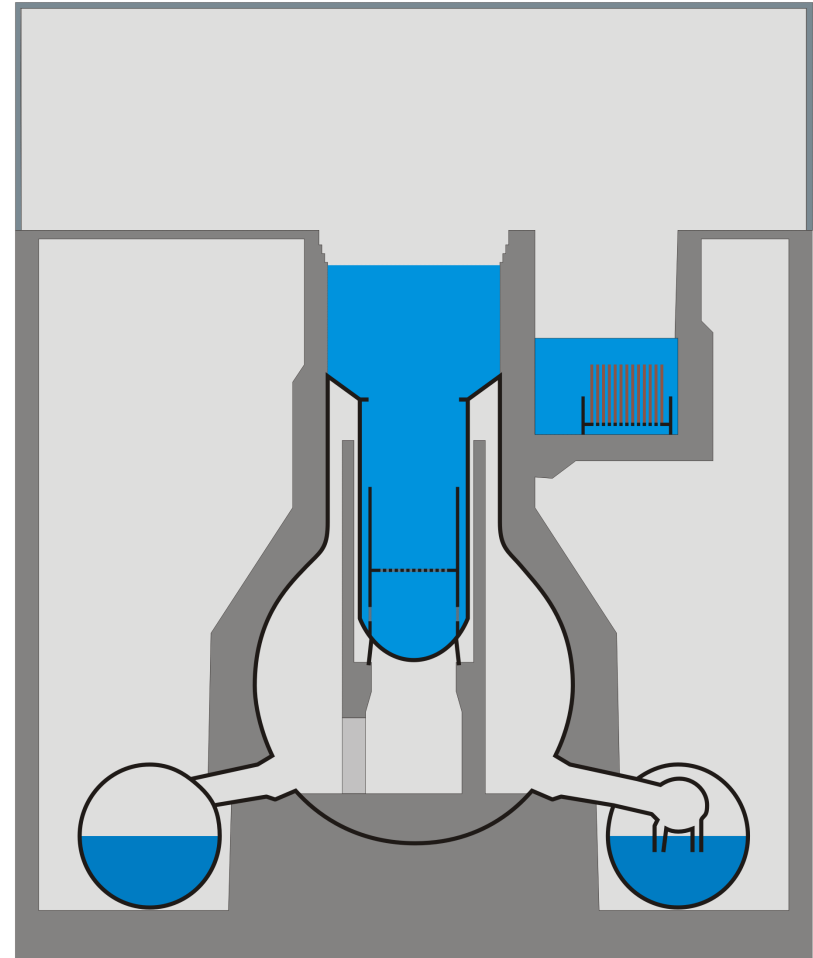
- ▶ **La piscine de désactivation est située sur le plancher de service**
 - ◆ **Tranche 4 à l'arrêt : Tous les éléments du cœur en piscine de désactivation**
 - ◆ **Vidange partielle des piscines**
 - **Tranche 4: en 10 jours**
 - **Tranches 1, 2 et 3, en quelques semaines**
 - ◆ **Dysfonctionnement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



L'accident de Fukushima Daiichi

Piscines de désactivation

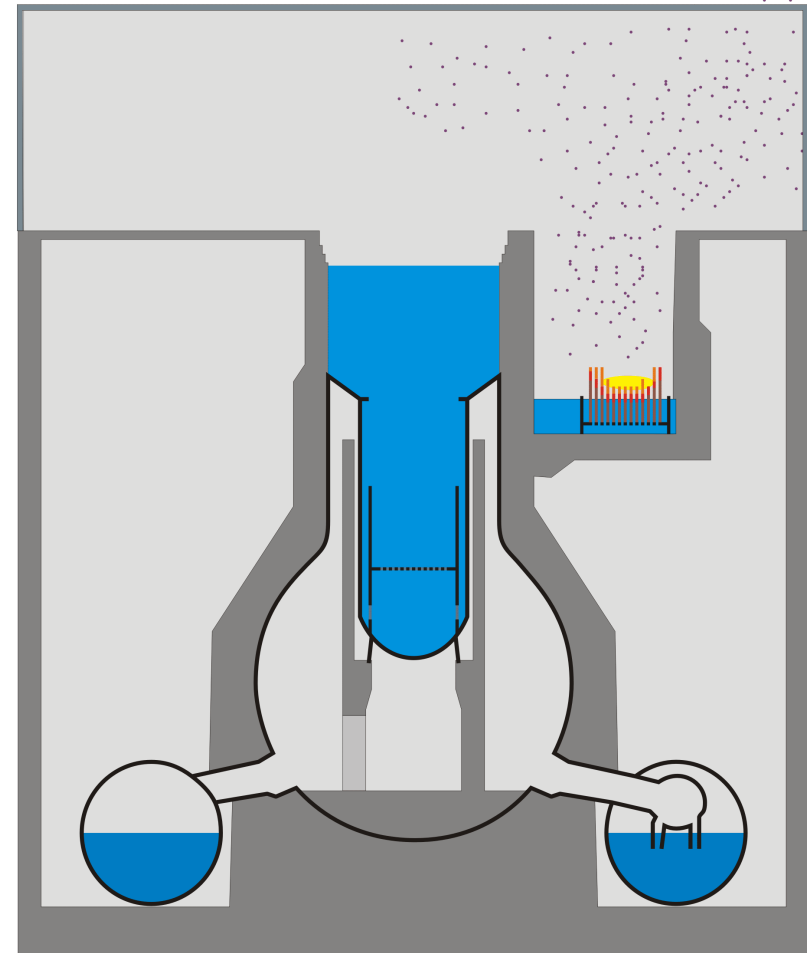
- ▶ **La piscine de désactivation est située sur le plancher de service**
 - ◆ **Tranche 4 à l'arrêt : tous les éléments du coeur en piscine de désactivation**
 - ◆ **Vidange partielle des piscines**
 - **Tranche 4: en 10 jours**
 - **Tranches 1, 2 et 3 en quelques semaines**
 - ◆ **Dysfonctionnement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

