framatome

Les réacteurs de 3ème génération : l'EPR et ses concurrents

Jean-Luc JACOUD

SFEN Provence – 10 mai 2023

SOMMAIRE

01 . Les Réacteurs de troisième génération

02 . EPR

03 . AP1000

04 . VVER (AES-2006 / VVER-TOI)

05 . HUALONG-One (HPR1000)

06 . APR1400

07 . Et les autres ???

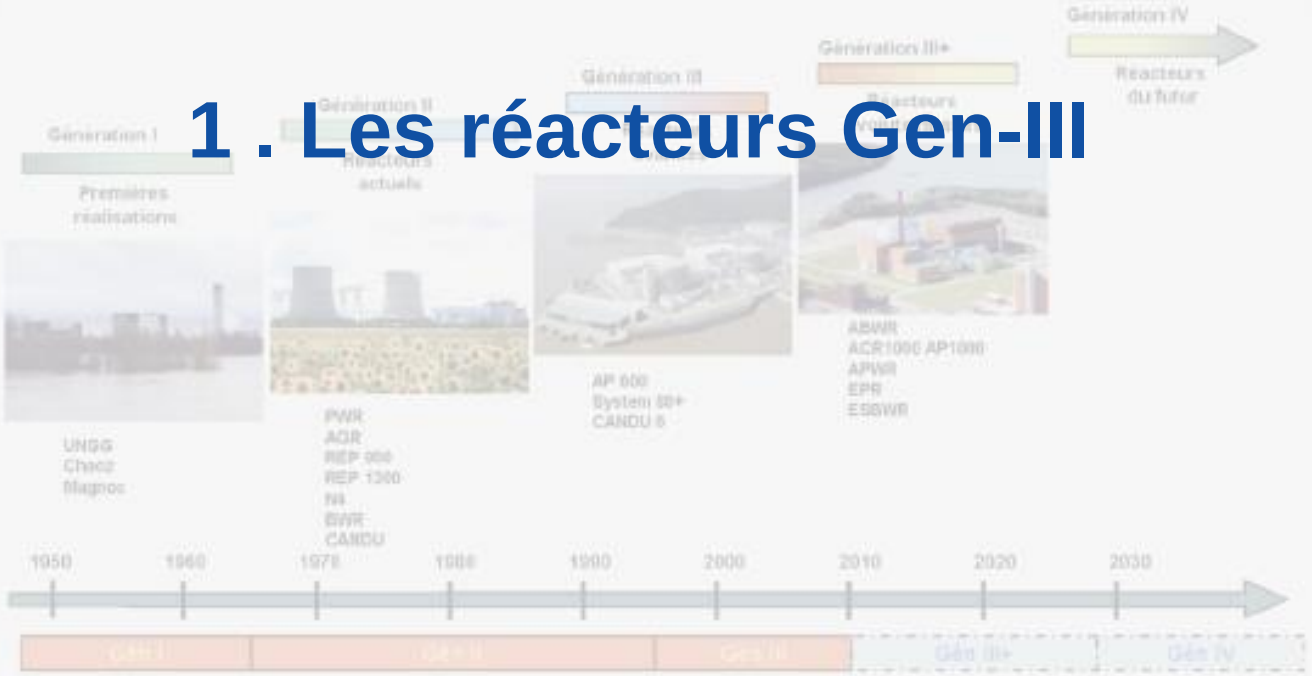
08 . Tendances

09 . Conclusions

© Framatome - Tous droits réservés

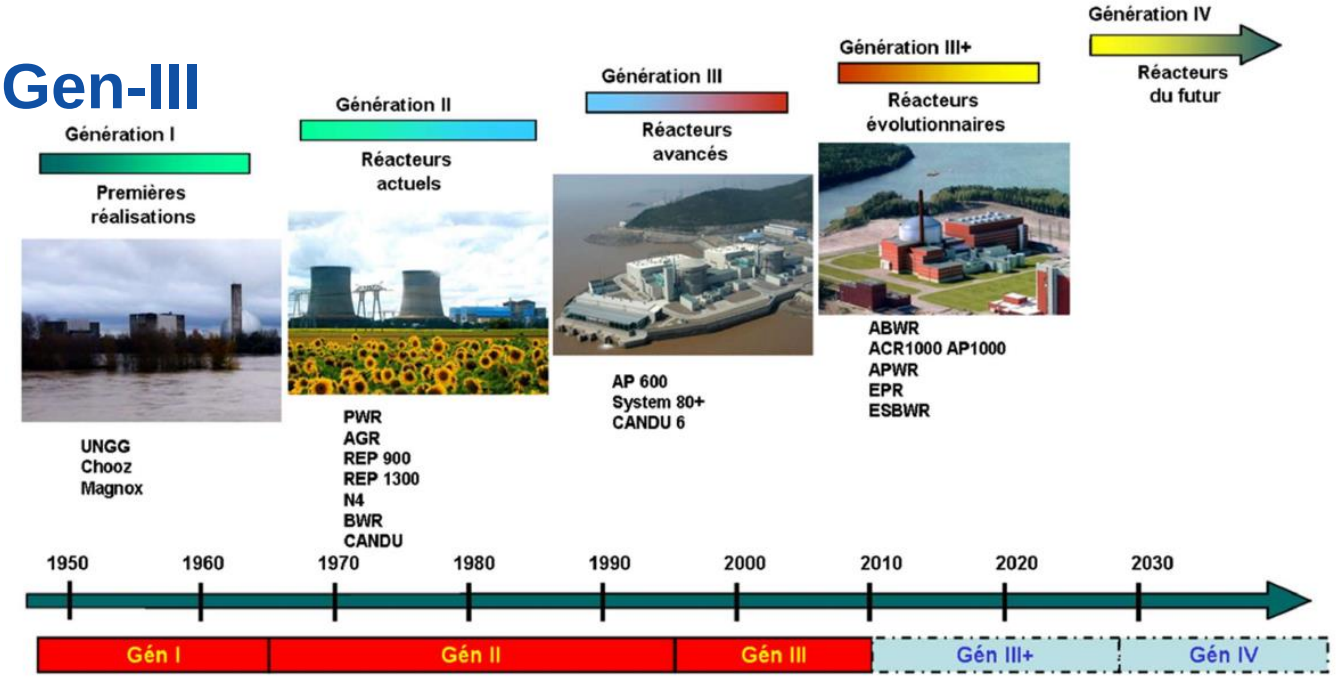
C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

1 . Les réacteurs Gen-III



framatome

Les réacteurs Gen-III



- **Gen III+ = Gen III**
  - Après TMI puis Tchernobyl puis « 11 septembre 2001 »
    - → Sureté renforcée (probabilité de fusion du cœur < 10^{-5})
    - Prise en compte de l'accident grave dès la conception
    - Protection renforcée vis-à-vis des agressions externes
    - Performances économiques
      - ↘ coûts, ⇗ disponibilité, ⇗ flexibilité, ⇗ durée de fonctionnement > 60

2 . EPR

La référence française !

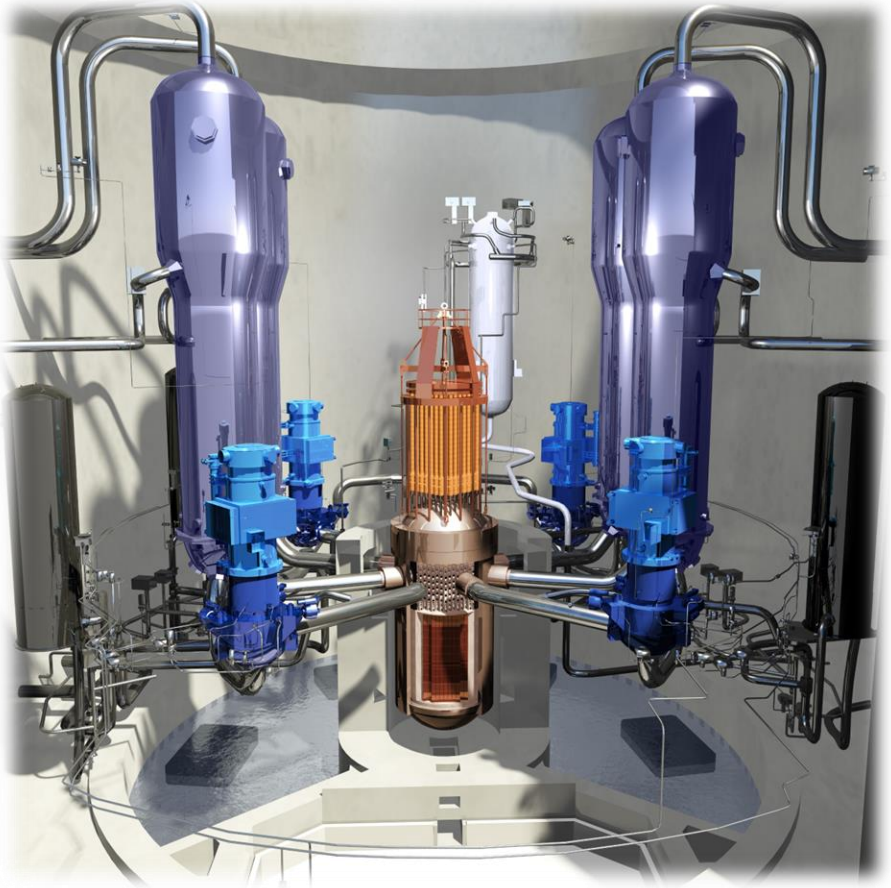
framatome

EPR – Quelques caractéristiques

- Développé à partir des années 90 dans le cadre d'une coopération franco-allemande avec l'objectif de
  - Développer le standard de troisième génération pour le renouvellement des parcs nucléaires français et allemand
  - Permettant de répondre aux exigences de sureté françaises et allemandes.
- Gamme de **puissance : forte**→ ~1600-1650 MWe
- Mise sur
  - **Une conception évolutionnaire sur la base de solutions éprouvées**
    - Permettant de s'appuyer sur le REX existant (demande AS)

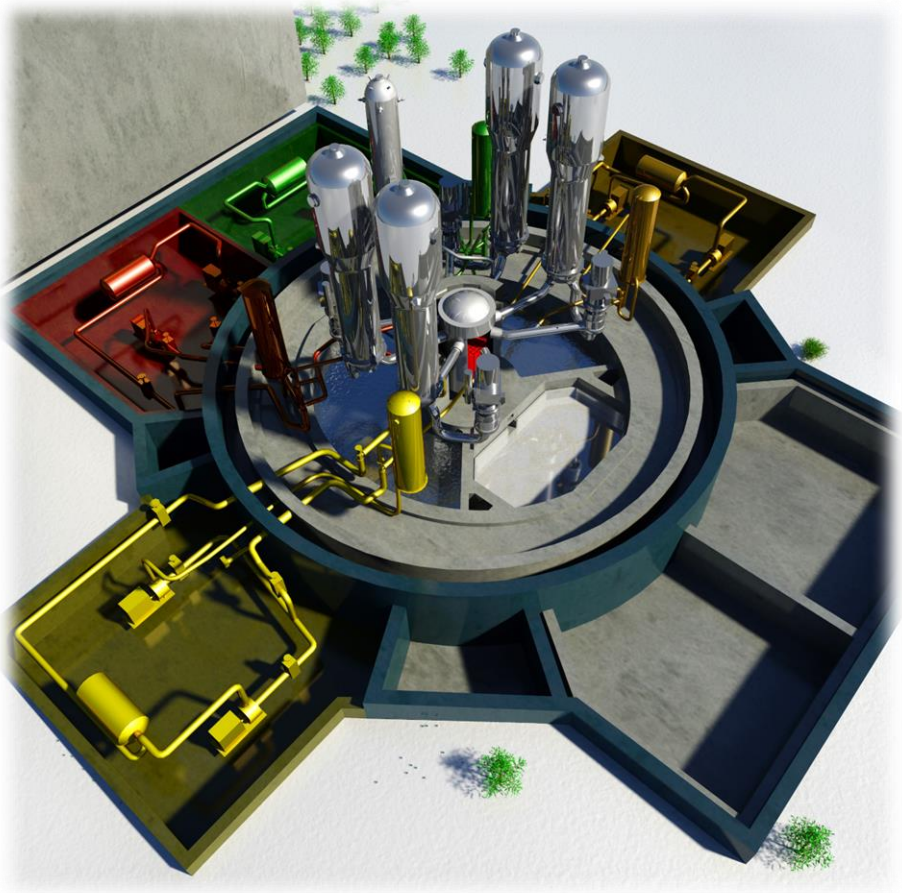
EPR – la chaudière

- **Cœur** : 241 assemblages 17x17 de 14 pieds
  - Puissance : 4300 – 4590 MWth
  - 89 grappes de crayons absorbants
  - Réflecteur lourd
- **Circuit primaire 4 boucles de type « parc »**
  - ⇗ Taille des principaux composants
  - Moins de forgés
    - moins de soudures
    - Des forgés plus gros



