

L'énergie nucléaire : quelles solutions pour le futur?

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheuse Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



FIEEC-INNOVTECH

Le Document de présentation sur L'Energie Nucléaire est très complet et dépasse le temps imparti lors de ce WEBINAIRE,

Vous pourrez le retrouver dans son intégralité dur le site FIEEC InnovTech

Avec notamment :

- Des rappels historiques,
- La constitution d'un réacteur,
- Le fonctionnement d'un réacteur
- L'EPR2
- La sureté
- Les Déchets
- La transition numérique

L'énergie nucléaire : quelles solutions pour le futur?

- 1. Introduction : Situation énergétique et climatique actuelle**
- 2. Histoire et état actuel de la filière**
- 3. Comment marche un réacteur nucléaire pour produire de l'électricité ?**
 - a. La fission et la réaction en chaîne
 - b. Le réacteur et la centrale
- 4. Le futur**
 - a. Le futur proche
 - b. Le futur plus lointain
- 5. Les compléments importants**
 - a. La sûreté
 - b. Les déchets

L'énergie : l'enjeu du 21^{ème} siècle



- ❑ La lutte contre le réchauffement climatique : diminuer les émissions de gaz à effet de serre
- ❑ Pour atteindre la neutralité carbone en 2050 : diminuer nos émissions de CO2 de 10 t CO2/personne actuellement à 2 tCO2eq/personne en France.
- ❑ Urgence à décarboner au maximum tout ce que l'on peut décarboner : arrêter de consommer des énergies fossiles
- ❑ Ordre de grandeurs:
 - les renouvelables et le nucléaire : moins de 50 g de CO2 /kWh
 - les énergies fossiles : plus de 500 g de CO2 /kWh
- ❑ Fondamental de décarboner les secteurs de l'économie hors électricité
 - les transports (1^{er} émetteur de CO2, pétrole),
 - l'industrie, l'agriculture et l'habitat (gaz, pétrole).
- ❑ La production d'électricité d'origine nucléaire répond à cet enjeu en faisant partie d'un mix énergétique décarboné aux côtés des ENR et l'hydroélectricité.



Habitat



Déplacements



Industrie



Agriculture

Actualité géopolitique en Europe



❑ La guerre en Ukraine démontre la nécessité de :

- conserver une souveraineté énergétique (autant que faire se peut).
- augmenter notre souveraineté industrielle potentielle.
- → le scénario « réindustrialisation » de RTE = scénario de référence.

Scénario de référence : Consommation électricité : augmentation de 400 TWh aujourd'hui à 645 TWh en 2050 (scénario « réindustrialisation » = 755 TWh)

- → obligation d'une part significative de nucléaire dans le MIX énergétique

❑ Conséquence:

- Création d'emplois non délocalisables à haute valeur ajoutée.
- Relocalisations de productions fortement émettrices de GES.
- Amélioration de l'économie du pays.

2. Histoire et état actuel de la filière

Détails sur le site FIEEC

3. Comment marche un réacteur nucléaire pour produire de l'électricité ?

- a. La fission et la réaction en chaîne**
- b. Le réacteur et la centrale**

Détails sur le site FIEEC

La réaction de fission

❑ C'est la coupure d'un noyau lourd en deux noyaux plus petits.

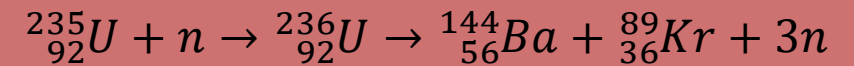
❑ Deux réactions distinctes :

- fission spontanée = le noyau fissionne sans apport d'énergie.
- fission provoquée = le noyau absorbe de l'énergie.

❑ La fission spontanée = processus rare

~ 1 fission spontanée/heure dans 1g d'uranium 235.

❑ Dans la nature, l'uranium-235 = seul noyau lourd fissile.

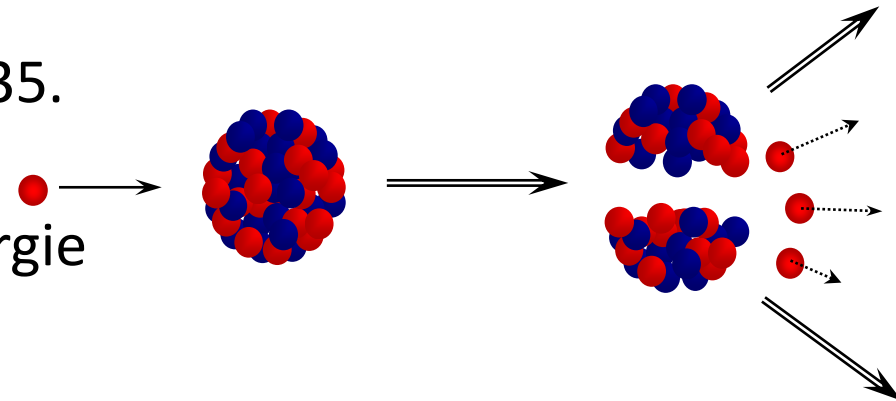
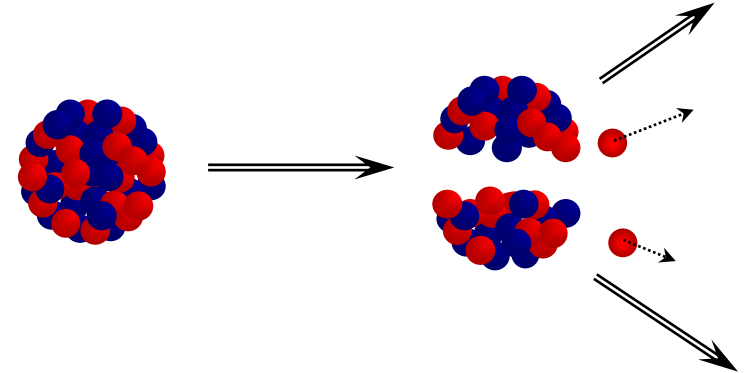


❑ Vitesse du neutron : lent (2200m/s) → rapide (20 000 km/s).

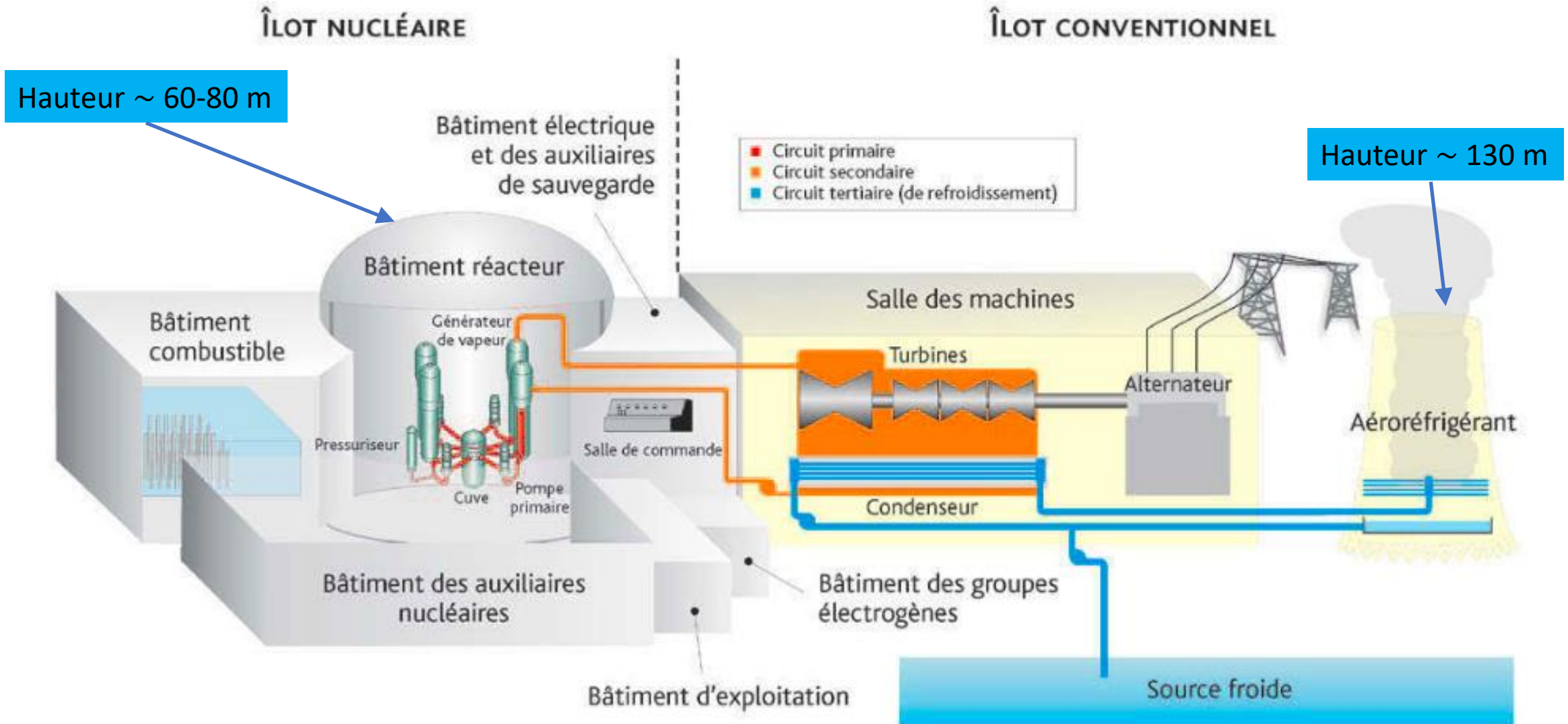
❑ Grande probabilité de fission avec neutrons lents pour l'U-235.

❑ Lors de cette réaction sont émis :

- 2 produits de fission, des neutrons (2-3) et de l'énergie (environ 200 MeV=3,2x10⁻¹¹J).



