

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

L'accident de Fukushima DAIICHI (11 mars 2011) : état des connaissances

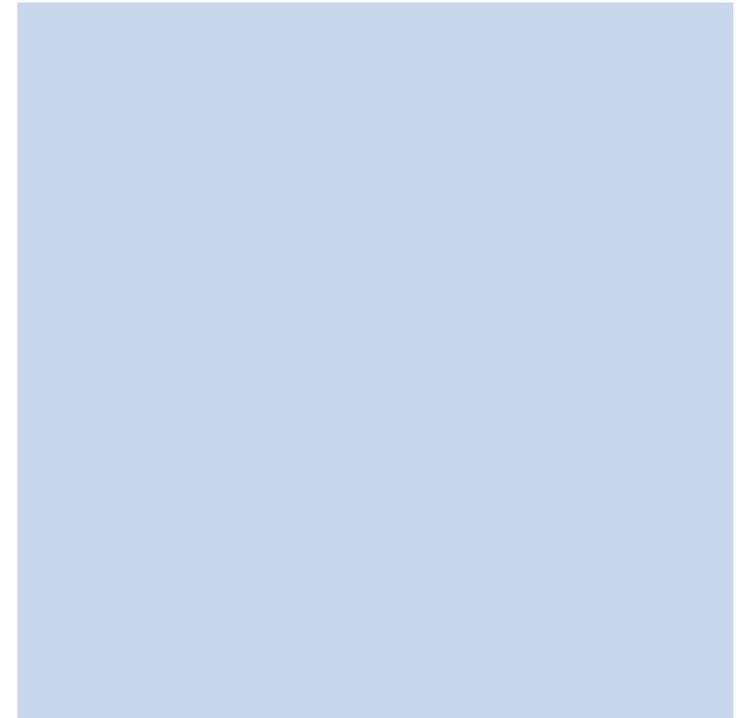
JOURNÉE THÉMATIQUE
ECCOREV

RISQUE NUCLEAIRE

16 Novembre 2012

Didier JACQUEMAIN

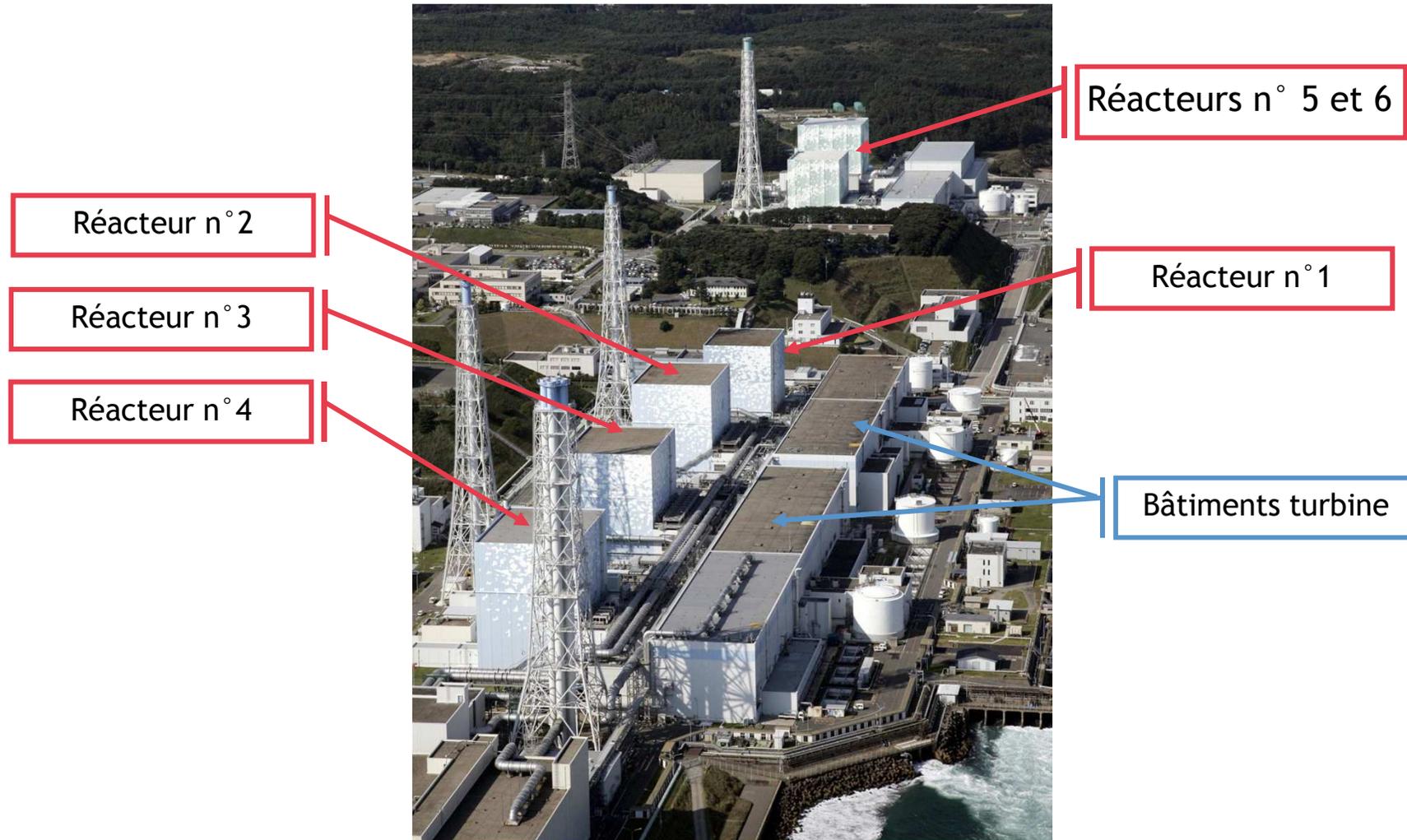
Institut de Radioprotection et de
Sûreté Nucléaire



Sommaire

- **Conception des réacteurs de la centrale de FUKUSHIMA-DAIICHI**
- **Déroulement de l'accident**
- **Situation actuelle des réacteurs, évaluation préliminaire des rejets et des conséquences**

La centrale de Fukushima Dai-ichi



Types de réacteurs, états avant l'accident

	Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Tranche 4	Tranche 5	Tranche 6
Puissance électrique (MWe)	460	784	784	784	784	1,100
Type de réacteur	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
Date de mise en service	Mars 1971	Juillet 1974	Mars 1976	Octobre 1978	Avril 1978	Octobre 1979
Nombre d'assemblages dans le cœur	400	548	548	0 (cœur déchargé)	548	764
État du réacteur avant l'accident	100% PN	100% PN	100% PN		A l'arrêt	A l'arrêt
Nombre d'assemblages dans les piscines de désactivation	392 (dont 100 ass. neufs)	615 (dont 28 ass. neufs)	566 (dont 52 ass. neufs)	1 531 (dont 783 usés, 548 déchargés récemment et 20 neufs)	994 (don't 48 ass. neufs)	940 (don't 64 neufs)
Puissance résiduelle dans les piscines de désactivation ¹	0,18	0,58	0,51	2,39	1,07	0,86
Type de combustible	UO ₂	UO ₂	UO ₂ et 32 assemblages MOX	UO ₂	UO ₂	UO ₂

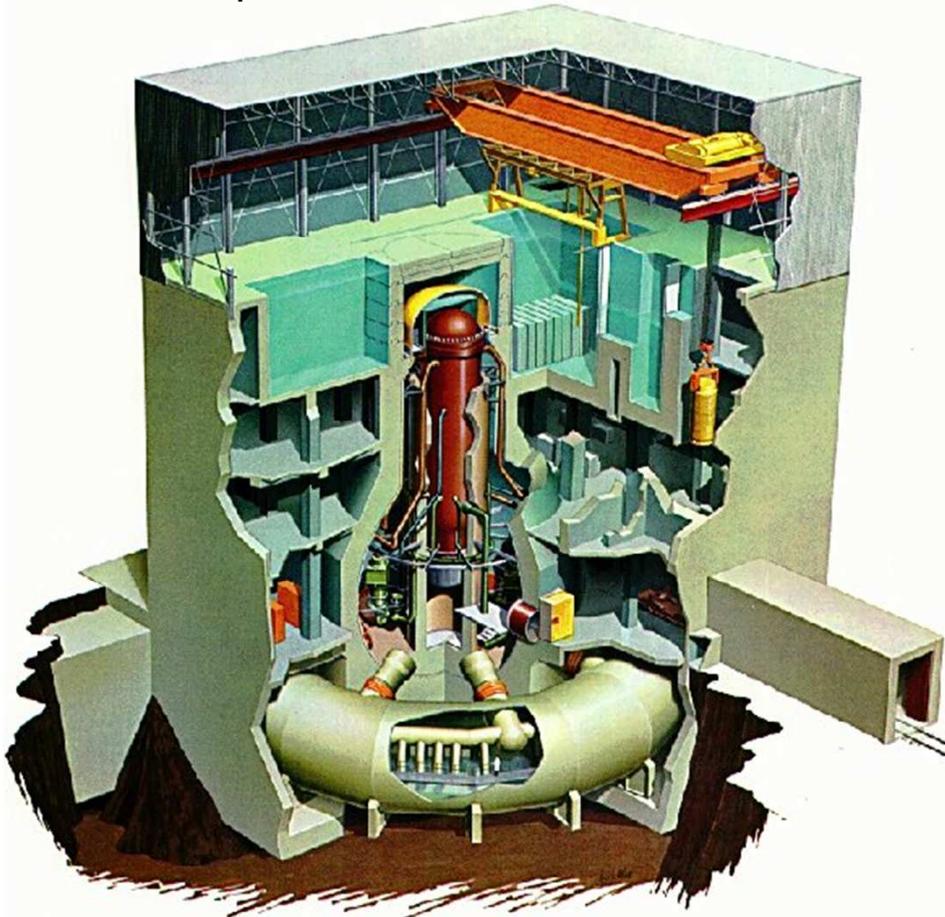
+ piscine de stockage commune contenant 6400 assemblages

¹ évaluations IRSN

Conception des bâtiments réacteurs

Structure du bâtiment

- Structure inférieure en béton
- Structure supérieure et plancher de service en acier



Enceinte de confinement

- Dry-Well (forme de poire)
- Wet-Well (forme de tore)



Conception des bâtiments réacteurs

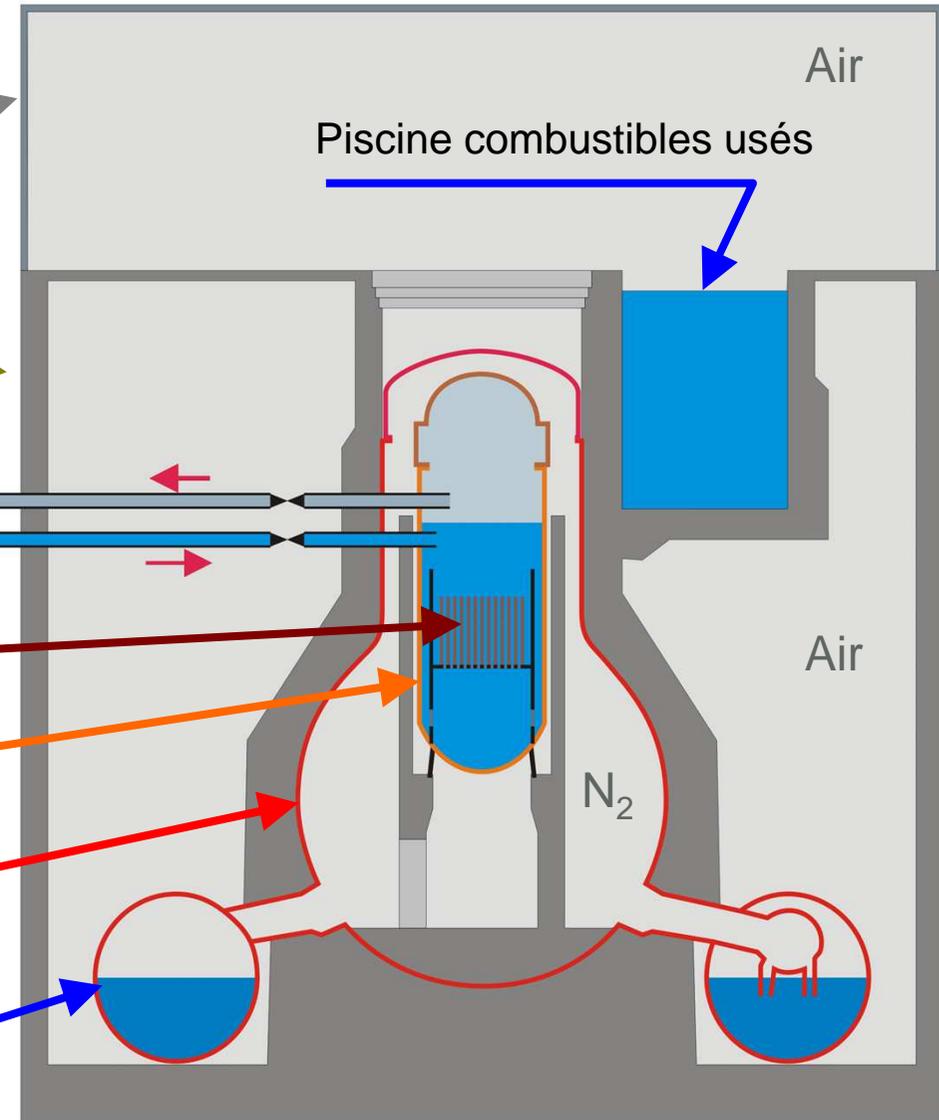
■ Plancher de service



Conception des bâtiments réacteurs

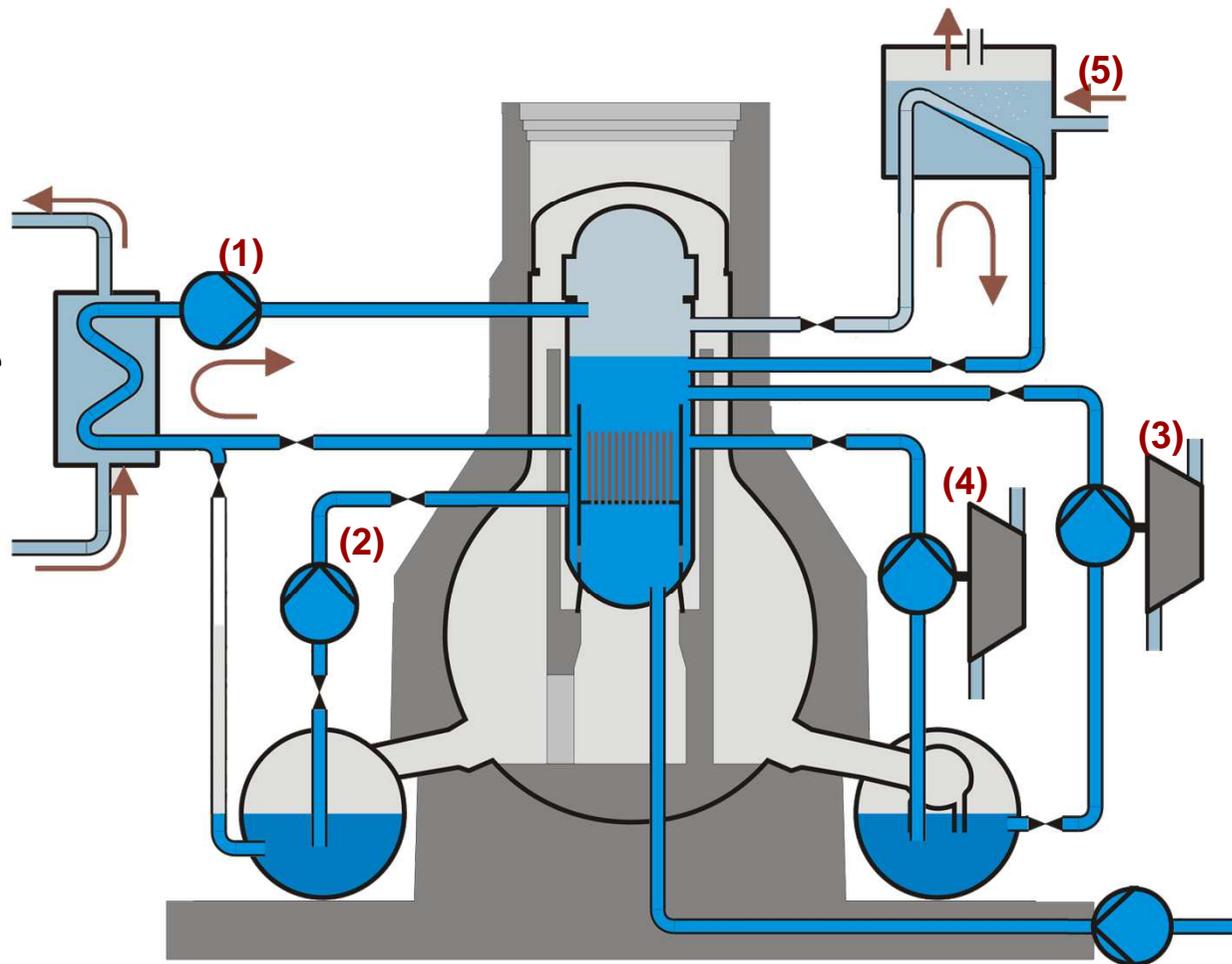
- Plancher de service (structure acier)
- Bâtiment réacteur béton (confinement secondaire)
- Coeur du réacteur
- Cuve du réacteur
- Confinement (Dry well)
- Confinement (Wet Well) / Piscine de condensation

