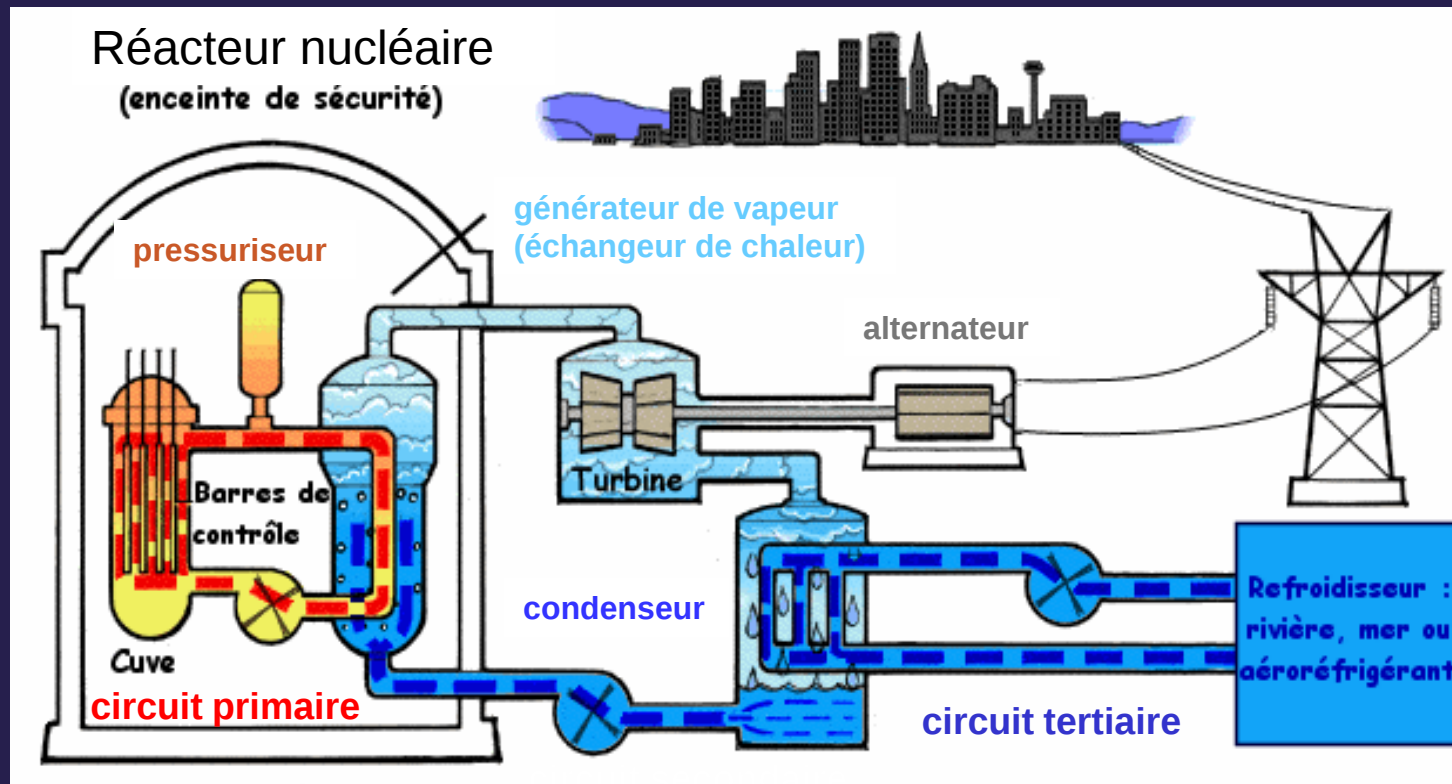


Profs au CAEN



L'électronucléaire



L'Electronucléaire

électro → électricité

nucléaire → réacteur nucléaire

Unités et Ordres de grandeurs

La France :

Bilans énergétiques

Les centrales nucléaires

Le Monde :

Réacteurs nucléaires

Production d'électricité et prévisions

Fonctionnement d'un réacteur :

La fission nucléaire

La réaction en chaîne

La criticité

Calendrier des générations de réacteurs

L'EPR :

Evolutions techniques, économique, environnementale (?)

Evolutions de sûreté

Les réacteurs de IVème génération :

Contexte

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR)

La régénération avec l'uranium – La transmutation

Les réacteur RNR-Na, RNR-L, RNR-G

La régénération avec le thorium

Le réacteur MSR

Les réacteurs VHTR – SCWR

Les réacteurs pilotés par accélérateurs = ADS

Les technologies du futur :

Les petits réacteurs modulaires : SMR, MMR, AMR

Leurs différences / réacteurs générations III et IV

défis – ambitions – types

SMR en exploitation ou en construction, ayant atteint la criticité

SMR en cours de conception en France

Conclusions

Unités & Ordres de grandeur

Unité légale d'énergie = Joule

Formes variées $\Rightarrow$ $\neq$ unités spécifiques



- **1 watt-heure** = énergie fournie ou consommée par un dispositif d'une puissance d'1 watt pendant 1 heure

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$\rightarrow$ **électricité, gaz ...**

$$1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh}$$

- **1 eV** = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ = énergie acquise par un électron accéléré sous 1 différence de potentiel de 1 Volt

$$1 \text{ MWh} = 2,247 \cdot 10^{22} \text{ MeV}$$

$\rightarrow$ **physique nucléaire**

1 t charbon

$\Leftrightarrow$ 4,7 à 8,2 MWh, selon sa qualité

1 t gaz naturel ($\sim 1475 \text{ m}^3$)

$\Leftrightarrow$ 14,5 MWh

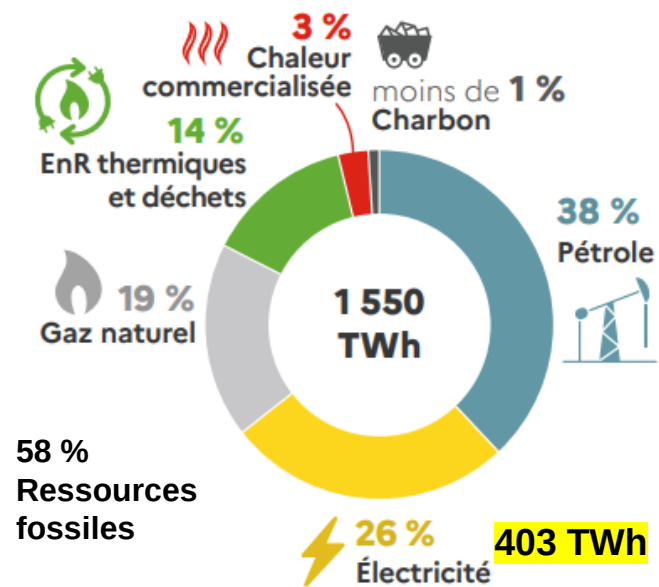
d'1 t uranium naturel, serait possible d'extraire $\Leftrightarrow \sim 160\,000 \text{ MWh}$