Sur le site:

Amélioration régulière, mais non totalement maîtrisée

- **Refroidissement des cœurs Tr 1, 2 & 3 assuré, en circuit ouvert**
 - Restaurer des conditions sûres de refroidissement en circuit fermé.
- **Combustible très endommagé : corium en fond de cuves**
- **Accumulation d'eau contaminée dans les salles basses de la centrale**
 - Handicap majeur pour les interventions à l'intérieur des bâtiments.
 - Construction d'une usine de décontamination sur le site (AREVA)
- **Piscine tranche 4 en cours de consolidation**
- **Atmosphère très humide dans les bâtiments.**
 - Nécessité de traitement : déshumidification, décontamination, ventilation
- **A l'extérieur des bâtiments : de nombreux débris, points chauds radioactifs**
 - Traitement des poussières : « collage » par projection de résines inhibitrices.

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.

L'accident de Fukushima Daiichi

Conséquences radiologiques et sanitaires

► Les travailleurs sur site

- ◆ Dose limite tolérée pour travailleurs à Fukushima : 250 mSv
- ◆ 4 personnes ont reçu des doses supérieures à la limite, sur 1100 travailleurs contrôlés
- ◆ 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, mais il reste des « points chauds » résiduels.
- ◆ Conditions de travail difficiles dans les bâtiments.