EPR – La sûreté

- Sûreté basée principalement sur des **systèmes actifs**
  - Redondance renforcée
  - Diversité renforcée
  - Meilleure séparation physique
  - Délai de grâce porté à 30 minutes

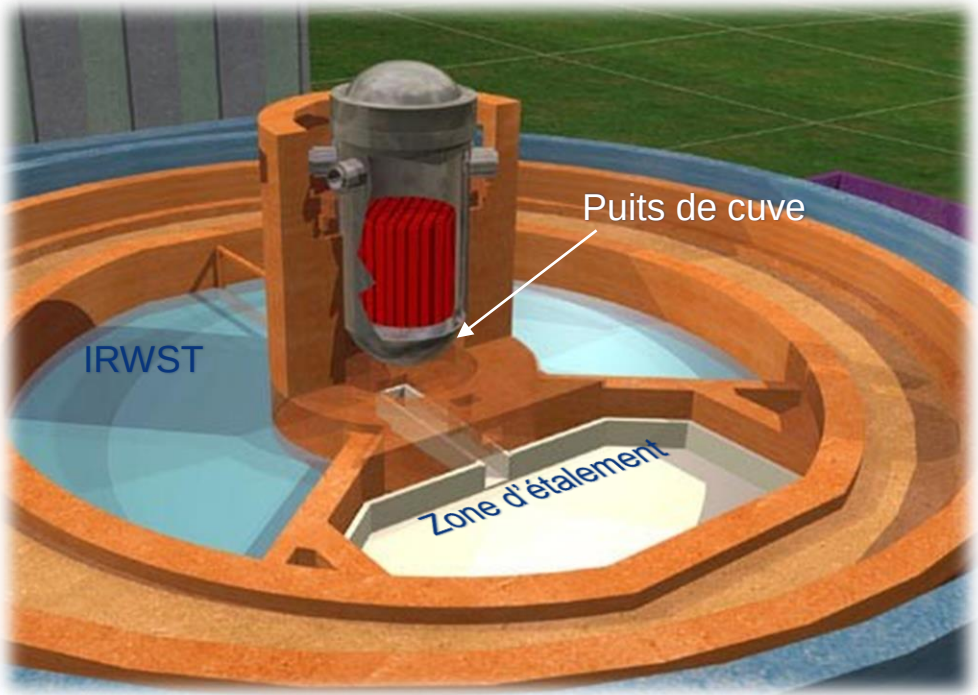


 © Framatome - Tous droits réservés

C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

EPR – La sûreté

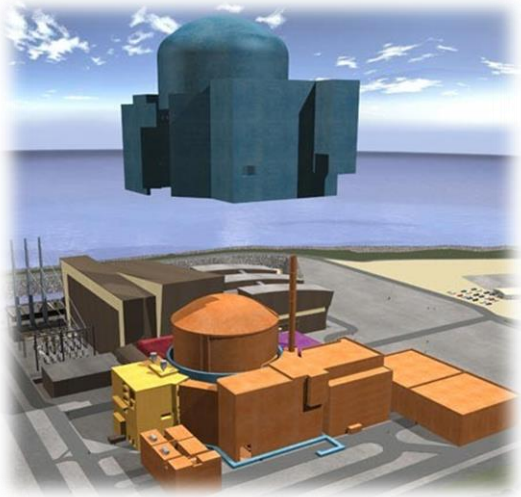
- Pour **l'accident grave** : Rétention et refroidissement du corium hors cuve → core catcher
  - Approche déterministe
  - Passif pour la gestion à court terme, puis actif pour la gestion du refroidissement à long terme

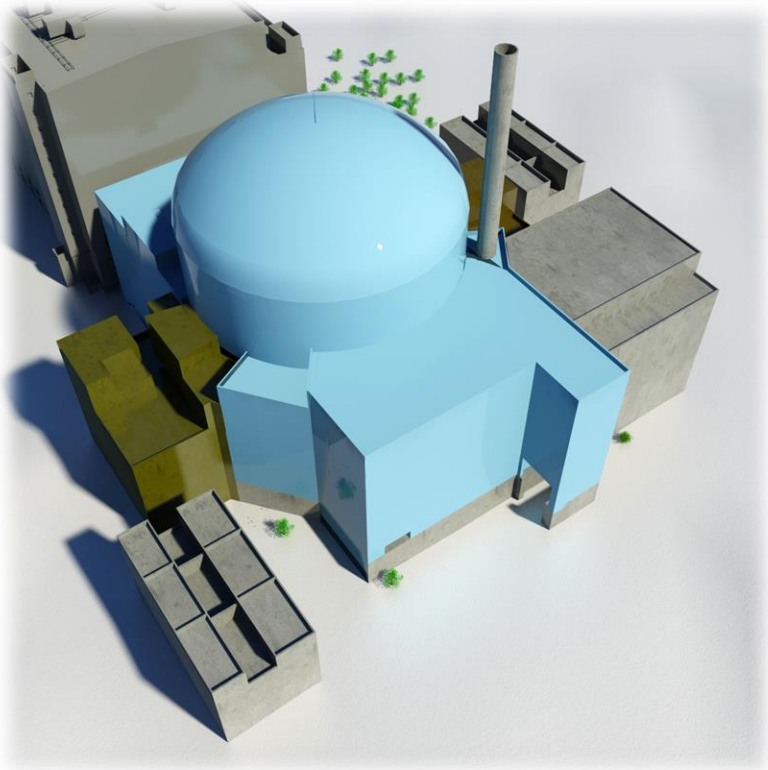


Des recombineurs catalytiques d'H2

EPR – La sûreté

- Pour la **protection contre les agressions externes**
  - Une « coque avion » sur
    - Le bâtiment réacteur (double enceinte)
    - Le bâtiment combustible
    - 2 des bâtiments de sauvegarde
  - + Séparation physique





EPR – Le bilan

- En production
  - Finlande : OL3
  - Chine : Taishan 1&2
- En commisionning
  - France : FA3
- En construction
  - Royaume-Uni : Hinkley Point C
- En projet
  - France (EPR2 - en phase de detailed design),
  - Royaume Uni : Sizewell C (EPR)
- Prospect
  - République Tchèque (EPR1200), Inde

 © Framatome - Tous droits réservés
C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

3 . AP1000

Le modèle innovant !

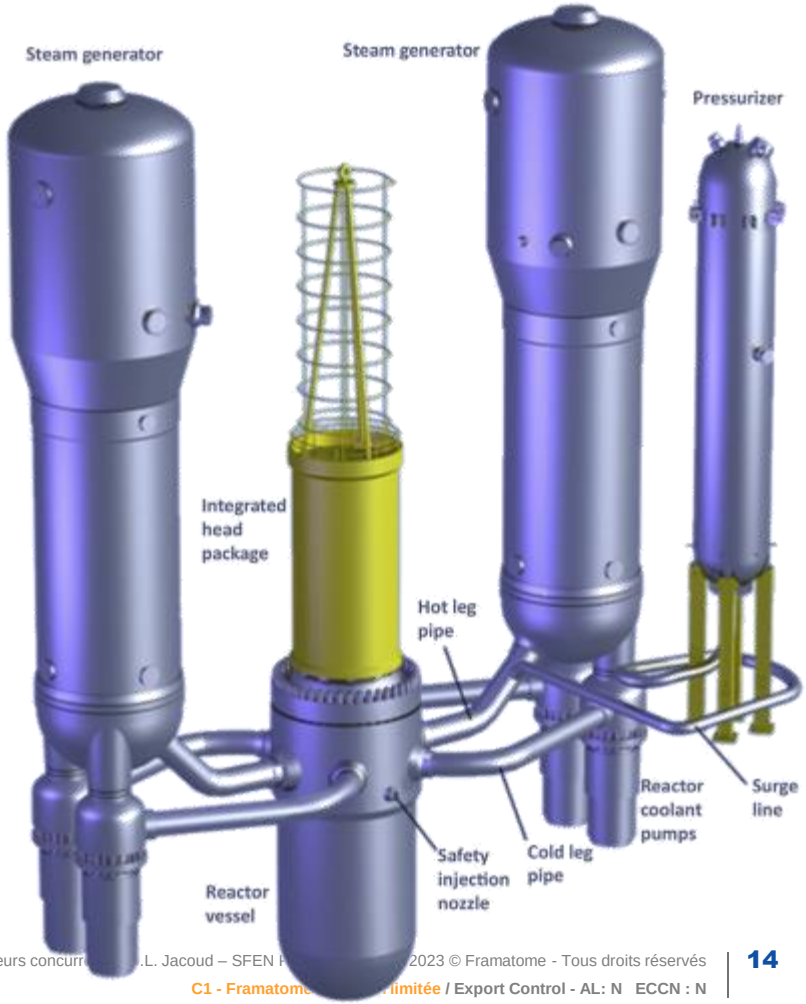
framatome

AP1000 – Quelques caractéristiques

- Développé après **TMI** dans le cadre du programme **ALWR** avec le double objectif de
  - réduire la dépendance à l'opérateur
  - et de réduire les coûts d'investissement
- Gamme de **puissance : Moyenne** → ~1100 MWe
- Mise sur
  - **l'innovation**
  - … et le caractère éprouvé des solutions mises en place