Vue d'ensemble

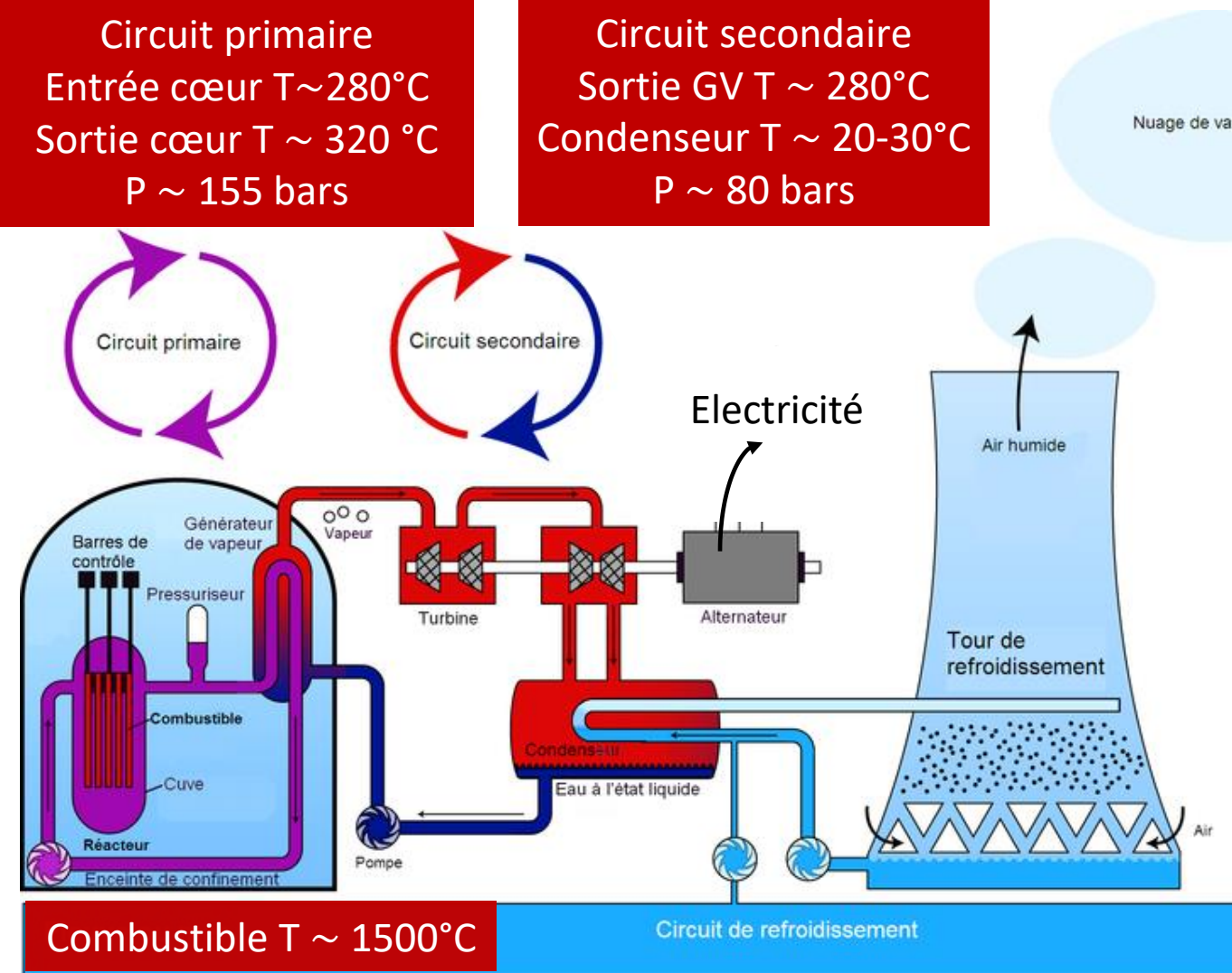


Une centrale nucléaire

Circuit primaire
 Entrée cœur $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Sortie cœur $T \sim 320^\circ\text{C}$
 $P \sim 155$ bars

Circuit secondaire
 Sortie GV $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Condenseur $T \sim 20\text{-}30^\circ\text{C}$
 $P \sim 80$ bars

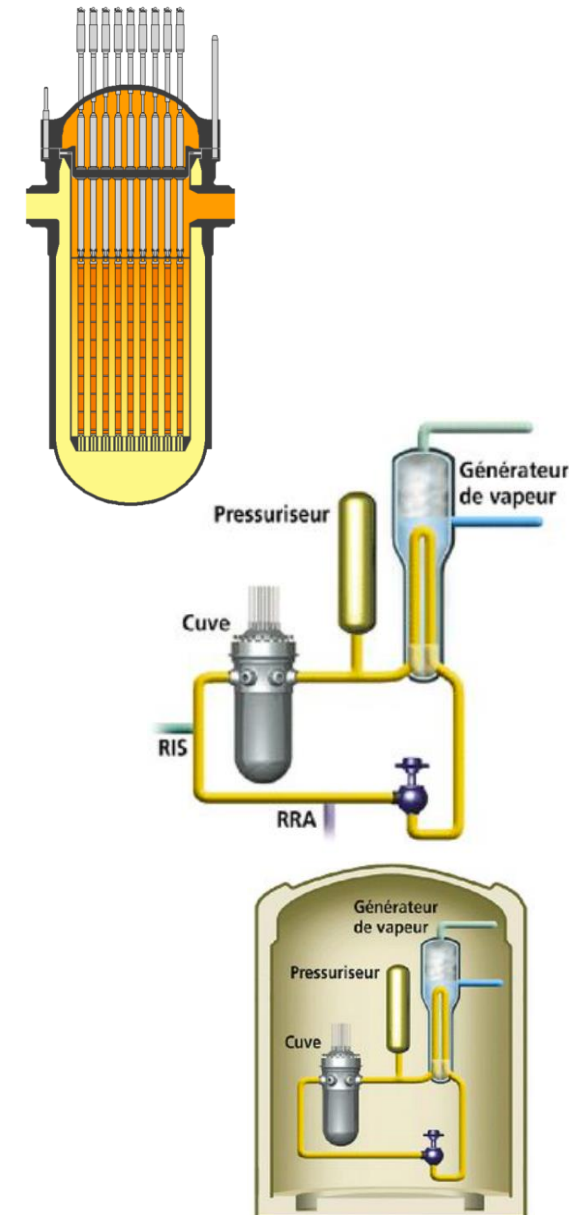
- ❑ 3 circuits indépendants
- ❑ Beaucoup d'autres systèmes :
 - Contrôle-commande et instrumentation
 - Circuits fluides (purification, borication,...)
 - Circuits électriques
 - Bâtiments (BR, BK, BAN...)
 - Circuits auxiliaires
 - Systèmes de sauvegarde
- ❑ Sûreté : 3 fonctions de sûreté
 - Stabilité de la réactivité (criticité)
 - Confinement
 - Refroidissement
- ❑ Basée sur la défense en profondeur



Les trois fonctions essentielles de la sûreté nucléaire pour un réacteur nucléaire

□ La sûreté nucléaire repose sur le maintien de trois fonctions :

1. **Contrôle** de la réaction en chaîne, et donc de la puissance produite :
 - Barres de contrôle
 - Concentration en bore (absorbeur de neutrons)
2. **Refroidissement** du combustible, évacuer la puissance résiduelle:
 - fonctionnement normal : évacuation par les GV
 - À l'arrêt du réacteur : circuit de réfrigération RRA
 - En situation incidentelle/accidentelle : circuit d'injection de sécurité RIS
3. **Confinement** des produits radioactifs.
 - trois barrières: gaine de combustible, circuit primaire, enceinte de confinement.

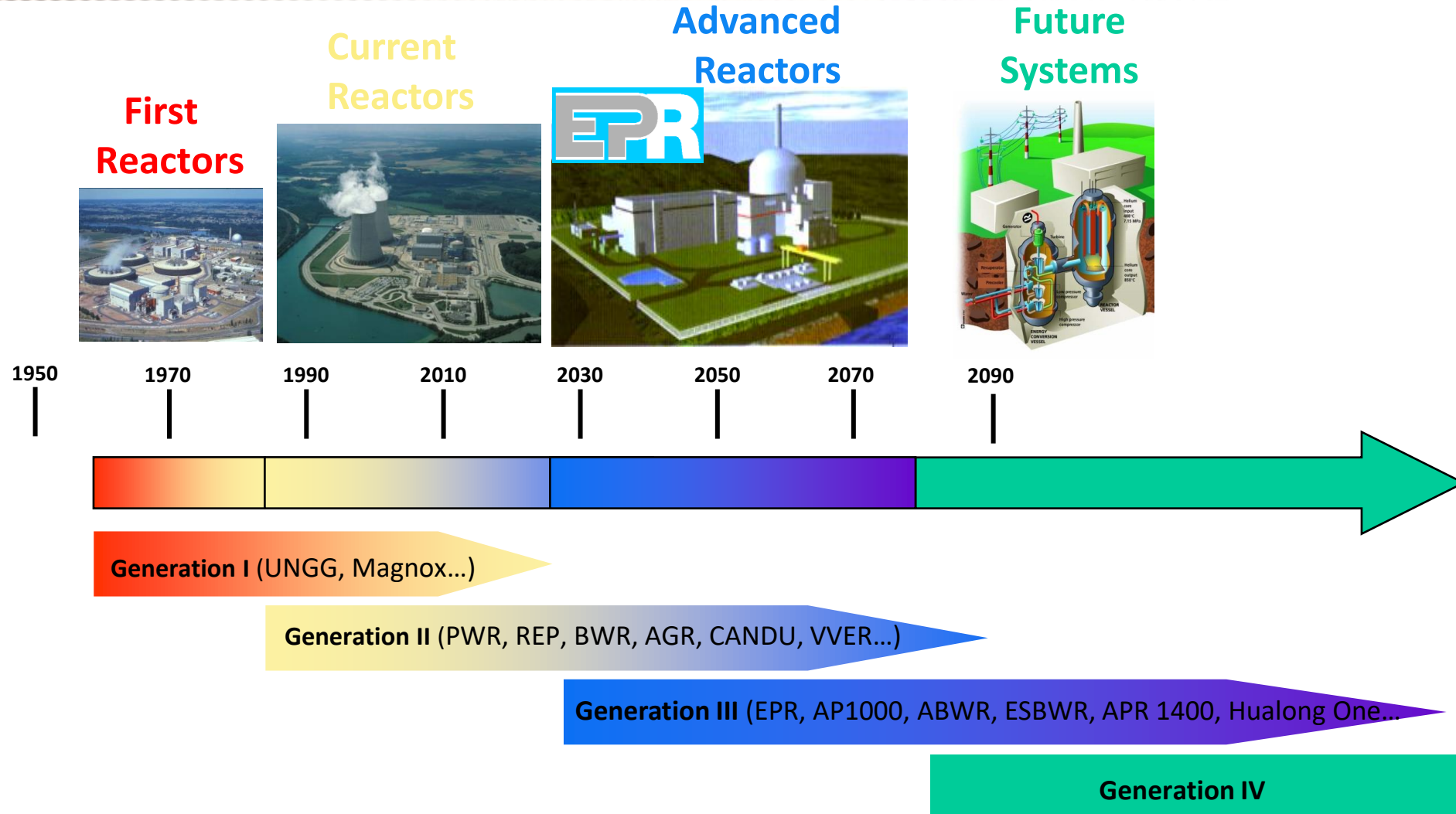


Détails sur le site [FIEEC](http://www.fieec.fr)