➤ *Les conséquences sanitaires sur les travailleurs devraient être limitées*

L'accident de Fukushima Daiichi

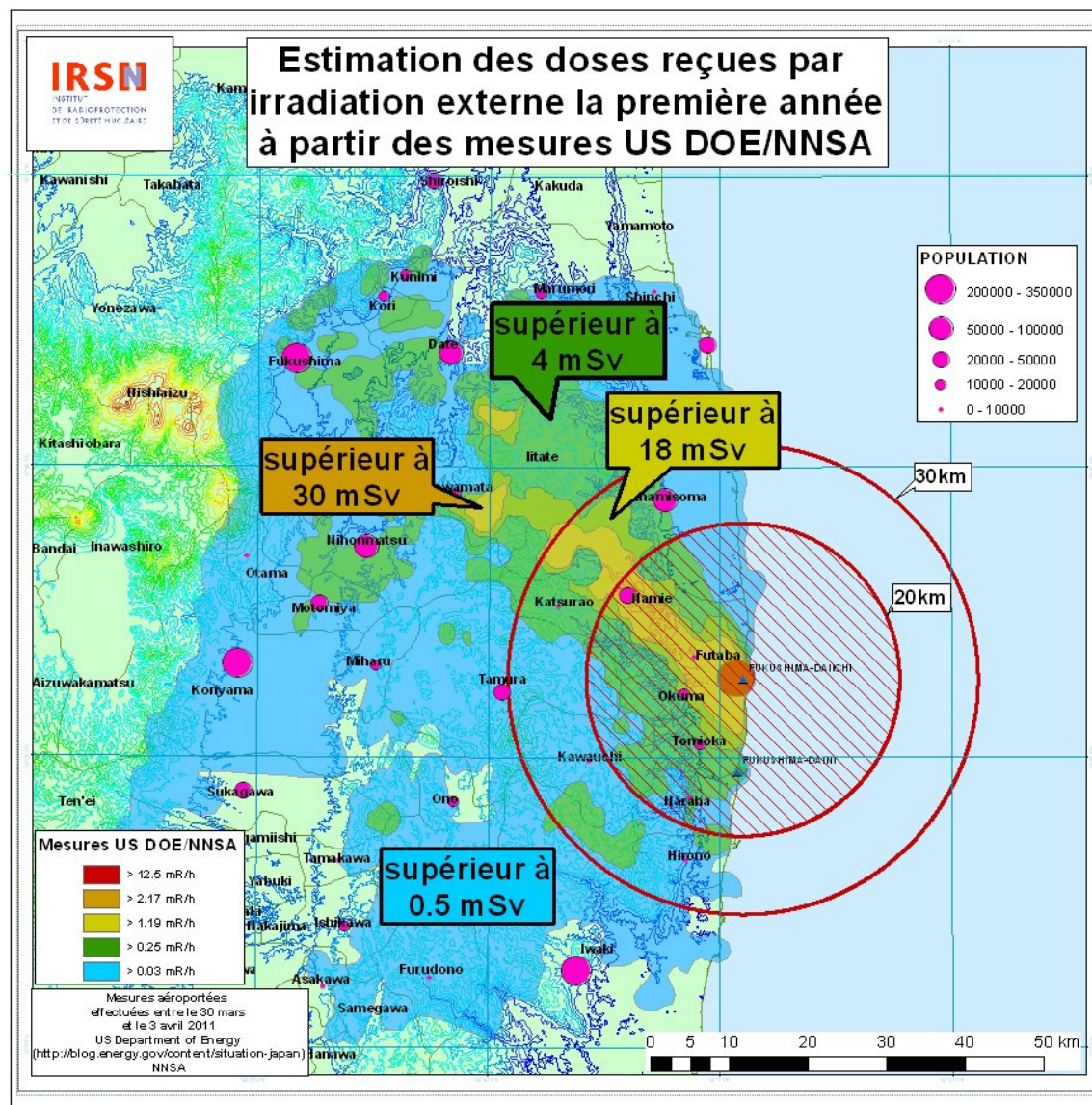
Conséquences radiologiques et sanitaires

► 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
A ce jour : Pas de conséquence sanitaire prévisible du fait de l'irradiation
- ◆ Situation à surveiller dans la zone d'exclusion du fait de la contamination des sols.

L'accident de Fukushima Daiichi

Conséquences radiologiques et sanitaires



Définir un modèle énergétique durable...

- Fort traumatisme post-Fukushima dans les opinions publiques
- Exploitation politicienne par les opposants à l'énergie nucléaire
- Décisions marquantes en Allemagne et Suisse



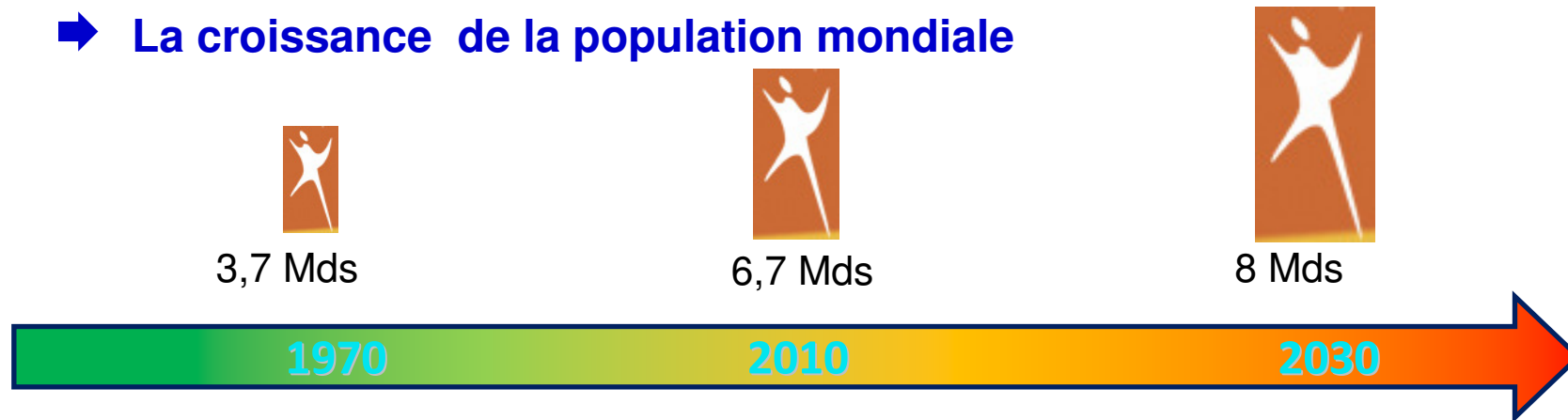
Le choix du nucléaire est-il raisonnable?