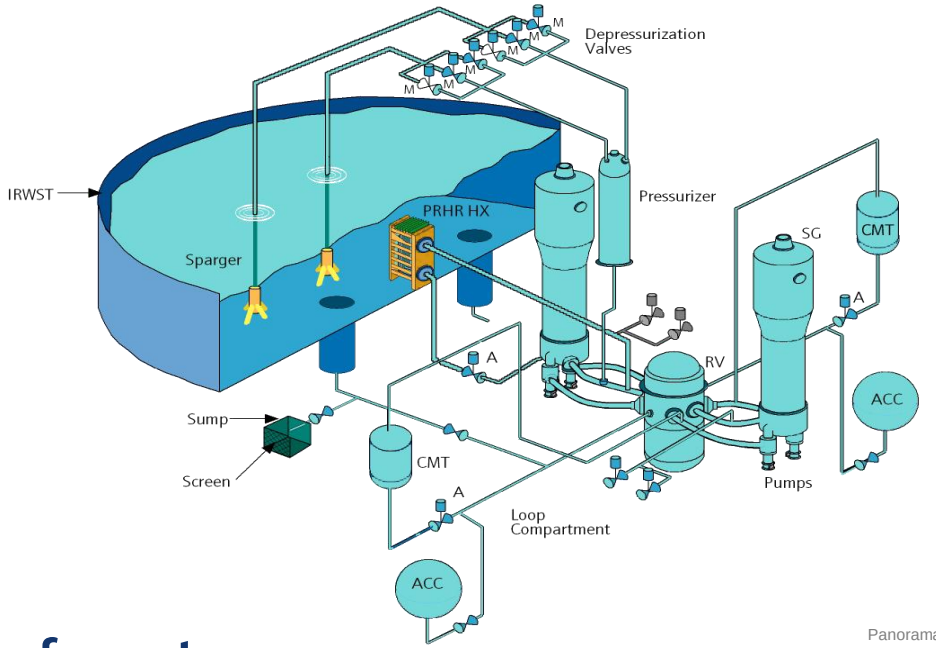
AP1000 – la chaudière

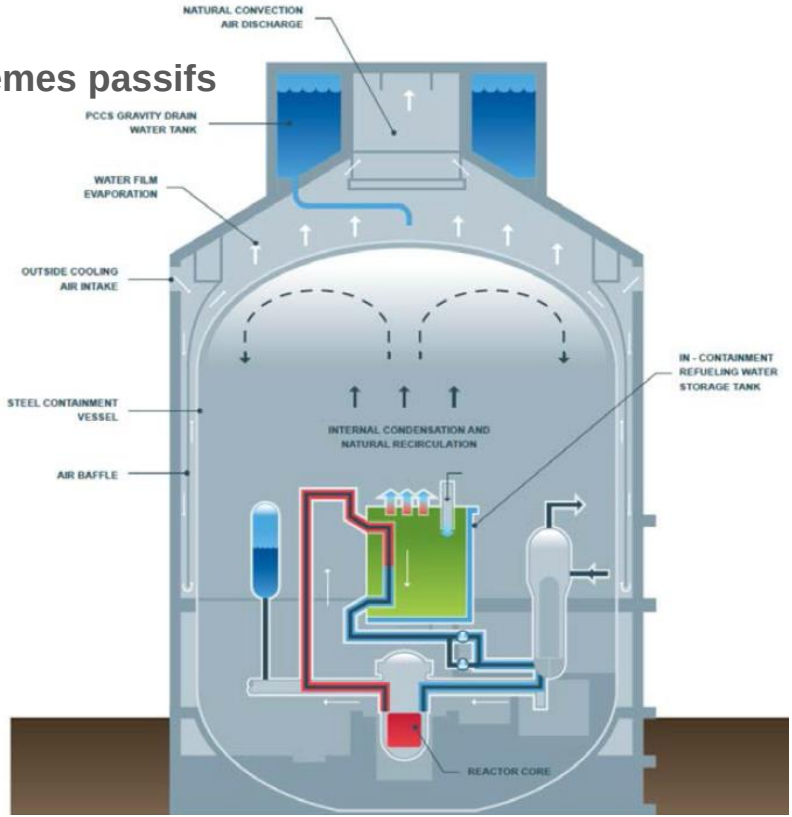
- **Cœur** : 157 assemblages 17x17 de 14 pieds
  - Puissance : 3400 MWth
  - 69 grappes de crayons absorbants
- **Circuit primaire de type CE** avec
  - 2 branches chaudes (2 gros GV)
  - 4 branches froides (4 pompes primaires)
  - Pompes à rotor noyé
    Montées directement sous les GV
    ➔ pas de branche en U
    5.4 MW !



AP1000 – La sûreté

- Démonstration de sûreté basée uniquement sur des **systèmes passifs**
  - 72 heures d'autonomie sans action opérateur



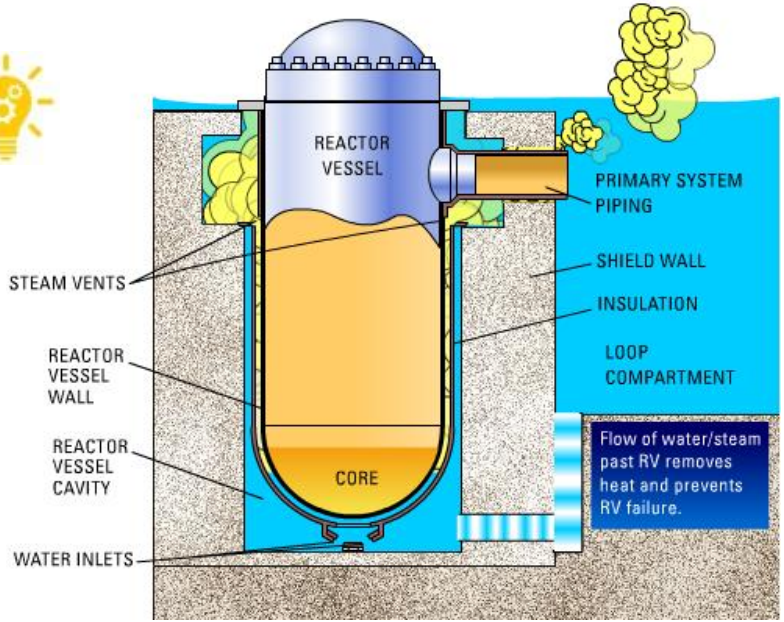


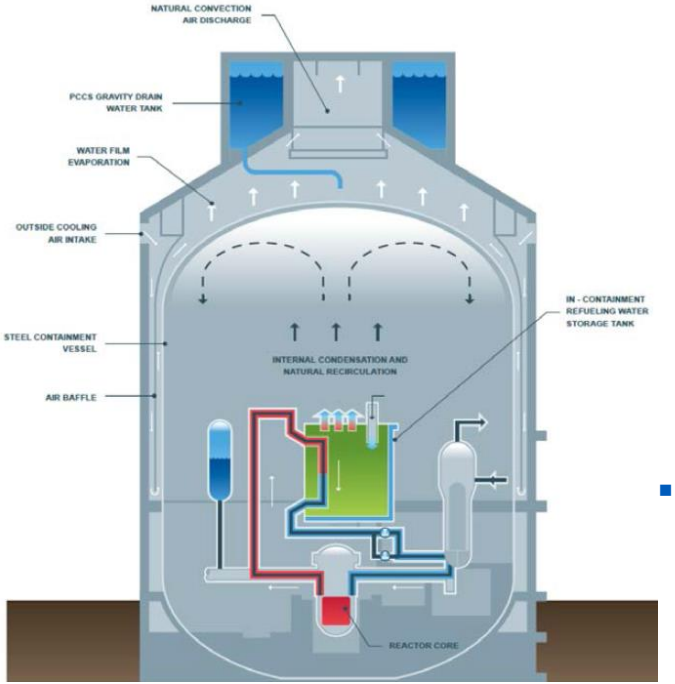
AP1000 – La sûreté

- Démonstration de **sûreté** basée uniquement sur des **systèmes passifs**
  - 72 heures d'autonomie sans action opérateur
  - **Des systèmes actifs** (non classé) pour éviter le déroulement de la séquence passive complète et la perte de l'investissement !
    - RRA
    - RVC
    - Startup Feedwater System

AP1000 – La sûreté

- Pour **l'accident grave** : Rétention du corium en cuve





- Pour la **protection contre les agressions externes**
  - Enceinte de confinement métallique + Bâtiment de protection

AP1000 – La Construction

- Utilisation intensive de la construction modulaire

framatome

AP1000 – Le bilan

- USA : construction de 4 unités lancée en 2013
  - Vogtle 3&4 → mise en service espérée en 2023 / 2024
  - V.C. Summer 2&3 → construction arrêtée en 2017 pour raisons économiques
- Chine
  - Construction de 4 unités (Sanmen 1&2 et Haiyang 1&2) lancées en 2009 et mises en service en 2018/2019
  - 4 unités supplémentaires lancées 2022.
- Pologne
  - Sélectionné pour la première centrale Polonaise
- Prospects
  - Ukraine, République Tchèque, Inde

4 . VVER Gen-III (VVER-1000 /VVER-1200 / VVER-TOI)

Ceinture et bretelles !

framatome

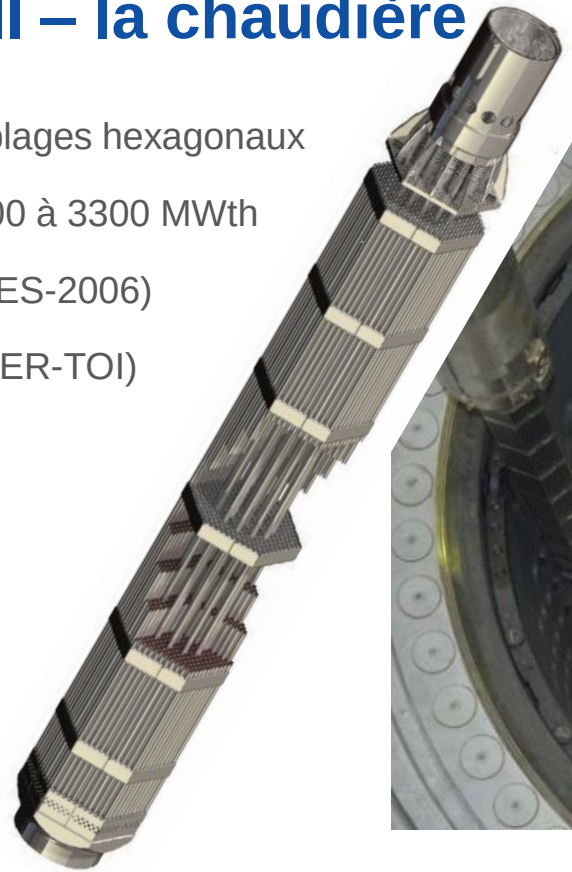
VVER Gen-III – Quelques caractéristiques

- Développés **après Tchernobyl** avec un objectif essentiel
  - Augmenter significativement le niveau de sureté des VVER
    ➔ se mettre au niveau des standards occidentaux !
- Gamme de **puissance : Moyenne** → de 1000 MWe (AES-91 / AES-92) à 1300 MWe (VVER-TOI)
- Bénéficient largement de la **coopération internationale** mise en place après Tchernobyl
  - Systèmes de sureté actifs redondants + Double enceinte de confinement (~ EPR)
  - Backup passif (Coopération avec Siemens)
- Compétition entre 2 bureaux d'études
  - Moscou : AES-92 → AES-2006/V392M → VVER-TOI
  - St Pétersbourg : AES-91 → AES-2006/V491

 © Framatome - Tous droits réservés
C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

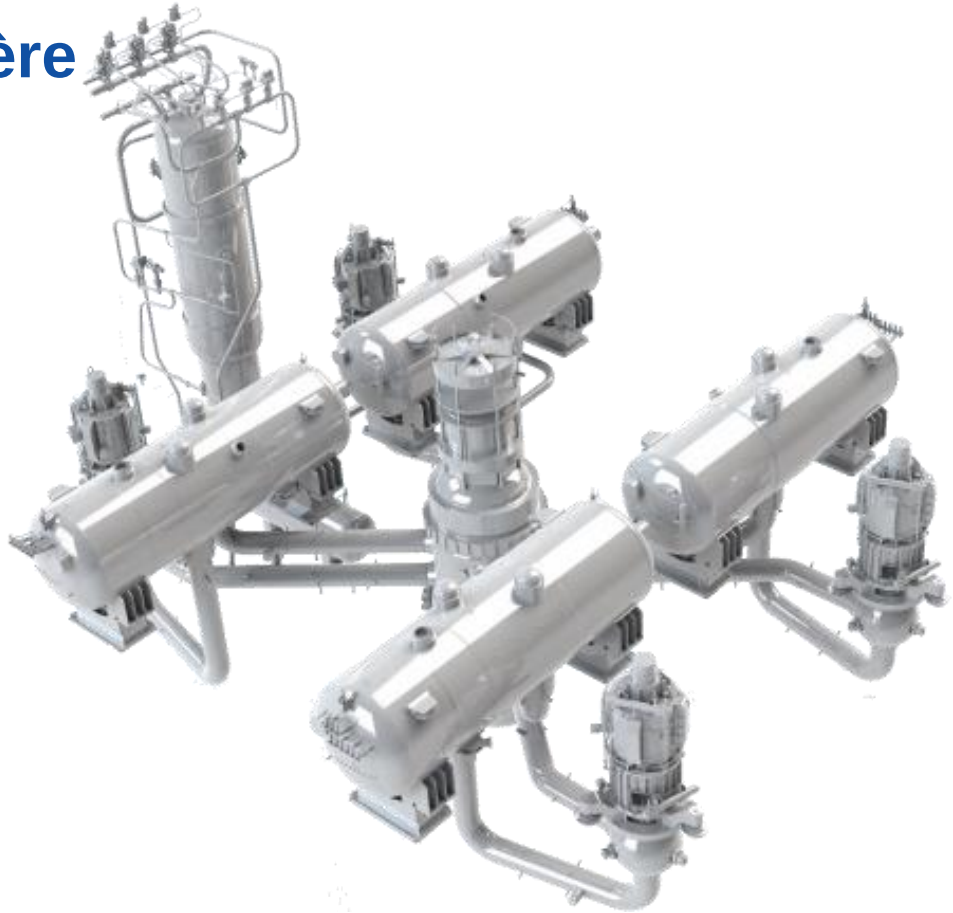
VVER Gen-III – la chaudière

- **Cœur** : 161 assemblages hexagonaux
  - Puissance : 3000 à 3300 MWth
  - 121 grappes (AES-2006)
  - 89 grappes (VVER-TOI)