Sortie vapeur du cœur
Alimentation en eau du cœur



Les systèmes de refroidissement d'urgence du cœur

- 1) Système d'évacuation de la puissance résiduelle
- 2) Système d'aspersion basse pression du cœur (APRP)
- 3) Système d'injection haute pression du cœur (APRP)
- 4) Circuit d'isolement et de refroidissement du cœur (Unit 2,3 [BWR4])
- 5) Condenseur d'isolement (Unit 1 [BWR3])
- 6) injection d'eau borée



Les systèmes de refroidissement d'urgence du cœur

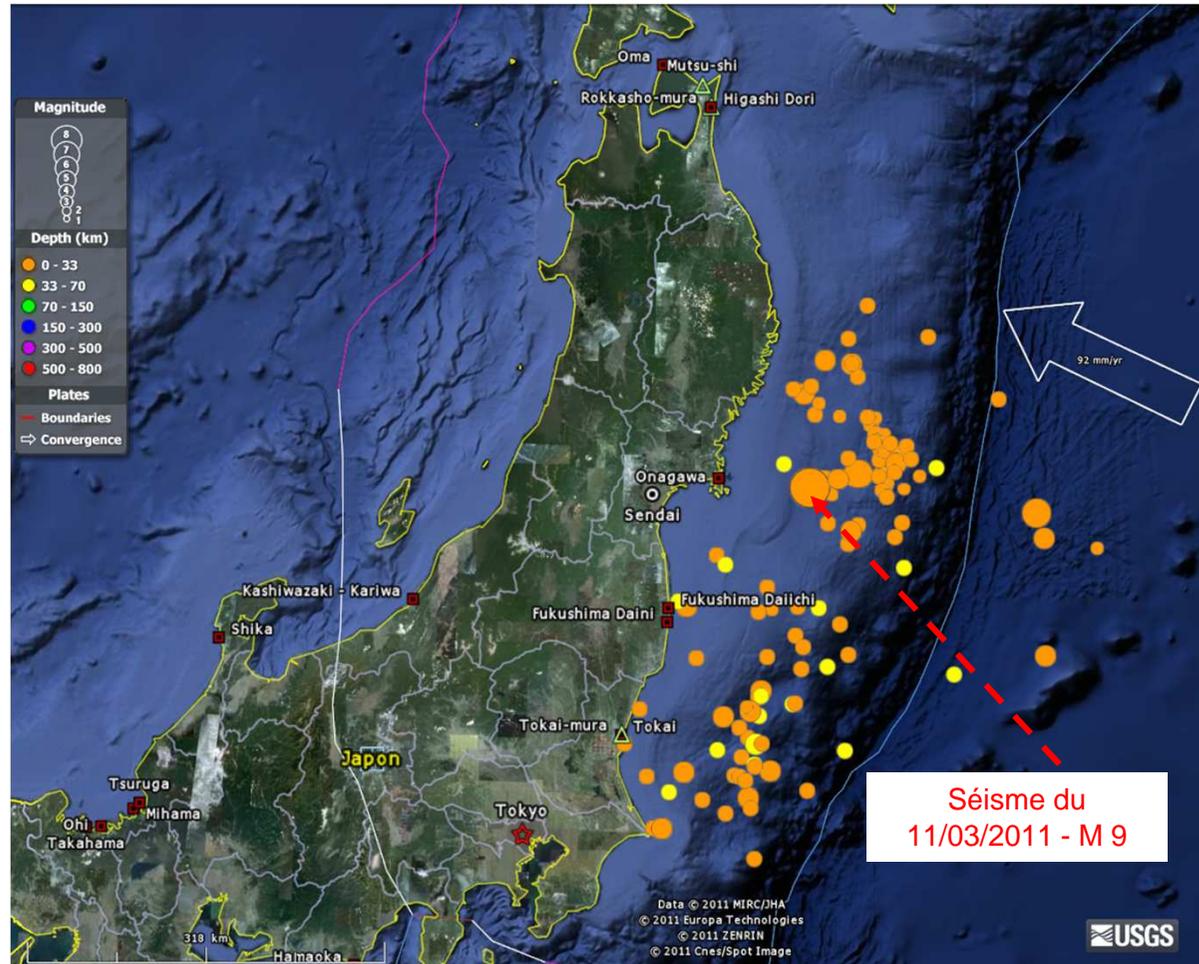
■ Conçus pour respecter le guide de conception NSC N° 27

- Ils doivent permettre d'assurer un arrêt sûr et le refroidissement du réacteur en cas de perte totale d'alimentation électrique de courte durée (les systèmes 3), 4) et 5) peuvent fonctionner sur batteries pendant environ 8 à 10 h)
- Ils ne sont pas prévus pour pallier à une perte totale d'alimentation électrique sur le long terme car il est fait l'hypothèse que le laps de temps avant une défaillance des batteries est suffisant pour rétablir l'alimentation ou mettre en place des systèmes d'alimentation d'urgence (générateurs diesels)

Sommaire

- **Conception des réacteurs de la centrale de FUKUSHIMA-DAIICHI**
- **Déroulement de l'accident**
- **Situation actuelle des réacteurs, éléments d'évaluation des rejets**

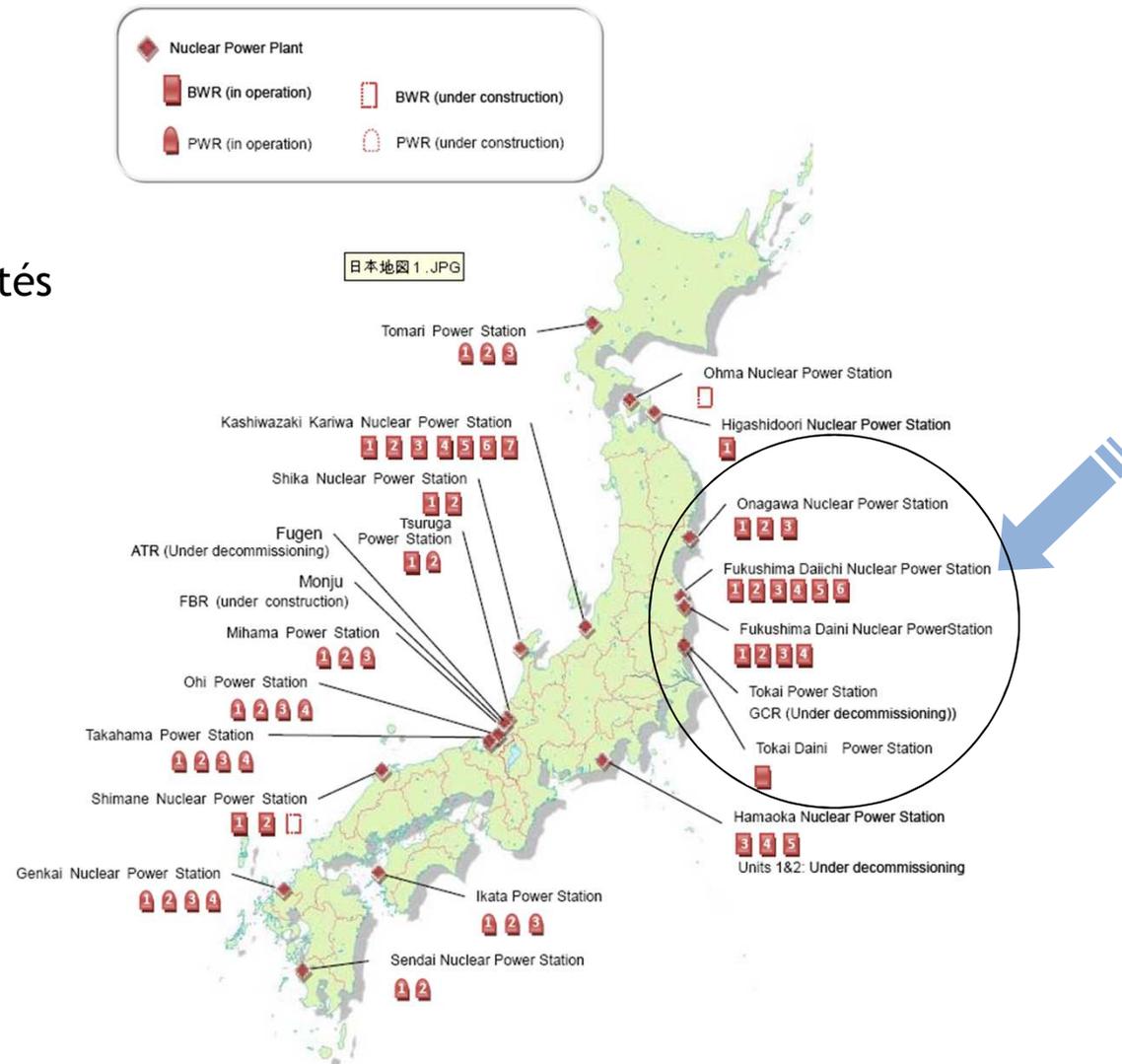
Initiateurs de l'accident



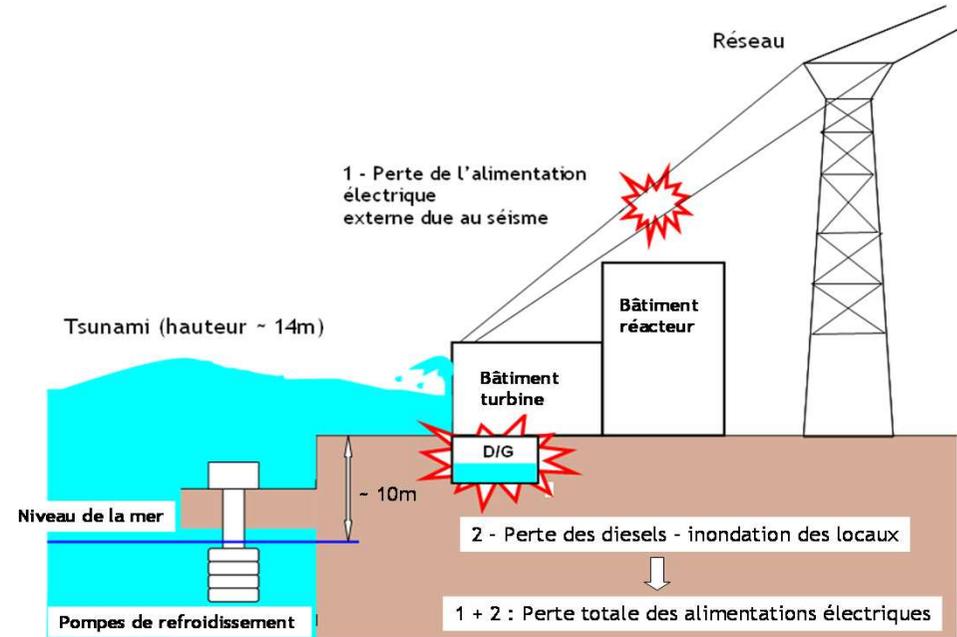
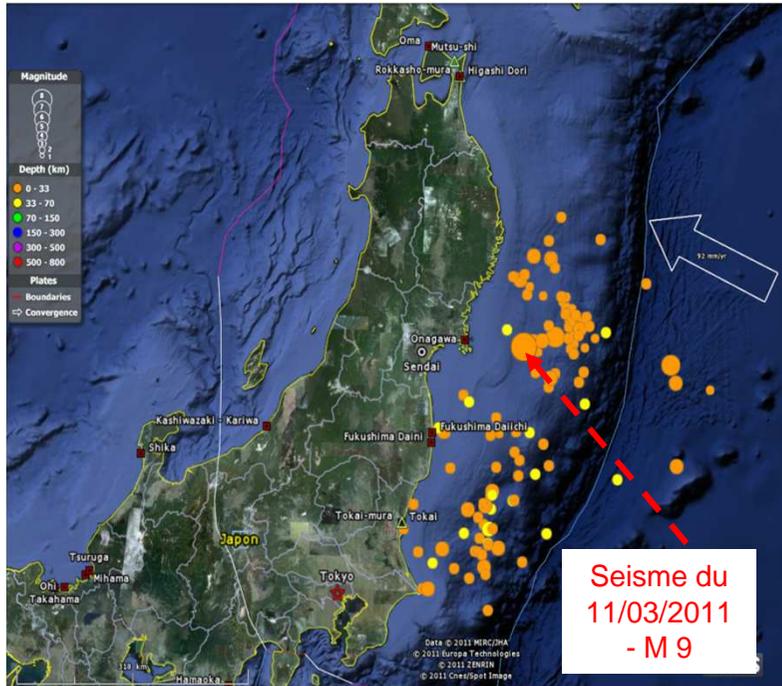
11 mars 2011 : 14h46 JST : séisme de magnitude 9 au large de l'île d'Honshu
15h36 JST : tsunami

Centrales japonaises affectées

14 réacteurs affectés



Les agressions successives



15h36 JST : tsunami - inondation par plus de 4 m d'eau dans certaines parties de la centrale

11 mars 2011 - 14h46 JST : séisme de magnitude 9

Situation de perte totale des alimentations électriques, de la source froide sur les installations n° 1 à 4 du site de Fukushima - Démarrage d'un diesel sur les tranches 5-6