Définir un modèle énergétique durable...

- Le modèle énergétique mis en œuvre depuis deux siècles par les sociétés industrielles est parvenu à ses limites :
 - ✓ épuisement de la ressource
 - ✓ Impact environnemental (Gaz à effet de serre)
- Passer d'un système énergétique fondé sur les énergies fossiles à un **système énergétique durable** :
 - ✓ Ressources disponibles sur le long terme
 - ✓ Impact environnemental minimum
 - ✓ Prix garantissant l'accès de tous
 - ✓ production régulière et fiable (indépendance énergétique).

Evolution de la demande en énergie

➡ La croissance de la population mondiale



➡ Le besoin légitime de développement économique et humain

> Augmentation de la consommation énergétique moyenne par habitant

1,35 tep/an

1,8 tep/an

2,1 tep/an

Consommation mondiale en Milliards de Tep



Un choix, une responsabilité, un défi

Face à cette prévision, deux options possibles:

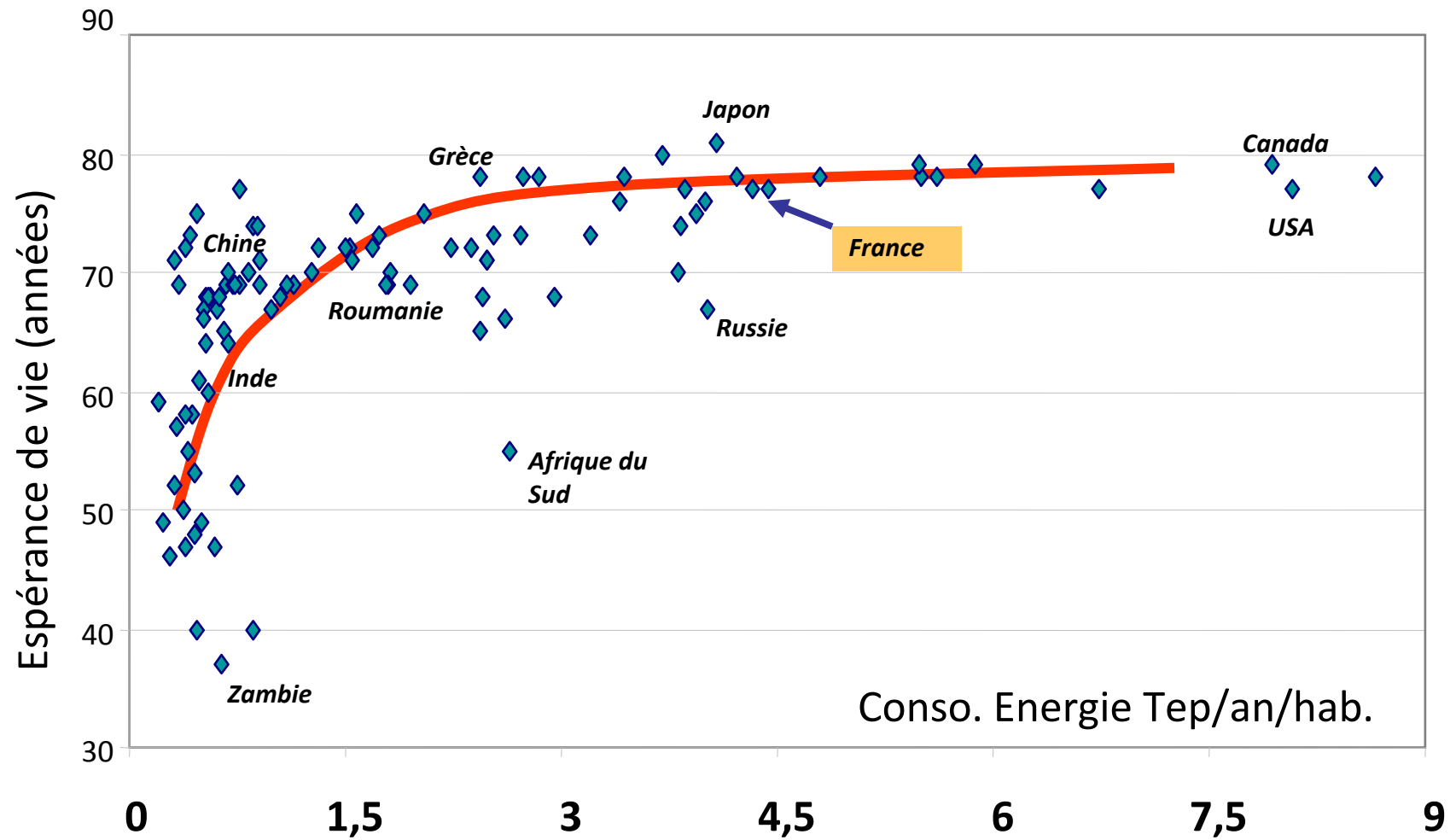
- Imposer la décroissance aux pays avancés et Refuser le droit au développement des pays émergents