VVER Gen-III – la chaudière

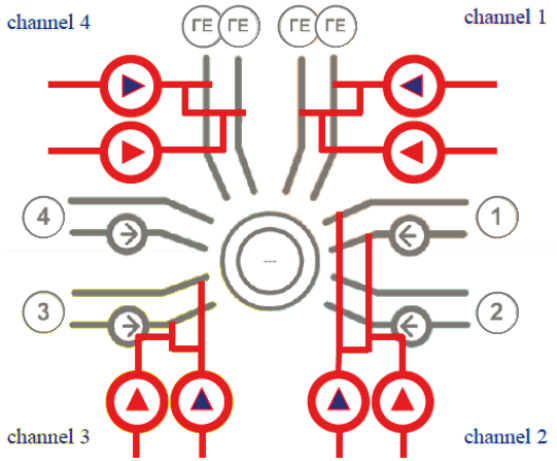
- **Circuit primaire** typique VVER
  - 4 boucles avec BC et BF sur 2 niveaux
  - GV horizontaux



VVER Gen-III – La sûreté

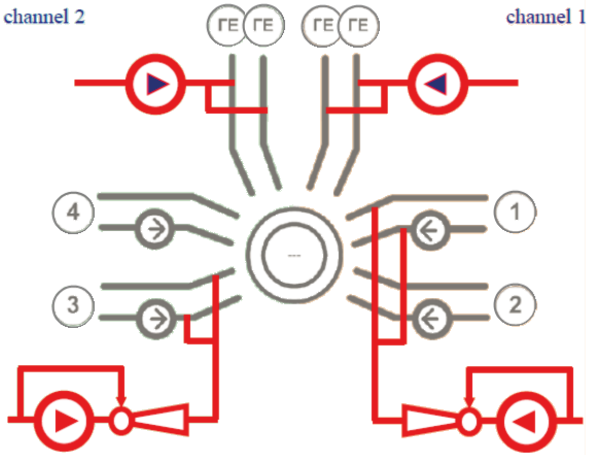
- Des **systèmes de sauvegardes actifs** redondants

4 trains indépendants (4x100)



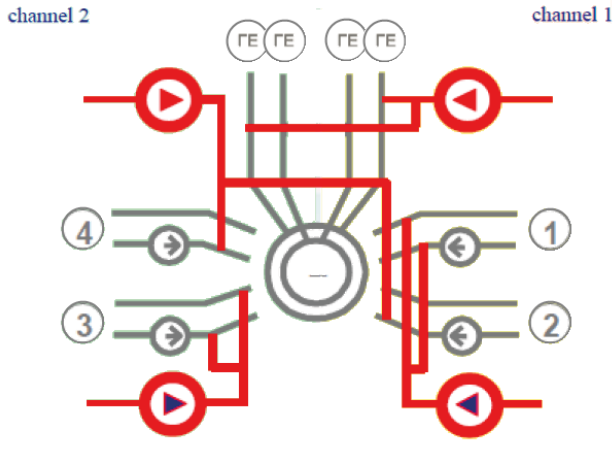
VVER-1200 St Pétersbourg

2 trains indépendants avec redondance interne (2x(2x100))



VVER-1200 Moscou

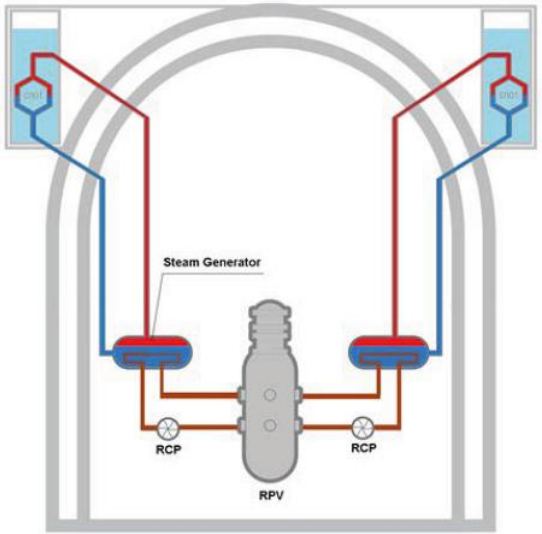
2 trains indépendants (2x100)



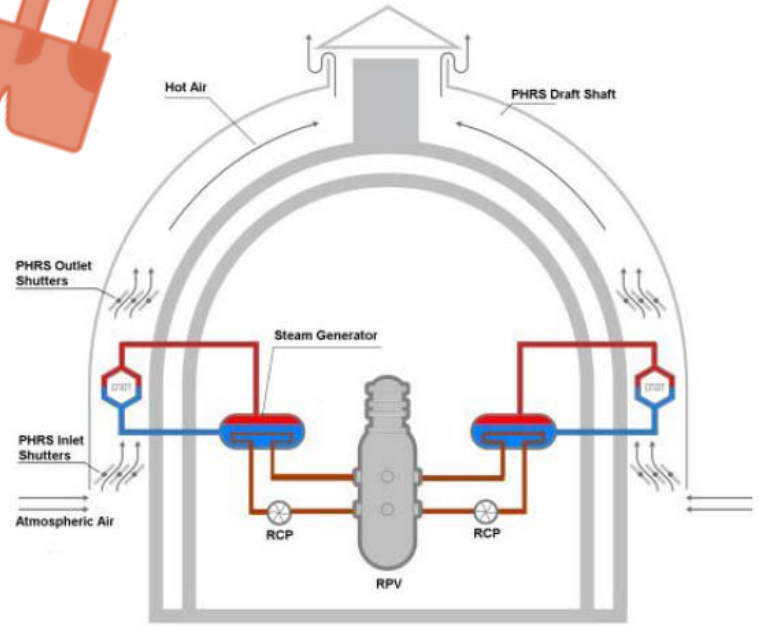
VVER-TOI Moscou

VVER Gen-III – La sûreté

- Des **systèmes de sauvegardes passifs en backup**



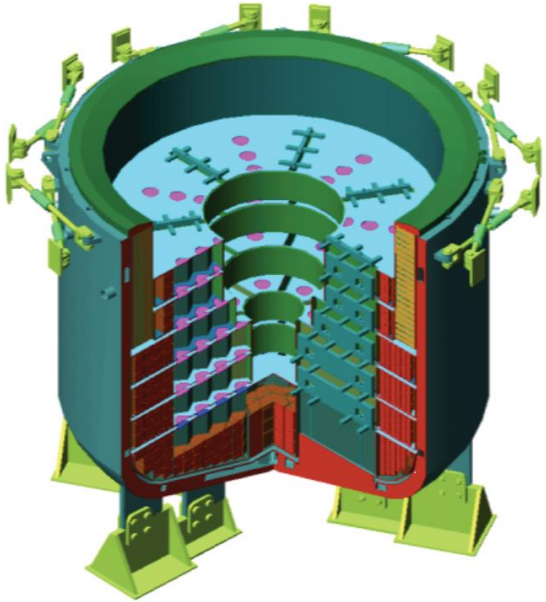
VVER-1200 S^{t} Pétersbourg

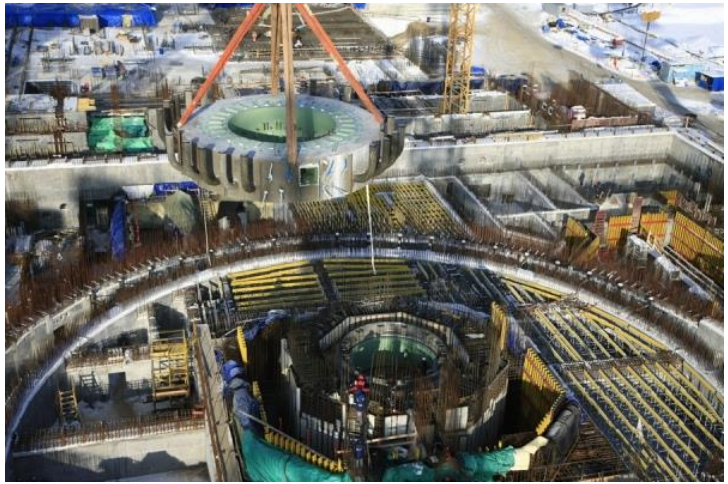


VVER-1200 / VVER-TOI Moscou

VVER Gen-III – La sûreté

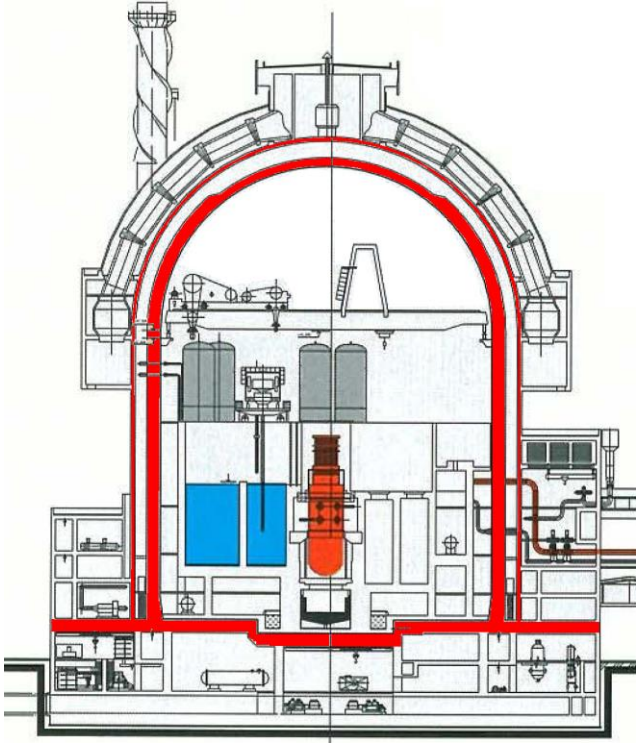
- **Pour les accidents graves** un récupérateur de corium