Le futur

Le futur proche
Le futur plus lointain

Les différentes générations de réacteurs



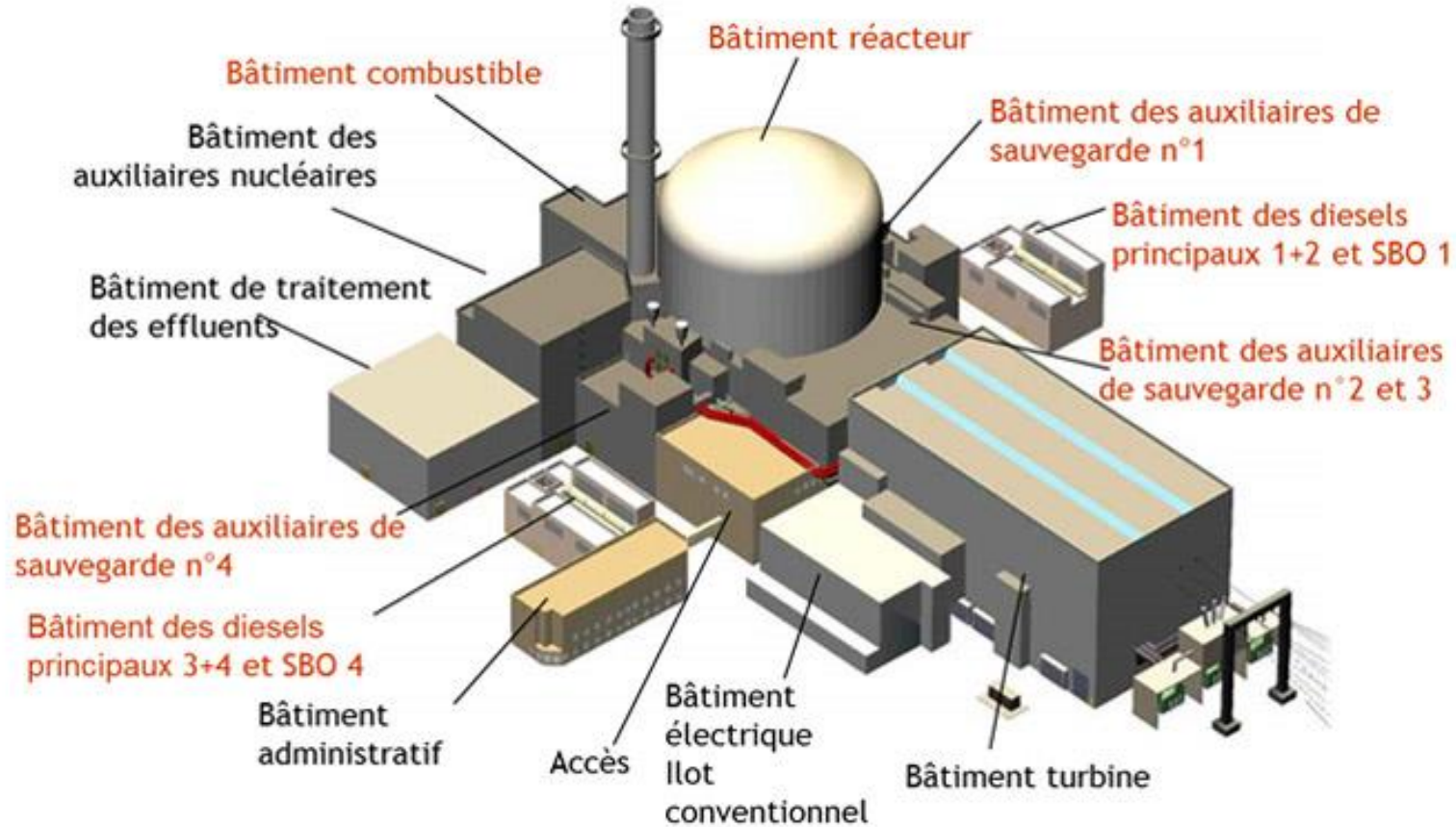
La génération 3: EPR

- ❑ Projet franco-allemand débuté en 1989.
- ❑ Construit sur le site de Flamanville.
- ❑ Concept évolutionnaire p/p aux REP français et Konvoi allemand.
- ❑ Puissance = 1650 MWe
- ❑ Rendement énergétique = 36 %
- ❑ Une utilisation possible par conception de différents types de combustible (UOX ou MOX à 30%)
- ❑ Longueur du cycle en cœur: 12 à 24 mois
- ❑ Une durée de vie technique de 60 ans
- ❑ Des charges d'exploitation réduites (fonctionnement à 91% de disponibilité)
- ❑ Suivi de charge intégré dès la conception: variation de puissance jusqu'à 5%/mn



(Source EDF)

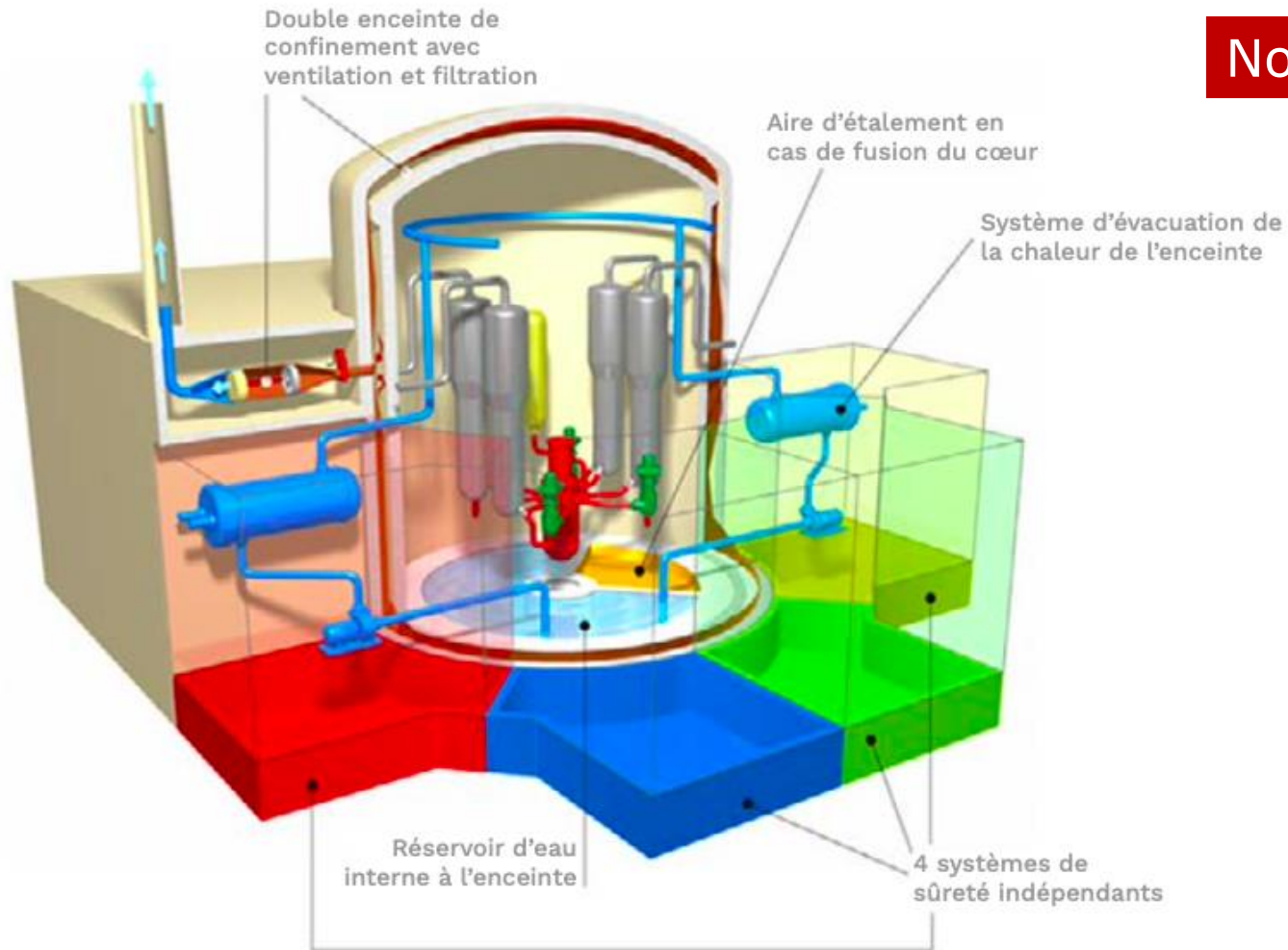
Objectifs de sûreté EPR



(Source IRSN)

- ❑ Objectifs de sûreté parmi les plus élevés au monde.
- ❑ Réduction de la fréquence de fusion de cœur ($< 10^{-5}$).
- ❑ Réduction des rejets radioactifs.
- ❑ Protection renforcée contre les agressions internes et externes.
- ❑ Réduction des doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs.
- ❑ Approche évolutionnaire par rapport au parc installé pour bénéficier des REX.

