



Université Claude Bernard  Lyon 1

Le modèle EPR et ses évolutions

19 01 2022

FRANÇOISE TERNON-MORIN
RÉGIS MILAN

SOMMAIRE

- **Fonctionnement d'un REP**
- **Qu'est ce qu'un EPR ?**
- **Evolutions de l'EPR :**
 - EPR2
 - EPR 1200
- **Questions**

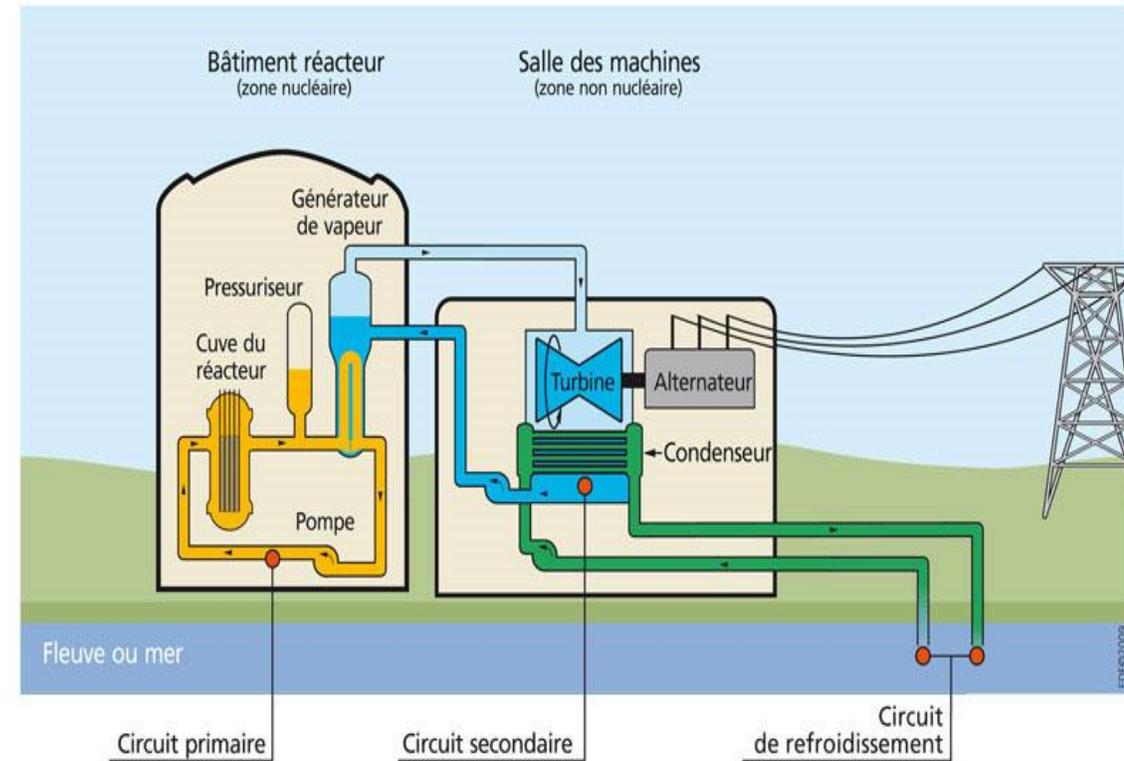


EPR Flamanville 3

Le modèle EPR et ses évolutions

Fonctionnement d'un REP

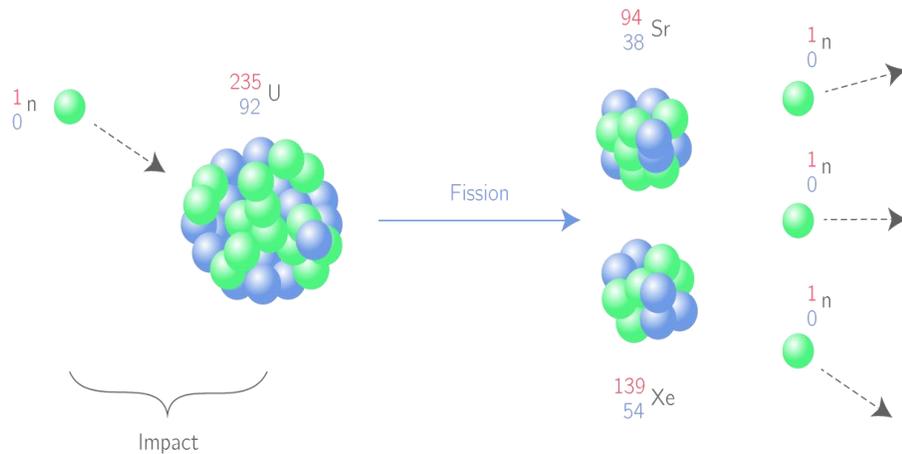
- Réacteur à Eau Pressurisée (REP) (154 bar rel.)
- Une centrale nucléaire est une centrale thermique mais le combustible est de l'Oxyde U235 fissile enrichi entre 3 et 5%.
- Une boucle dite « primaire » est constituée de la cuve connectée par tuyauterie à une pompe primaire (GMPP) et à un générateur de vapeur (GV).
- Suivant le type de REP il y a 3 ou 4 boucles constituant le circuit primaire principal connectées à la cuve.
- Une de ces boucles inclut le pressuriseur qui permet de maintenir le circuit primaire à une pression de 154 bar rel.