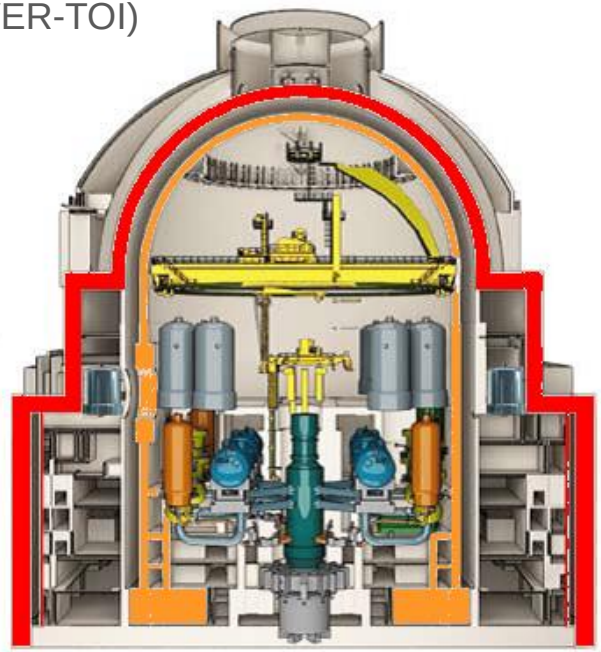




VVER Gen-III – La sûreté

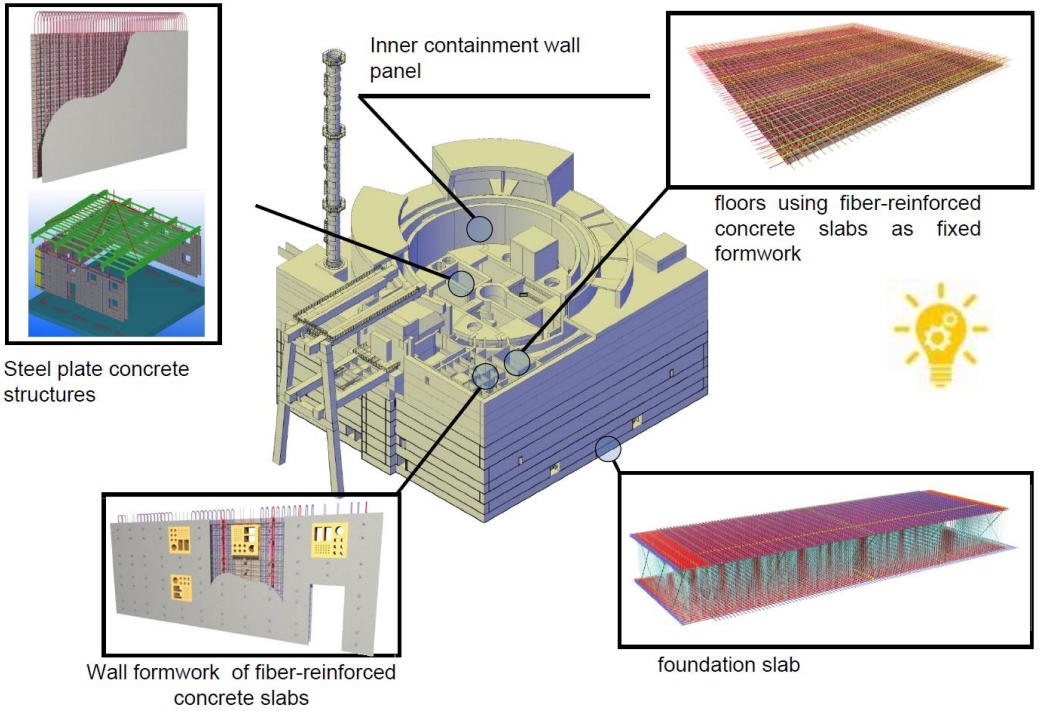
- **Pour la protection contre les agressions externes**
  - Une double enceinte de type EPR
    - Enceinte externe : 60 cm → 180 cm (150 cm sur VVER-TOI)





VVER Gen-III – La Construction

- Utilisation croissante de la construction modulaire



VVER Gen-III – Le bilan

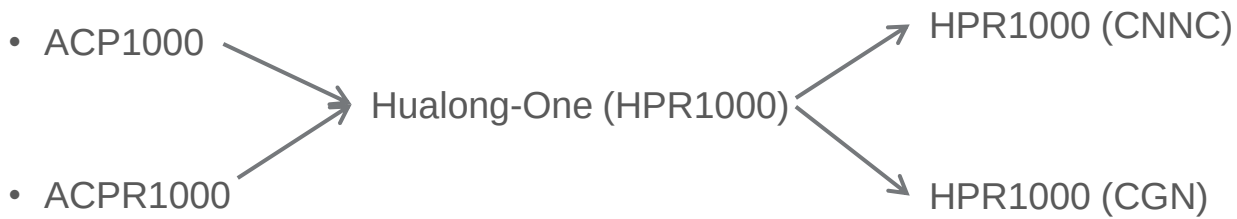
- Russie : 4 unités en service (AES-2006) + 2 en construction (VVER-TOI)
- Chine : 4 unités en service (VVER-1000) + 4 en construction (AES-2006)
- Inde : 2 unités en service (VVER-1000) + 4 en construction (VVER-1000)
- Bangladesh : 2 unités en construction (AES-2006)
- Turquie : 4 unités en construction (AES-2006)
- Egypte : 2 unité en construction (AES-2006) + 2 autres devraient suivre
- Prospects : Russie, Egypte, Iran, Bangladesh, Hongrie, ~~Finlande~~, République Tchèque

5 . HUALONG-One

framatome

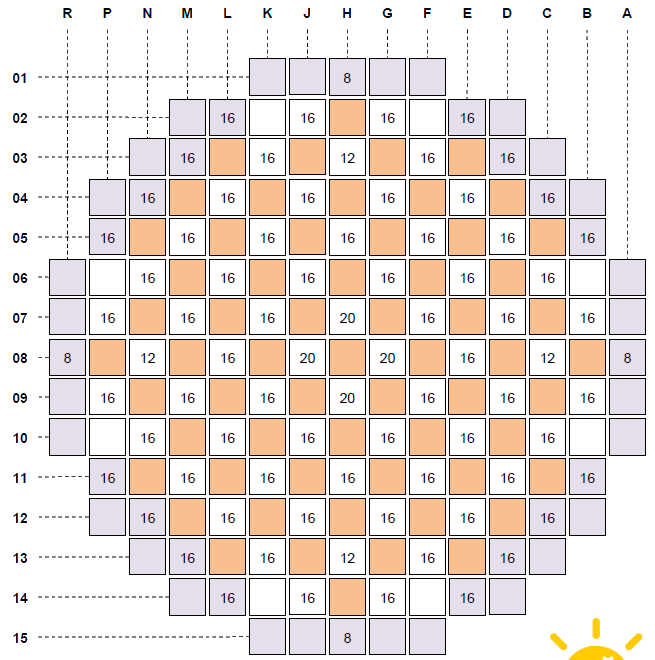
HPR1000 – Contexte

- **Avant Fukushima :**
  - Les CPR1000+ (Gen II issus du 900 MW français) sont construits en série
  - Des modèles Gen III en développement (ACP1000 (CNNC), ACPR1000 (CGN))
  - Modèle Gen-III **« officiel » → AP1000** + EPR
- **Après Fukushima :**
  - Arrêt des autorisations de construction pour les Gen II
  - →CNNC et CGN poussent leur modèles Gen III

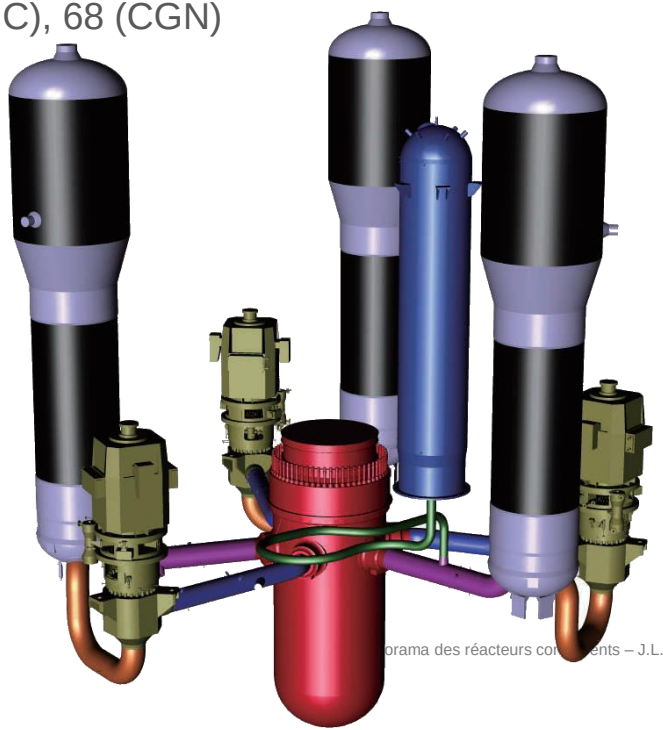


HPR1000 – la chaudière

- **Cœur** : 177 assemblages 17x17 de 12 pieds
  - Puissance : 3050 MWth (CNNC) / 3150 MWth (CGN)
  - Grappes : 61 (CNNC), 68 (CGN)



- **Circuit primaire**
  - type W 3-boucles

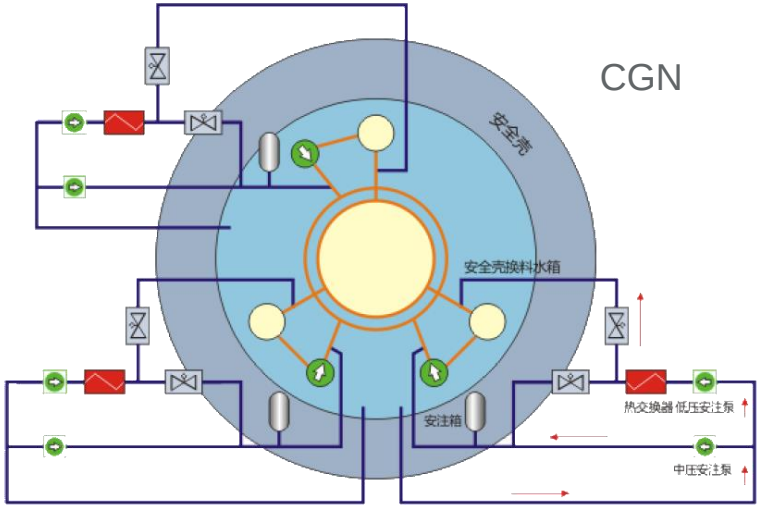


HPR1000 – La sûreté

- Des **systèmes de sauvegardes actifs** redondants

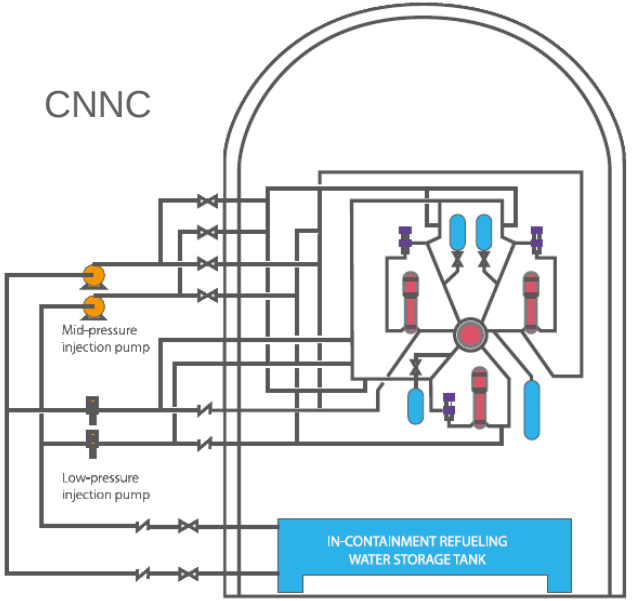
3 trains indépendants (3x100)

CGN



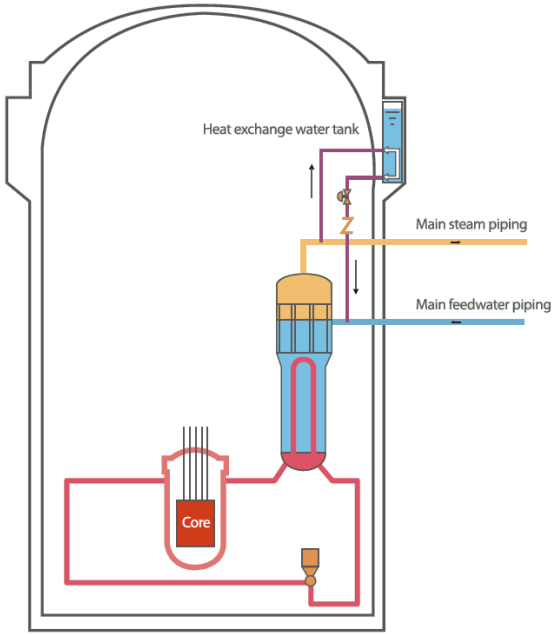
2 trains avec barillet (2x100)