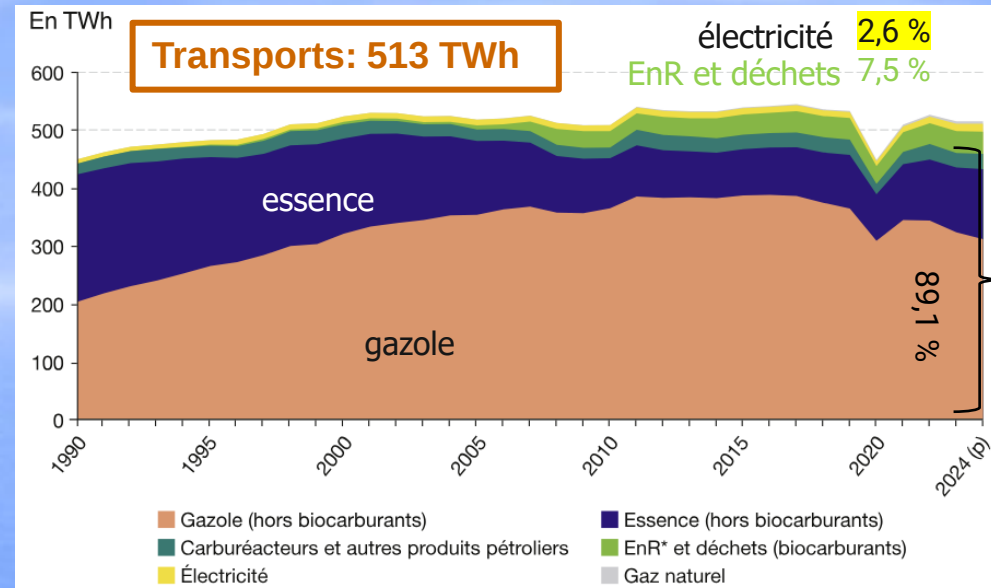
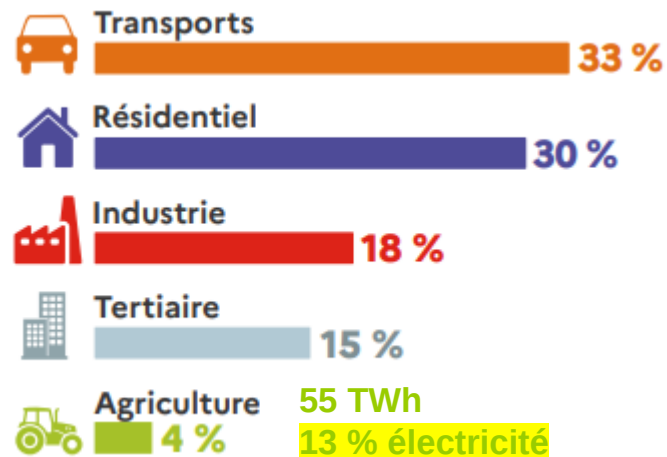
$\Rightarrow$ **Densité énergétique massique du combustible nucléaire très élevée**

Consommation d'énergie finale à usage énergétique en France (2024) :

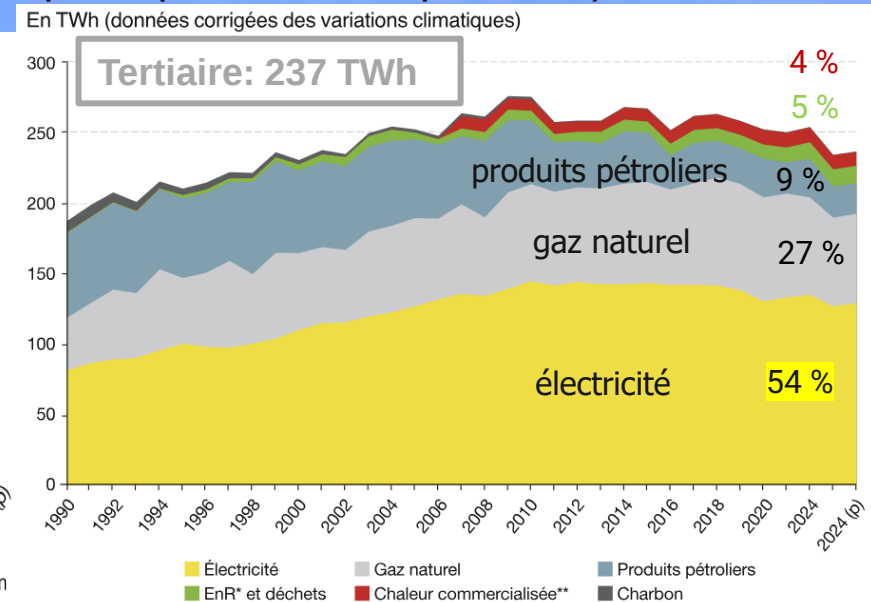
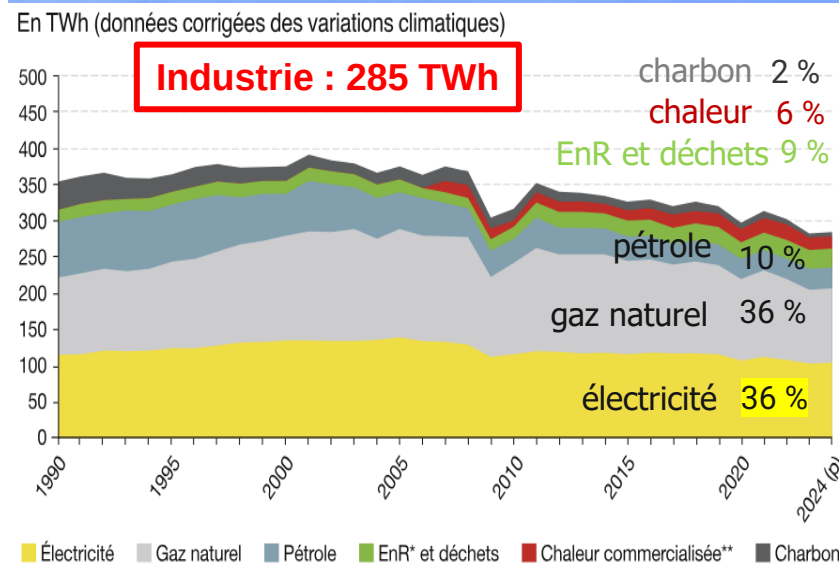
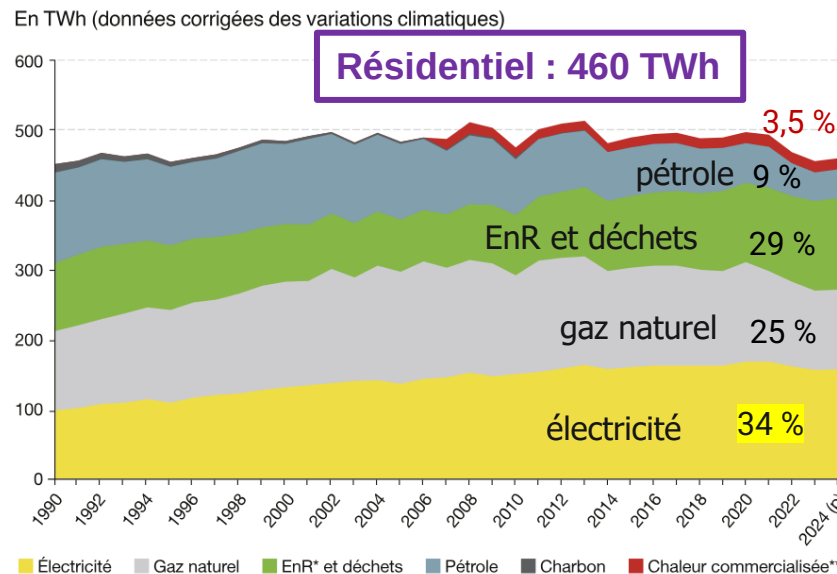
Par type d'énergie