Echec de la réalimentation des moyens de secours

- Fusion du cœur de trois réacteurs
- Endommagements par explosions

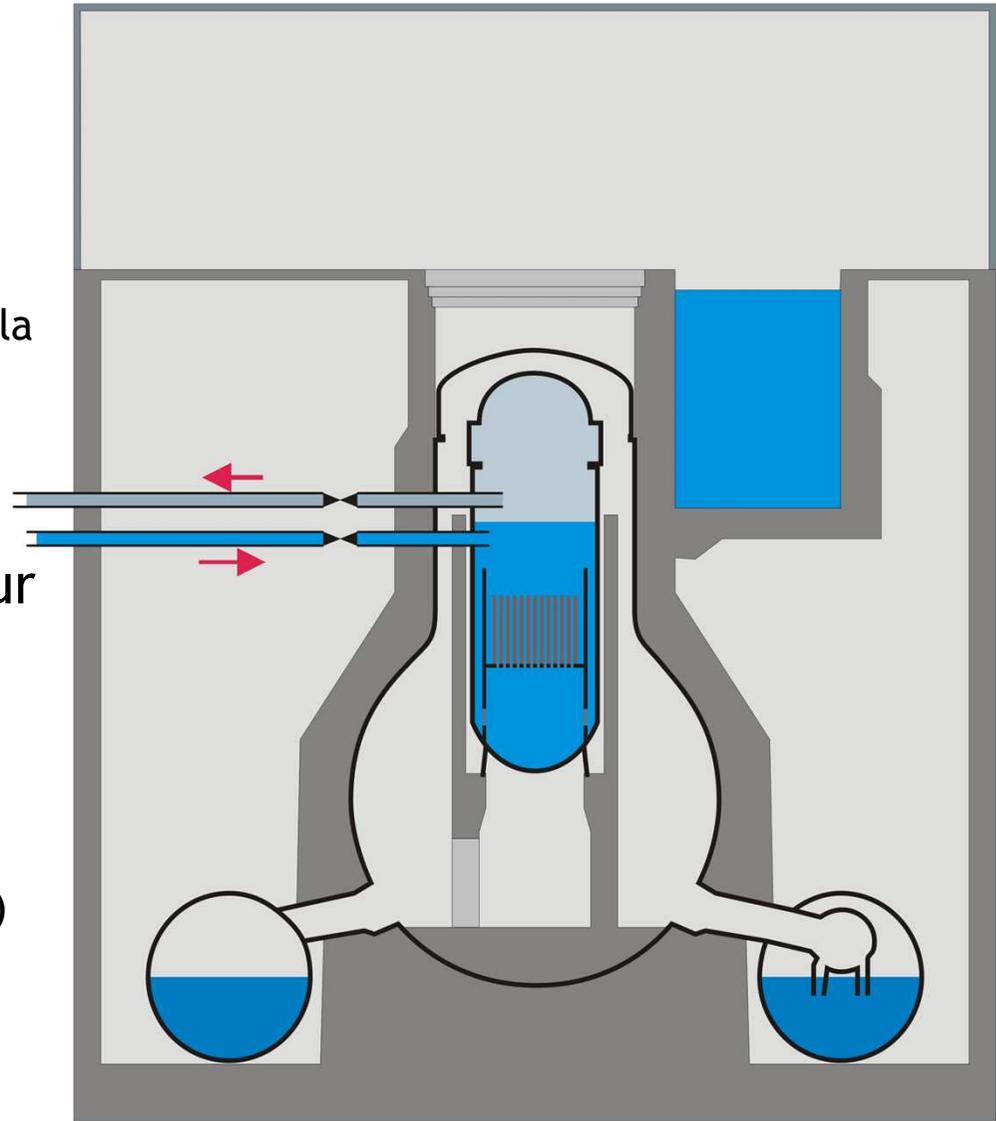
Déroulement de l'accident

11.3.2011 14:46 - séisme

- Magnitude 9
- Perte du réseau électrique dans la partie nord du japon
- Dommages aux réacteurs faibles

Arrêt automatique du réacteur

- plus de puissance due aux réactions de fission
- chaleur dégagée par la décroissance des produits radioactifs (puissance résiduelle)
 - Après arrêt (SCRAM) ~6% PN
 - Après 1 jour ~1% PN
 - Après 5 jours ~0.5% PN



Déroulement de l'accident

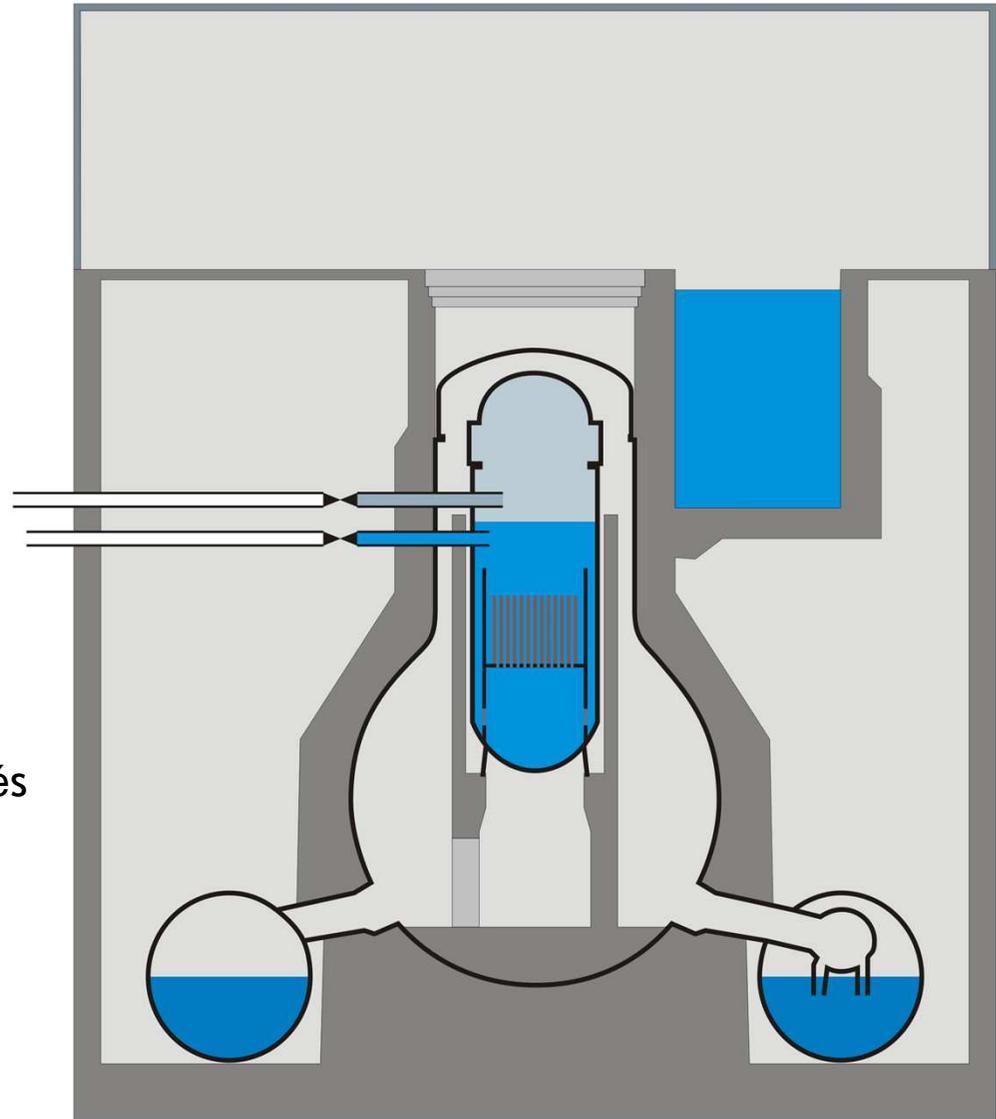
Isolement du confinement

- Fermeture de toutes les pénétrations de l'enceinte de confinement non utiles pour assurer la sûreté du réacteur
- Arrêt des turbines

Démarrage des générateurs diesels

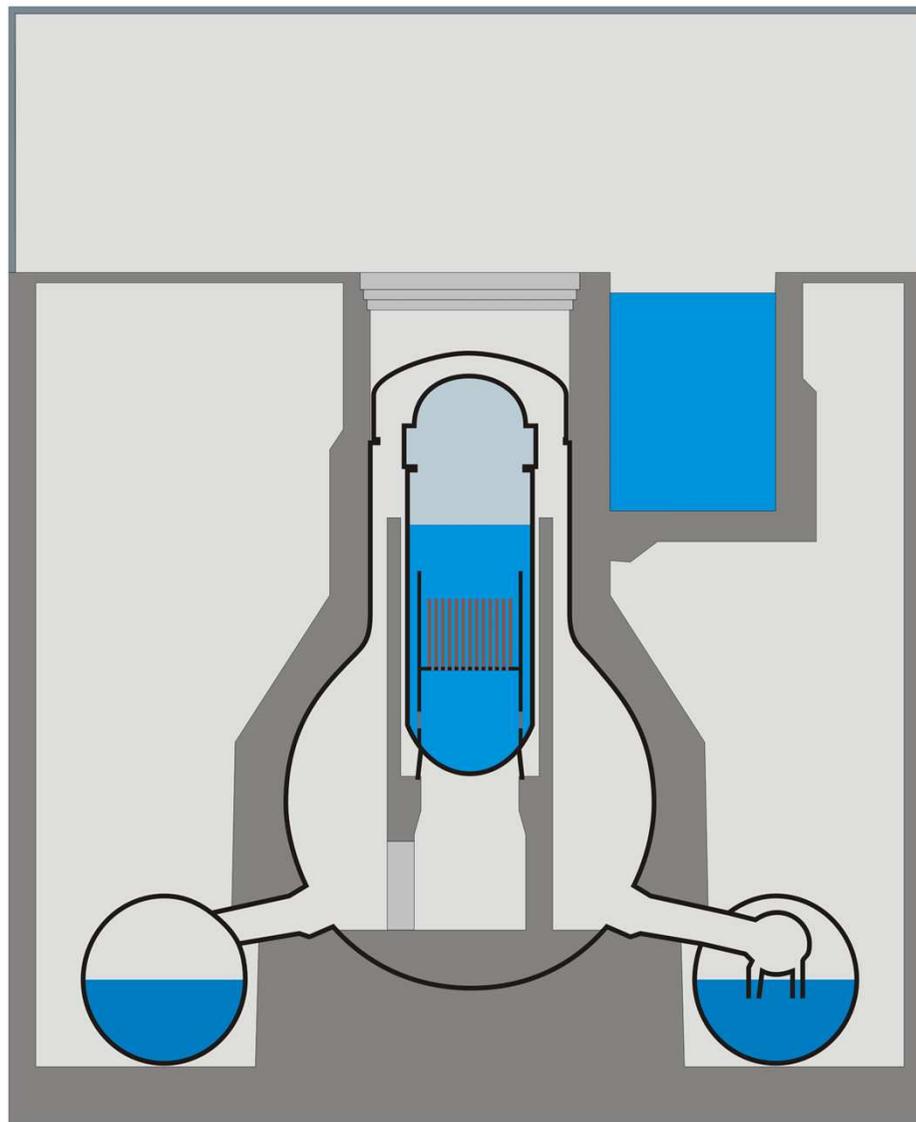
- Les systèmes de refroidissement d'urgence du cœur sont alimentés

La centrale est dans un état stabilisé



Déroulement de l'accident

- 11.3. 15:42 Le tsunami frappe la centrale
 - La centrale est conçue pour un tsunami d'une hauteur de 5.7 m, protection de 6.5 m
 - Hauteur du tsunami ~14 m
 - Inondations des générateurs diesels et de la station de pompage assurant l'alimentation en eau de refroidissement (source froide)
- Perte totale des alimentations électriques (mode commun)
 - Seules les batteries sont disponibles
 - Perte des systèmes de refroidissement d'urgence à l'exception des systèmes 3), 4), 5) fonctionnant sur batteries



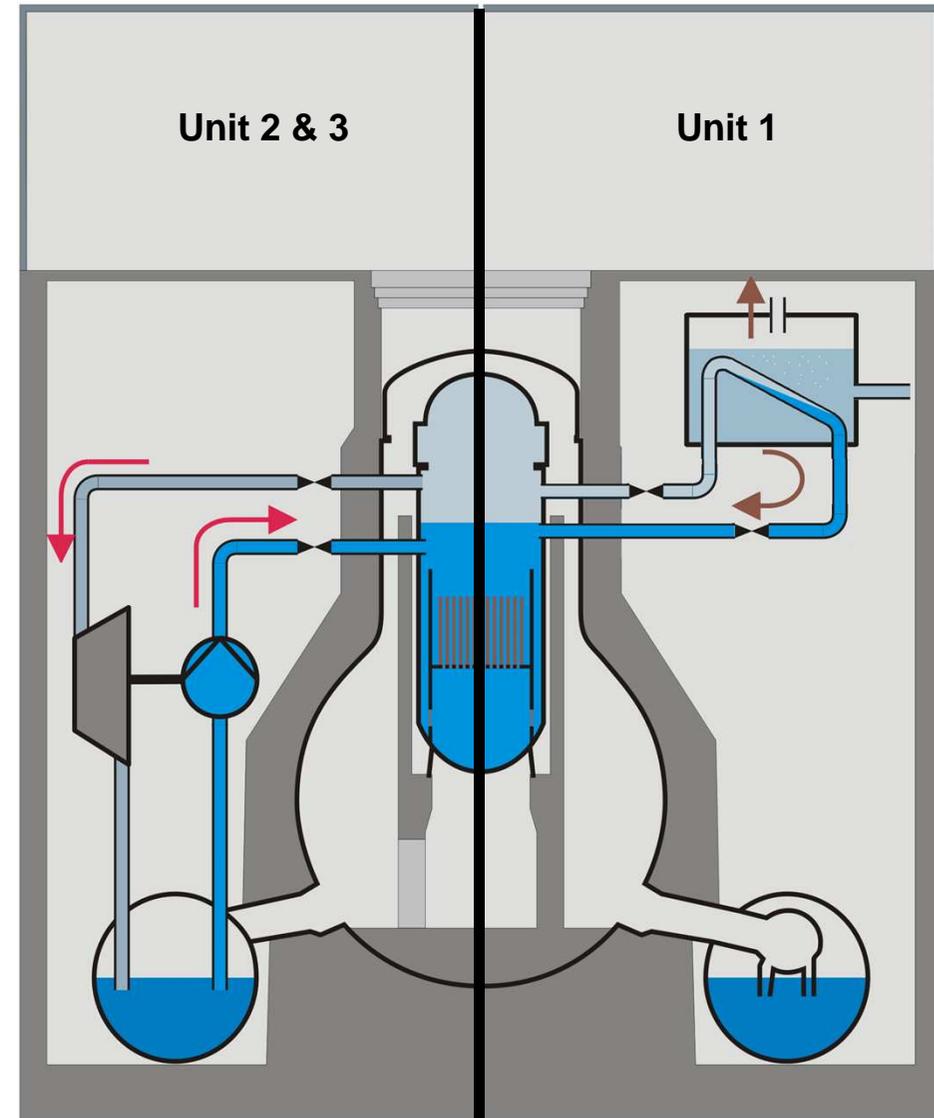
Déroulement de l'accident

■ Fukushima I Unit 1

- Condenseur d'isolement (5)
 - La vapeur entre dans un échangeur de chaleur
 - Les condensats sont réinjectés dans le cœur
 - la vapeur est relâchée du réacteur côté secondaire
- Une pompe est nécessaire pour l'alimentation en eau

■ Fukushima I Unit 2 and 3

- Pompe d'isolement du cœur(4)
 - La vapeur provenant du réacteur actionne une turbine
 - La turbine actionne une pompe qui injecte de l'eau du wet-well dans le cœur
 - La vapeur se condense dans le wet-well
 - Nécessite une alimentation électrique et une température du wet well $< 100^{\circ}\text{C}$
- Pas d'évacuation de la chaleur



Déroulement de l'accident

11.3. 16:36 Unit 1

- Perte du refroidissement par le condenseur d'isolement (perte de l'alimentation en eau de refroidissement?)