Ou

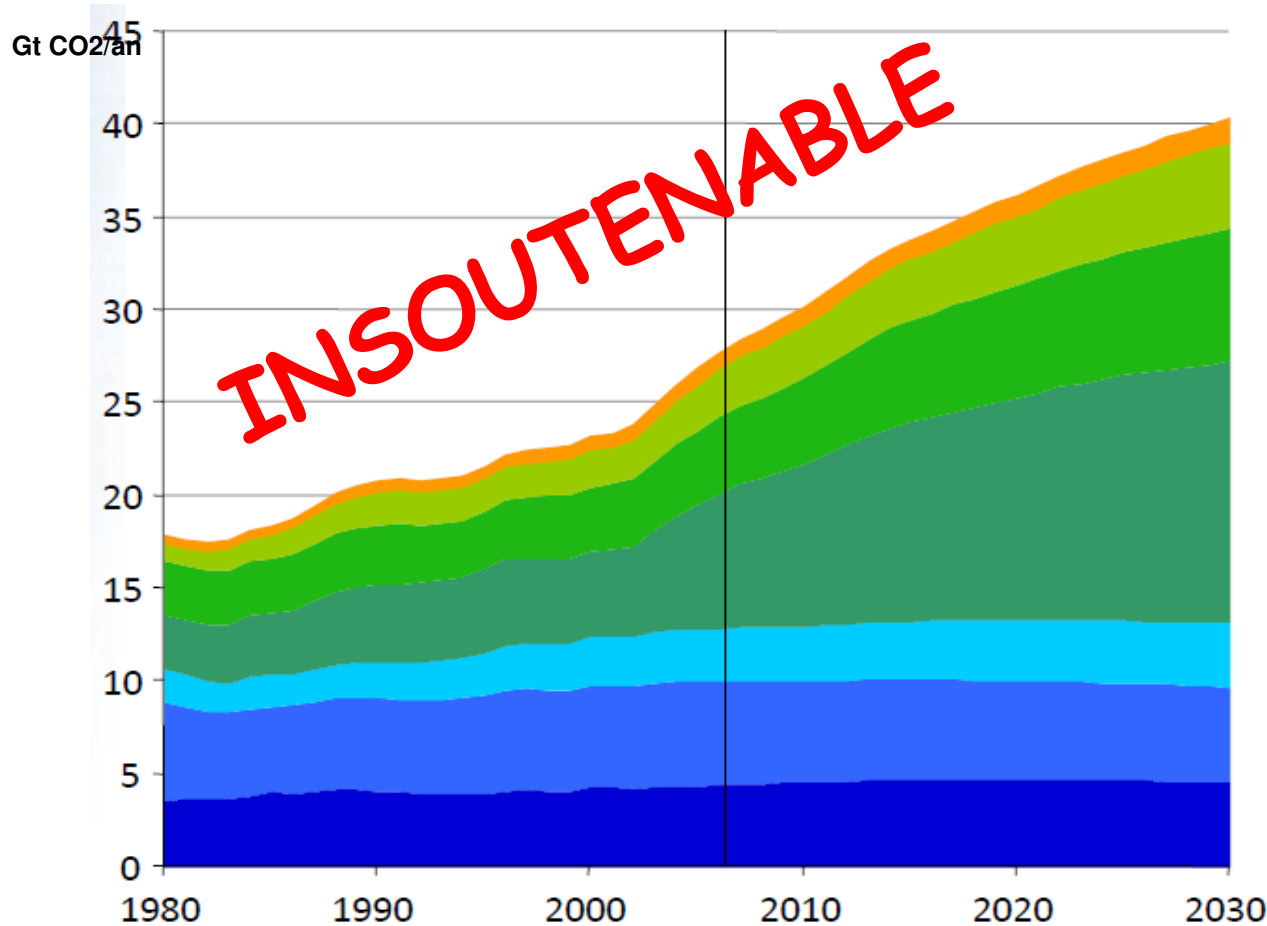
- Affronter le problème et décider des moyens susceptibles d'apporter un **développement durable** à tous les humains, cad: Produire l'énergie nécessaire au bien être social et au développement économique, notamment dans les pays émergents, à un coût accessible, avec un impact environnemental minimal.
 - ✓ Economies d'énergies, particulièrement dans les pays développés
 - ✓ Promouvoir les énergies non carbonées :
 - **Les énergies renouvelables**
 - **L'énergie nucléaire,**

En reconnaissant les mérites et les limites de chacune de ces sources.