Génération 3: EPR



(Source EDF)

Nombreuses avancées en matière de sûreté

- ❑ Systèmes de sûreté : quatre voies indépendantes et géographiquement séparées.
- ❑ 4 groupes électrogènes principaux+ 2 groupes électrogènes de technologie différente.
- ❑ Réserve d'eau à l'intérieur du BR.
- ❑ Enceinte de confinement : BR, BK, 2 des 4 bâtiments abritant les systèmes de sauvegarde.
- ❑ Source froide : 4 voies identiques et séparées+ 2 voies diversifiées (technologie différente).
- ❑ Récupérateur de corium.
- ❑ Cuve sans pénétration fond de cuve.

EPR : Perte d'alimentation électrique

☐ **Systemes d'urgence redondants** : en cas de perte totale de l'alimentation électrique extérieure :

- **4 générateurs diesel d'urgence** installés dans des bâtiments protégés et distincts du bâtiment réacteur. (autonomie de 72 heures).
- **2 générateurs diesel d'ultime secours (DUS)**. (autonomie de 24 heures).
- **6 batteries pour l'alimentation du contrôle-commande et des équipements essentiels.** (4 batteries avec une autonomie de 2 heures chacune et 2 batteries « accidents graves » d'une autonomie de 24 heures chacune)



(Source EDF)



EPR : Perte du refroidissement

❑ Refroidissement du cœur :

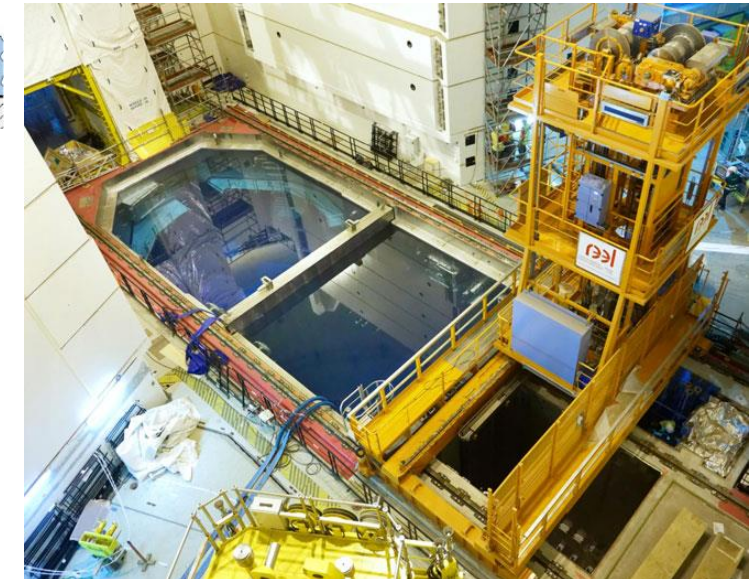
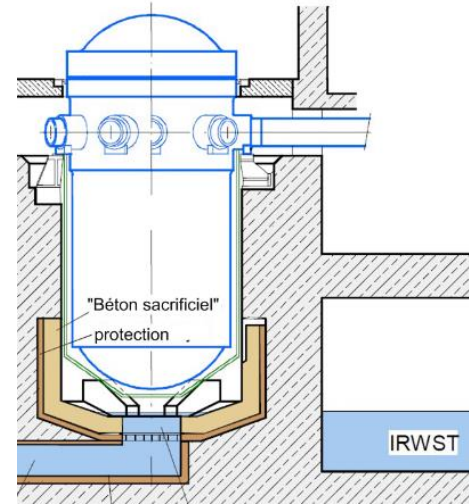
- 4 réservoirs d'accumulation pressurisés pour le système RIS (injection de sécurité)
- 1 réservoir de stockage d'eau (en bas du BR) qui alimente les 4 voies des systèmes d'injection à moyenne et basse pression

❑ Refroidissement des GV :

- 4 voies pour le système de secours d'alimentation en eau des GV (chacune assure 50% de la fonction)
- 1 réservoir d'eau dans les 4 bâtiments de sauvegarde (alimenté par la citerne destinée à prévenir les incendies).

❑ Refroidissement piscine :

- 2 systèmes de refroidissement redondants + 1 dispositif diversifié.

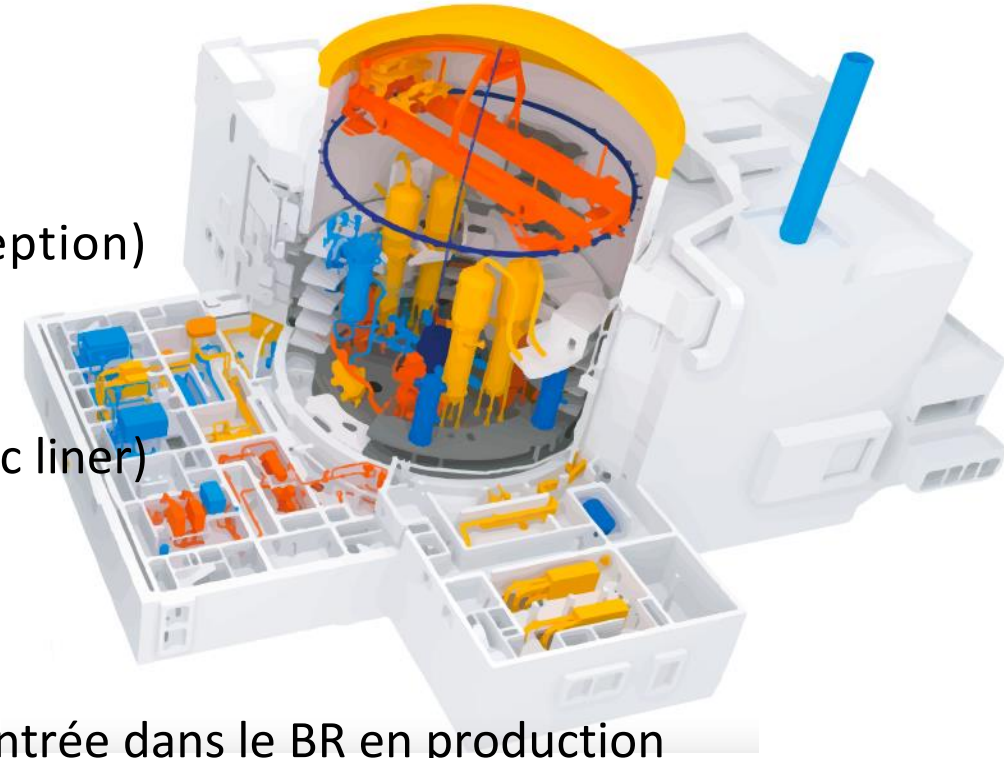


L'EPR2

- ❑ Version optimisée de l'EPR.
- ❑ L'EPR2 conserve les atouts de l'EPR :
 - Puissance = 1650 MWe
 - Utilisation en UO₂ ou MOX (30%)
 - hautes normes de sûreté (post Fukushima intégré à la conception)
 - Suivi de charge exigé plus important pour compenser les ENR
- ❑ Prise en compte du REX des EPR dans le monde et du parc :
 - design simplifié : meilleure constructibilité (simple enceinte avec liner)
 - Outils numériques utilisés (maquette numérique 3D et 4D)
 - Travail en entreprise étendue
 - Standardisation et réduction des catalogues des équipements.
 - Suppression du « two-room concept » de l'EPR : abandon de l'entrée dans le BR en production
 - Trois trains de sauvegarde au lieu de 4 sur l'EPR : abandon de la maintenance en marche

Détails sur le site FIEEC

(Source Dossier EPR2, EDF CNDP)



4. Le Futur plus lointain

A quoi doit répondre un réacteur du futur?

Flexible et pilotable
(suivi de charges)

S'intégrer facilement avec des ENR
dans un MIX électrique

Electrifier les usages
(Électricité et/ou chaleur)

Lutte contre le RC
efficacement

Accepter par les
populations

Toujours sûrs
(attention au FOH)
Non proliférants

Réduire les déchets

Construction en grand nombre

Economie de combustible
Besoin de peu de matières
premières

Coût abordable



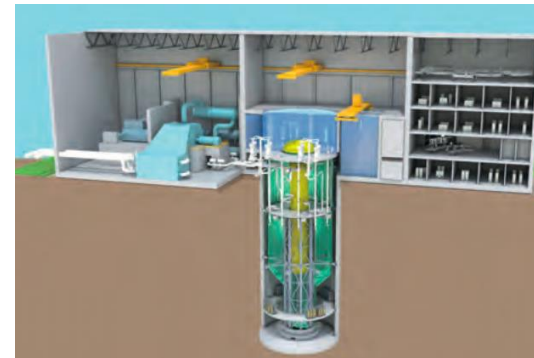
Forum GenIV

- ❑ Créé en 2001.
- ❑ 13 pays (Argentine, Australie, Brésil, Canada, Chine, France, Japon, Corée, Russie, Afrique du Sud, Suisse, Royaume-Uni et États-Unis), ainsi que l'Euratom - représentant les 27 membres de l'Union européenne.
- ❑ Accord de coopération pour développer la recherche nécessaire pour tester la faisabilité et les performances des systèmes nucléaires de quatrième génération.
- ❑ Il s'agit de développer pas seulement le réacteur mais aussi la fabrication du combustible, le retraitement et les installations de stockage.
- ❑ Déploiement industriel d'ici 2030.
- ❑ Le GIF a sélectionné six technologies de réacteurs :
 - le réacteur rapide refroidi au gaz (GFR),
 - le réacteur rapide refroidi au plomb (LFR),
 - le réacteur à sels fondus (MSR),
 - le réacteur rapide refroidi au sodium (SFR) ,
 - le réacteur refroidi à l'eau supercritique (SCWR),
 - le réacteur à très haute température (VHTR).