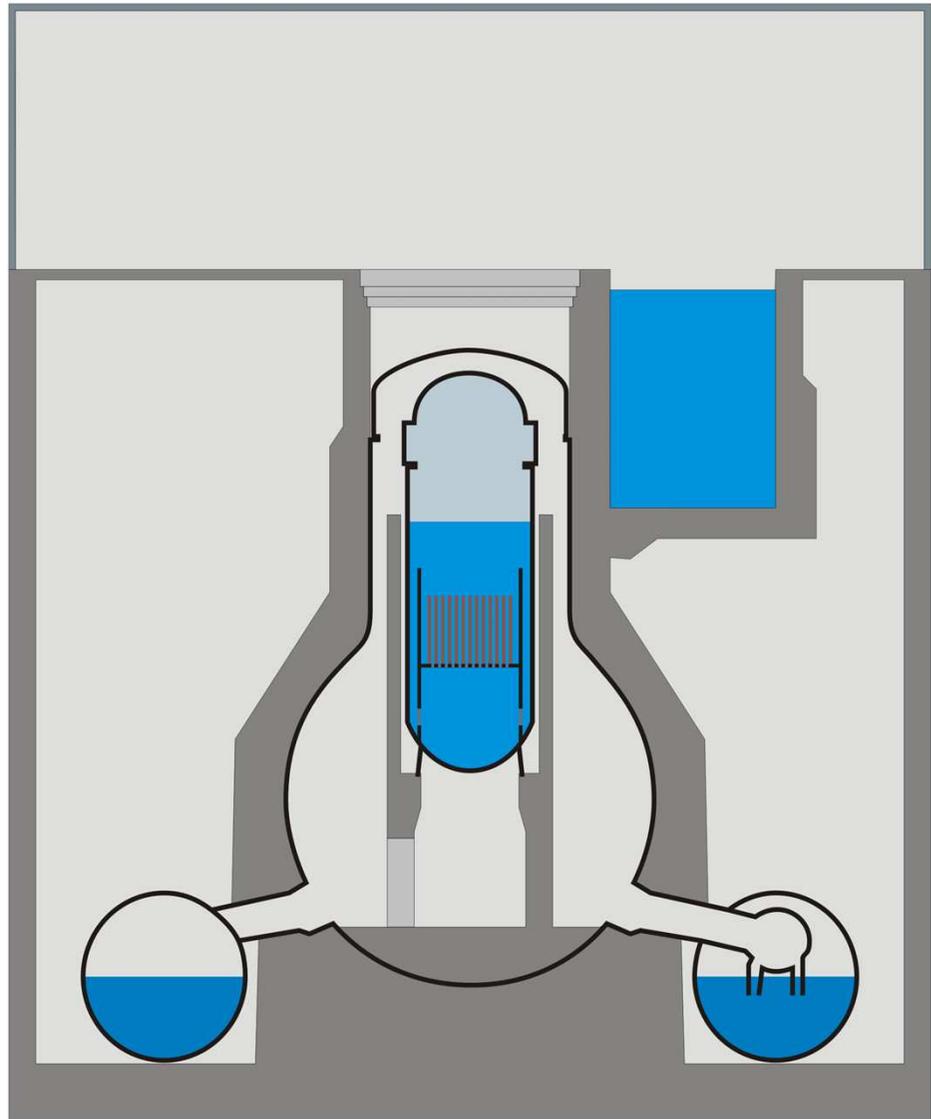
13.3. 5:30 Unit 3

- Perte du refroidissement par le circuit d'isolement et de refroidissement du cœur (défaillance des batteries?)

14.3. 13:25 Unit 2

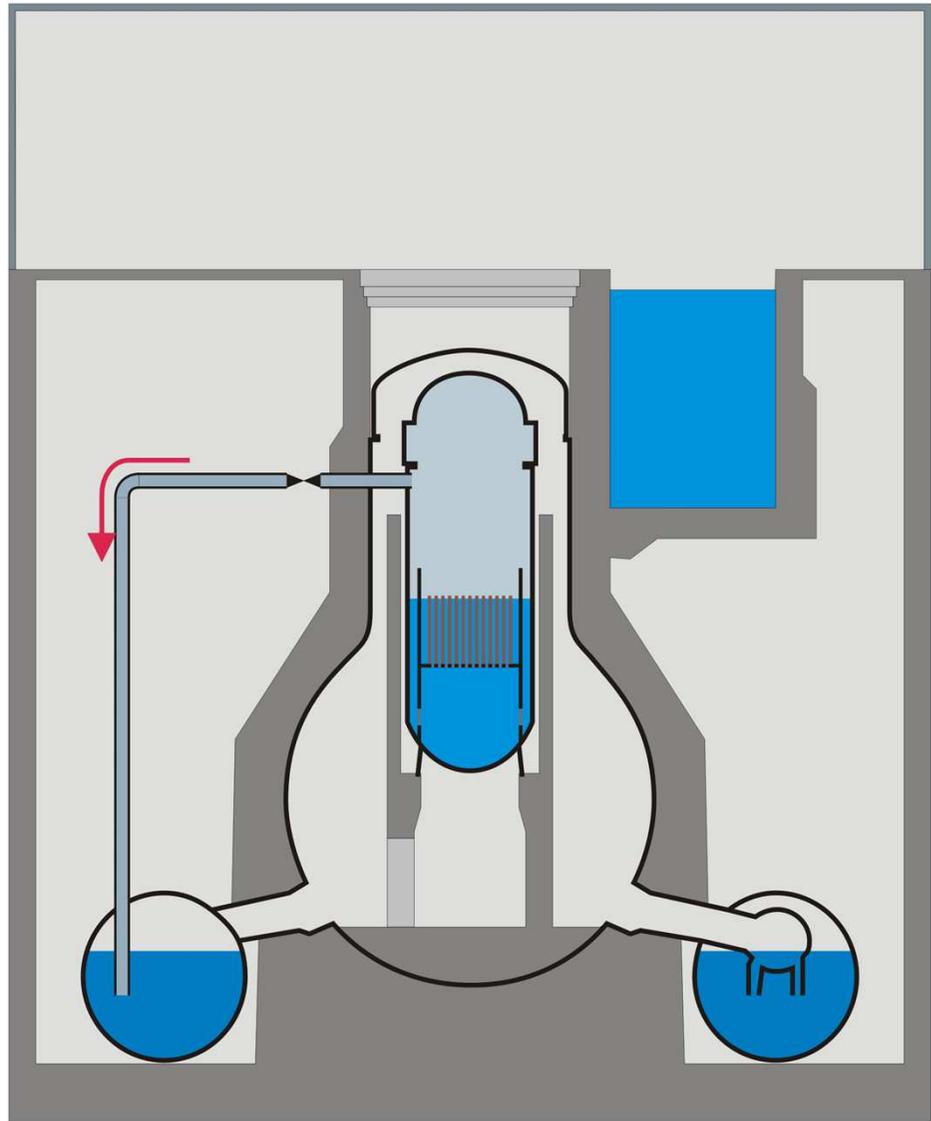
- Idem unit 3 (défaillance de la pompe?)

- Les réacteurs Unit 1-3 ne sont plus alimentés par aucun circuit permettant d'évacuer la chaleur



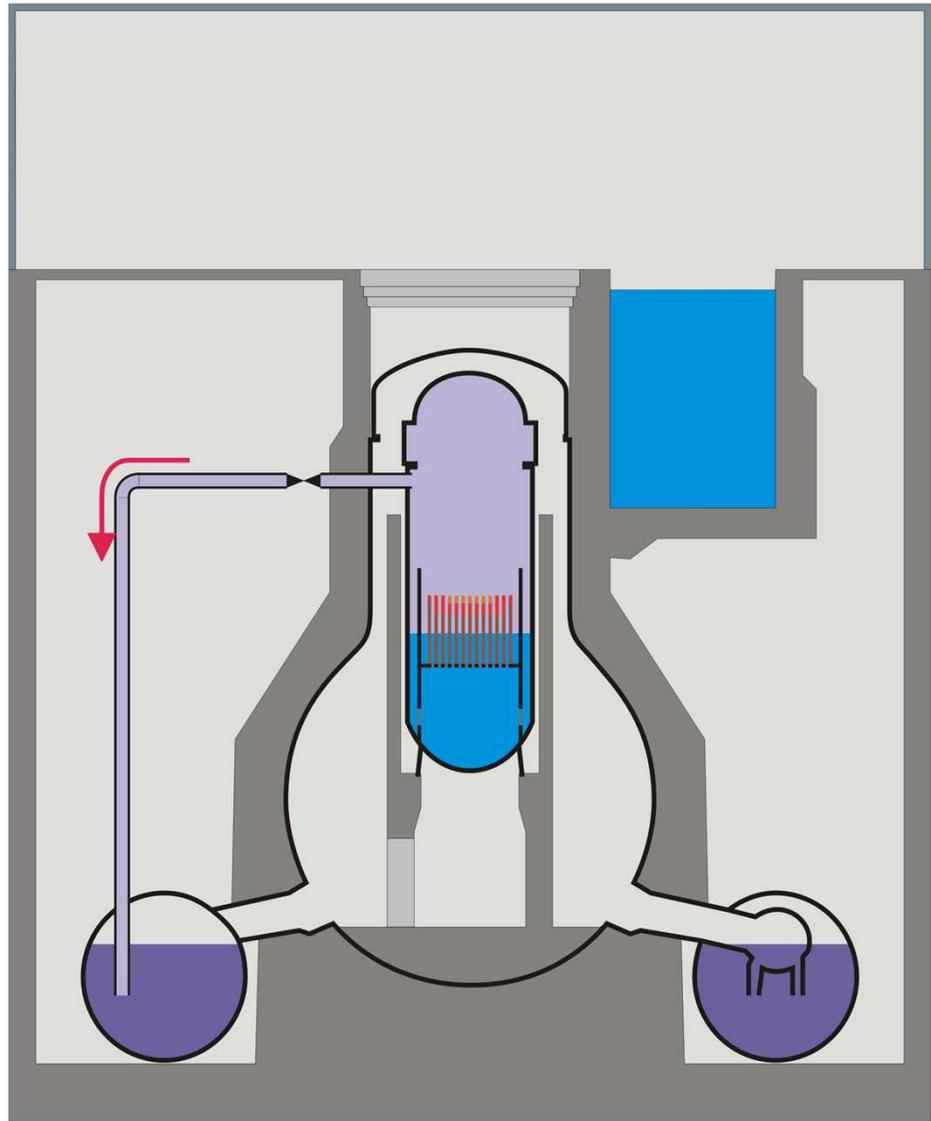
Déroulement de l'accident

- La puissance résiduelle produit de la vapeur et une augmentation de pression dans la cuve du réacteur
- Par ouverture d'une vanne de dépressurisation la vapeur se décharge dans le wet-well
- Le niveau d'eau décroît dans la cuve



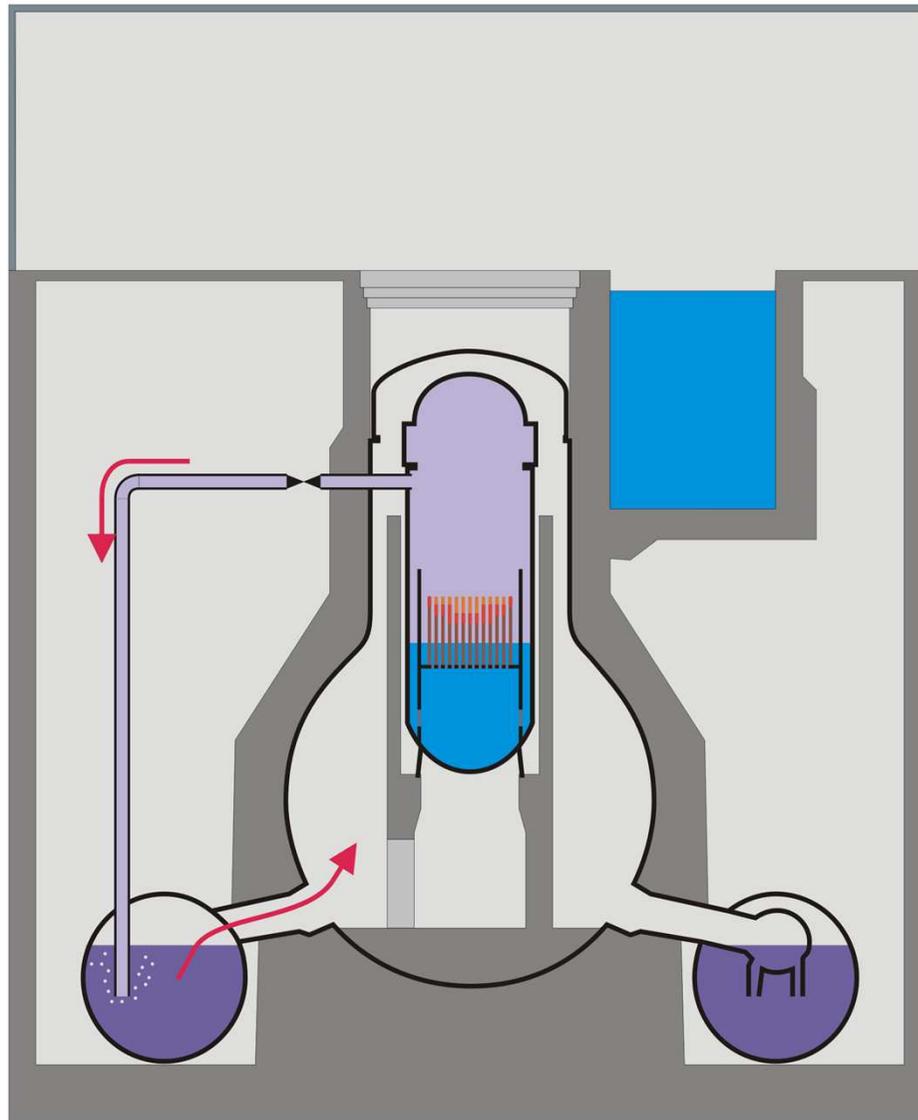
Déroulement de l'accident

- ~50% du cœur découvert
 - Augmentation de la température des gaines des crayons combustibles
- ~2/3 du cœur découvert
 - Les températures de gaines dépassent $\sim 900^{\circ}\text{C}$
 - gonflement / rupture de gaines
 - Relâchement des produits de fission présents dans les gaps des crayons combustibles