Développement humain et consommation d'énergie



Scénario de référence Emissions de CO₂ liées à l'énergie



Scénario de référence « Business as usual »

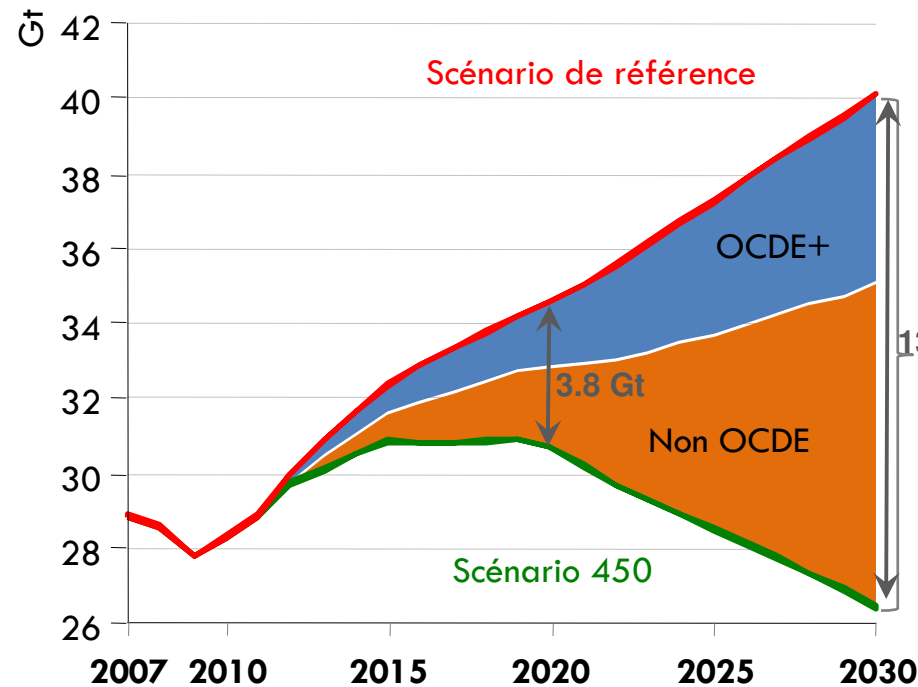
97% de l'accroissement
 des émissions provient
 des pays non OCDE, les
 $\frac{3}{4}$ sont dus à la Chine,
 Inde et Moyen Orient

- International marine bunkers and aviation
- Non-OECD - gas
- Non-OECD - oil
- Non-OECD - coal
- OECD - gas
- OECD - oil
- OECD - coal