Concepts du futur (PRM-SMR/AMR)

- ❑ Les concepts de réacteurs du futur sont tous à des stades de réflexion.
- ❑ Faible puissance (50-300 MWe) dont le cout < 1 milliard d'euros.
- ❑ Environ 70 concepts dont la moitié sont des REP.
- ❑ Trois piliers : modularité, effet de série et simplification.
- ❑ La plupart des concepts ont été pensés dans les années 60-70.
- ❑ Faire plus petit (SMR/PRM) ou faire autrement (AMR).
- ❑ Grâce aux développements technologiques, ils pourraient revenir sur le devant de la scène.
- ❑ On peut les classer par solutions aux usages industriels :
 - Électricité : EPR2, SMR ...
 - Chaleur (industrielle, chauffage) : HTR, MSR
 - Production hydrogène : HTR
 - Bruleur de déchets (meilleure utilisation des matières premières) : MSR, RNR



(Source AIEA)

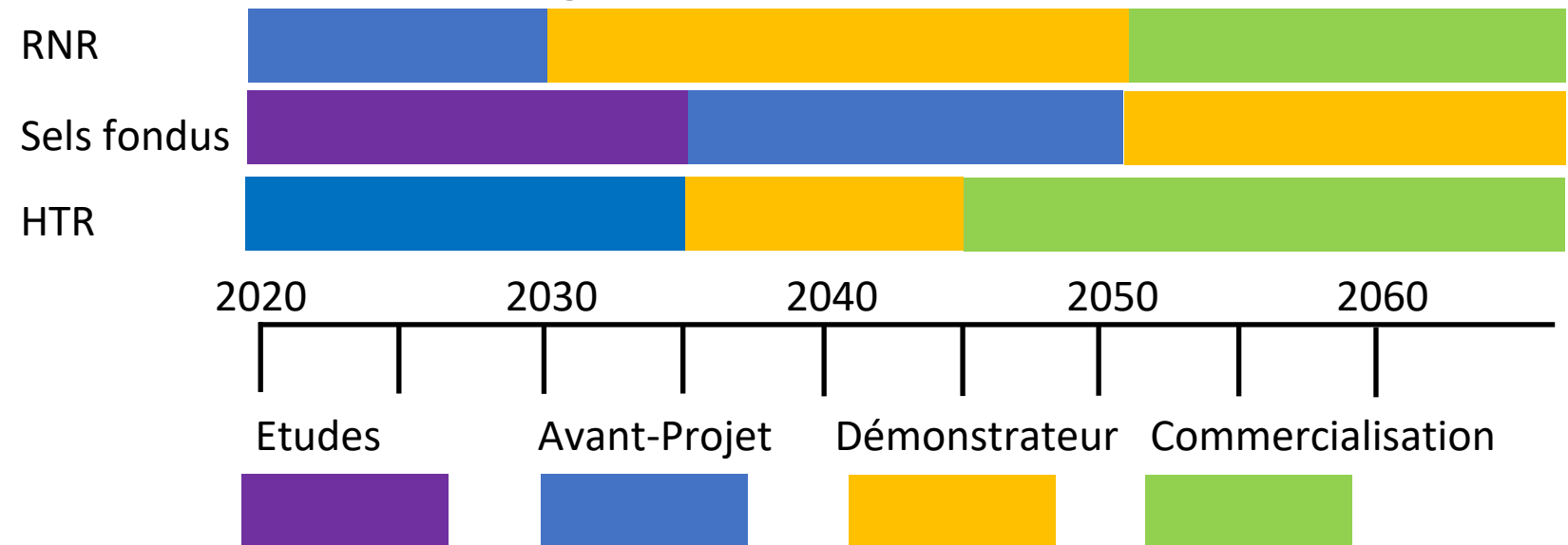
Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

❑ Pour les générations Gen3 : environ 10-15 ans

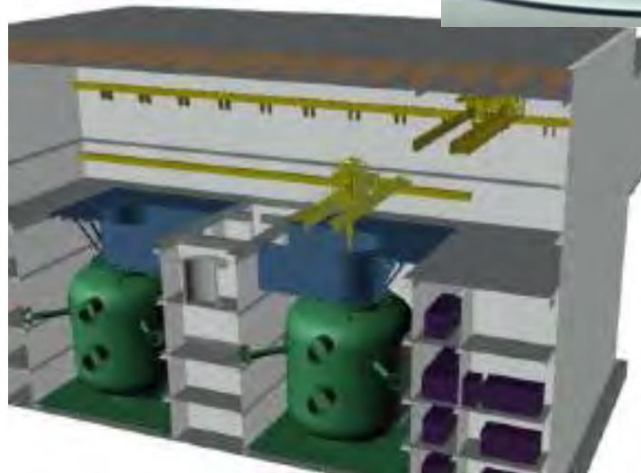
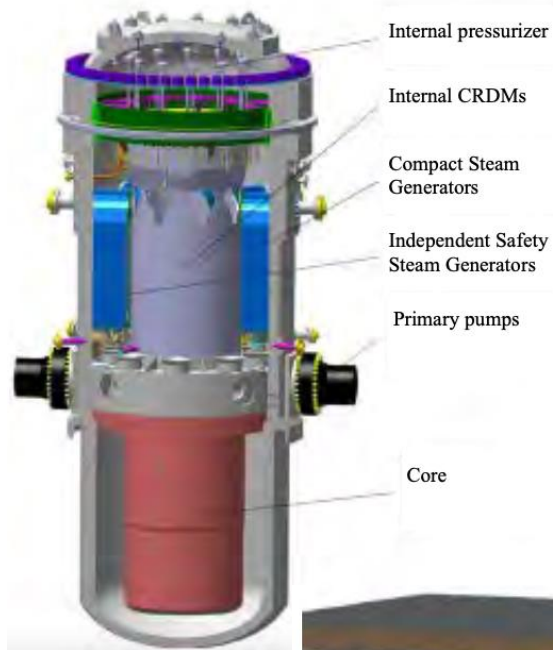
- Procédures administratives (Licensing, Permis de construire, débat public...)
- Construction + Essais + MIS

❑ Pour les générations Gen4 : bien plus long

- Verrous technologiques sur le réacteur
- Concevoir le cycle du combustible associé (fabrication et gestion des déchets)
- Licensing nouveau à instruire



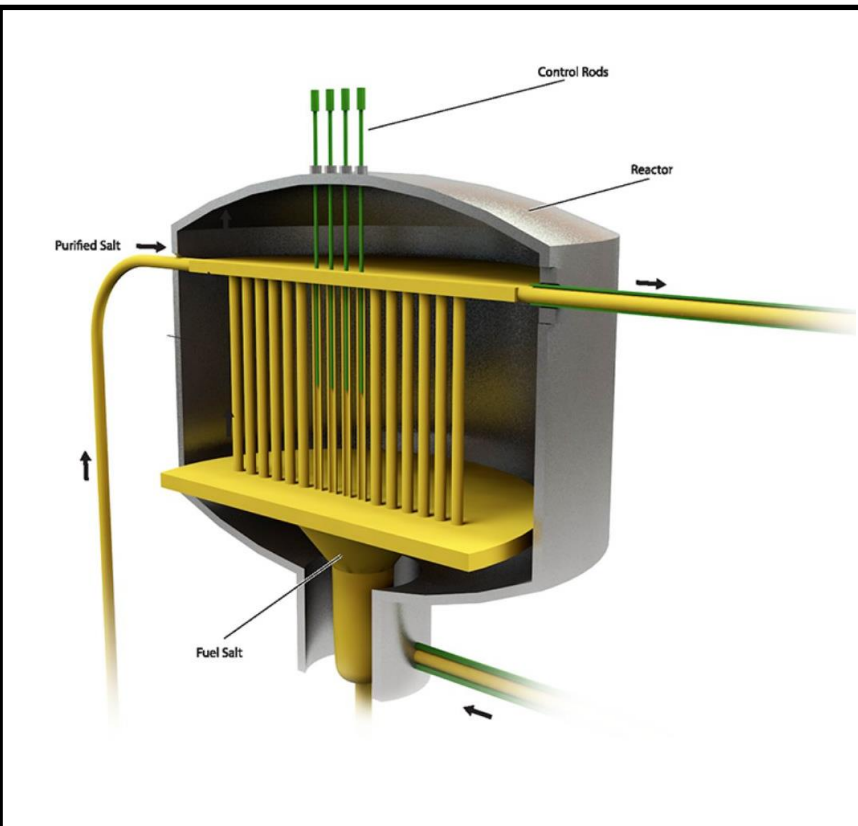
Projet Nuward



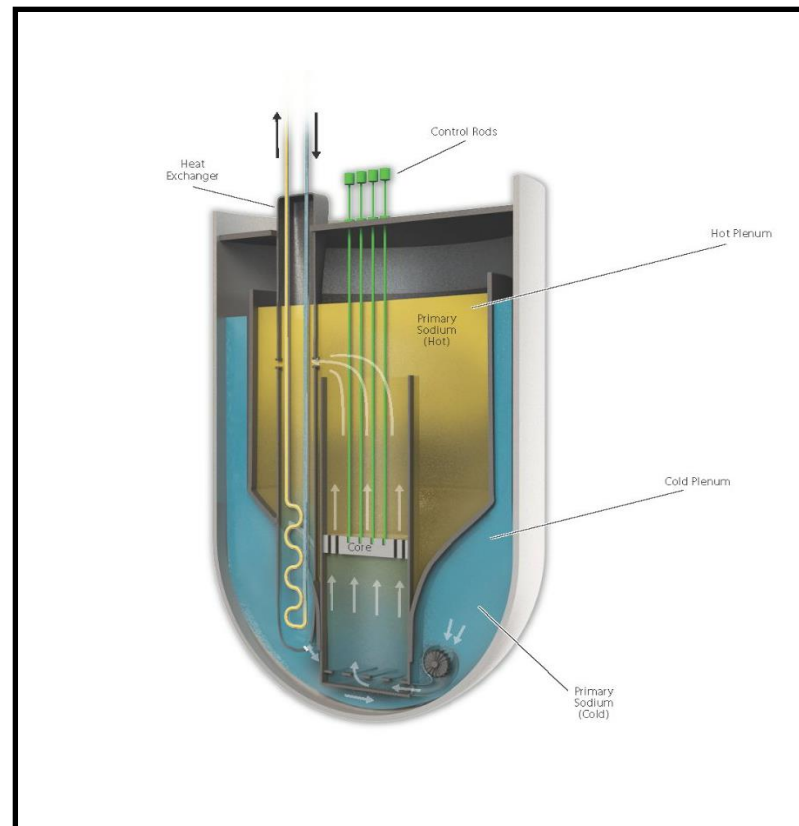
(Source AIEA)

- ❑ Ilot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170 MWe + une piscine d'entreposage
- ❑ Cuve : H<16 mètres, D ~ 4 m
- ❑ Enceinte métallique dans un bassin d'eau (25mx25mx25m)
- ❑ Générateurs de vapeur à plaques. (1^{ère} fois)
- ❑ Mécanismes de commande de grappes immergés.
- ❑ Système de refroidissement passif.
- ❑ GV et pressuriseur dans la cuve.
- ❑ 60% du bâtiment enterré.
- ❑ 1er béton du prototype en France en 2030.
- ❑ Dossier d'Options de Sûreté (DOS) à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) début 2023.
- ❑ Cible principale: remplacement des centrales à charbon (plus de 3000 centrales à remplacer dans les 30 ans.)