Déroulement de l'accident

- ~3/4 du cœur découvert
 - Température de gaines ~1200°C
 - Démarrage de la réaction d'oxydation du Zirconium par la vapeur
 - $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$
 - Réaction exothermique qui génère de l'hydrogène
 - Unit 1: 300-600kg
 - Unit 2/3: 300-1000kg
 - L'hydrogène est transféré au travers du wet-well vers le dry-well



Déroulement de l'accident

■ à ~1800° C

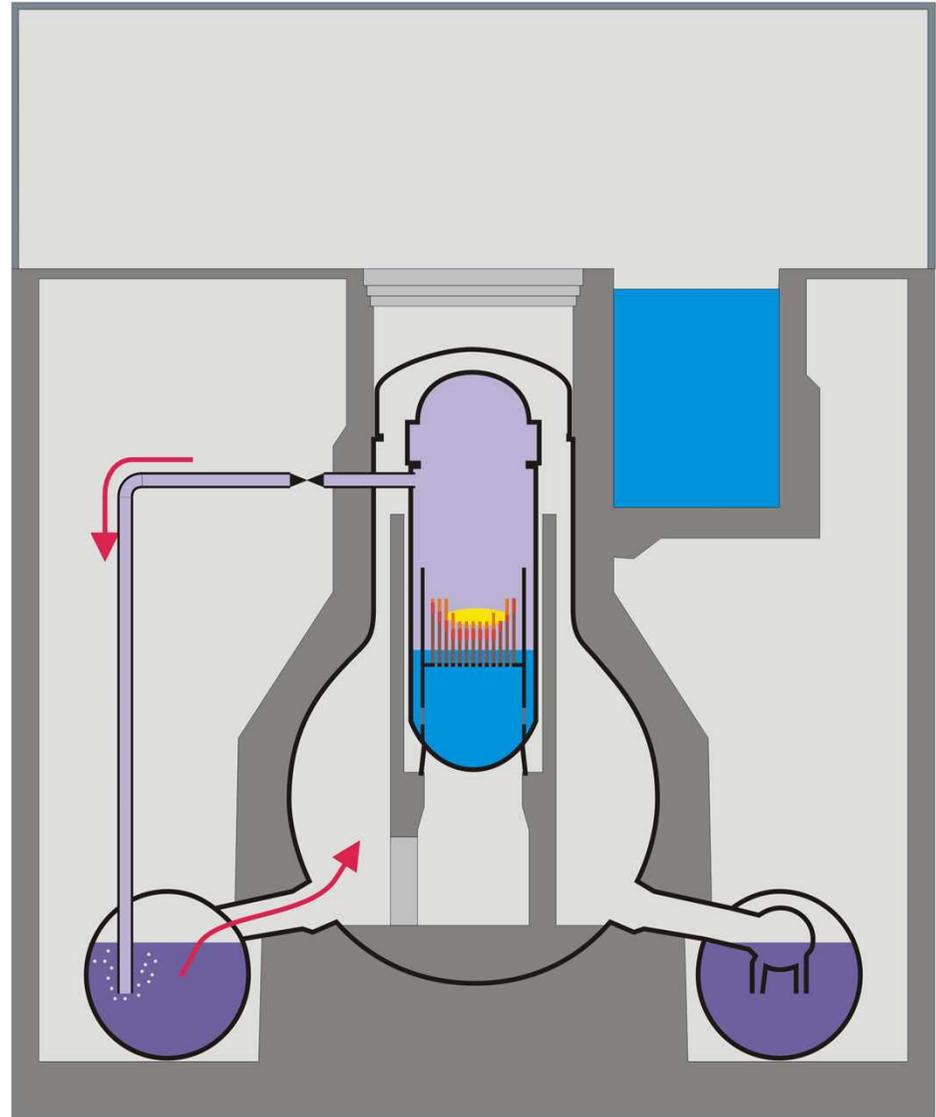
- Fusion des gaines
- Fusion des structures acier

■ à ~2300° C et au delà

- dégradation des crayons combustibles
- Formation probable de lits de débris dans le cœur
- Fusion d'eutectiques Uranium-Zirconium

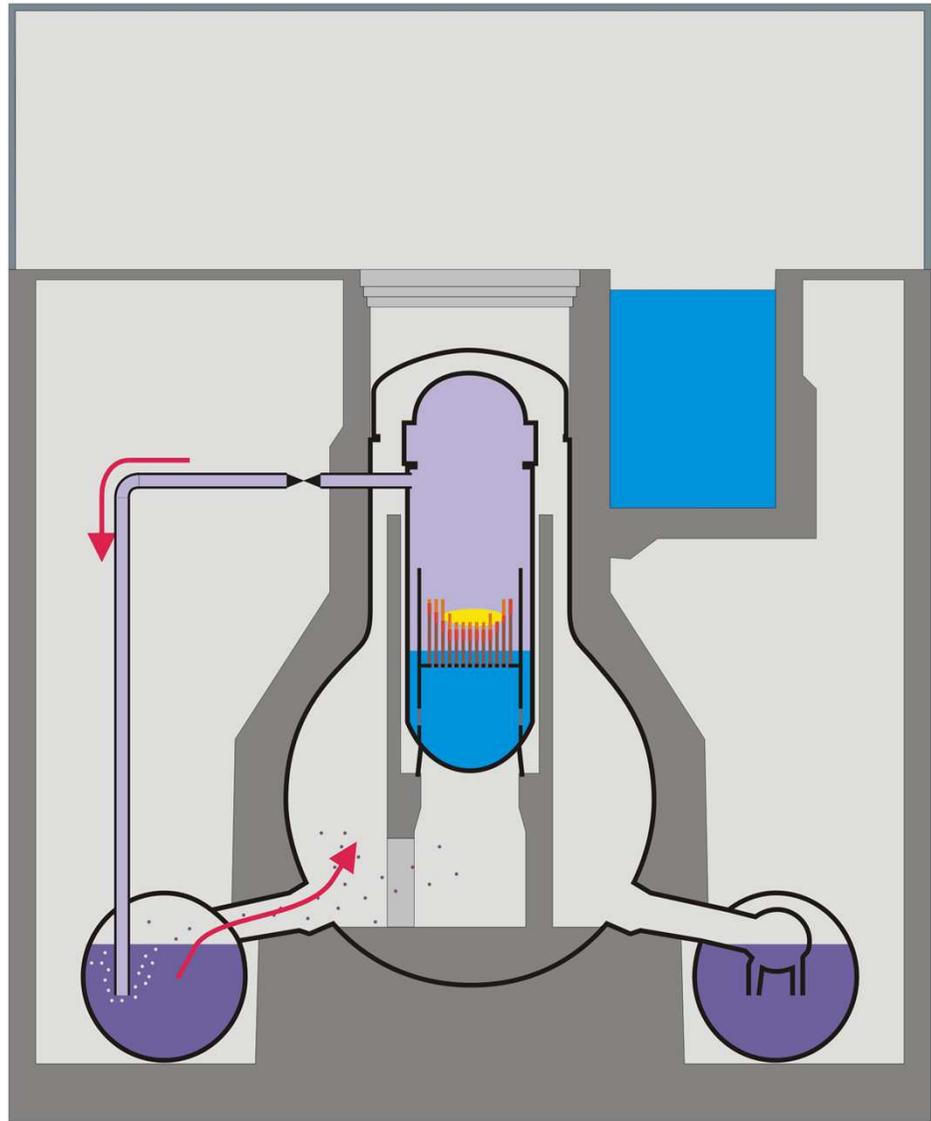
■ Injection d'eau de mer dans les cœurs pour arrêter la fusion du cœur dans les 3 réacteurs

- Unit 1: 12.3. 20:20
- Unit 2: 14.3. 20:33
- Unit 3: 13.3. 9:38



Déroulement de l'accident

- Relâchements de produits de fission PF au cours de la fusion
 - Xénon, Césium, Iode,...
 - Une part des PF condense sous forme d'aérosols
- Transfert par la vanne de décharge des PF dans le wet well
 - Par barbotage une fraction des aérosols est retenue dans l'eau du wet well
- Les gaz et les aérosols non retenus dans le wet well sont transférés dans le dry well
 - Dépôt d'une part des aérosols sur les surfaces



Déroulement de l'accident

■ Enceinte de confinement

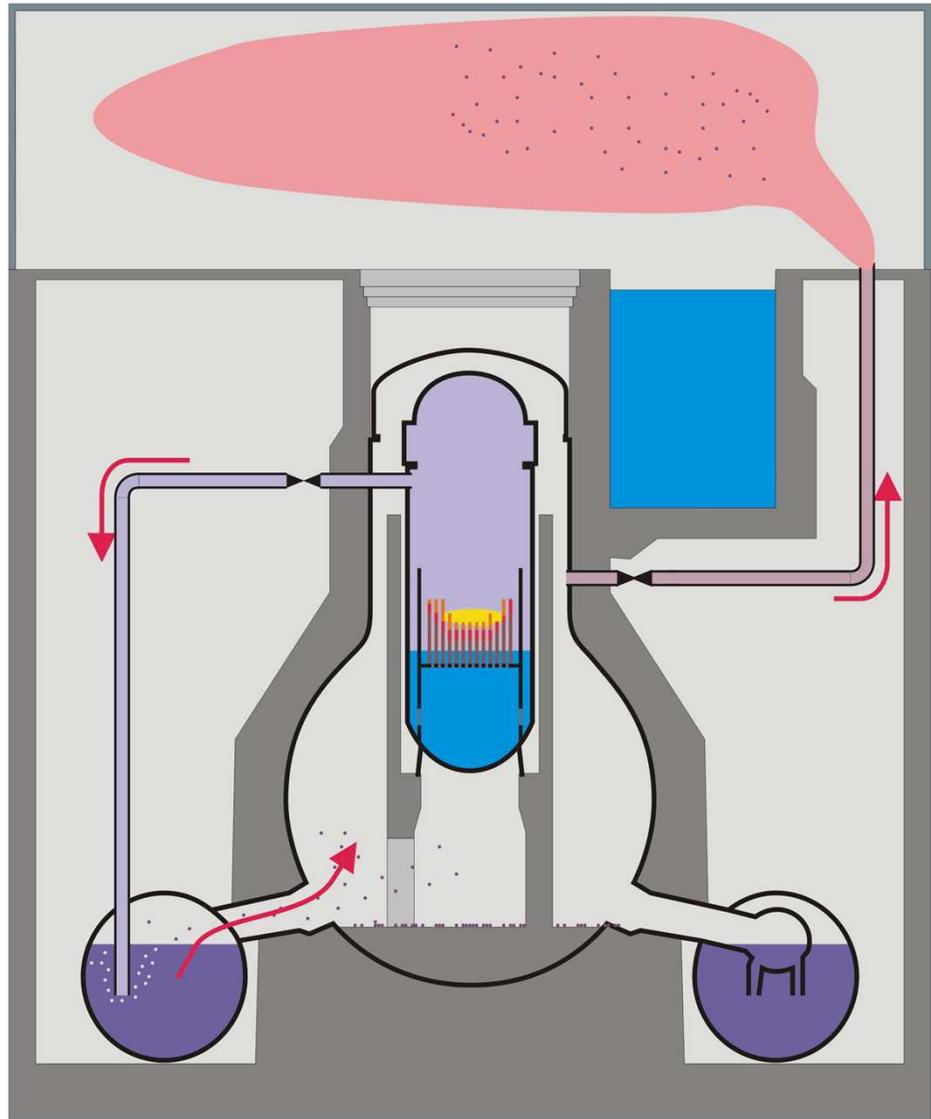
- Dernière barrière entre les substances radioactives et l'environnement
- Conçue pour une pression de 4-5 bar

■ La pression atteint 8 bars

- Gaz d'inertage (azote)
- Hydrogène produit par l'oxydation
- Vapeur produite par ébullition de l'eau du wet well

■ Dépressurisation de l'enceinte

- Unit 1: 12.3. 4:00
- Unit 2: 13.3 00:00
- Unit 3: 13.3. 8:41

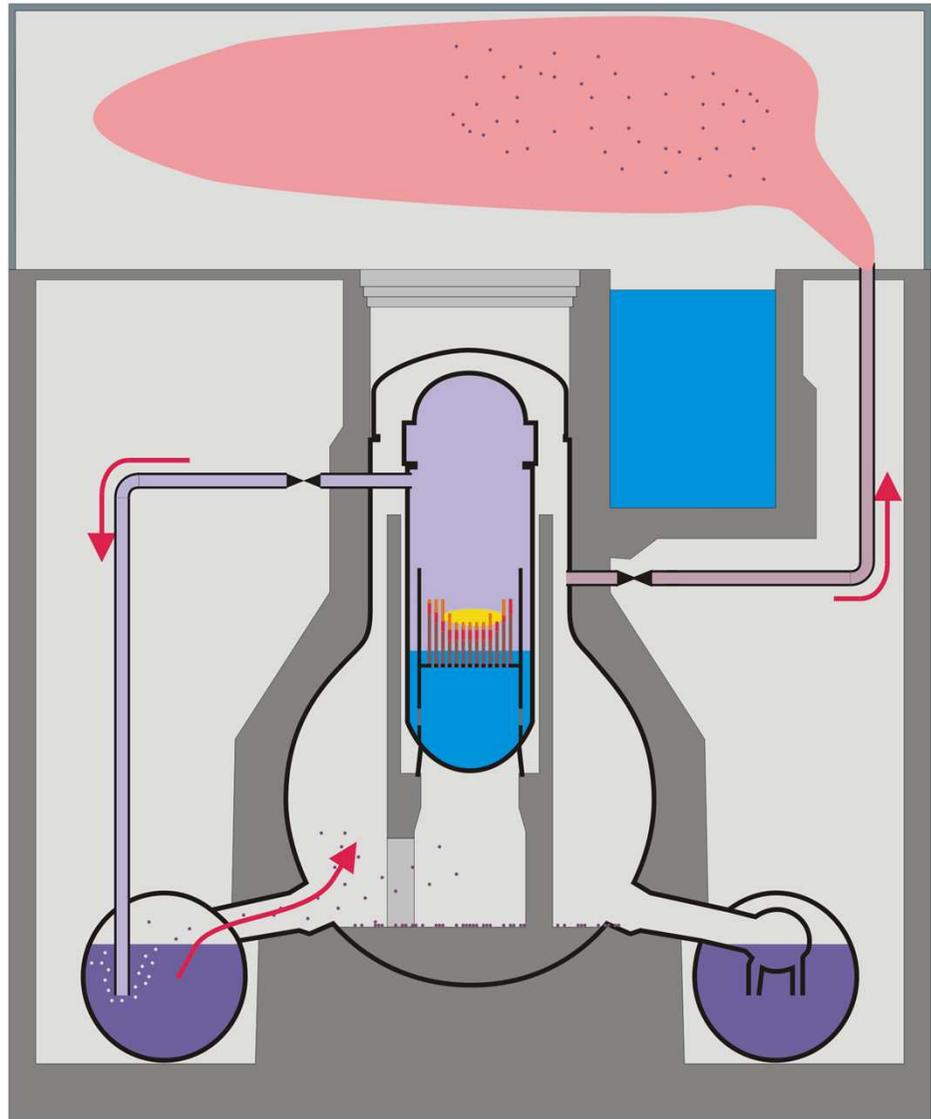


Déroulement de l'accident

Avantages et désavantages d'une dépressurisation de l'enceinte

- Évacue l'énergie de l'enceinte (seule voie restante)
- Réduit la pression à ~ 4 bar
- Relâchement de produits de fission (Iode, Césium)
- Relâchement d'hydrogène