Par secteurs



Usages non énergétiques concentrés dans pétrochimie (produits synthétiques : matières plastiques, cosmétiques, etc.)



Production totale d'électricité en France (2025) : répartition par filière

Nucléaire
373,0 TWh / 68,1 %



Solaire
32,9 TWh / 6,0 %



Éolien (terrestre et en mer)
49,6 TWh / 9,1 %



Hydraulique
62,4 TWh / 11,4 %



Gaz
16,4 TWh
3,0 %

Thermique renouvelable et déchets
10,9 TWh
2,0 %

28,5 %

Électricité
renouvelable

Autre
0,1 TWh
0 %

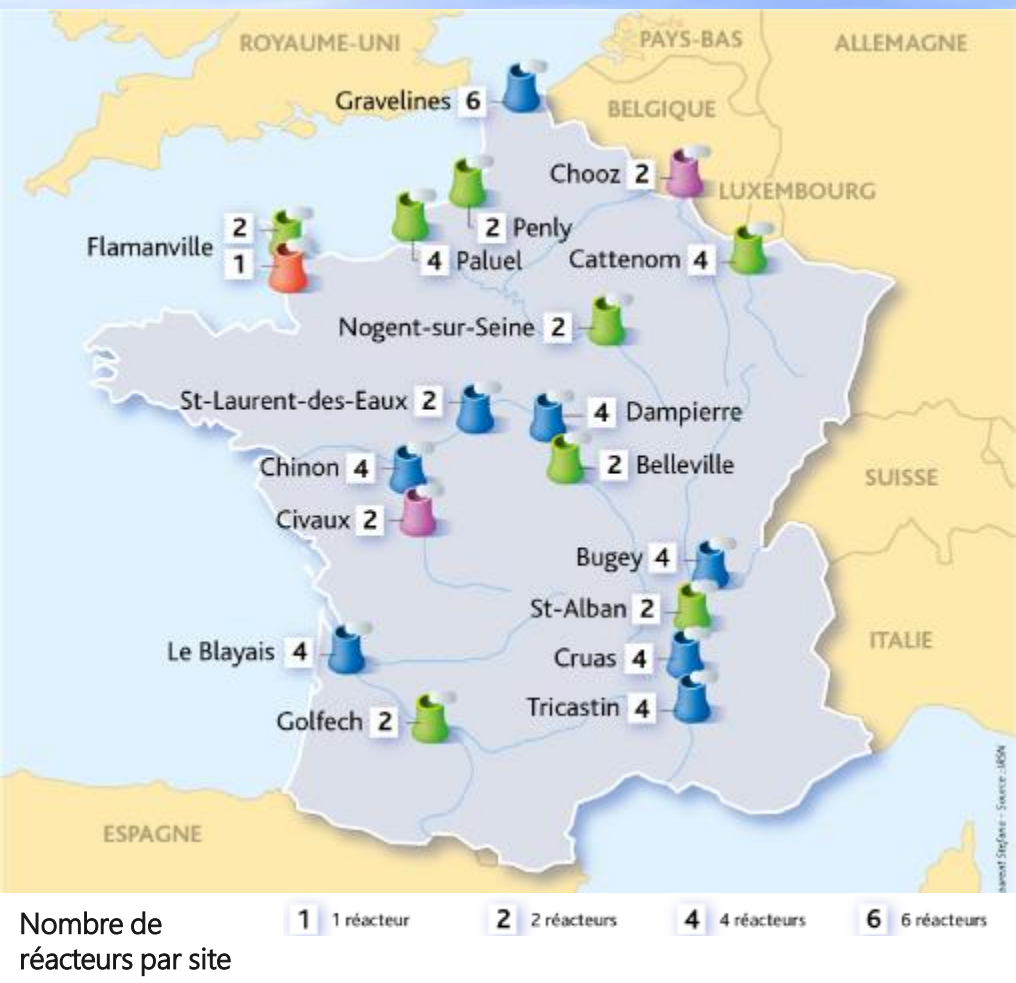
Charbon
0,7 TWh
0,1 %

Fioul
1,6 TWh
0,3 %

Production totale : 547,5 TWh

Légende : Filière
Volume de production en 2025 / Part dans le mix électrique en 2025

Les 18 centrales nucléaires en France (2024)



Capacité installée de ~ 62,4 GWe

Mise en service 1 EPR de Flamanville 2024 (= 1^{ère} depuis 2002 !!)

(European Pressurized Reactor

⇒ Evolutionary Power Reactor)

+ Fermeture 2 réacteurs Fessenheim en 2020,

→ France compte 57 réacteurs dont 56 REP (Réacteur à Eau Pressurisée) répartis entre 18 centrales

52 mis en service en 16 ans : 1978 ⇔ 1994

Puissance électrique nette	Nombre de réacteurs	Année de mise en service commercial
900 MW	32	1978-1988
1300 MW	20	1985-1994
1500 MW	4	2000-2002
1650 MW (EPR**)	1	2024