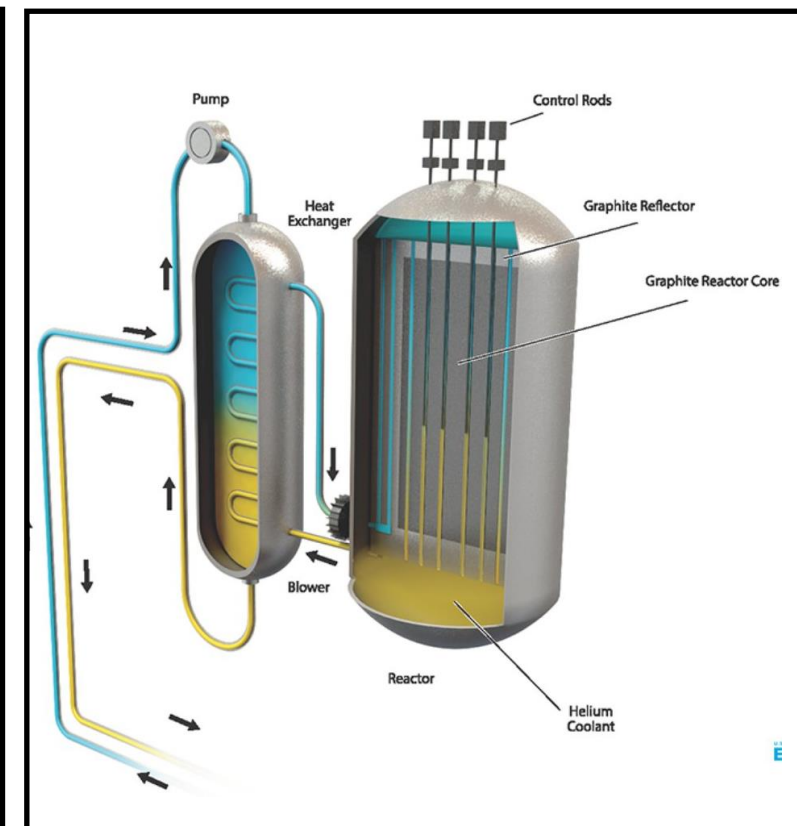
Les concepts disruptifs



Réacteurs à sels fondus

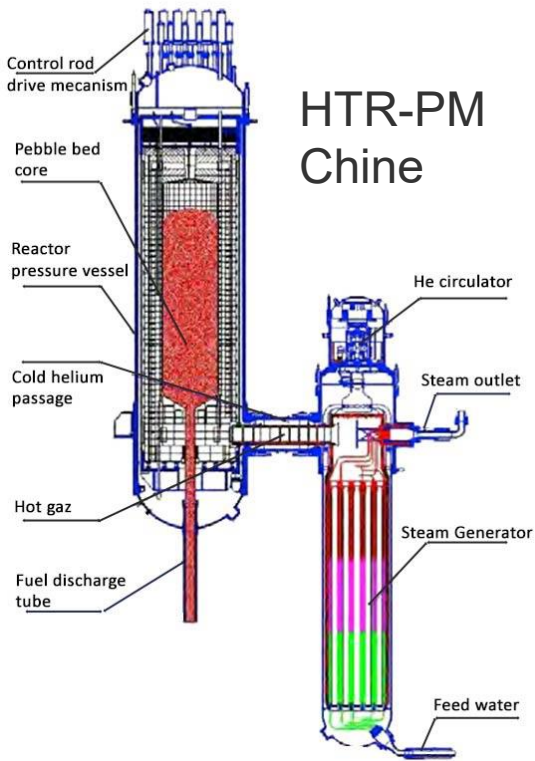


Réacteurs à neutrons rapides

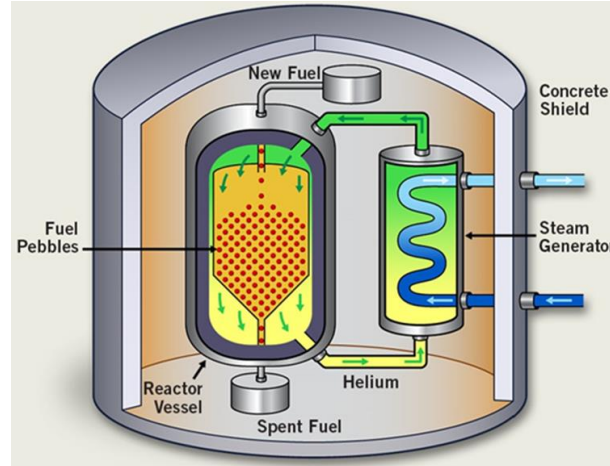


Réacteurs à haute température

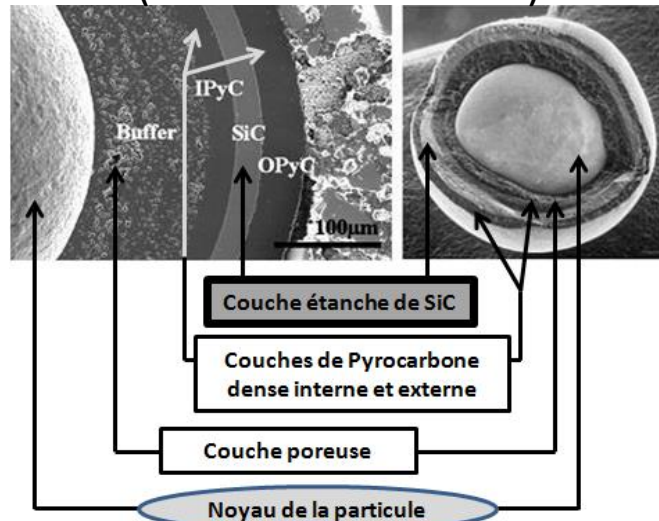
Réacteur à haute température



(Source: BWXT)

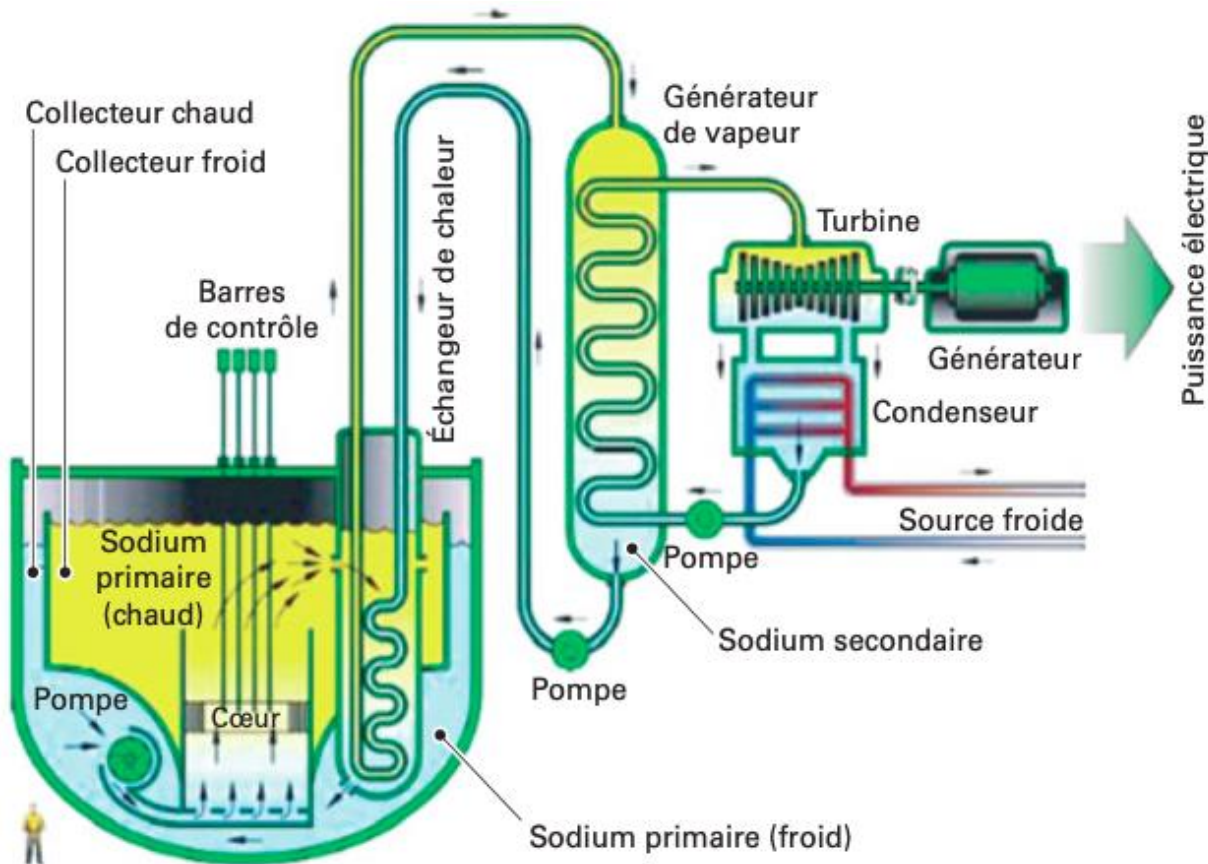


(Source D.Grenèche)



- ❑ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ❑ 1^{er} réacteur DRAGON en UK (1964-1977).
- ❑ Caloporteur : gaz inerte (hélium) (pas de problème de chimie et de radioactivité) à haute température.
- ❑ Modérateur : graphite (supporte $T > 2500^{\circ}\text{C}$)
- ❑ Rendement élevé ($\sim 50\%$) : augmentation de la T° .
- ❑ Combustible céramique sphérique de $D < 1\text{mm}$ (TRISO) (sûreté).
- ❑ Haute température produite autour de 600°C
- ❑ 1/3 des concepts des start-up sont des HTR.
- ❑ La Chine a mis en service un HTR (2 réacteurs, $P=200$ Mwe) le 20/12/21 à Shidao Bay.
- ❑ Start-up en France Jimmy : micro-réacteur de 10 MWe.