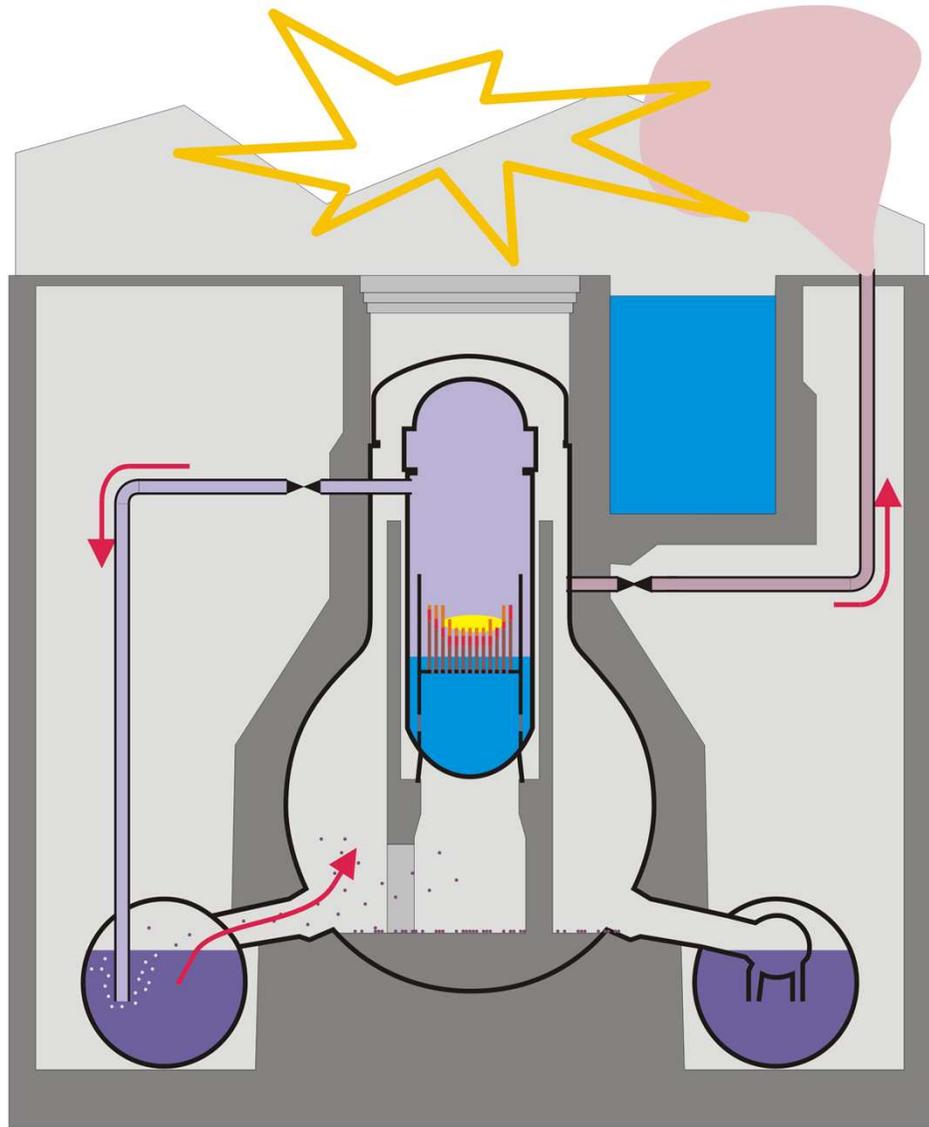
Relâchement dans le bâtiment contenant le plancher de service



Déroulement de l'accident

Unit 1 et 3

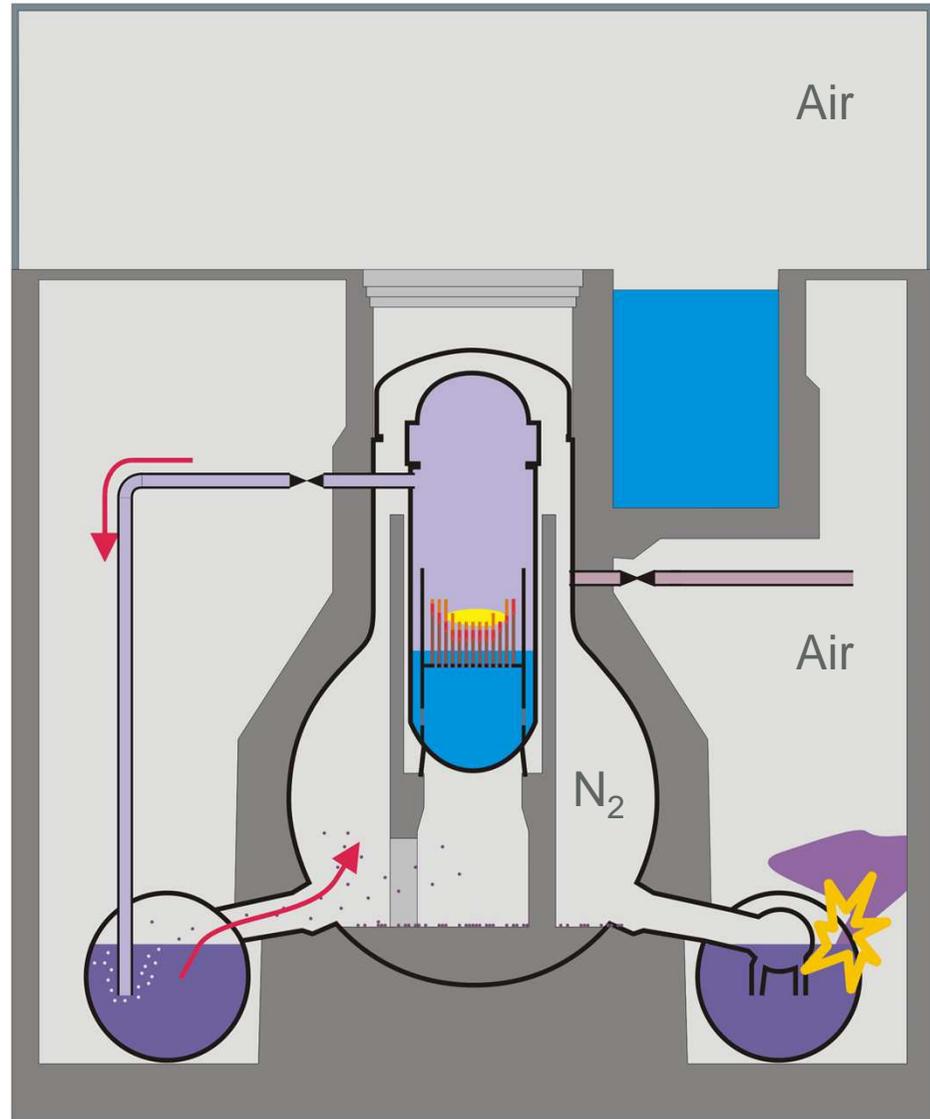
- Explosion d'hydrogène dans le bâtiment contenant le plancher de service
- Destruction de la structure acier
- Les parois en béton renforcé semblent intactes



Déroulement de l'accident

Unit 2

- Rupture probable du wet well suite à une augmentation de pression dans l'enceinte de confinement
- Relâchement d'eau fortement contaminée et relâchement non contrôlé de gaz et d'aérosols radioactifs
- Évacuation temporaire de la centrale
- Débits de dose élevés localement sur le site



Déroulement de l'accident - réacteur n° 1

11 mars

- 14h46 Séisme
- 15h42 Tsunami
- 16h36 Perte totale des moyens d'injection en cuve

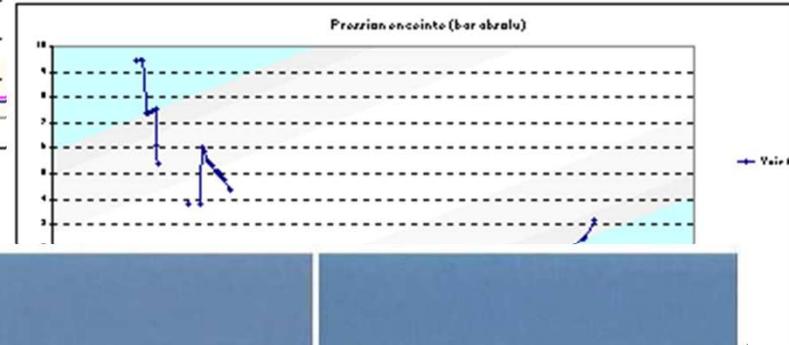
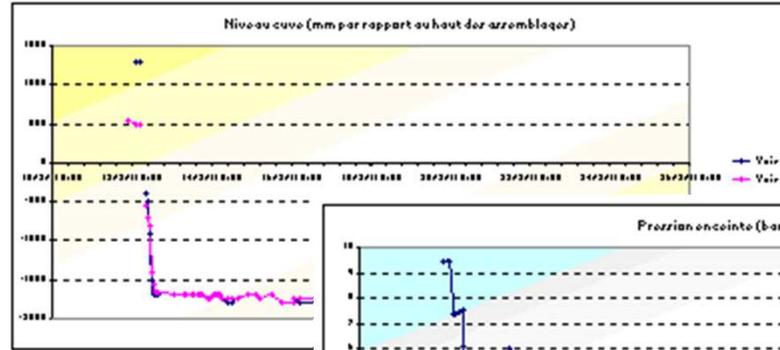
12 mars

- 00h49 Augmentation anormale de la pression dans l'enceinte
- 10h17 Eventage de l'enceinte de confinement → Début des rejets
- 15h36 Explosion H₂ dans le bâtiment du réacteur
- 20h20 Injection d'eau de mer borée en cuve

Dégradation du cœur

25 mars

- 15h37 Injection d'eau douce

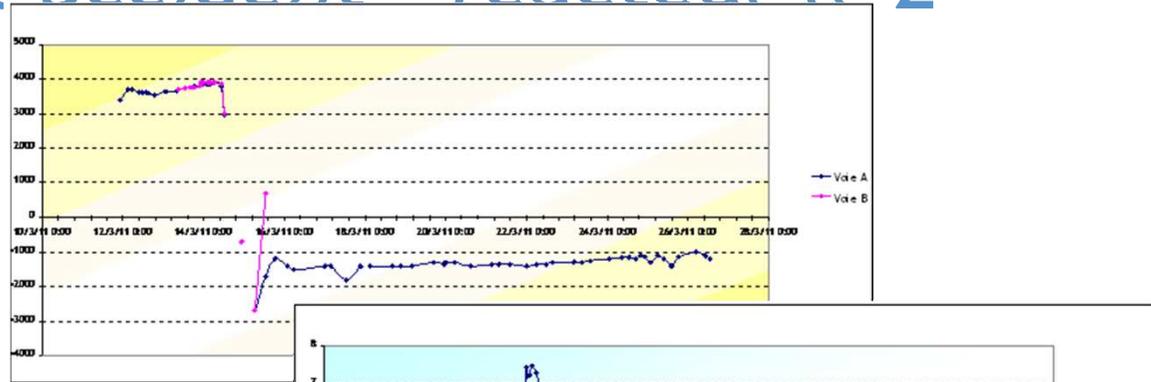


Cœur très fortement endommagé - relocalisation du corium en fond de cuve

Déroulement de l'accident - réacteur n°2

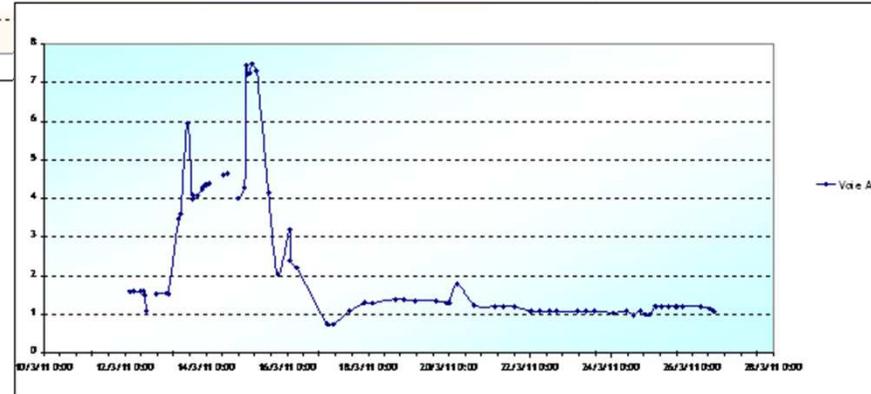
11 mars

- 14h46 Séisme
- 15h42 Tsunami
- 16h36 Perte totale des moyens d'injection en cuve
- Acheminement d'un Diesel sur le site - autonomie limitée



14 mars

- 13h00 Baisse du niveau d'eau dans la cuve - ouverture sur le toit du BR 2



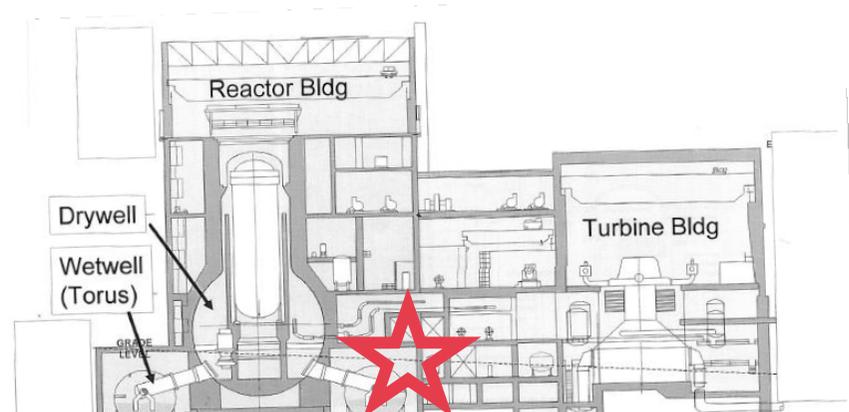
Dégradation du cœur

- 0h00 Eventage de l'enceinte de confinement → Rejets
- 1h10 Injection d'eau de mer borée en cuve

- 6h10 Défaillance du tore (explosion hydrogène?)