Source

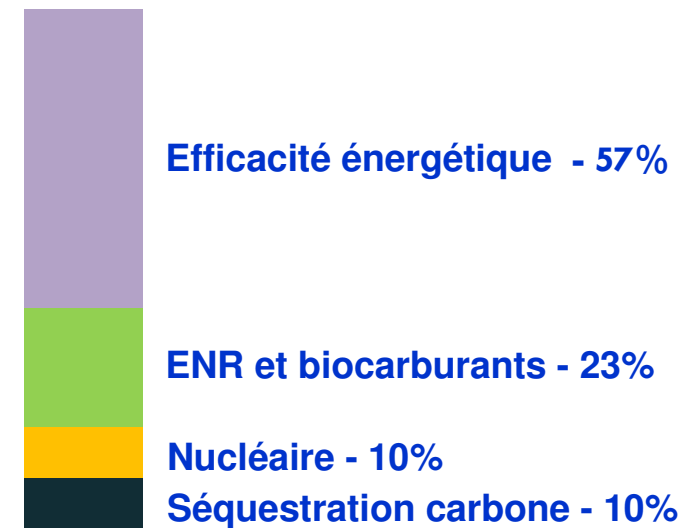
Une nécessaire révolution énergétique

Emissions CO2 Gt/an



OCDE+ : pays de l'OCDE+pays UE non OCDE

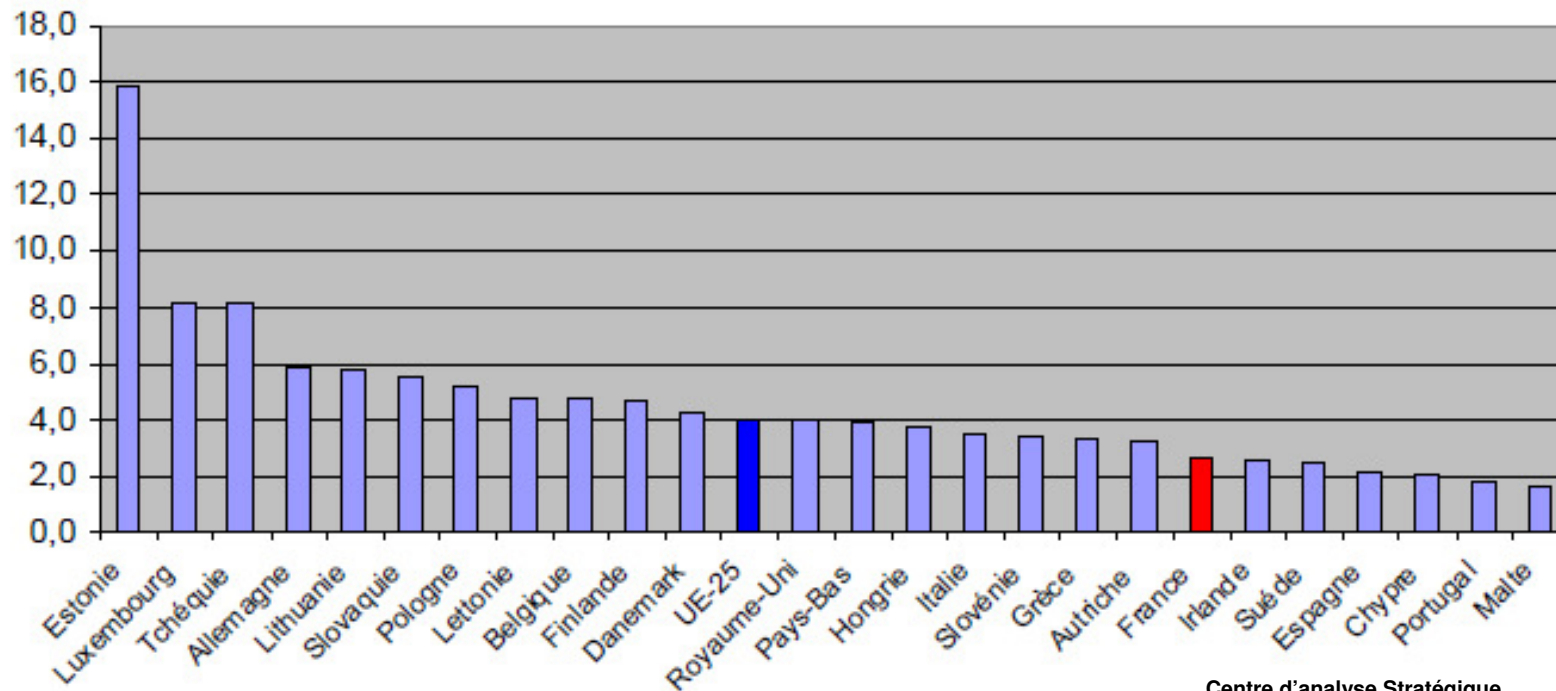
Les voies de réduction
des émissions de CO2 à l'horizon 2030