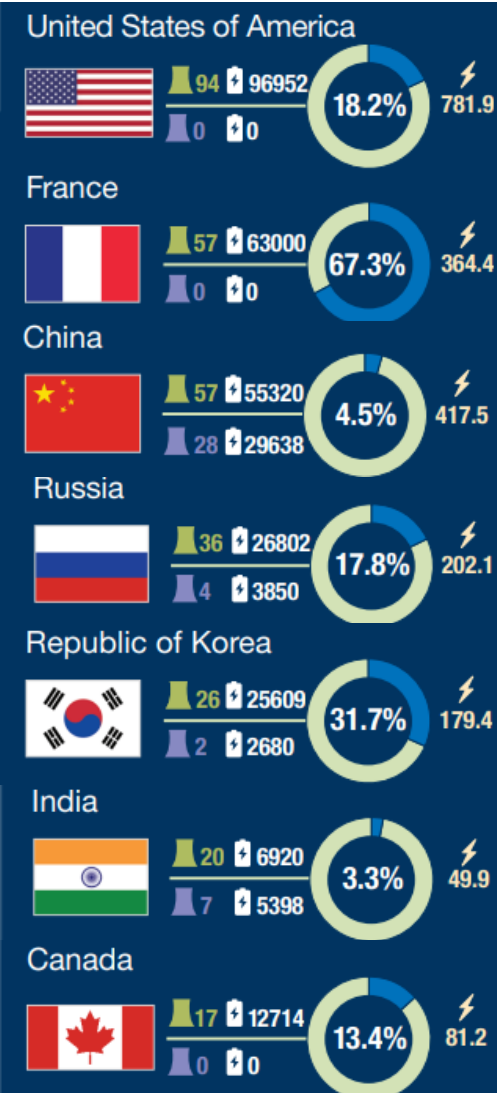
16 ans



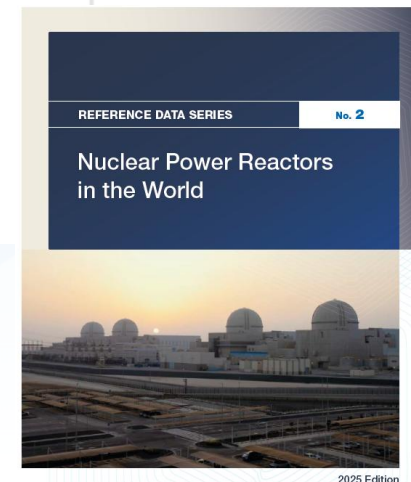
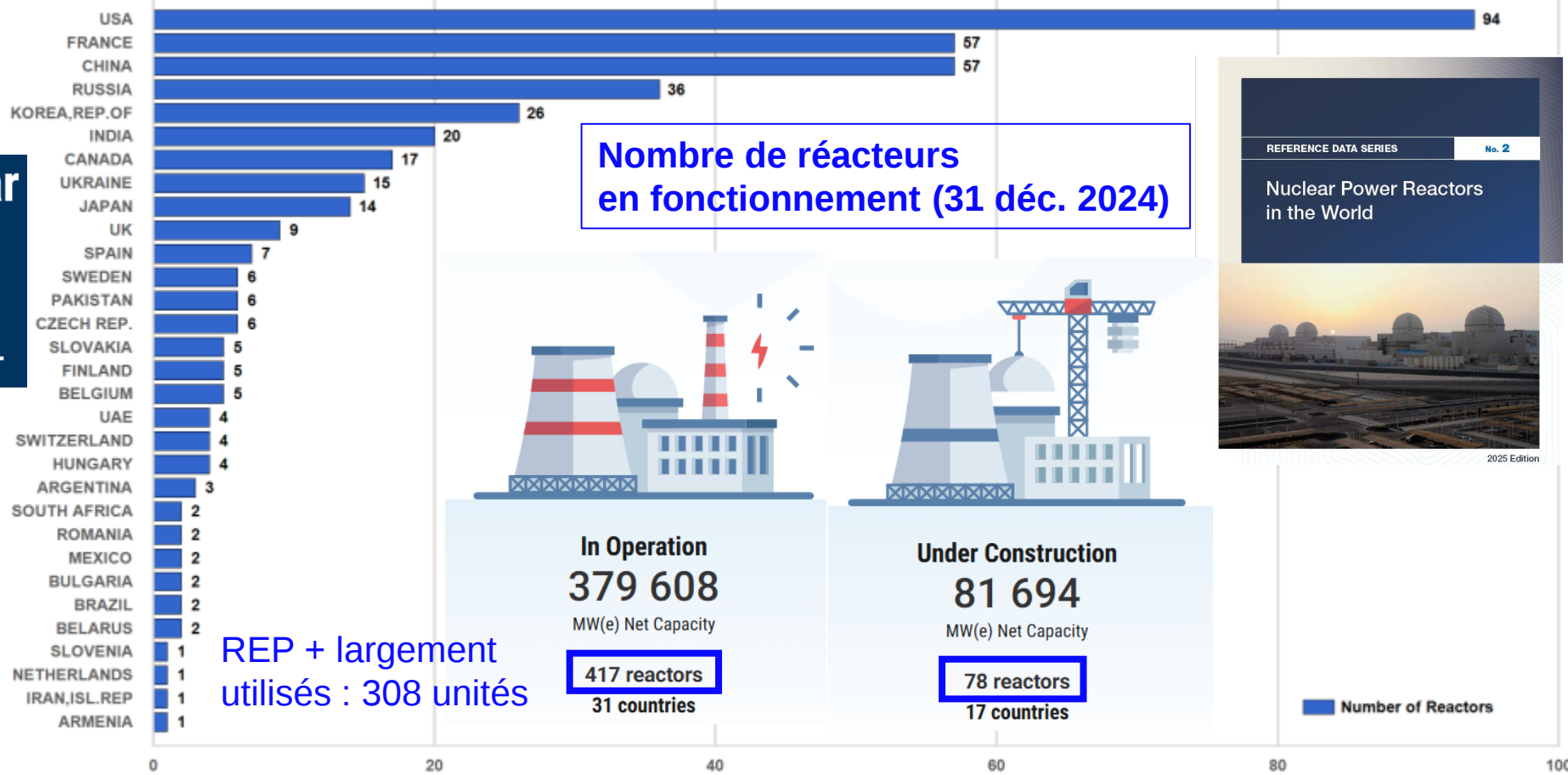
35 réacteurs utilisent combustible UOX,

22 réacteurs de 900 MWe utilisent combustibles MOX + UOX

Dans le monde

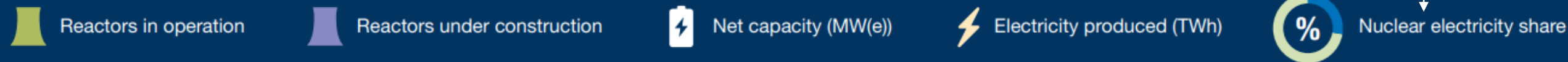


Nuclear Power Status 2024



<https://pris-stats.iaea.org/world-statistics>
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications>

% de la production totale d'électricité provenant de l'énergie nucléaire



Monde : Consommation / Production d'électricité en 2024

& prévisions de l'



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

En 2024



En 2050



20.5%

de l'énergie finale consommée
était de l'électricité

26%

43%



30 529 TW·h

d'électricité produite



8.7%

d'électricité produite par le nucléaire, ~ 60 % par les E fossiles & ~ 31 % par EnR