CNNC

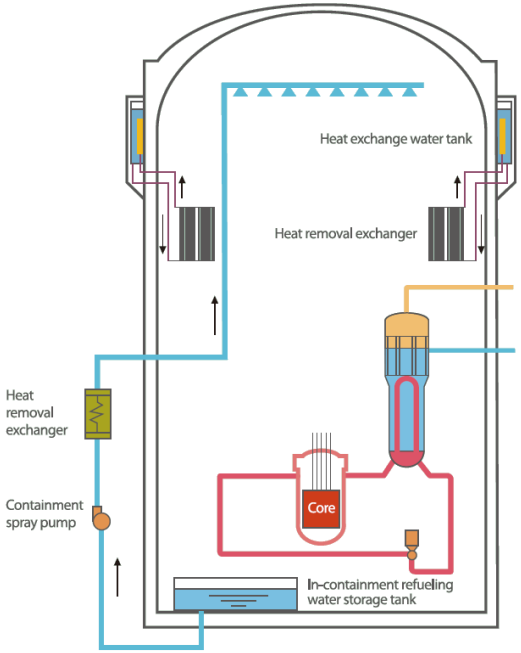


HPR1000 – La sûreté

- Des **systèmes de sauvegardes passifs en backup**



CNNC / CGN

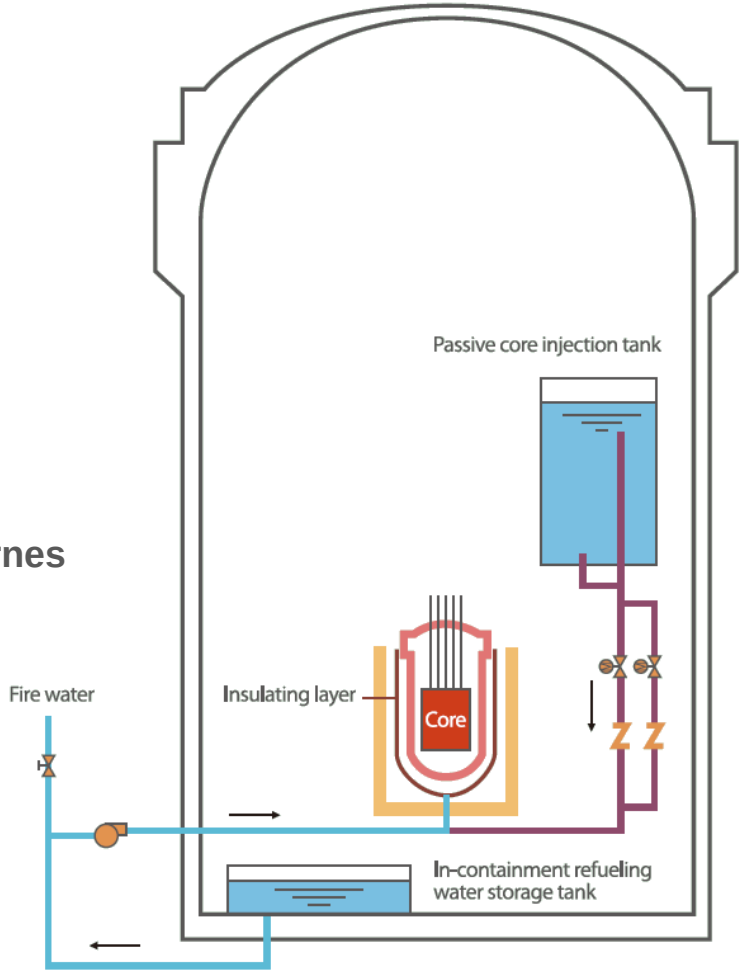


CNNC

HPR1000 – La sûreté

- **Pour les accidents graves**
  - un système de rétention du corium en cuve comme sur l'AP1000

- Et **pour la protection contre les agressions externes**
  - Une double enceinte de type EPR



HPR1000 – Le bilan

- Chine
  - 3 unités en fonctionnement (Fuqing 5&6 – CNNC, Fangchenggang-3 - CGN)
  - **10 unités supplémentaires en cours de construction** (4 CNNC + 6 CGN).
- Pakistan
  - 2 unités en fonctionnement (Karachi - CNNC)
- Prospects
  - Chine, Pakistan, Argentine,

6 . APR1400

Le modèle d'entrée gamme !

framatome

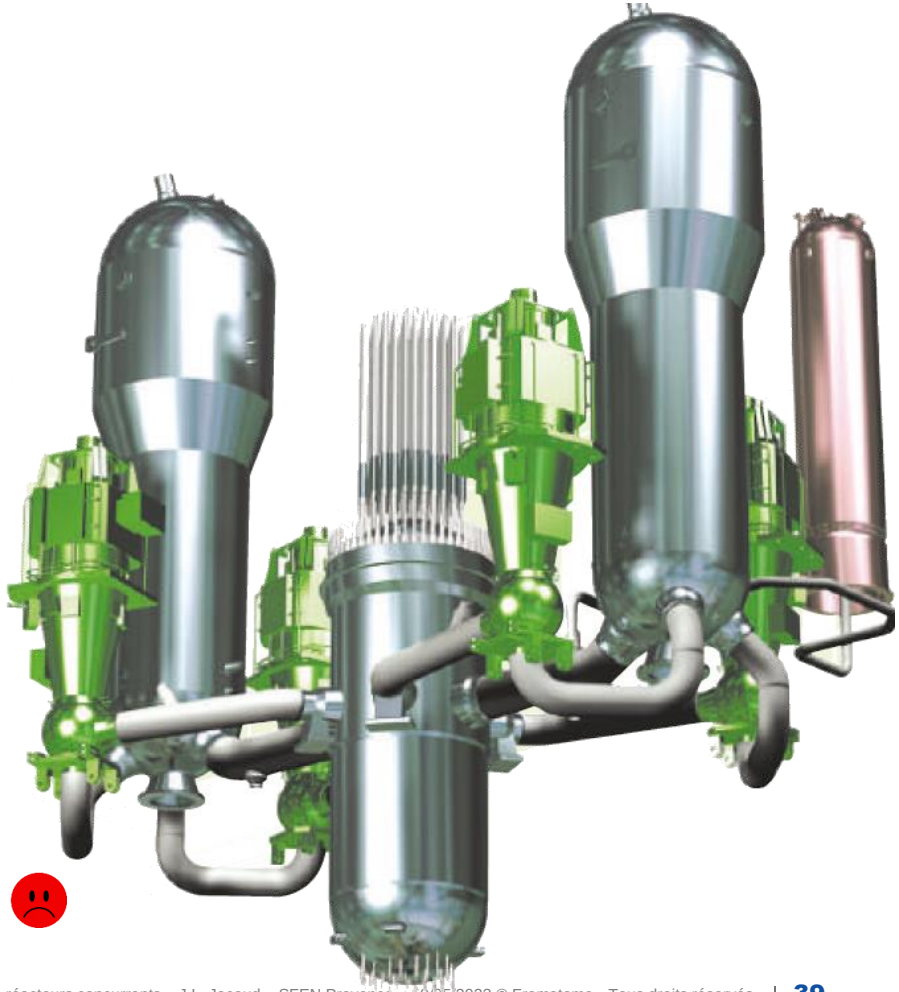
APR1400 – Contexte

- Programme lancé en 1992 pour développer le successeur du standard Coréen Gen II
  - Adaptation du CE80 + de CE
- Gamme de **puissance : Grande** → ~1400 MWe
- Mise sur
  - ⇗ de puissance pour baisser les coûts du kW installé
  - Evolution d'un modèle éprouvé

APR1400 – la chaudière

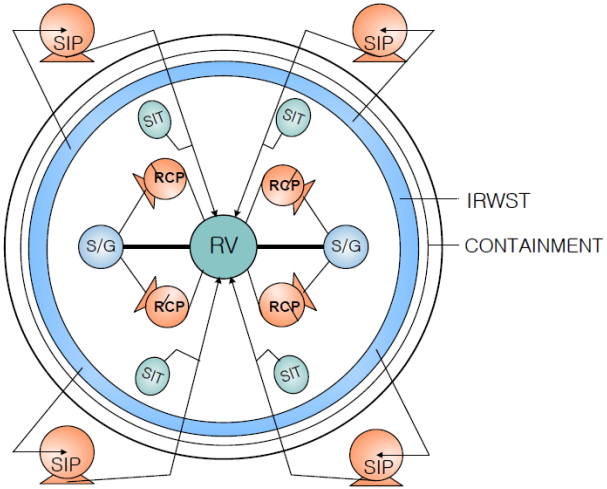
- **Cœur** : 241 assemblages 16x16
  - Puissance : 4000 MWth
  - 93 grappes

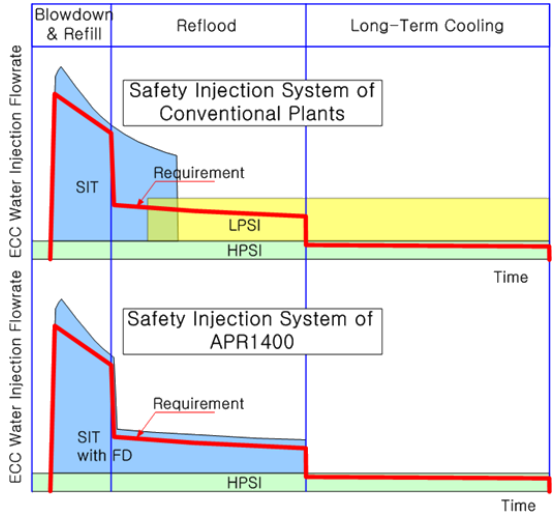
- **Circuit primaire de type CE** avec
  - 2 branches chaudes (2 gros GV)
  - 4 branches froides (4 pompes primaires)
  - Pénétrations en fond de cuve (instrumentation)

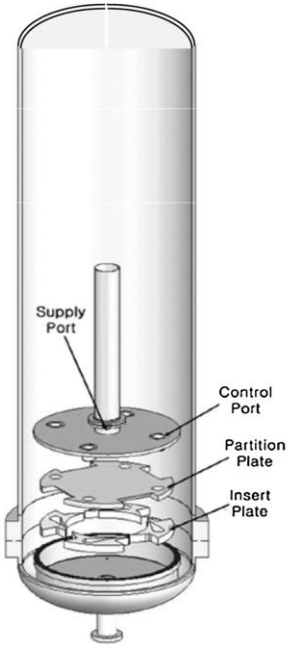


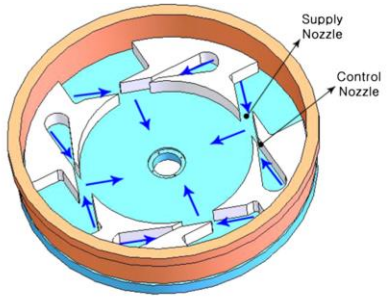
APR1400 – La sûreté

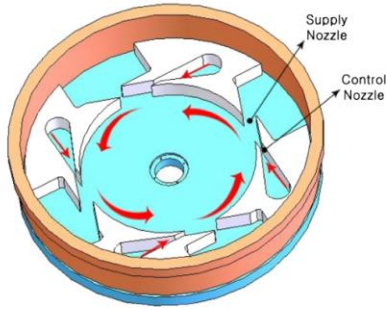
- Des **système de sauvegarde actifs** (4x50%)
  - Mais seulement 2 divisions électriques
  - Des accumulateurs avancés => ~~injection BP~~