Le modèle EPR et ses évolutions

Fonctionnement d'un REP

La production de chaleur est obtenue au travers de la réaction de fission de l'Uranium 235



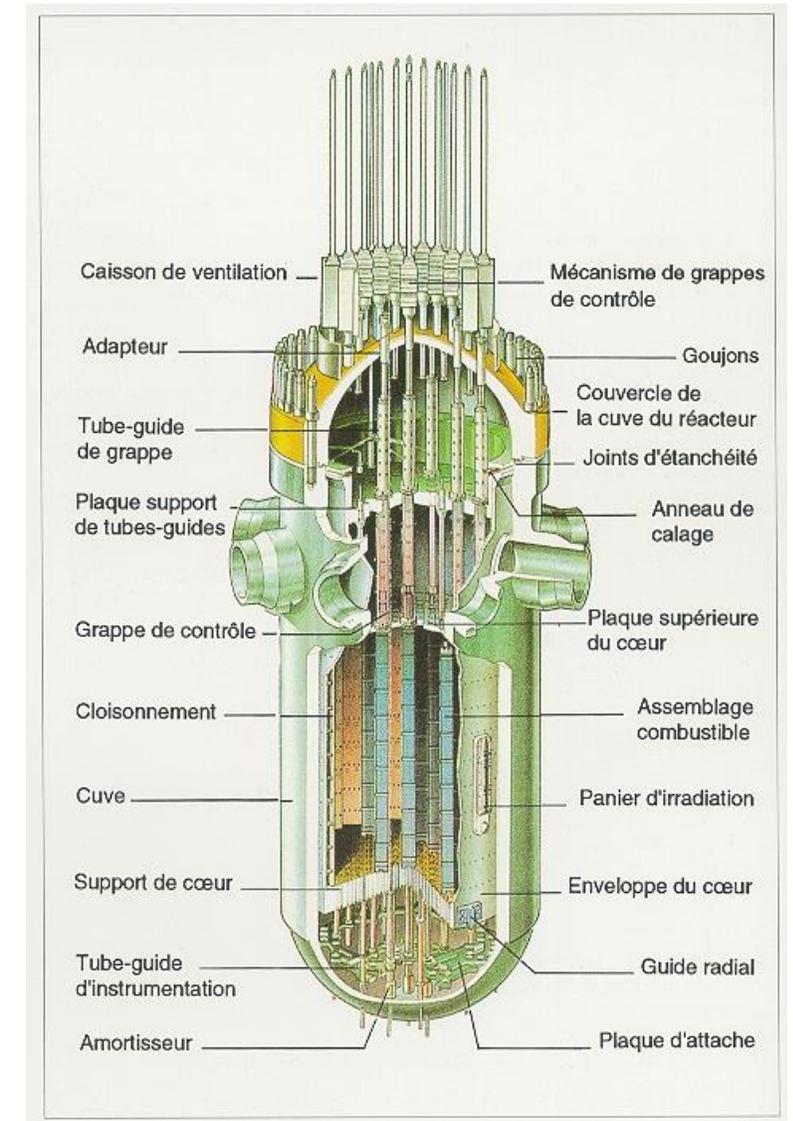
Uranium

Élément chimique naturel comportant 92 protons
Il existe 3 isotopes radioactifs naturels (U234-U235-U238)
Il contient 99.3% d'U238 fertile et 0.7% U235 fissile
Ce métal est de couleur blanc argenté et très dense (19.07g/cm³)

Le modèle EPR et ses évolutions

Fonctionnement d'un REP

- Le fluide caloporteur (eau +acide borique) constituant le circuit primaire pressurisé à 154b rel. remplit plusieurs fonctions:
 - Evacuer la chaleur due à la réaction de fission vers l'échangeur circuit primaire/circuit secondaire (GV)
 - Thermaliser (modérer) l'énergie des neutrons émise par la réaction de fission qui se produit dans la pastille de combustible.