67%



377 GWe

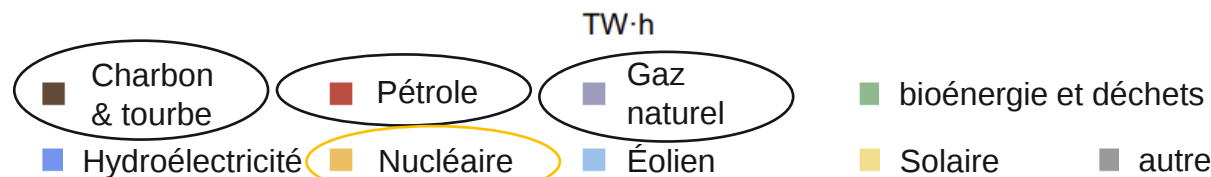
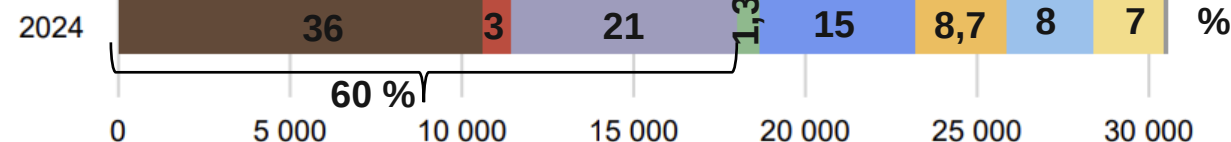
puissance nette
totale installée (réacteurs)

x 2,6
x 1,5

992 GWe

561 GWe

PRODUCTION MONDIALE D'ÉLECTRICITÉ PAR SOURCE D'ÉNERGIE

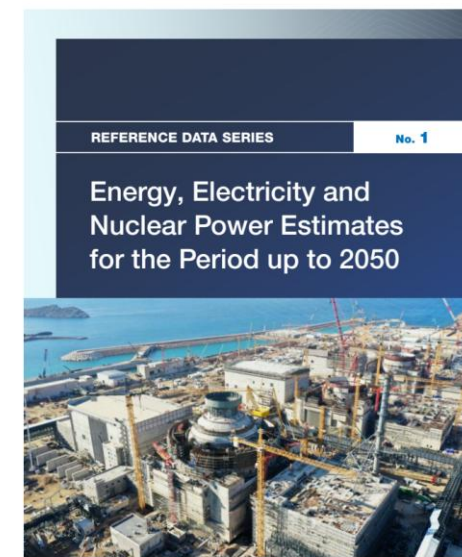


Dans le scénario haut / bas, la capacité de production d'électricité nucléaire devrait être X par 2,6 / 1,5 d'ici 2050.

Dans le scénario optimiste / pessimiste, les petits réacteurs modulaires (SMR) devraient représenter 24 % / 5% de la nouvelle capacité ajoutée.

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15942-25-02880E_RDS-1-45_web.pdf

<https://www.iaea.org/publications/15942/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>



Fonctionnement d'un réacteur

La fission nucléaire

1 neutron en collision avec noyau lourd peut le briser en 2 noyaux + petits
= réaction de **FISSION**

= Fragments de Fission (FF), après désexcitation prompte (émission neutrons et gammas) $\Rightarrow$ produits de fission (PF), radioactifs

lors 1 fission, 2 à 3 neutrons produits et énergie dégagée $E \sim 200 \text{ MeV}$
(Combustion d'1 at de C = 4 eV)

$\approx$ E cinétique des PF (vitesse $\approx 8000 \text{ km/s}$) + E emportée neutrons faible

PF ralentis lors chocs subis avec atomes environnants, j'arrêtés

$\rightarrow$ Énergie perdue par PF chauffe le combustible

$\rightarrow$ Localement T° combustible $\nearrow$

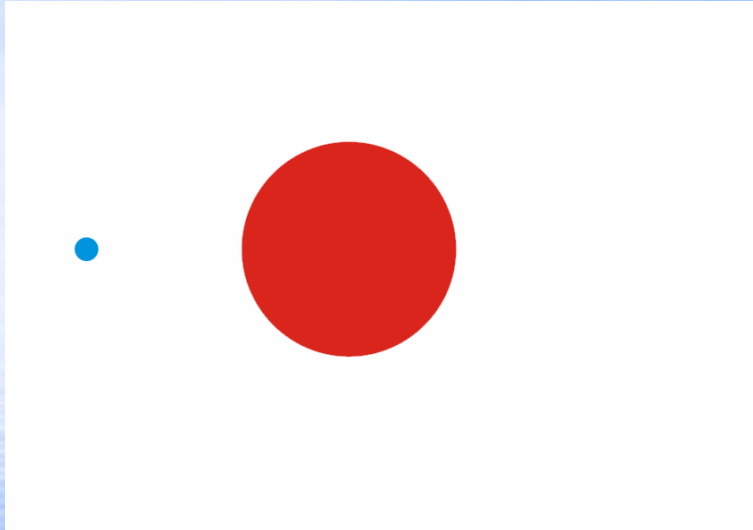
$\rightarrow$ Chaleur chauffe l'eau du circuit 1^{aire} entourant le combustible