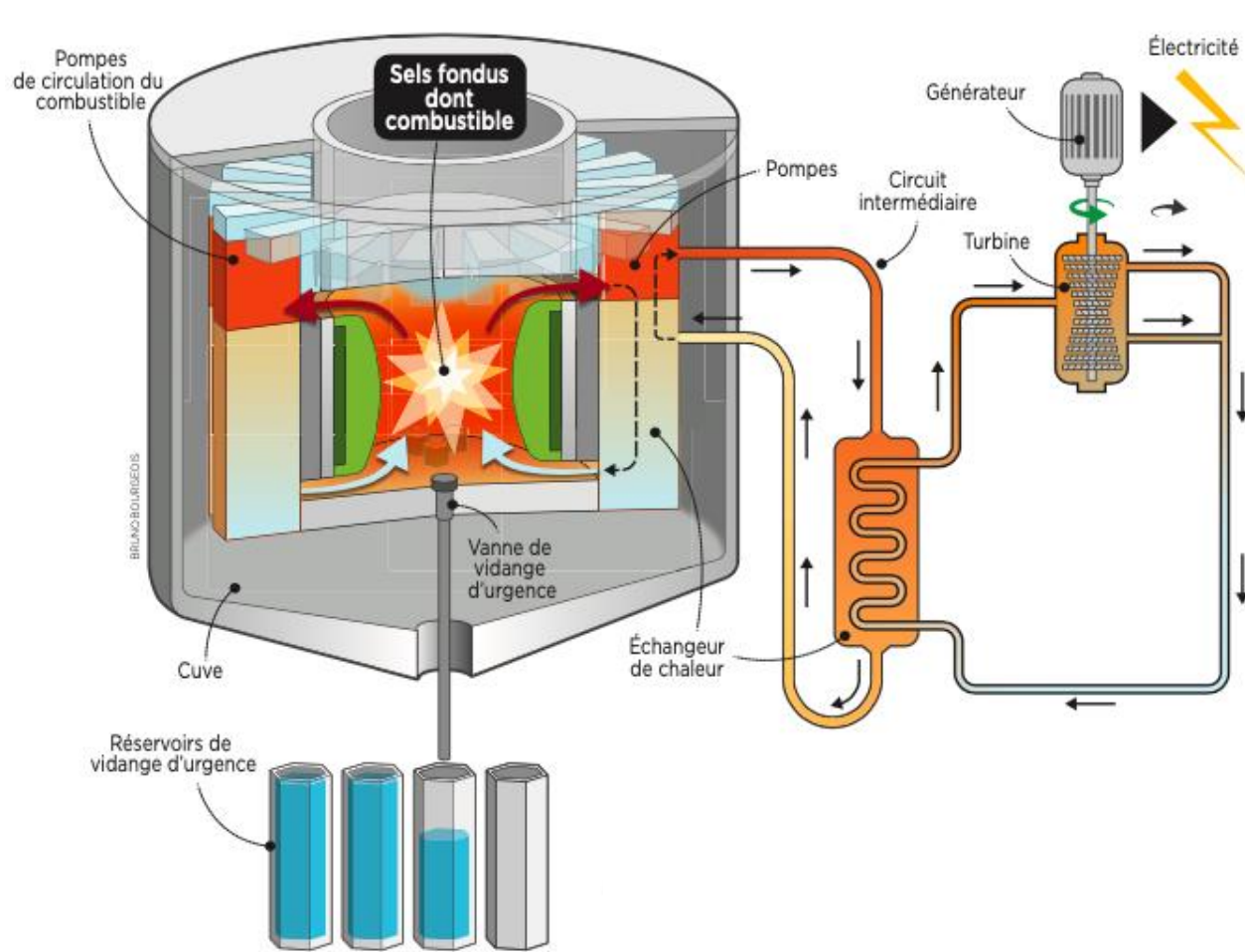
Réacteur à neutrons rapides



(Source Techniques de l'ingénieur, dossier BN3230)

- ❑ Combustible : mélange UO_2 - PuO_2 (15-20% de Pu)
- ❑ Pas de modérateur (neutrons rapides)
- ❑ Caloporteur: sodium liquide (autres options comme Pb)
- ❑ Capables de fabriquer autant de matière fissile qu'ils n'en consomment : utilisation U-238.
- ❑ Entre 50-100 plus d'énergie que l'on peut tirer de l'uranium par rapport aux réacteurs actuels.
- ❑ Deux RNR construits en France : Superphenix et Phenix.
- ❑ En 2020, trois réacteurs à neutrons rapides en exploitation : les réacteurs russes [Beloyarsk-3 \(BN-600\)](#) et [Beloyarsk-4 \(BN-800\)](#) et le [CEFR](#) chinois.
- ❑ Inconvénients: cout élevé+ sureté liée au sodium
- ❑ Start-up en France : Newcleo (avec du Plomb liquide) (30 et 200 MWe).
- ❑ Start-up Hexana, issue du CEA: réacteur de 2x150 MWe.

Réacteurs à Sels fondus



(Source sciences et avenir la Recherche mars 2022)

- ❑ Le combustible est liquide et non plus solide dissous dans un sel.
- ❑ Sel fluorure ou chlorure.
- ❑ Le sel est le caloporteur et joue le rôle de barrière de confinement.
- ❑ Possibilité neutrons thermiques ou rapides.
- ❑ Avantages théoriques:
 - Retraitement en ligne possible
 - Utilisation de U/Pu; Th/U
 - Incinération Pu et transmutation Am
 - Sûreté passive (évacuation Pres)
- ❑ Il faut un prototype construit.
- ❑ Deux start-up en France avec sel chlorure et n rapides : Naarea (40 MWe) et Stellaria (CEA).

Avantages et Verrous de la filière sels fondus

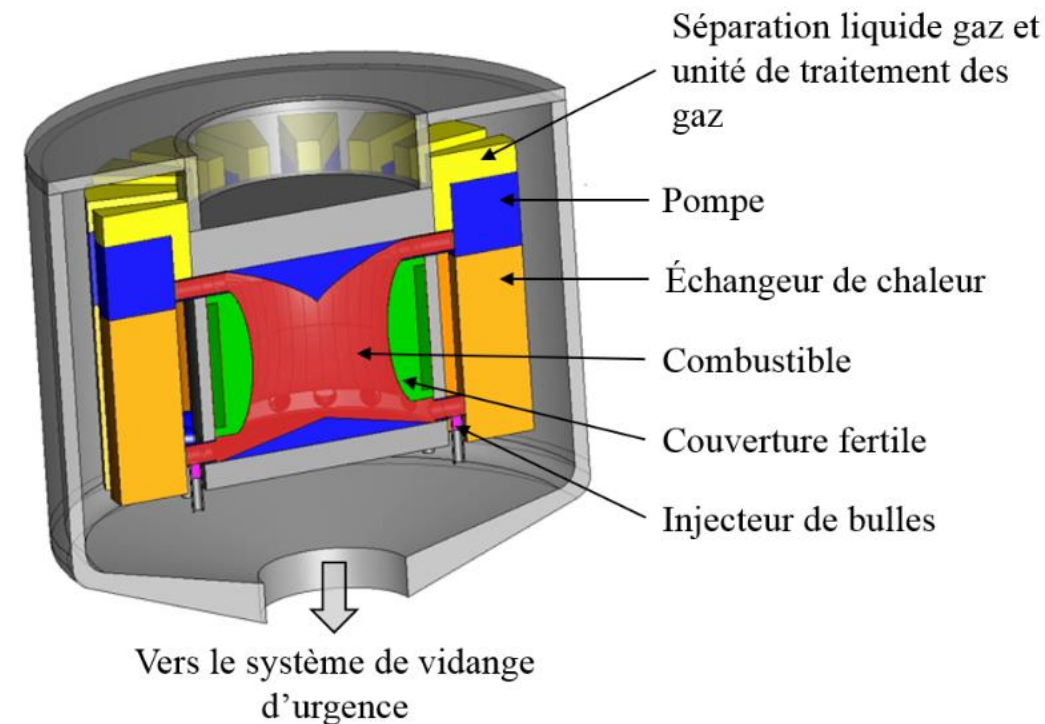
□ Avantages : Répond à une préoccupation de l'opinion sur la gestion des déchets et de matières radioactives:

- Gestion des matières: utilisation du Pu, transmutation des AM → économie d'uranium naturel
- Sûreté intrinsèque: Pas de haute pression; contre-réaction très négative; solidification du sel en cas de fuite.
- Flexibilité si production électricité

□ Verrous technologiques :

- Matériaux : comportement à haute température et sous irradiation, corrosion.
- Chimie du sel (corrosifs, risque chimique, retraitement en ligne,...)
- Sûreté de fonctionnement (contrôle-commande, instrumentation du cœur, études des composants...)
- Etude de sûreté et validation sûreté passive et études de dimensionnement d'un réacteur.