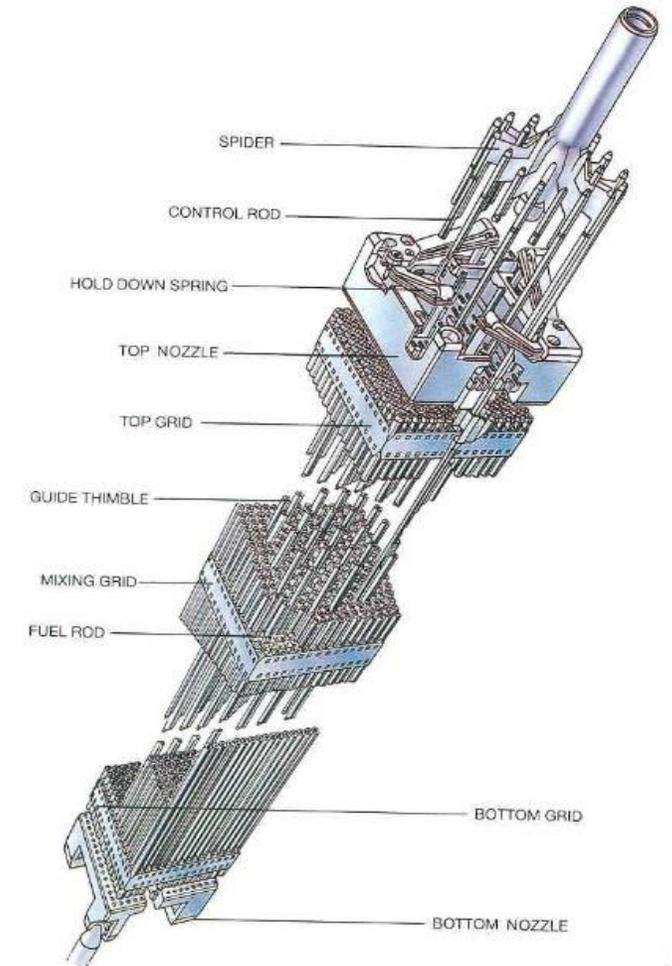


Le modèle EPR et ses évolutions

Fonctionnement d'un REP

MAIS si aucune action n'est menée la réaction va « s'étouffer » !

- Le REP est un réacteur stable qui ne s'emballe pas naturellement.
- Pour maintenir voire augmenter le nombre de fissions donc la puissance il faut agir sur :
 - la concentration en bore du circuit primaire
 - la position des grappes de contrôle



Le modèle EPR et ses évolutions

Fonctionnement d'un REP

Les différents types de REP en France

Quelques chiffres	REP 900 Mwe (CPY)	REP 1300 Mwe (P4/P'4)	REP 1500 Mwe (N4)
Nombre de boucles	3	4	4
Puissance thermique de la chaudière (MWth)	2785	3817	4270
Puissance électrique (Mwe)	960	1370	1470
Nombre Assemblages combustibles	157	193	205
Quantité UO2 (t)	82	118	125

Capacités calorifiques des divers combustibles

1 g de combustible dégage 35 W de puissance thermique

Equivalence entre sources d'énergie pour 100 g d'Uranium	
GAZ	600 Kg
PETROLE	1000 Kg
CHARBON	1500 Kg
BOIS	2500 Kg

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Un projet né d'un rapprochement franco-allemand à la fin des années 1980.**

En 1989, un accord de coopération est signé entre Framatome et Siemens visant la mise au point d'une nouvelle technologie de réacteur pour les marchés français et allemands, mais aussi pour l'export.

Le projet est baptisé « European Pressurized water Reactor » (EPR) en 1992

En 1998, l'Allemagne se retire du projet après l'entrée des Verts au gouvernement, laissant les français EDF et Areva (né en 2001 de la fusion de Framatome, Cogema et CEA Industrie) en première ligne.

- **Un réacteur à eau pressurisée de troisième génération**

L'EPR est un réacteur dit « évolutionnaire », sa conception repose sur celle des réacteurs existants de type N4 français et Konvoi allemands, conçu pour une durée de fonctionnement de 60 ans.