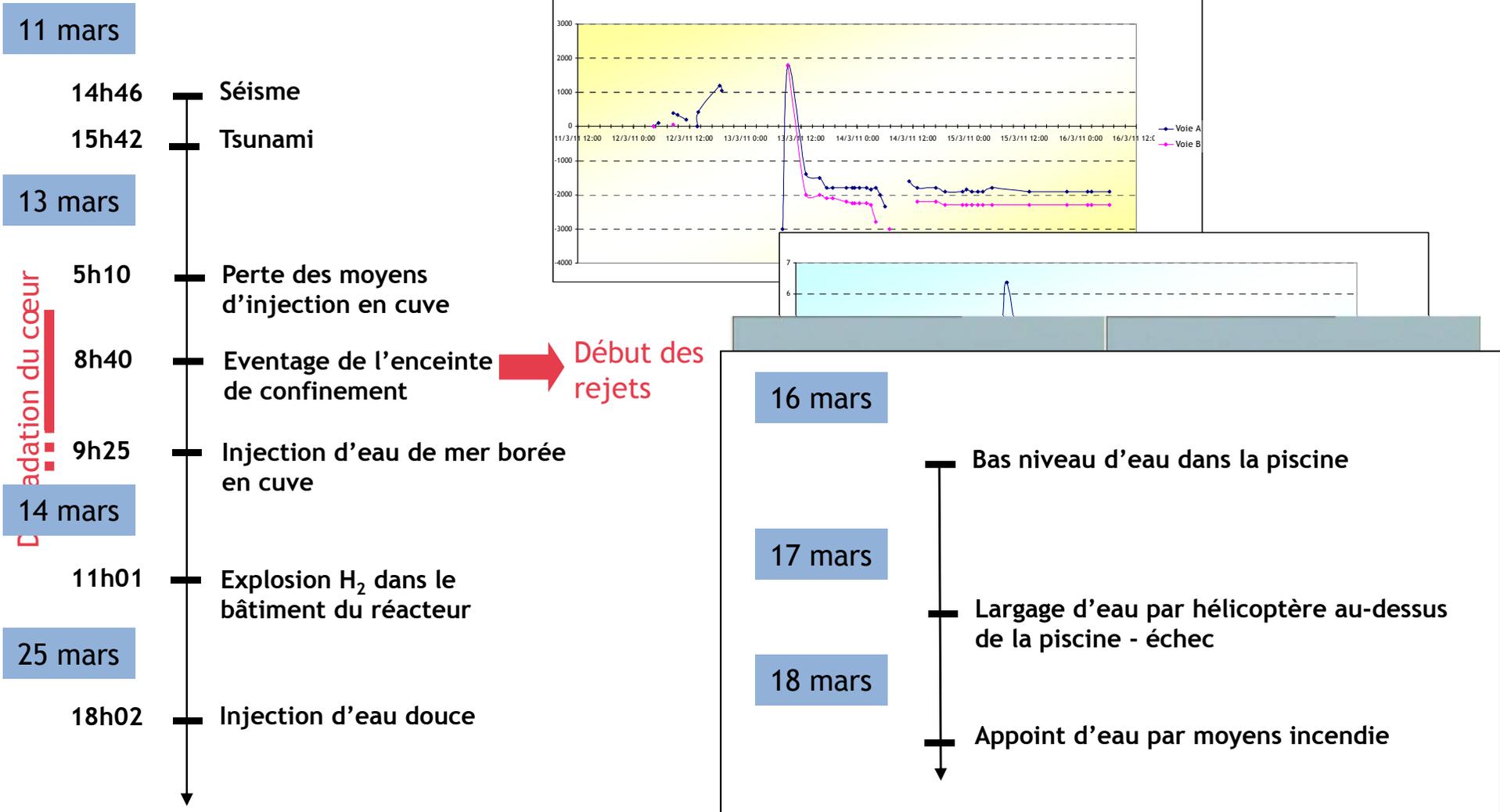
26 mars

- 10h10 Injection d'eau douce



Cœur a priori moins dégradé que le cœur du réacteur n°1 mais rejets d'eau contaminée du tore

Déroulement de l'accident - réacteur n° 3



Cœur a priori moins dégradé que le cœur du réacteur n° 1 - piscine potentiellement endommagée

Déroulement de l'accident - piscine n° 4

11 mars

14h46 — Séisme

15h42 — Tsunami

14 mars

4h00 — Augmentation de la température (84°C)

15 mars

6h14 — Incendie + bruit d'explosion

12h25 — Confirmation extinction incendie

16 mars

5h45 — Incendie dans la partie N-O du bâtiment

20 mars

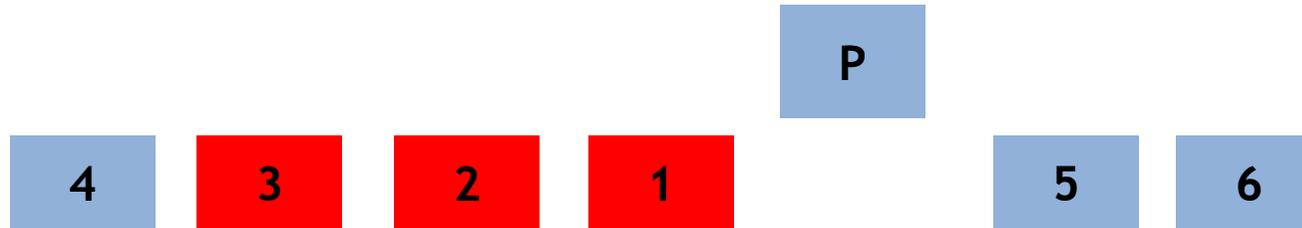
12h25 — 1^{er} déversement d'eau dans la piscine



Sommaire

- Conception des réacteurs de la centrale de FUKUSHIMA-DAIICHI
- Déroulement de l'accident
- Etat des réacteurs, éléments d'évaluation des rejets

L'état des installations (fin octobre 2012)

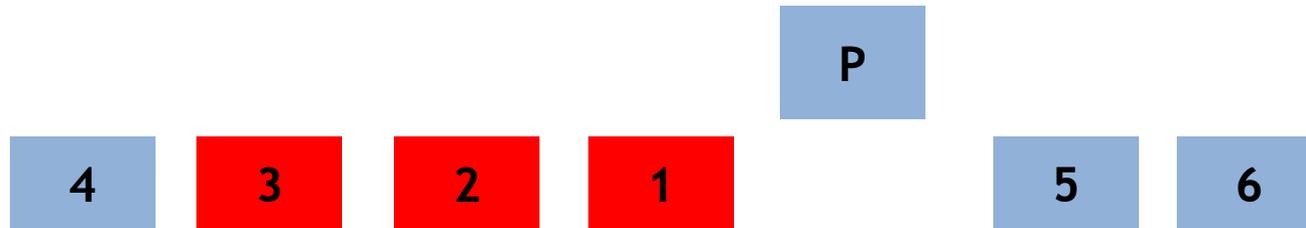


Etat des combustibles dans R1, R2 et R3

- R1: fusion totale du cœur, percée de la cuve, épandage du corium sur le fond de l'enceinte de confinement
- R2, R3: dégradation importante des cœurs mais de moindre ampleur que R1, percée de la cuve avec un écoulement de corium de faible ampleur dans le fond de l'enceinte de confinement

■ **Etat des réacteurs R1, R2, R3** : gestion stabilisée (refroidissement des cœurs par de l'eau douce (température entre 30 et 60°C) et inertage des enceintes de confinement par injection d'azote)

L'état des installations (juin 2012)



Etat des réacteurs R4, R5, R6 et des piscines :

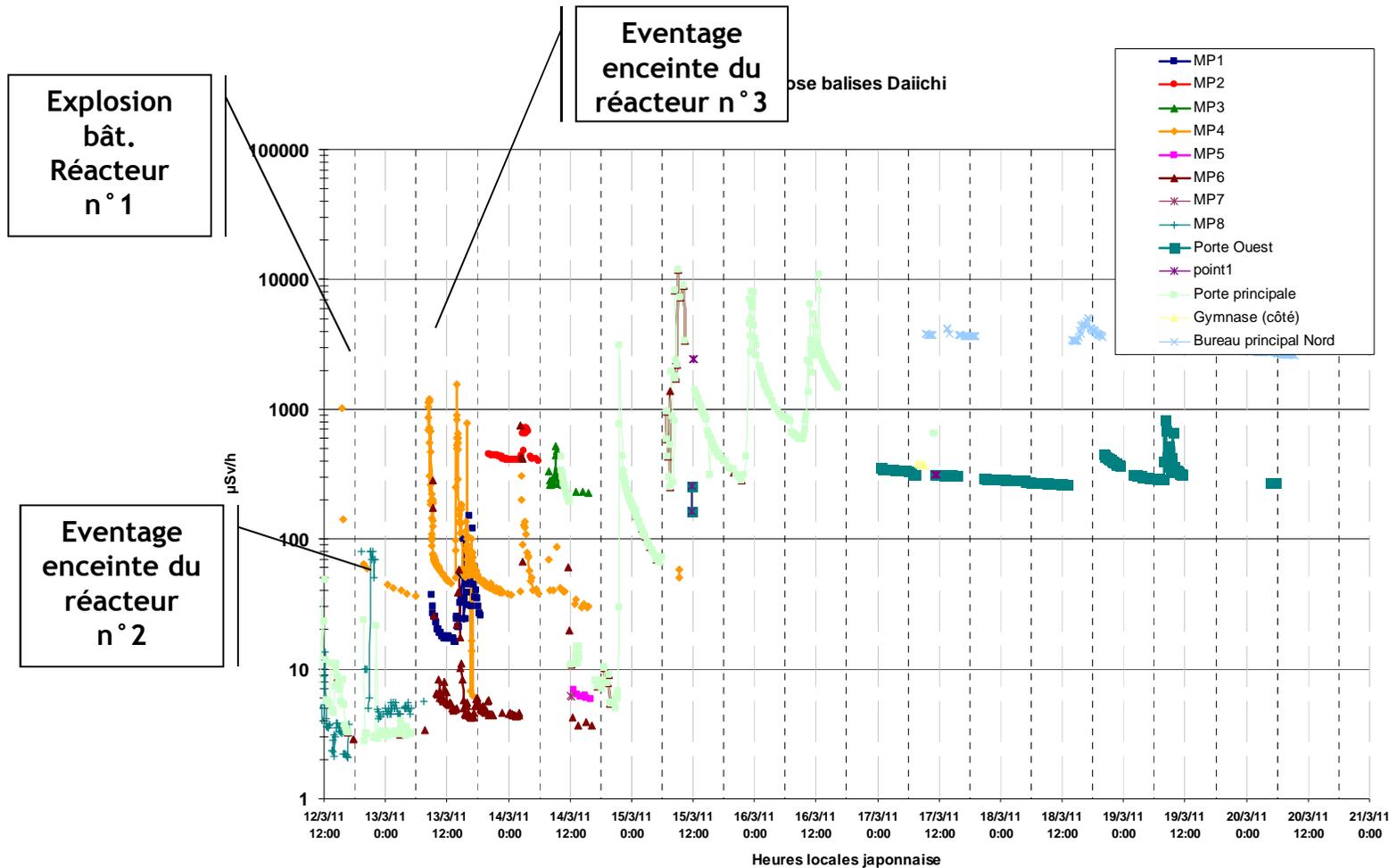
R4, R5, R6 : arrêt « sûr », aucun dommage (R5, R6 construits sur une plateforme 10 m + haut, 1 générateur électrique préservé après le tsunami)

Piscines d'entreposage R1 à R4 : pas d'endommagement significatif du combustible, y compris dans la piscine de R4 dans laquelle sont survenus une explosion et un incendie (refroidissement assuré en circuit fermé); interrogations sur la tenue des structures des piscines des réacteurs endommagés au séisme (travaux de confortement du génie civil de la piscine du réacteur 4 réalisés)

Après l'accident... 3 grandes étapes

- 1- une phase de **reprise de contrôle** : réduire les rejets radioactifs résiduels, fiabiliser les installations (refroidissement pérenne, contamination fixée sur le site et traitée, traitement des eaux fortement contaminées...) : **phase achevée**
- 2 - **reconquête des installations** : confinement des bâtiments (constructions de superstructure de couverture), confortement des structures dégradées (supportage des piscines notamment), évacuation des combustibles irradiés des piscines et préparation du démantèlement : **en cours, objectif : finaliser dans les deux ans**
- 3 - **évacuation des « cœurs » dégradés: 10 ans ; démantèlement et assainissement du site : 30 à 40 ans**

Les rejets radioactifs dans l'atmosphère



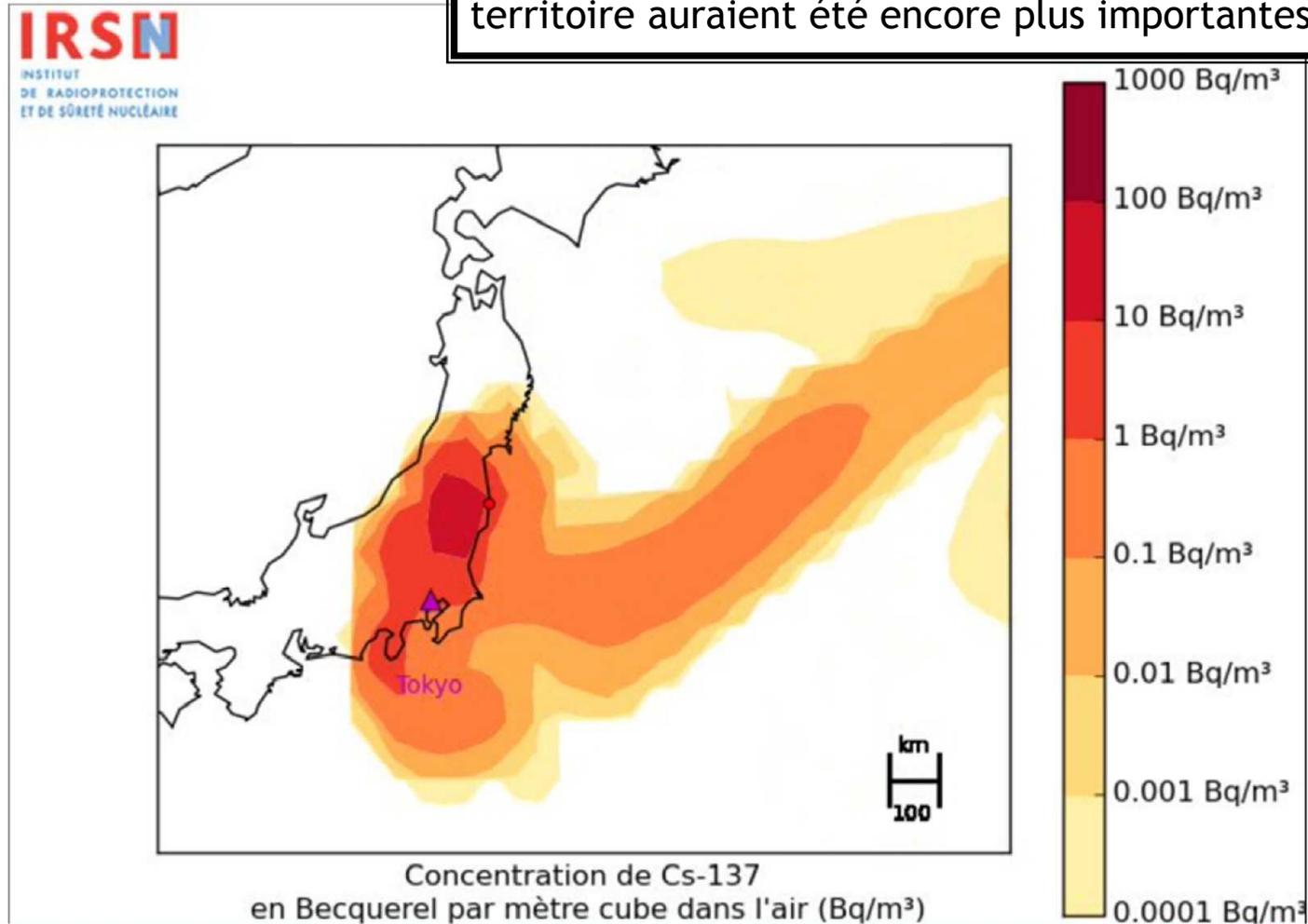
Rejets successifs importants entre le 12 et le 22 mars liés notamment aux opérations d'éventage des enceintes