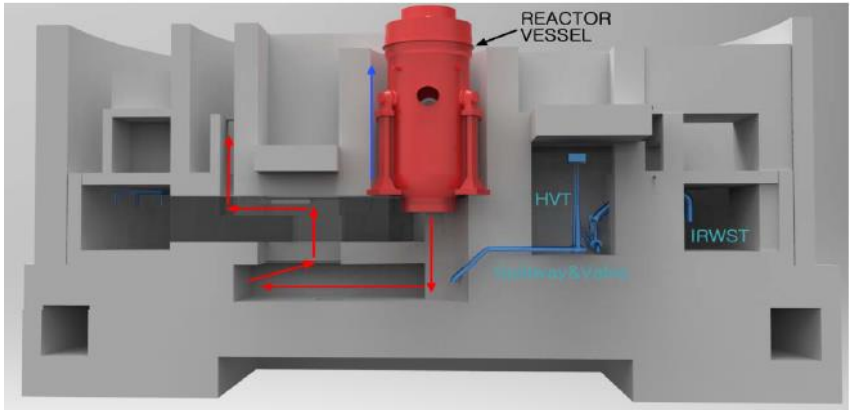


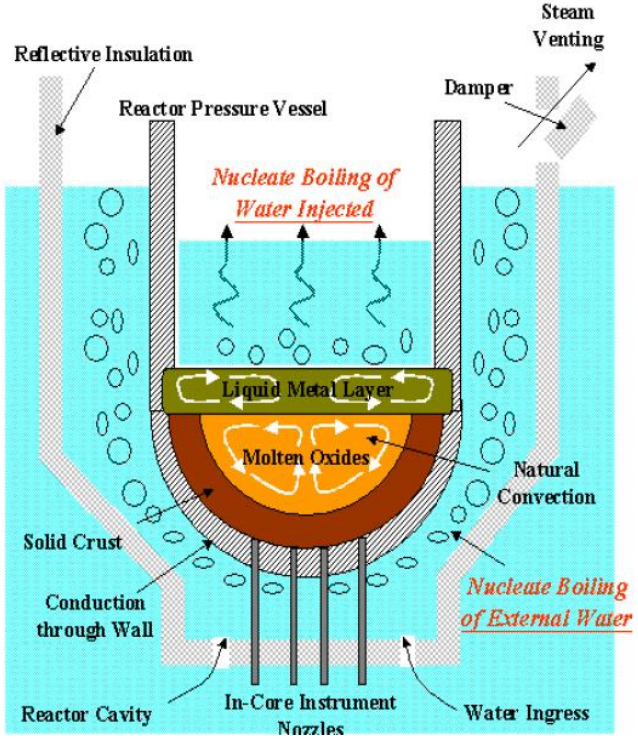




APR1400 – La sûreté

- **Pour les accidents graves**
  - un système de rétention du corium en cuve
    - Très discutable pour un cœur de 4000 MW
  - + une zone d'étalement optimisée
    (⚠ ≠ récupérateur de corium)





APR1400 – La sûreté

- Et pour la **protection contre les agressions externes**
  - Une simple enceinte de 120 cm d'épaisseur
    - Non dimensionnée pour des agressions extrêmes

APR1400 – Le bilan

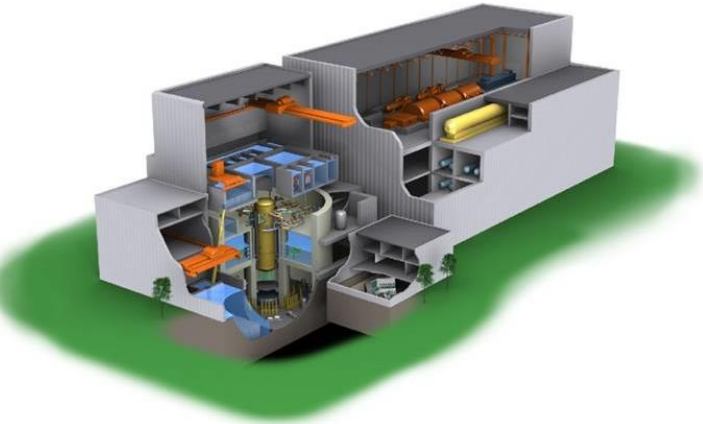
- **Corée**
  - 3 unités en fonctionnement
  - 3 unités en construction
  - 2 unités supplémentaires planifiées
- **Emirats Arabes Unis**
  - 3 unités en fonctionnement
  - 1 unité en fin de construction.
- **Prospects**
  - Pologne, République Tchèque (APR1000), Inde

7 . ET LES AUTRES ?

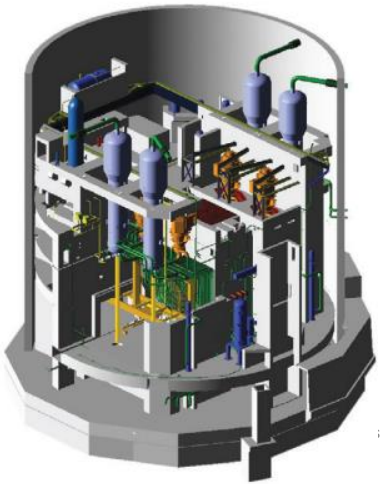
Les Autres

Nos chers disparus!

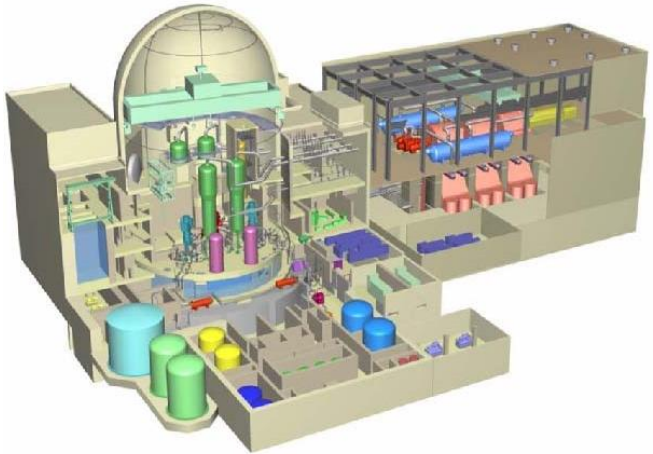
- ESBWR (GE)



- EC6 (SNC-Lavalin)

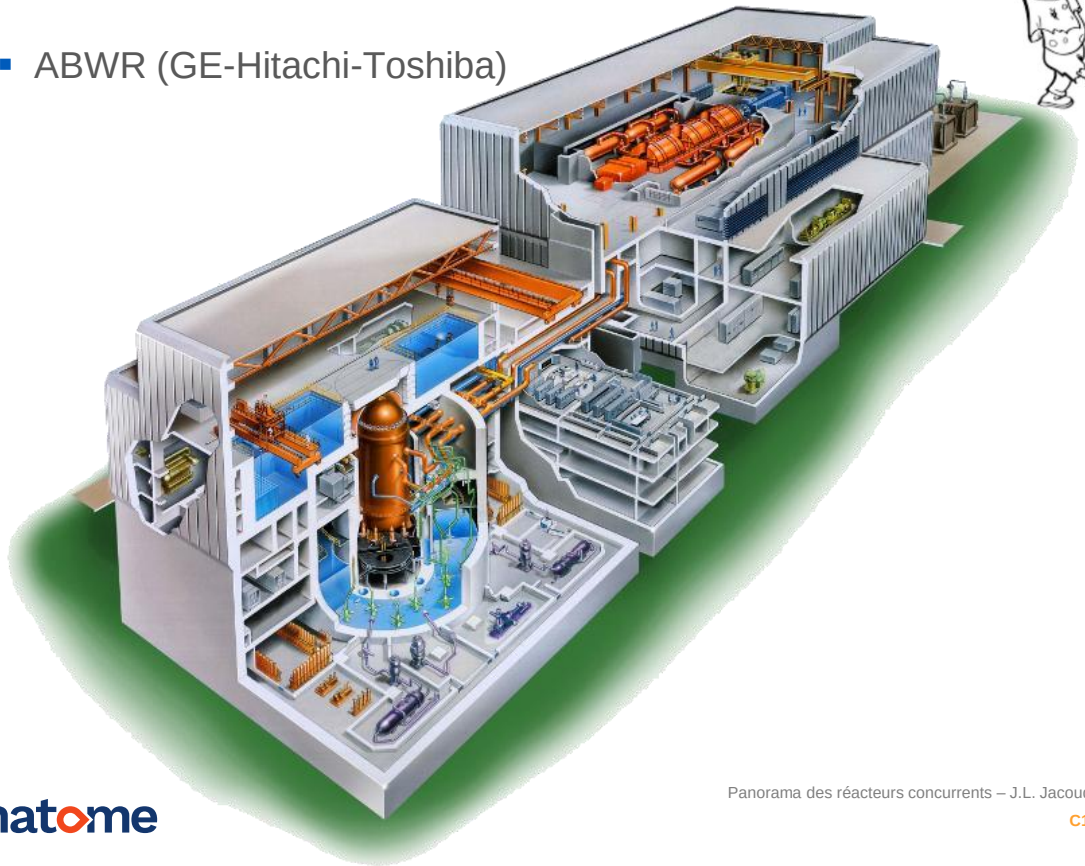


- APWR (MHI)

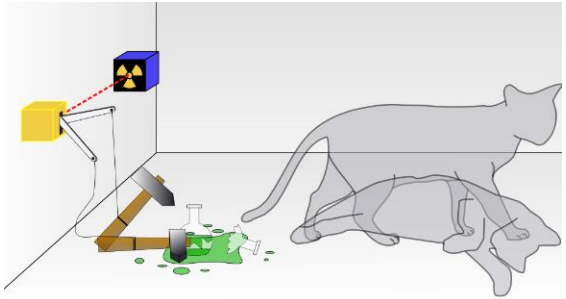


Les Autres

- ABWR (GE-Hitachi-Toshiba)



Le Mort-vivant



Les Autres

L’arlésienne

- CAP1400

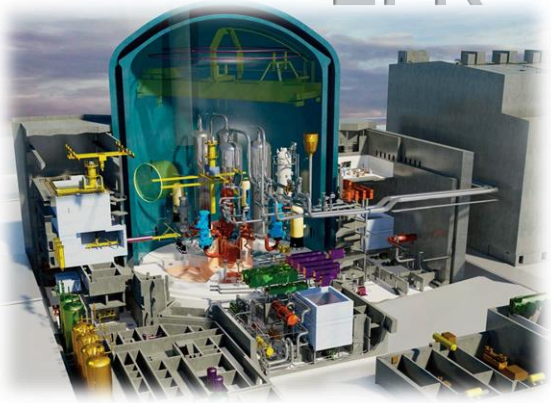
Photo prise en 2014

8 . Les tendances

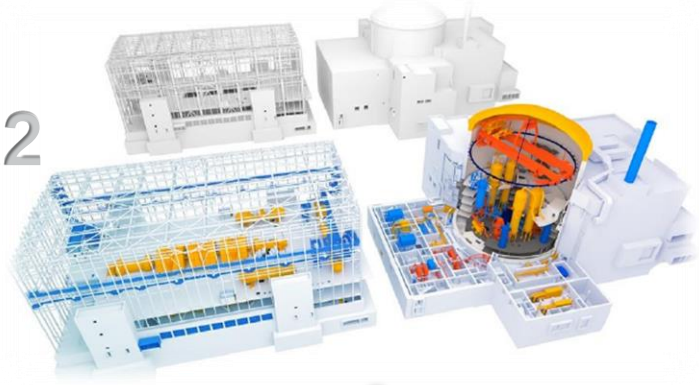
C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