D'une puissance de 1.600 MWe - soit 100 à 150 MWe de plus que la génération précédente

L'EPR utilise de l'uranium enrichi à 5 % ou du combustible MOX. (Plutonium et Uranium appauvri, créé à partir de combustible nucléaire usé)

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Objectifs généraux**
 - **Amélioration de la sûreté du réacteur**
 - **Assurer de meilleurs rendements**
 - **Améliorer la performance économique**

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la sûreté du réacteur**
 - **Objectifs généraux d'amélioration de la sûreté**
 - Réduction des doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs.
 - Réduction du nombre d'incidents significatifs dans le but de réduire les possibilités d'apparition de situations accidentelles
 - Réduction de la probabilité d'accident avec fusion du cœur : $< 10^{-5}$ /réacteur/an
 - Réduction des rejets radioactifs pouvant résulter de situations incidentelles ou accidentelles (accident avec fusion du cœur).

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la sûreté du réacteur**

- ❖ Prise en compte du REX des accidents majeurs (TMI, Tchernobyl et Fukushima)
- ❖ Réduction de l'impact sur la population en cas d'accident grave :
 - Maintien du confinement : l'ensemble du système a été conçu pour résister un séisme et une partie des bâtiments est « bunkérisée » pour supporter la chute d'un avion gros-porteur. Cette résistance élevée aux agressions externes prise en compte dès l'origine sur l'EPR a eu pour effet de limiter les modifications du modèle après l'accident de **Fukushima**, celles-ci se limitant à des mesures de renforcement de l'autonomie (réserves en eau par exemple).

EX : Diesels & réservoirs de fuel dans des bâtiments en béton armé (Résistance au séisme - Portes résistantes aux explosions externes