$\rightarrow$ transforme en vapeur l'eau du circuit 2^{aire}

$\rightarrow$ actionne turbine

$\rightarrow$ production d'ÉLECTRICITÉ

$\rightarrow$ couplée à alternateur



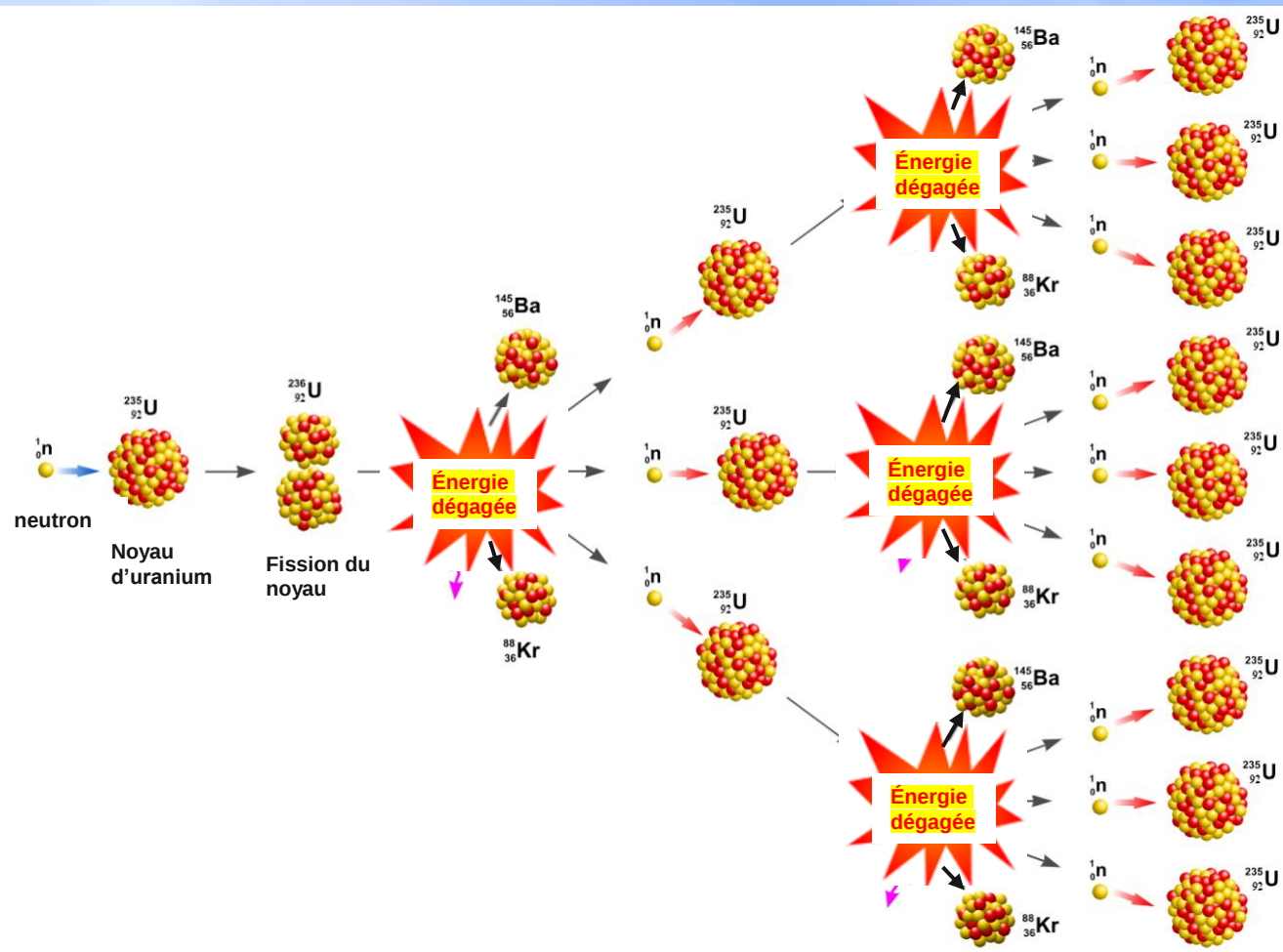
noyau lourd,
 ^{235}U ou $^{239, 241}\text{Pu}$



neutron

Fonctionnement d'un réacteur

La réaction en chaîne



1^{ère} génération $\longleftrightarrow$ 2^{ème} génération $\longleftrightarrow$ 3^{ème} génération
 $50 \mu\text{s}$ $50 \mu\text{s}$

Chaque fission produit **2 à 3 neutrons (n)**

chaque n peut interagir avec 1 autre noyau

si $^{235}\text{U} \Rightarrow$ nouvelle fission

& libération de nouveaux n, et ainsi de suite....

= RÉACTION EN CHAÎNE

nombre de n produits d'1 génération à l'autre $\nearrow$ très rapidement ($\Lambda \approx 50 \mu\text{s}$, $\heartsuit$ thermique)

démarrée avec source de n (Cf, Am-Be, Po)

maîtrisée par noyaux absorbant les n (B, Gd, Cd, In...),
ex : contenus dans barres de commande = "contrôle"
mobiles $\Rightarrow$ piloter le réacteur, B dilué dans eau

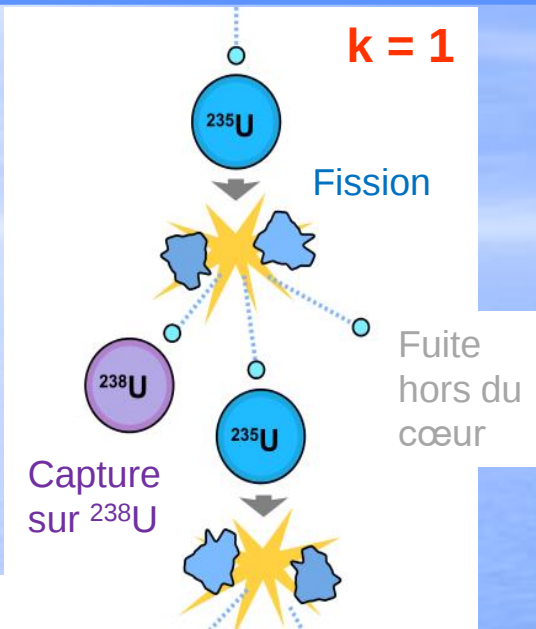
si 1 seul n, issu de chaque fission, provoque 1 nouvelle fission $\rightarrow$ nombre de fissions constant d'1 génération à l'autre

$\rightarrow$ quantité de chaleur libérée dans $\heartsuit$ constante

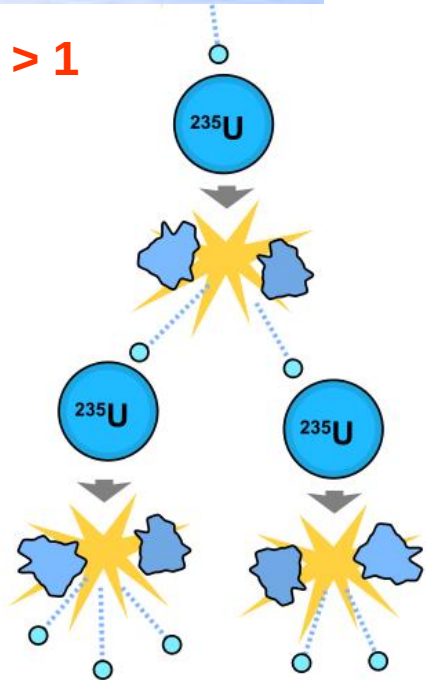
$\rightarrow$ puissance du réacteur stable

Fonctionnement d'un réacteur

Criticité



$k > 1$



Coefficient de multiplication des neutrons **k** donne le
nombre moyen de fissions induites par 1 fission

N_0 fissions $\rightarrow k N_0 \rightarrow k \times k N_0 \rightarrow k \times k \times k N_0 \rightarrow \dots$

si $k = 1$, chaque fission induit ≈ 1 nouvelle fission

puissance stable, réacteur critique

$\Rightarrow$ mode de fonctionnement **RÉACTEURS** actuels

si $k < 1$, nombre de fissions $\searrow$ d'1 génération à l'autre

puissance $\searrow$ jusqu'à l'arrêt, réacteur sous-critique,

réaction **s'arrête** rapidement sans apport extérieur de n

si $k > 1$, nombre de fissions $\nearrow$ d'1 génération à l'autre,

puissance ne fait que $\nearrow$, réacteur sur-critique,

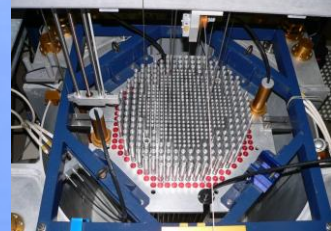
réaction en chaîne **diverge** vite

pour $k = 1,001$ puissance $\times 2$ en 46 s (^{235}U) $\Rightarrow$ emballement rapide

$\Rightarrow$ essentiel de maintenir $k = 1$ à l'aide barres de commande

(système prompt-surcritique $\Rightarrow$ bombes nucléaires)

Réacteur Crocus (Suisse)



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

Le cœur du réacteur : le combustible



pechblende (U_3O_8),

uraninite (UO_2)



Source : Le comptoir géologique

Concentré d'uranium yellowcake
sortant d'un filtre-presse, Source : Orano

Nature facétieuse !