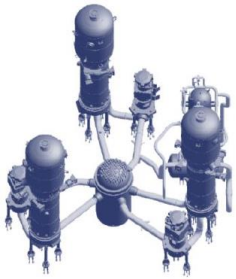
France La gamme EPR

EPR



EPR2





EPR-1200

Corée

La gamme APR

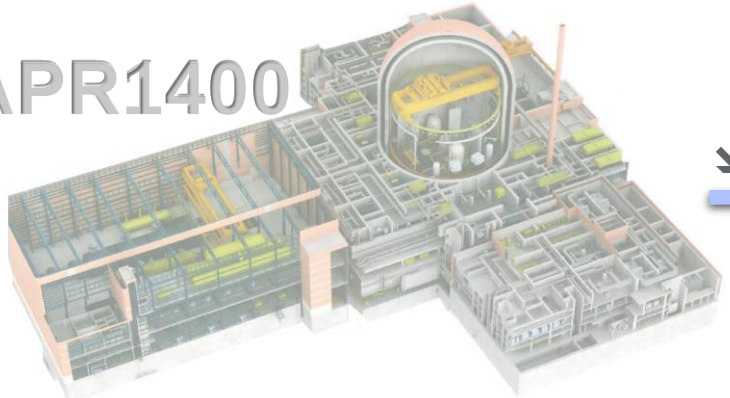
APR1400

Systèmes passifs

APR+

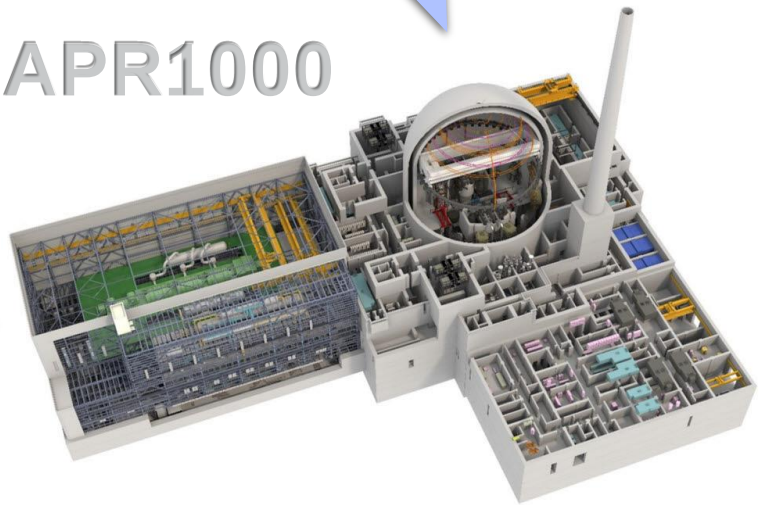
↗ sûreté

EU-APR1400



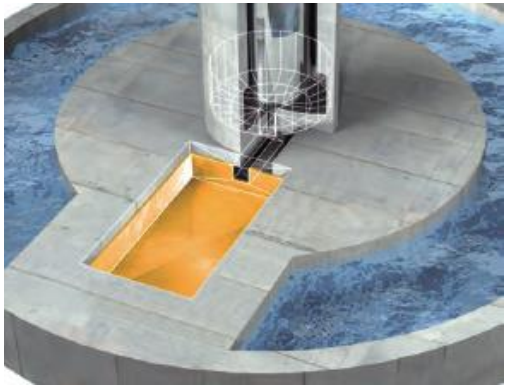
↘ puissance

APR1000



Japon - MHI

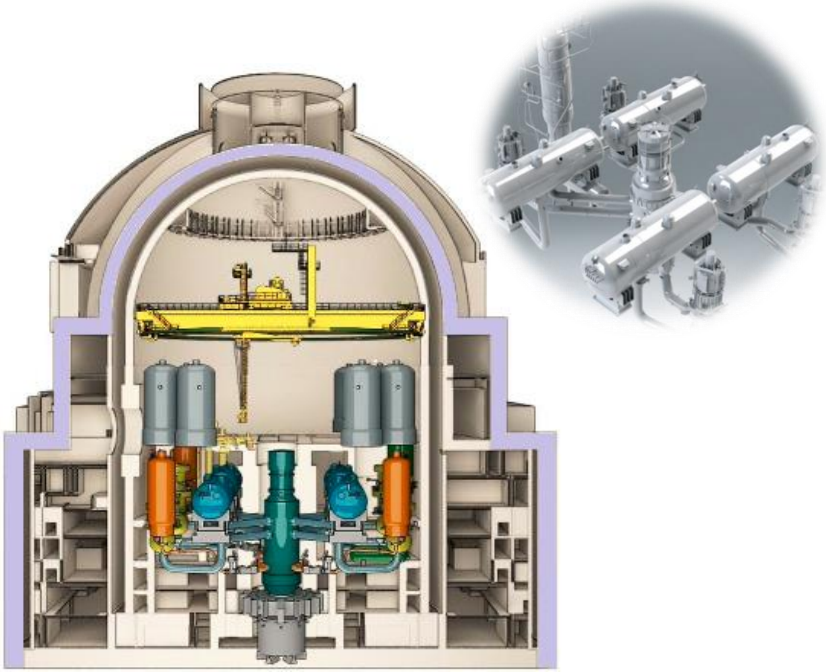
Un nouveau modèle : le SRZ-1200

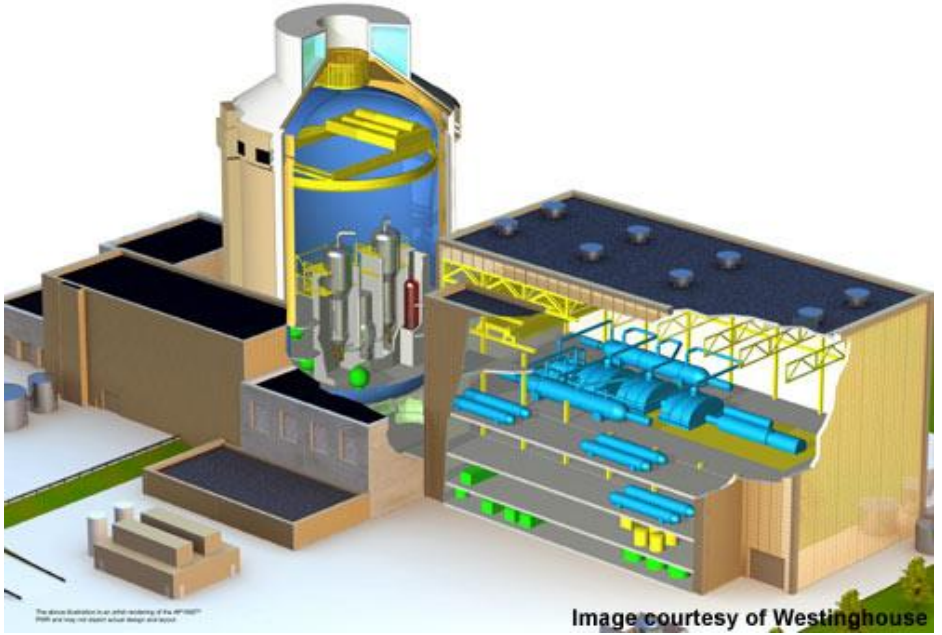


Russie

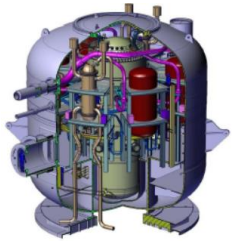
Le statu quo

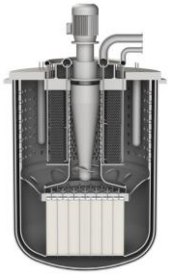
USA (Westinghouse)

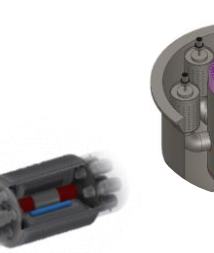
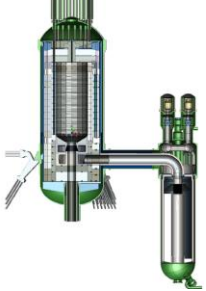
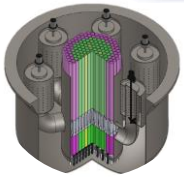


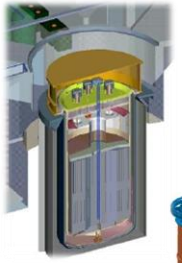


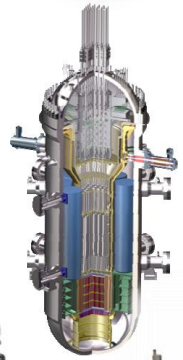
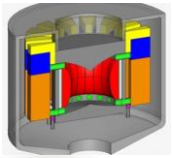
Et … des SMR partout !!!

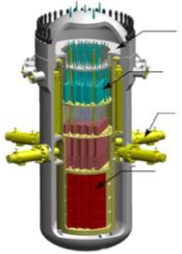








9 . Conclusion

C1 - Framatome Diffusion limitée / Export Control - AL: N ECCN : N

Conclusions

- Modèles français en concurrence directe avec **AP1000** et **APR1400** sur les appels d'offres « ouverts »
  - AP1000 bénéficie de la puissance commerciale des USA
    - *Et l'APR1400 aussi lorsque l'AP1000 n'est pas dans le jeu !*
  - Ne rencontrent pas le succès initialement escompté

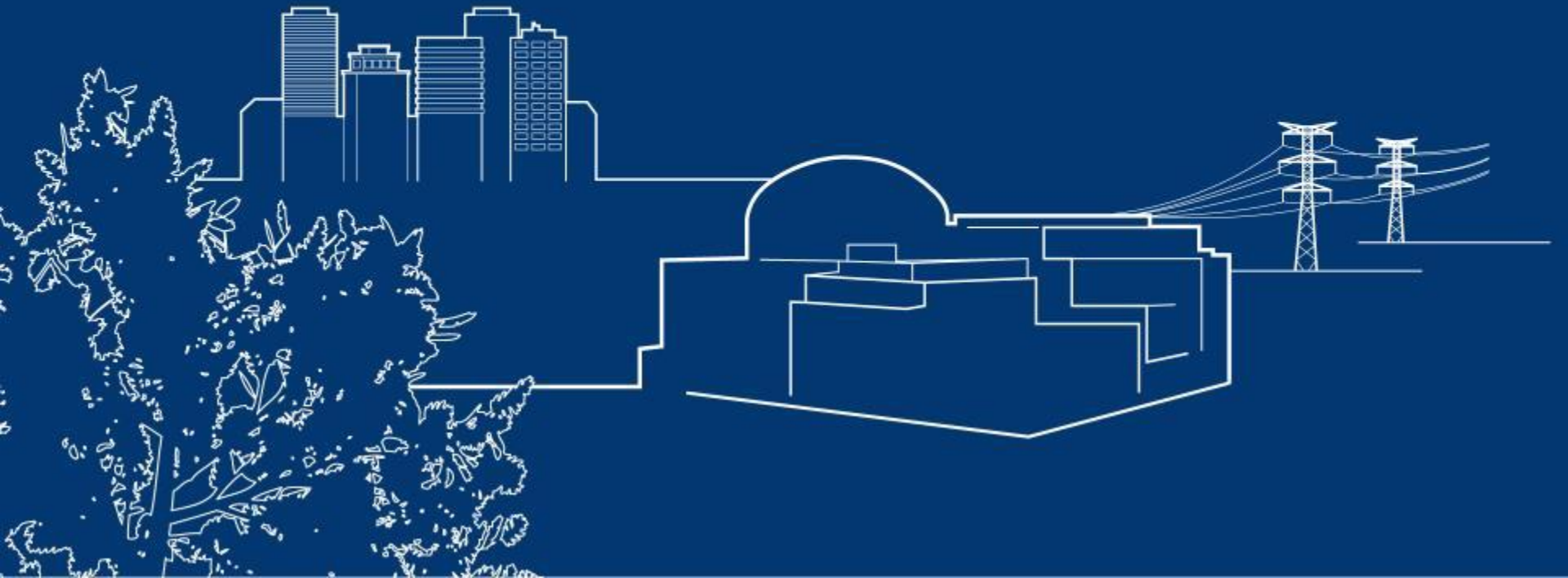
- VVER et Hualong-One
  - Généralement « gré à gré »
  - Inclut un package financier (VVER) ➔ modèle le + « vendu » à l'export
  - Tissu industriel opérationnel ➔ temps de construction « courts »

- Des exigences qualité et sûreté différentes

- **Ce ne sont pas les différences techniques qui déterminent le choix d'un modèle**.

framatome

Merci



Toute reproduction, modification, transmission à tout tiers ou publication totale ou partielle du document et/ou de son contenu est interdite sans l'accord préalable et écrit de Framatome.

Ce document et toute information qu'il contient ne doivent en aucun cas être utilisés à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été communiqués.

Tout acte de contrefaçon ou tout manquement aux obligations ci-dessus est passible de sanctions disciplinaires et de poursuites judiciaires.