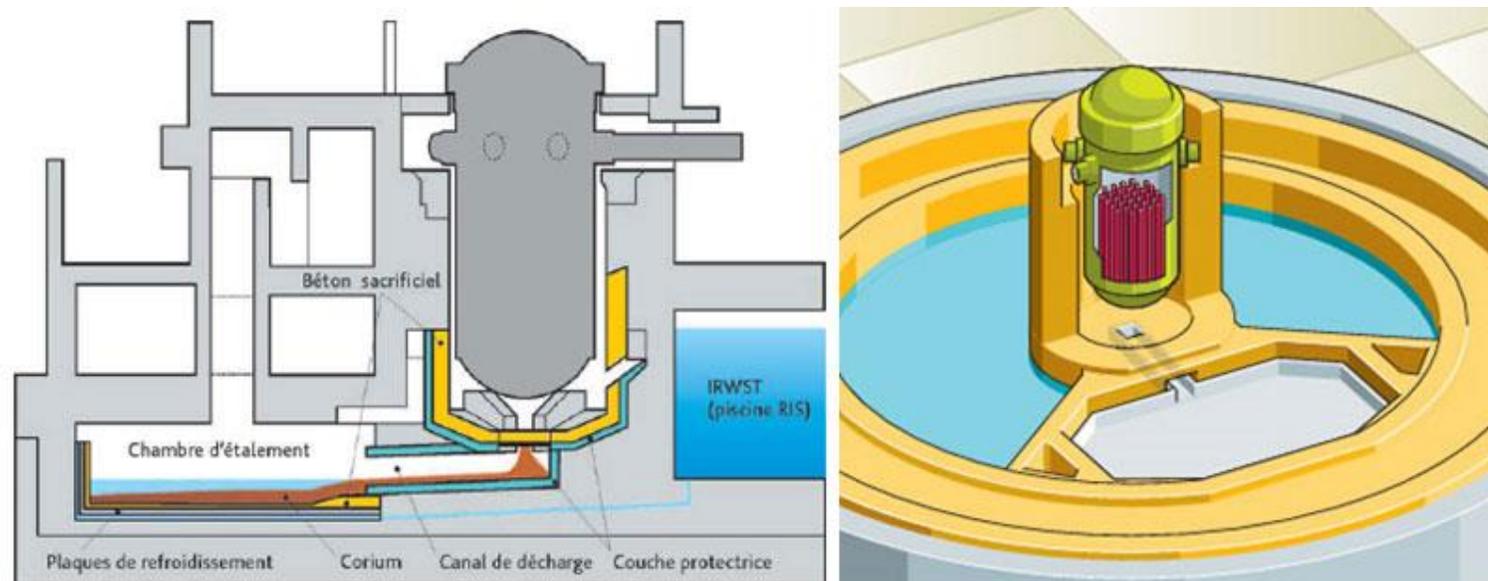


Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la sûreté du réacteur**

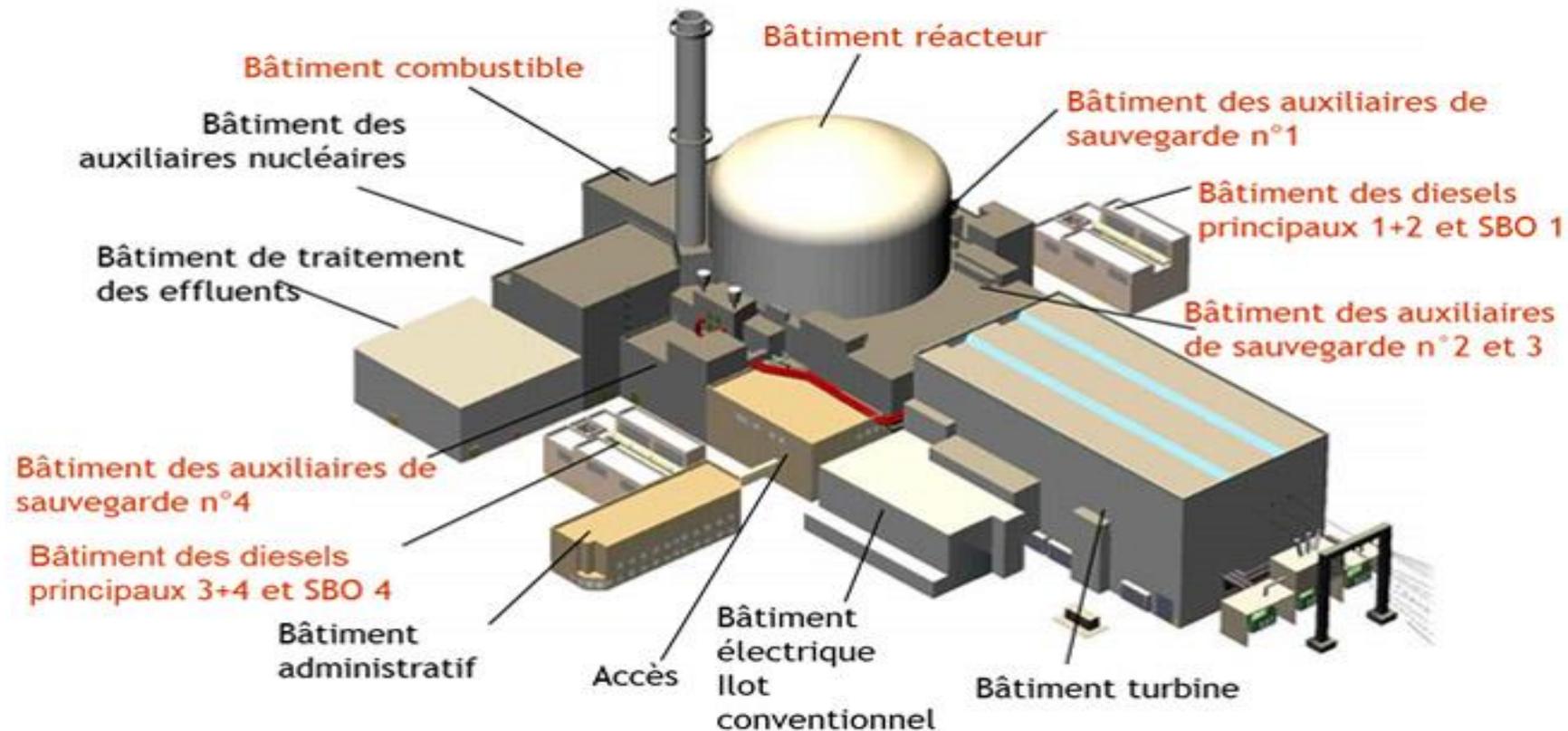
- ❖ Réduction de l'impact sur la population en cas d'accident grave :
 - l'enceinte de confinement doit être en mesure de contenir les fluides radioactifs vaporisés.
 - le réacteur est doté d'un récupérateur de corium, chargé de collecter et refroidir le produit d'une fusion du cœur.



Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la sûreté du réacteur**
 - ❖ Une architecture à quatre voies indépendantes et géographiquement séparées dans 4 bâtiments de sauvegarde distincts pour les principaux systèmes de sûreté



Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la sûreté du réacteur**

- ❖ Une alimentation électrique des systèmes de sûreté assurée par quatre groupes électrogènes principaux et par deux groupes électrogènes de conception différente permettant de faire face à la perte totale de l'alimentation électrique
- ❖ Une réserve d'eau utilisée pour refroidir le cœur en cas de brèche sur le circuit primaire est située à l'intérieur du bâtiment du réacteur
- ❖ Le bâtiment du réacteur, le bâtiment d'entreposage des assemblages combustibles usés ainsi que deux des quatre bâtiments abritant les systèmes de sauvegarde sont protégés de la chute d'avion par une épaisse structure en béton.
- ❖ La source froide, comporte quatre voies identiques et séparées. Deux voies diversifiées complémentaires permettent de faire face à une perte des quatre voies précitées.

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration du rendement**

- ❖ Fonctionnement avec un combustible nucléaire moins enrichi que les générations précédentes. Les phases de rechargements doivent être plus espacés, permettant des cycles plus longs.
- ❖ Les GV fonctionnent à une pression plus importante dans le circuit secondaire pour une meilleure production d'électricité.
- ❖ L'EPR fournirait 22 % d'électricité supplémentaire qu'un réacteur traditionnel, à partir de la même quantité de combustible !!

Le modèle EPR et ses évolutions

Qu'est ce qu'un EPR ?

- **Amélioration de la performance économique**

- ❖ Durée de vie ciblée à la conception 60 ans

- ❖ Disponibilité cible $\geq 90\%$ (sur 20 ans avec des cycles de 12 mois)

- ❖ Possibilité d'arrêts pour visite partielle avec rechargement combustible : 16 jours

- ❖ Flexibilité adaptée au réseau

- Suite à la variation de demande journalière → suivi de charge / variation de puissance
- Adaptation aux variations de fréquences en temps réel → réglages primaire / secondaire
- Adaptation aux perturbation du réseau → réponse aux demandes non programmées / retour rapide à pleine puissance
- Adaptation aux demandes anticipées → fonctionnement prolongé à puissance réduite

Le modèle EPR et ses évolutions

Les EPR dans le Monde

❖ France :

Le réacteur de Flamanville 3 devrait démarrer fin 2023, le chargement en combustible est prévu début 2023.

❖ Chine :

Deux réacteurs EPR sur le site de Taishan, dans le sud-est de la Chine sont en service opérationnel Ils ont été mis en service respectivement en 2018 et 2019, après neuf ans de construction.

❖ **Finlande** : Un réacteur mis en chantier en 2005 à Olkiluoto, en Finlande, a réalisé la première divergence en décembre 2021 et devrait être mis en service commercial au premier semestre 2022.

❖ Royaume Uni :

Deux réacteurs sont en cours de construction à Hinkley Point. La mise en service devrait avoir lieu vers 2026.

• En projet :

- 2 réacteurs à Sizewell C (Royaume Uni)
- 6 réacteurs à Jaitapur (Inde)

Le modèle EPR et ses évolutions

Evolution de l'EPR

- **EPR2**
- **EPR 1200**

Le modèle EPR et ses évolutions

Le modèle EPR2

Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : Une version optimisée et industrialisée de l'EPR



**Un réacteur nucléaire
qui reprend les atouts
de l'EPR**

Même niveau de sûreté
parmi les plus élevés au
monde, puissance,
performances
environnementales, etc.



**Qui intègre pleinement
le retour d'expérience**

de tous les chantiers EPR
dans le monde et du Parc
en exploitation, afin
d'optimiser les coûts et
les délais de construction.



**Conçu pour être exploité
dans un mix à forte composante
en énergies renouvelables**

à l'horizon 2040, grâce à sa
souplesse de pilotage
(manœuvrabilité).



**Dans un programme de
3 paires de réacteurs**

afin de bénéficier des
effets de palier et de
série.



Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : Ses principales caractéristiques

- **Il conserve tous les atouts de l'EPR**
 - Une puissance similaire à EPR : 1670 MWe soit 4590 MWth (idem Taishan)
 - Certains matériels et équipements identiques pour limiter les risques industriels
 - Des performances de sûreté parmi les plus élevées au monde avec intégration du REX Fukushima dès la conception
 - Des performances environnementales optimisées : des rejets réduits de 20%, possibilité d'utiliser 30% de MOX ...