Seuls ^{235}U et $^{239,241}Pu$ fissiles

= fissionnent quelque
soit E_{neutron}



"yellow cake" = pâte contenant
U concentré

75 % d'oxyde d'uranium (U_3O_8)



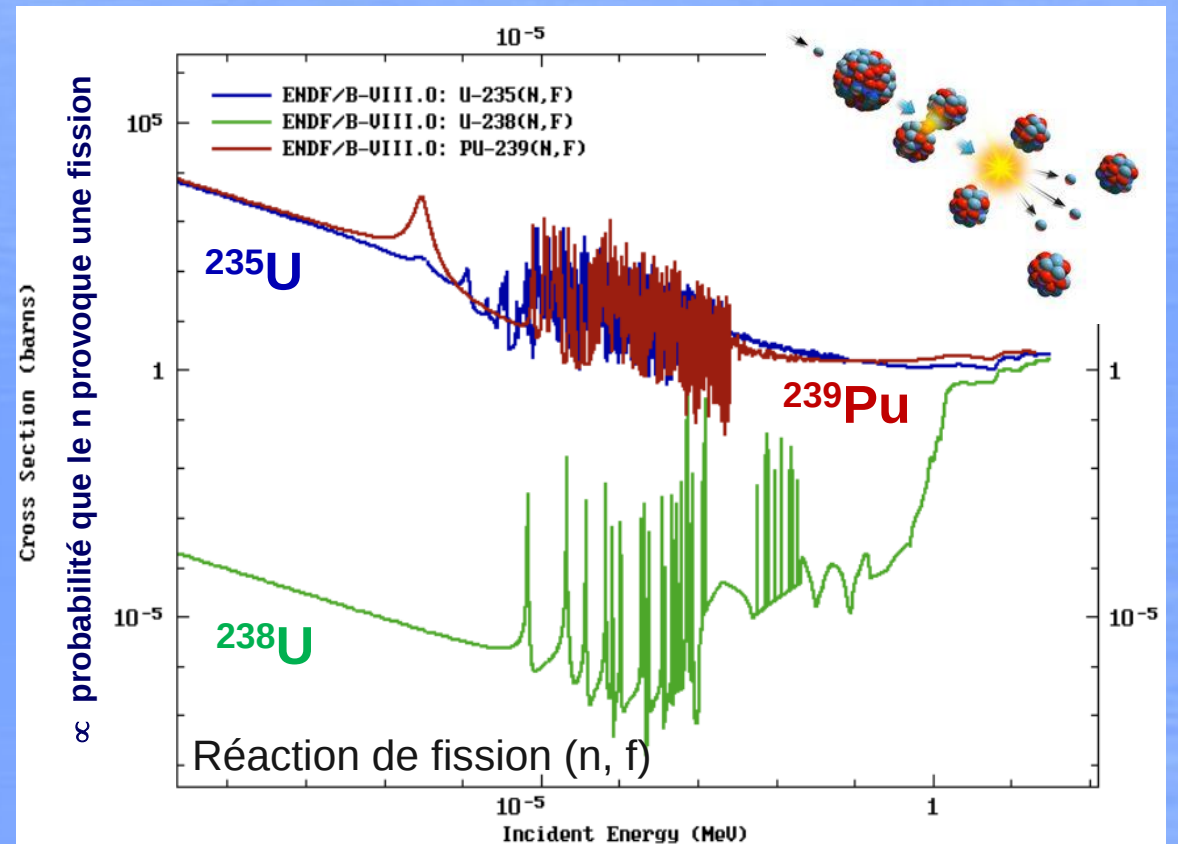
Combustible contient noyaux pouvant fissionner : ^{235}U et $^{239,241}Pu$

seul U existe dans la nature = métal dans roches uranifères (faible teneur)
combiné à autres éléments chimiques

100 kg d'U naturel : 99,3 kg d' ^{238}U ($T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ ans)

+ 0,7 kg d' ^{235}U ($T_{1/2} = 0,704 \cdot 10^9$ ans)

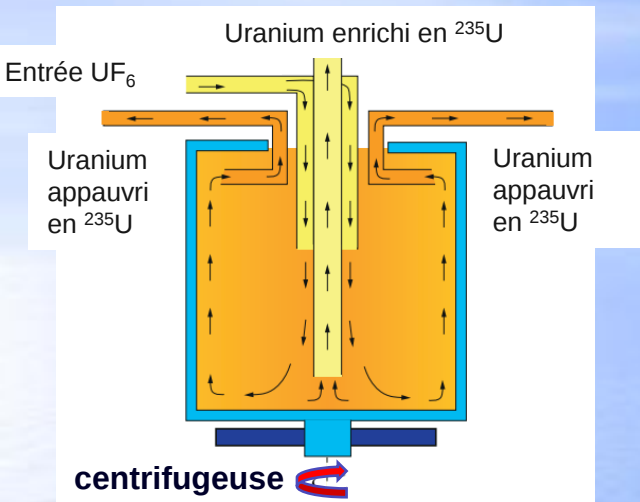
→ Converti en UF_6



^{238}U non fissile
⇒ il existe E_{seuil} ($\sim 1,3$ MeV)
⇒ Tend à capturer les n

Fonctionnement d'un REP

Le cœur du réacteur : le combustible



REP utilise combustible enrichi en ^{235}U entre 3 % et 5 % (UOX)

UOX = uranium oxide = UO_2

ou combustible = mélange 91,35 % d' U^{**} appauvri et de Pu (moy. 8,65 %) (MOX)

MOX = mixed oxides = $PuO_2 + U_{appauvri}O_2$

****U appauvri = sous-produit des usines d'enrichissement de l'U (~ 0,28 % d' ^{235}U)
& produit des centres de retraitement du combustible usé (~ 0,73 % d' ^{235}U)**

méthodes d'ENRICHISSEMENT en ^{235}U basées sur $\neq$ de masse entre ^{235}U et ^{238}U

→ différence de mobilité

= ultracentrifugation ("essoreuse à salade"), remplace diffusion gazeuse
(UF_6 gazeux à 56°C, passage à travers membranes percées de trous)