Estimation des rejets radioactifs dans l'atmosphère et mesures prises

- Ordres de grandeur estimés par rapport aux rejets de l'accident de Tchernobyl (évaluations susceptibles d'être précisées ultérieurement):
 - équivalent pour les gaz rares (Xe, Kr)
 - 3 fois moins pour ^{137}Cs
 - 10 fois moins pour ^{131}I
- Classement de l'accident au niveau 7 de l'échelle INES
- Quelques heures après l'accident, évacuation des populations dans un rayon de 20 km autour de la centrale, mise à l'abri dans la zone de 20 à 30 km
- Majeure partie des rejets dirigée vers l'océan, conséquences sur le territoire japonais significativement diminuées

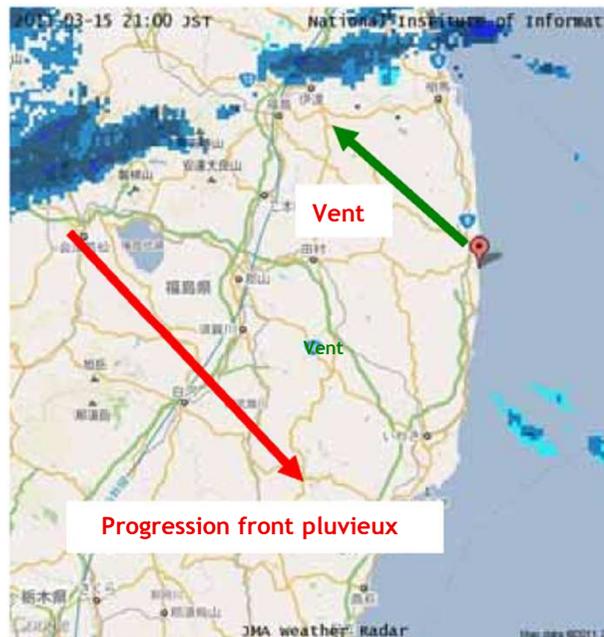
Dispersion des rejets à moyenne distance

Sans une météo globalement favorable les conséquences sur le territoire auraient été encore plus importantes



L'épisode météorologique défavorable des 15/16 mars

- Un épisode de rejet radioactif le 15 mars entre ~ 13h et 23h
- Le vent dirige le panache vers le nord-ouest et de fortes précipitations pluvieuses et neigeuses se produisent dans la nuit du 15 au 16 mars



15/03 21h (heure locale)



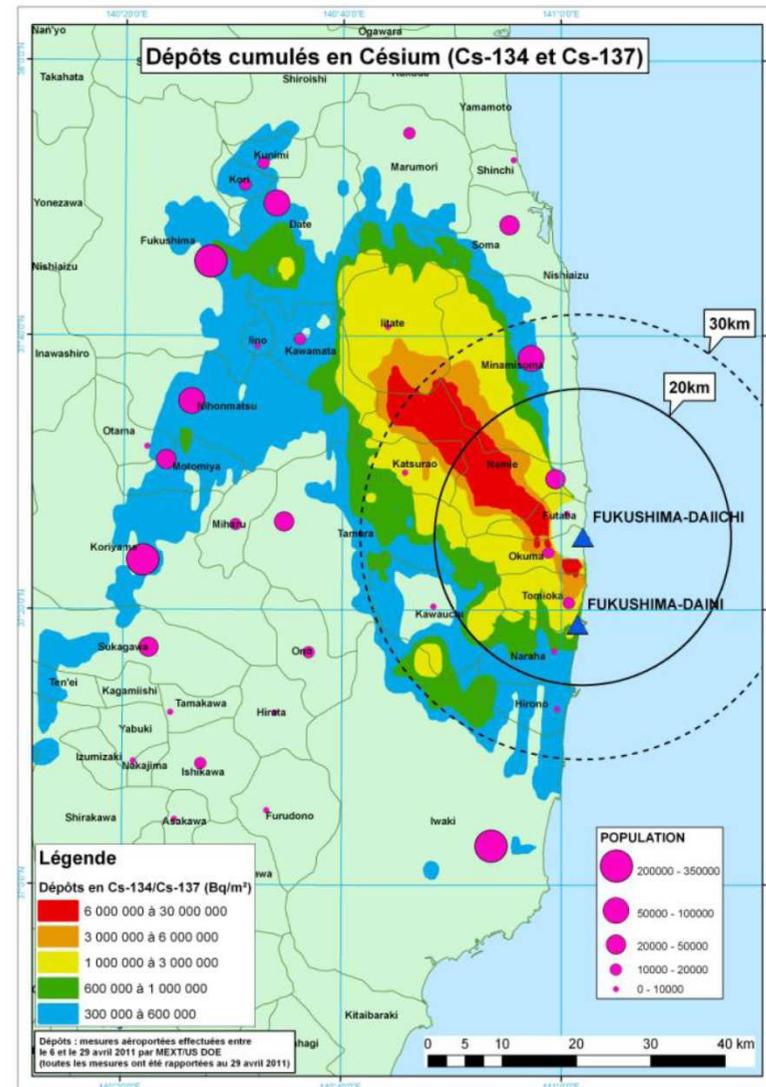
16/03 0h (heure locale)



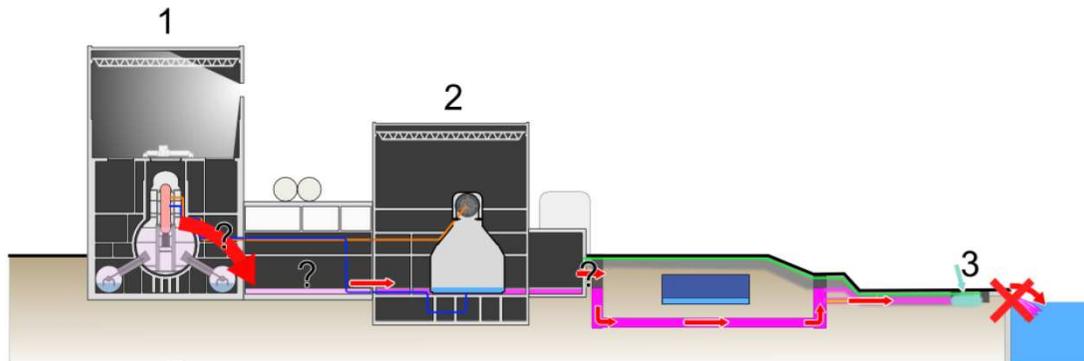
16/03 3h (heure locale)

Dépôts terrestres: cartographie DOE + MEXT

- Dépôts ^{134}Cs + ^{137}Cs hétérogènes conséquents sur une zone de 50 km de long et 20 km de large au nord-ouest de la centrale
- Dépôts fortement liés à l'épisode météorologique défavorable des 15 et 16 mars
- Niveaux d'activités élevés (entre 3 et $30 \cdot 10^6$ Bq/m²) dans la partie centrale, peu d'évolution après la phase principale de rejets
- Evacuation des populations jusqu'à 40 km au nord-ouest de la centrale (Juin 2011), surveillance en cours de la contamination des denrées



Les rejets en mer

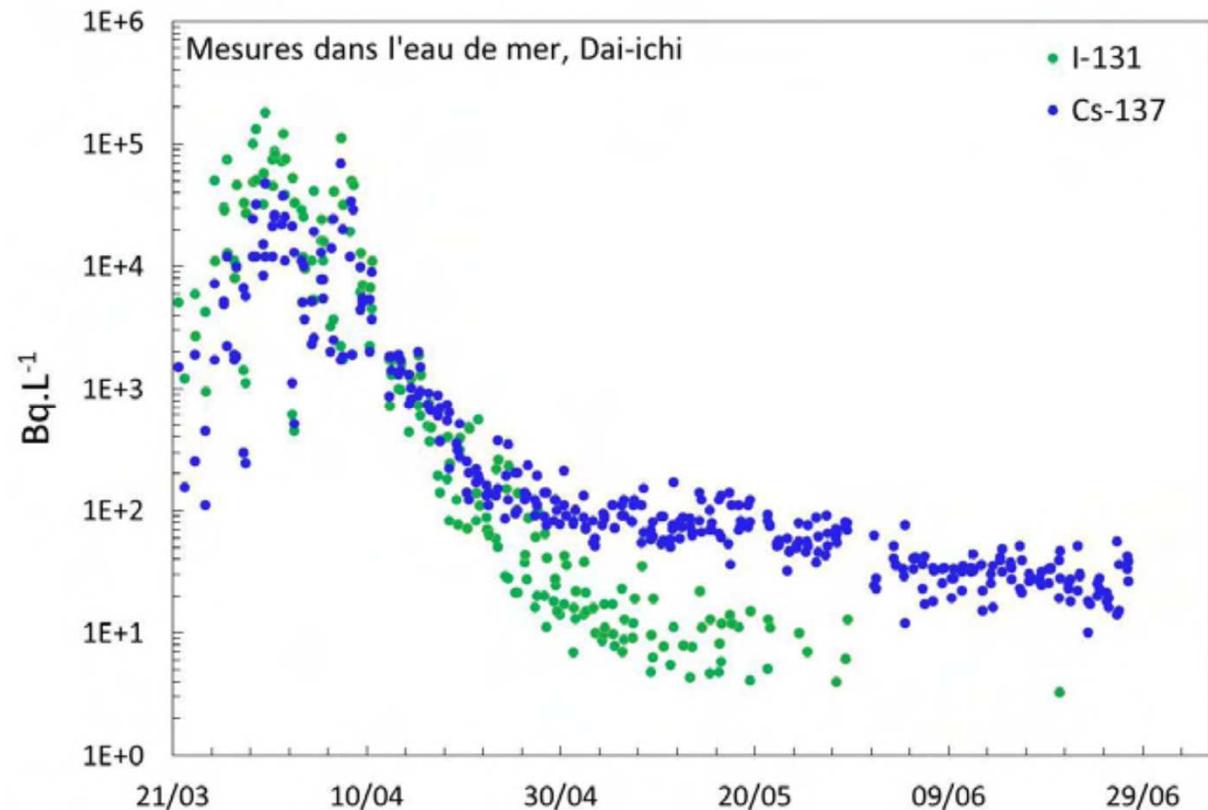


- Rejets directs de liquides contaminés en mer
- Retombées atmosphériques à la surface de la mer (notamment lors des épisodes pluvieux)
- Transport après lessivage de terrains contaminés par les eaux de ruissellement



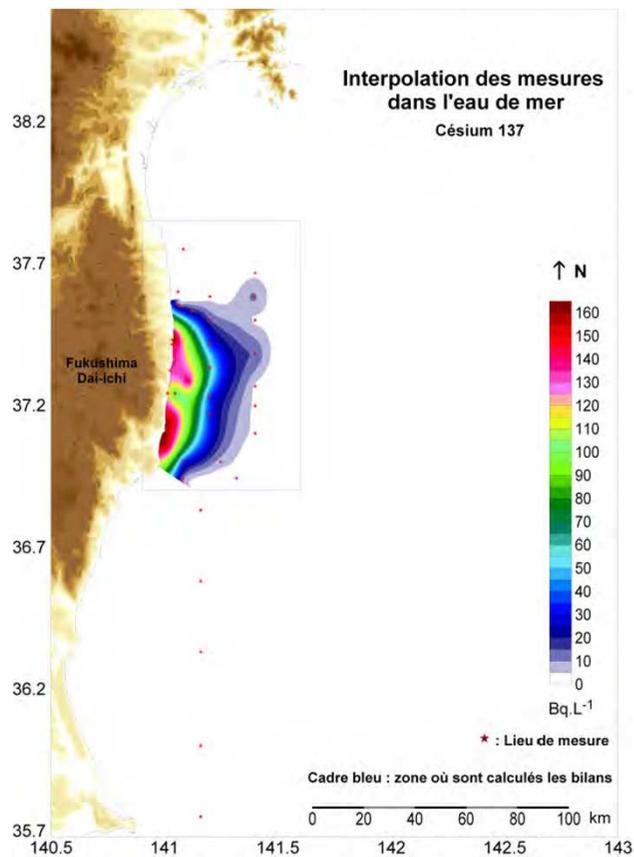
Les rejets en mer

- Évolution de la pollution marine: décroissance liée à la dispersion
- ^{131}I le plus abondant initialement, en dessous des LD depuis fin mai 2011
- Les concentrations en ^{137}Cs sont 1000 fois plus faibles que début avril 2011
- Surveillance en cours des dépôts dans les sédiments et du transfert aux espèces vivantes

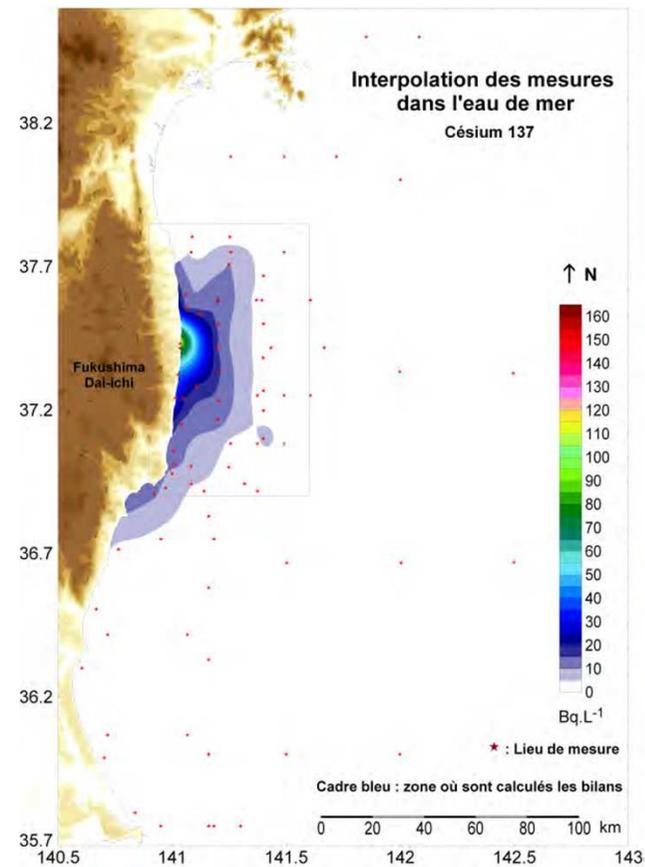


Les rejets en mer

Évolution de la pollution marine du 20 au 27/04/11



Évolution de la pollution marine du 28/04 au 28/05/11



Conséquences de l'accident de Fukushima pour la sûreté des réacteurs de puissance

- Court terme: tests de résistance (réévaluations de sûreté) pour l'ensemble des réacteurs de puissance européens; extension du domaine d'agressions externes envisageables
- Le REX s'étendra sur de nombreuses années et devrait, comme pour les accidents majeurs précédents, viser à:
 - Renforcer la prévention des accidents pour les réacteurs de puissance
 - Approfondissement des connaissances et vigilance élargie sur les agressions externes
 - Renfort de la défense en profondeur (notamment sur la base d'EPS intégrant les agressions externes, des initiateurs d'accidents exclus sur des considérations déterministes)
 - Renforcer la tenue des barrières de confinement et des systèmes de protection en situation accidentelle même de probabilité très faible
 - Renforcer les moyens de suivi d'actions en conditions fortement dégradées (diagnostic, actionneurs ultimes, moyens additionnels de secours, moyens robotisés)