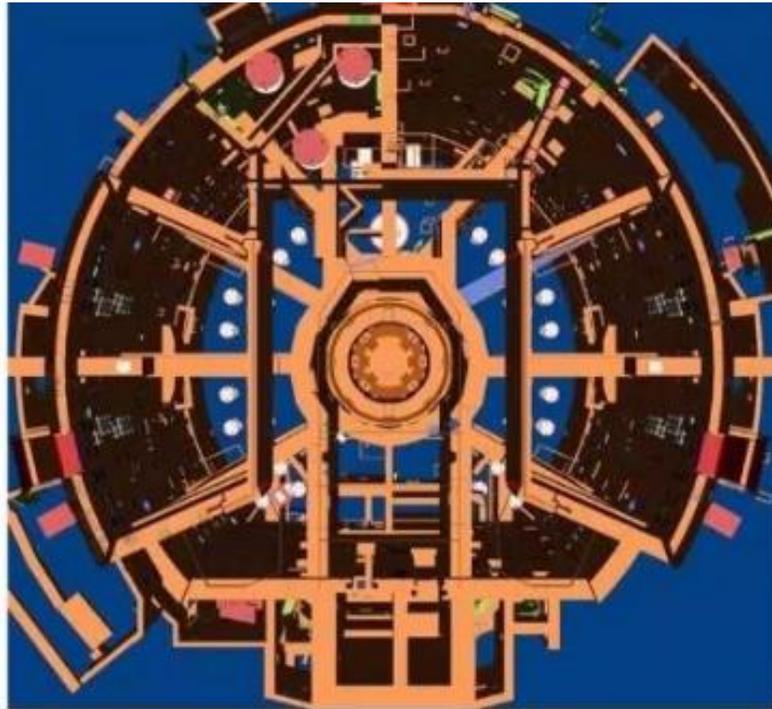
Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : Ses principales caractéristiques

- **Il intègre des modifications issues du REX des différents EPR et du Parc en exploitation**
 - **Une simplification du design pour faciliter la construction**
 - Génie civil simplifié
 - Simple enceinte à paroi épaisse avec liner
 - Suppression d'un bâtiment auxiliaire
 - Recours à la modularisation
 - Séparation géographique renforcée des systèmes de prévention et de mitigation des accidents graves

Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : Ses principales caractéristiques



HPC



EPR2

Structures internes verticales

Hinkley Point C

Le modèle EPR et ses évolutions

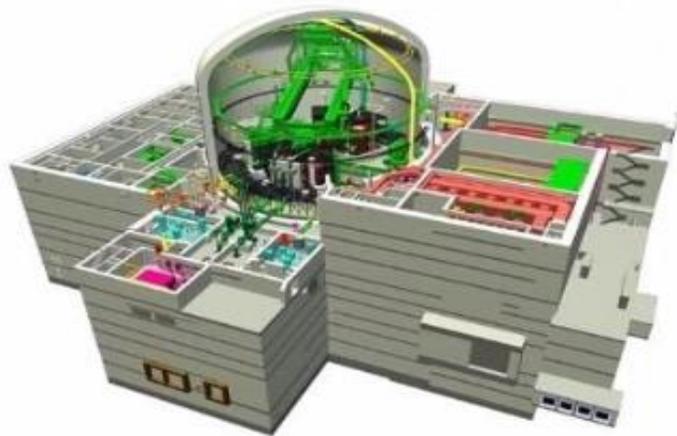
EPR2 : Ses principales caractéristiques

- **Des modifications d'options de maintenance et d'exploitation**
 - Architecture de sauvegarde en 3 trains (au lieu de 4 sur Flamanville)
- **Une prise en compte, dès la conception, des aspects industriels, pour améliorer et sécuriser la constructibilité du futur réacteur**

Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : Ses principales caractéristiques

- **Il est entièrement conçu selon la méthodologie de l'ingénierie système.**
 - Cette méthodologie, largement utilisée dans l'aéronautique et l'automobile, est développée dans le cadre d'un projet de transformation en partenariat avec Dassault System et Cap Gemini.
 - L'utilisation d'une maquette 3D permet de partager l'ensemble des données



Le modèle EPR et ses évolutions

EPR2 : La stratégie et les enjeux du projet

- EDF a remis au gouvernement en mai 2021 une proposition pour la construction de **3 paires de réacteurs EPR2** en France sur des sites existants destinées au renouvellement d'une partie du parc nucléaire actuel arrivant en fin de vie.
- Pourquoi 3 paires ?
 - La construction par paire sur un même site permet une réduction des coûts et des délais de 20 à 30% sur la 2eme tranche (cf Hinkley Point).
 - Un projet de 3 paires permet de tirer partie de l'effet de série avec des achats groupés et standardisés pour les 3 paires
- Quel planning ?
 - Le « basic design » du modèle est achevé. Edf est en attente de la décision du gouvernement
 - La date de mise en service du 1er réacteur visée est **2035** et celle du 6eme est **2042** avec un intervalle de 3 à 4 ans entre chaque paire.