circuit combustible du MSFR



(Source Thèse de Doctorat, Delphine Gerardin, 2018)

La transmutation

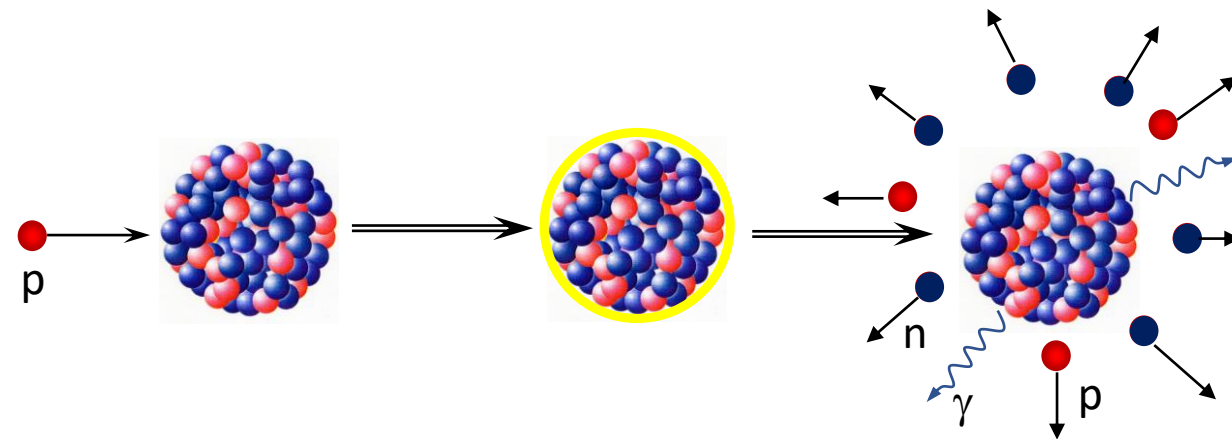
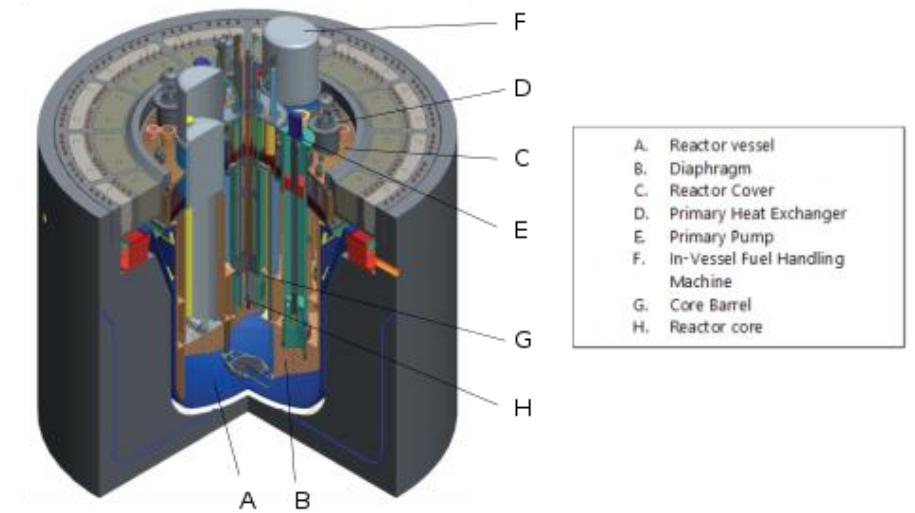
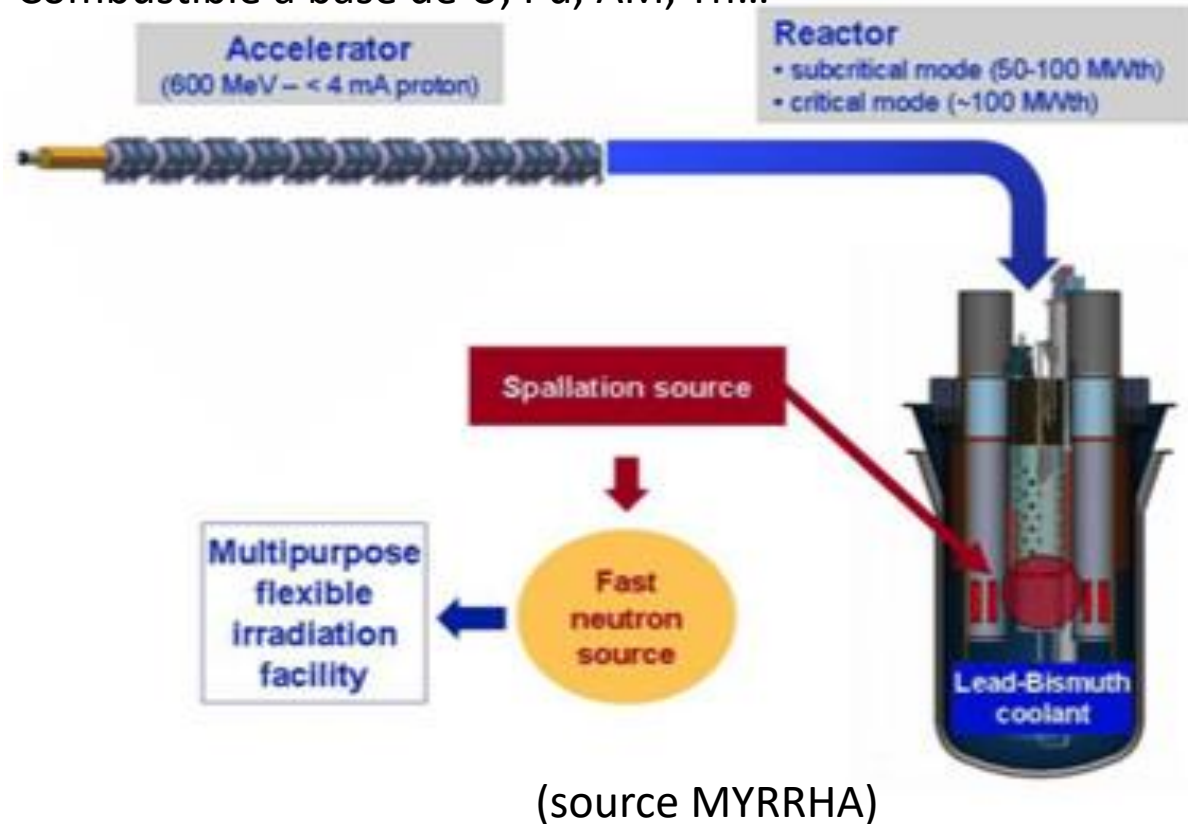
- Recycler des noyaux en réacteur pour les faire disparaître par réaction nucléaire.
- Les transuraniens (au-delà de l'uranium)** : Formés par capture neutronique et décroissance radioactive:
 - **élimination par réaction de fission**
- Les produits de fission à vie longue (PF-VL)** : Formés par fission, (décroissance (β) et/ou capture neutronique)
 - **élimination par capture vers un isotope stable**
- Rappel: loi de 2006 : la transmutation ne se positionne qu'en option complémentaire d'un stockage

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|----|----|
| 1 | H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | He | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Li | 4 | Be | | | | | | | | | | | 5 | B | 6 | C | 7 | N | 8 | O | 9 | F | 10 | Ne | | | | | | | | | | |
| 11 | Na | 12 | Mg | | | | | | | | | | | 13 | Al | 14 | Si | 15 | P | 16 | S | 17 | Cl | 18 | Ar | | | | | | | | | | |
| 19 | K | 20 | Ca | 21 | Sc | 22 | Ti | 23 | V | 24 | Cr | 25 | Mn | 26 | Fe | 27 | Co | 28 | Ni | 29 | Cu | 30 | Zn | 31 | Ga | 32 | Ge | 33 | As | 34 | Se | 35 | Br | 36 | Kr |
| 37 | Rb | 38 | Sr | 39 | Y | 40 | Zr | 41 | Nb | 42 | Mo | 43 | Tc | 44 | Ru | 45 | Rh | 46 | Pd | 47 | Ag | 48 | Cd | 49 | In | 50 | Sn | 51 | Sb | 52 | Te | 53 | I | 54 | Xe |
| 55 | Cs | 56 | Ba | Ln | 72 | Hf | 73 | Ta | 74 | W | 75 | Re | 76 | Os | 77 | Ir | 78 | Pt | 79 | Au | 80 | Hg | 81 | Tl | 82 | Pb | 83 | Bi | 84 | Po | 85 | At | 86 | Rn | |
| 87 | Fr | 88 | Ra | An | 104 | Rf | 105 | Db | 106 | Sg | 107 | Bh | 108 | Hs | 109 | Mt | 110 | Uun | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| lanthanides | | | | 57 | La | 58 | Ce | 59 | Pr | 60 | Nd | 61 | Pm | 62 | Sm | 63 | Eu | 64 | Gd | 65 | Tb | 66 | Dy | 67 | Ho | 68 | Er | 69 | Tm | 70 | Yb | 71 | Lu | | |
| actinides | | | | 89 | Ac | 90 | Th | 91 | Pa | 92 | U | 93 | Np | 94 | Pu | 95 | Am | 96 | Cm | 97 | Bk | 98 | Cf | 99 | Es | 100 | Fm | 101 | Md | 102 | No | 103 | Lr | | |

noyaux lourds
 produits d'activation
 produits de fission et d'activation
 produits de fission
 radionucléides à vie longue

Myrrha

- ❑ Réacteur sous-critique piloté par un accélérateur de particules
- ❑ La réaction de spallation produit les neutrons : $p + \text{Pb} \rightarrow X + n + \dots$
- ❑ Caloporteur : eutectique Plomb-Bismuth
- ❑ Combustible à base de U, Pu, AM, Th...



La transition numérique de la filière nucléaire

Voir site FIEEC
Et exposé suivant

La sûreté nucléaire – Les déchets

Voir site FIEEC

Merci de votre attention.