Source  International Energy Agency

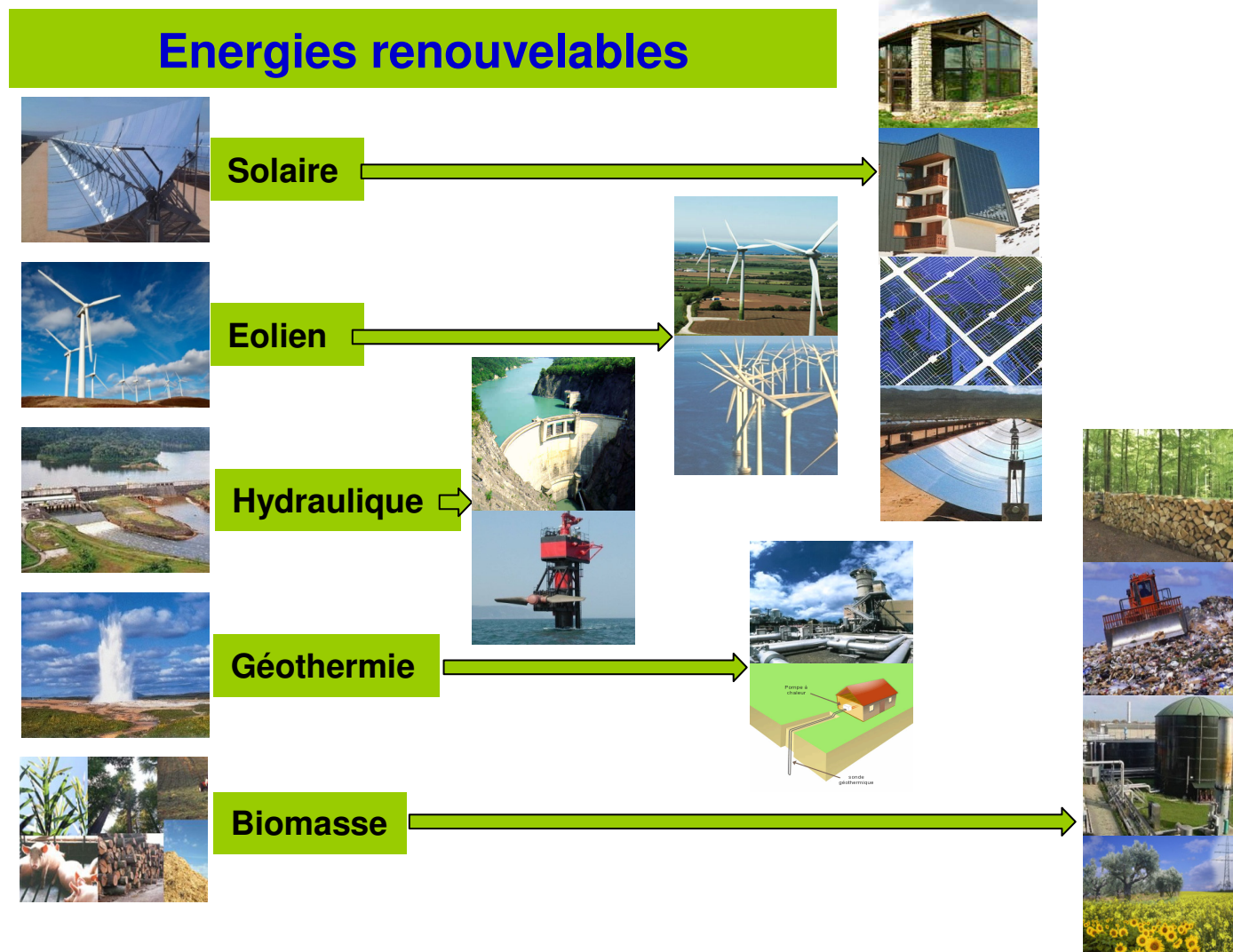
La réduction des émissions de GES : un effort colossal

Division des émissions de CO₂ pour atteindre le "facteur 4" (UE-25) à l'horizon 2050 par rapport à 1990, avec des émissions identiques par habitant



Centre d'analyse Stratégique
 (Commission énergie)
 J.Bergougnoux

Quelles sources de production?



Quelles sources de production ?

Production électricité en France 2010 : 550 TWh dont

- **Nucléaire : 408 TWh, soit 74,2%**
- **Thermique classique : 59 TWh, soit 10,8%, (+ 8,3% sur 2009)**
- **ENR : 83 TWh, soit 15,1% :**
 - 68,0 TWh Hydraulique
 - 9.6 Twh Eolien, en progression de 22% sur 2009
 - 0,6 Twh Photovoltaïque, en progression de ~300% sur 2009
 - 4,8 TWh Autres ENR.

TOTAL Renouvelables:

19 MTep (6,9%de la consommation française d'énergie)

Données France SOeS

Quelles sources de production?

Les mérites et les limites des principales sources:

- **Charbon/pétrole/gaz :**
 - Réserves limitées et mal réparties sur le globe
 - Impact environnemental majeur (Effet de serre, notamment)
 - Prix modéré, et flexibilité d'exploitation
- **Eolien/Photovoltaïque**
 - Intermittence (oblige à développer des moyens de substitution)
 - Coûts de production élevé
- **Hydraulique**
 - Développement important hors OCDE (impact environnemental lourd)
 - Pas de développement significatif prévisible dans les pays avancés.
 - Prix du kWh modéré
- **Nucléaire**
 - Acceptabilité sociale
 - Questionnement sûreté et stockage des déchets
 - Prix du kWh modéré
 - Impact environnemental faible

Une conclusion ?

- Réponse durable aux besoins en électricité :
 - ✓ Des économies d'énergies aussi grandes que possible
 - ✓ Des gains en efficacité énergétique (effort de R&D)
 - ✓ L'assistance aux pays émergents
 - ✓ Une production fiable, à prix accessible et à faible émission de GES grâce à une production d'électricité basée sur
 - les Energies Renouvelables (effort de R&D)
 - Le nucléaire, en maîtrisant toujours mieux la sûreté des installations

Un choix d'avenir

Le choix doit être lucidement fait entre :

- Une vision positive du futur, confiante dans les progrès de la science et ouvrant la voie à l'amélioration des conditions de vie pour tous.
- Une approche frileuse, refusant le progrès et condamnant l'humanité à la récession ...

...un bel avenir pour nos enfants?

Merci de votre attention