Le modèle EPR et ses évolutions

Le modèle EPR 1200

Le modèle EPR et ses évolutions

EPR 1200 : Une version moyenne puissance de l'EPR2

- **Le marché de la moyenne puissance offre un potentiel important**
 - La moyenne puissance répond aux attentes de certains clients qui ne disposent pas
 - d'un financement suffisant pour la forte puissance
 - d'un réseau électrique suffisamment robuste et/ou d'une source froide suffisamment dimensionnée.
 - Un modèle de moyenne puissance permet de se positionner sur certains appels d'offre face à la concurrence
 - Premier marché visé : la République Tchèque (Dukovany 5)
 - A plus long terme : Slovénie et Hors Europe (Brésil, Indonésie..)

Le modèle EPR et ses évolutions

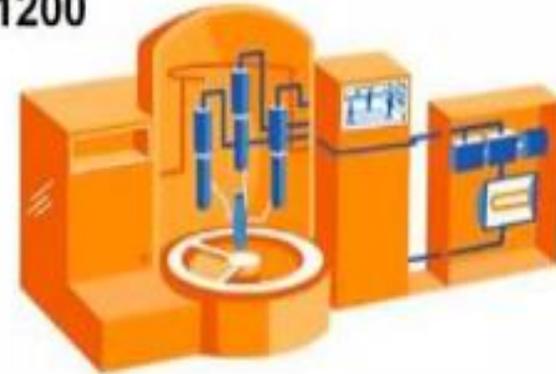
EPR 1200 : Ses principales différences et similitudes VS EPR2

EPR2



- Puissance thermique : **4590 MWth**
- **4 boucles**
- Cœur : **241 assemblages**
- Combustible: UO2 enrichi et possibilité de 30% MOX
- Enceinte simple paroi avec liner
- 3 trains de sauvegarde

EPR1200



- Puissance thermique : **3300 MWth**
- **3 boucles**
- Réutilisation de certains composants EPR2 (GV, GMPP)
- Cœur : **177 assemblages**
- Combustible identique à EPR2
- Enceinte simple paroi avec liner
- 3 trains de sauvegarde

Le modèle EPR et ses évolutions

EPR 1200 : l'appel d'offre Tchèque

- Appel d'offre pour une tranche nucléaire de 1200 MWe maximum sur le site de Dukovany attendu **début 2022**
- Suite à l'exclusion des Chinois (CGN) et des Russes (Rosatom) restent en compétition :
 - **EDF** (France) avec l'**EPR1200**,
 - **Westinghouse** (Etats-Unis) avec l'**AP1000**,
 - **KHNP** (Corée) avec l'**APR1000**.
- Sélection du concepteur : 2023-2024
- Finalisation du contrat en 2024
- Début de construction en 2029
- **Mise en service entre 2036 et 2038**



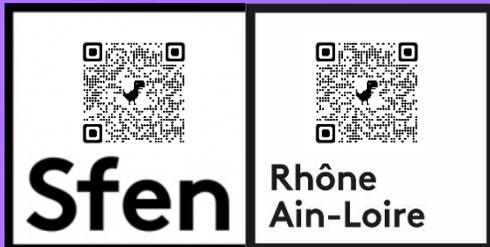
Le modèle EPR et ses évolutions

Synthèse

- **EPR**, comme les modèles de génération 3, intègre les enseignements tirés des accidents majeurs notamment Fukushima et par conséquent présente un niveau de sûreté élevé et des performances optimisées.
- Il est actuellement en exploitation en Chine, il démarre en Finlande, bientôt en France et est en construction au Royaume Uni.
- Pour optimiser les coûts et les délais de construction, EDF avec Framatome a fait évoluer le modèle vers **EPR2** tout en conservant les atouts de l'EPR.
- Les modifications apportées visent à simplifier la construction mais aussi l'exploitation du réacteur.
- EDF est en attente de la décision du gouvernement pour la construction de 3 paires d'EPR2 en France
- Par ailleurs un modèle de moyenne puissance **EPR 1200** est en cours de développement pour répondre aux exigences de certains clients et se positionner sur certains appels d'offres.



Merci de votre attention !



Françoise TERNON-MORIN

Régis MILAN