Assemblage
264 crayons

Crayon

h = 6 m

d = 1 cm

e = 1 mm

272 pastilles

Pastille

h = 1 cm

d = 8 mm



Assemblage de crayons

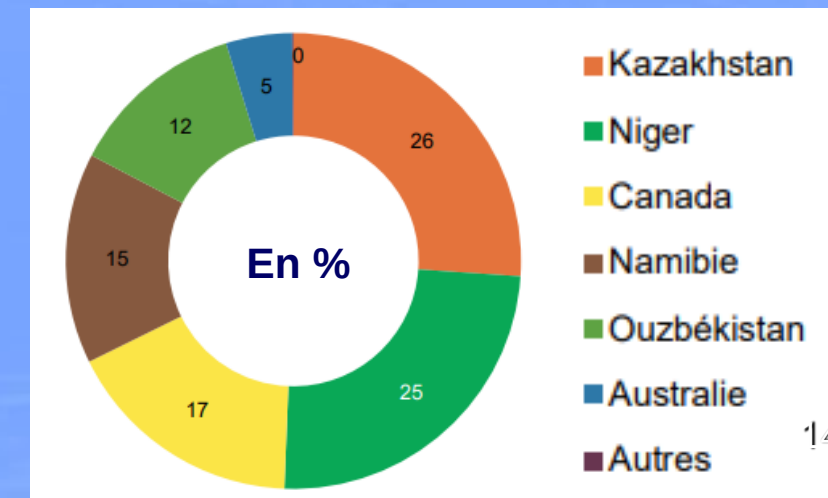
combustible = pastilles empilées

dans tubes ou « gaines » étanches = crayons

(1^{ère} barrière de confinement)

réunis en faisceau = assemblage

En 2024, la France a importé 15100 t d'U naturel



Fonctionnement d'un REP

Le cœur du réacteur : le combustible

Réacteur de 1 GWe fonctionnant 1 an consomme :
~ 180 t d'U naturel, 30 t d'U enrichi (à ~ 4 % en ^{235}U)

Combustible utilisé = pas suffisamment noyaux fissiles pour maintenir réaction en chaîne

Combustible, gaines & structures des assemblages peuvent s'altérer

fragilisation thermo-mécanique (T° , P) et chimique, sous irradiation

ex : **corrosion** des gaines par les PF et au contact de l'eau (oxydation, hydruration = diffusion d'H dans la gaine), **gonflement** des pastilles (dû relâchement de gaz de fission)

⇒ **combustible périodiquement renouvelé**

rechargement ⇒ arrêt du réacteur

fractionné :

1/3 ou 1/4 combustible rechargé

1 cycle ⇔ durée de fonctionnement réacteur entre deux recharges = 12 à 18 mois REP

Assemblage combustible reste 3 ou 4 cycles (REP)
⇔ entre 3 et 5 ans

Assemblage combustible

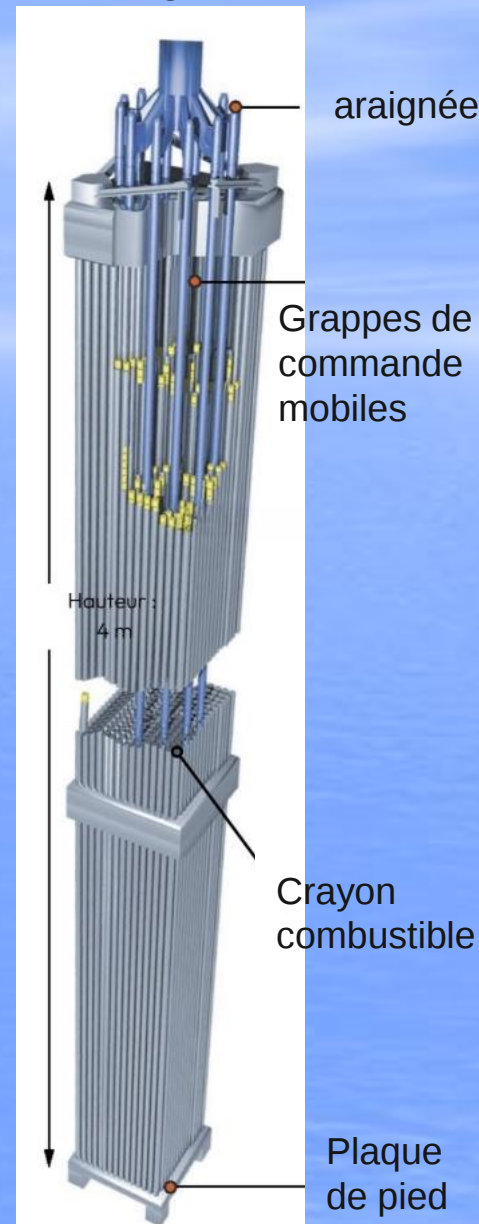
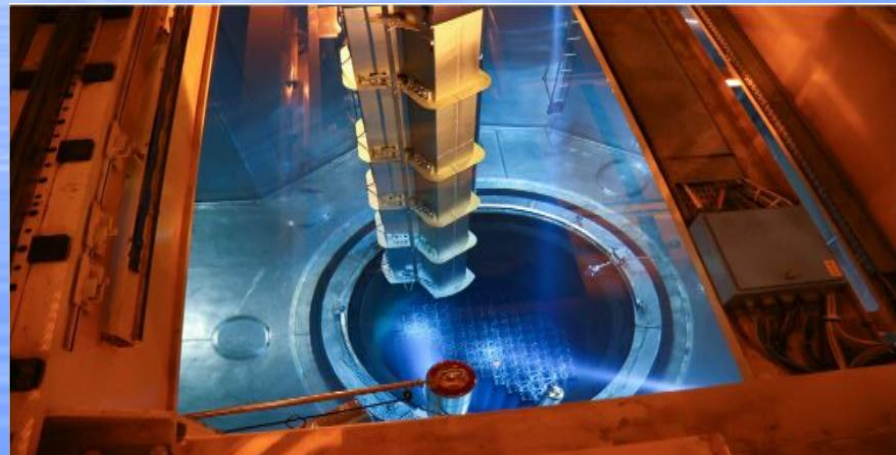
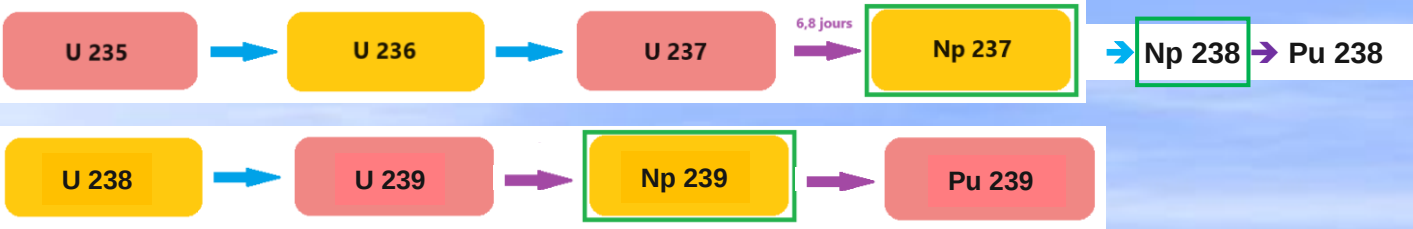


Schéma d'origine : EDF, modifié par Révolution Énergétique



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

Le cœur du réacteur : le combustible



Combustible utilisé
UOX contient :

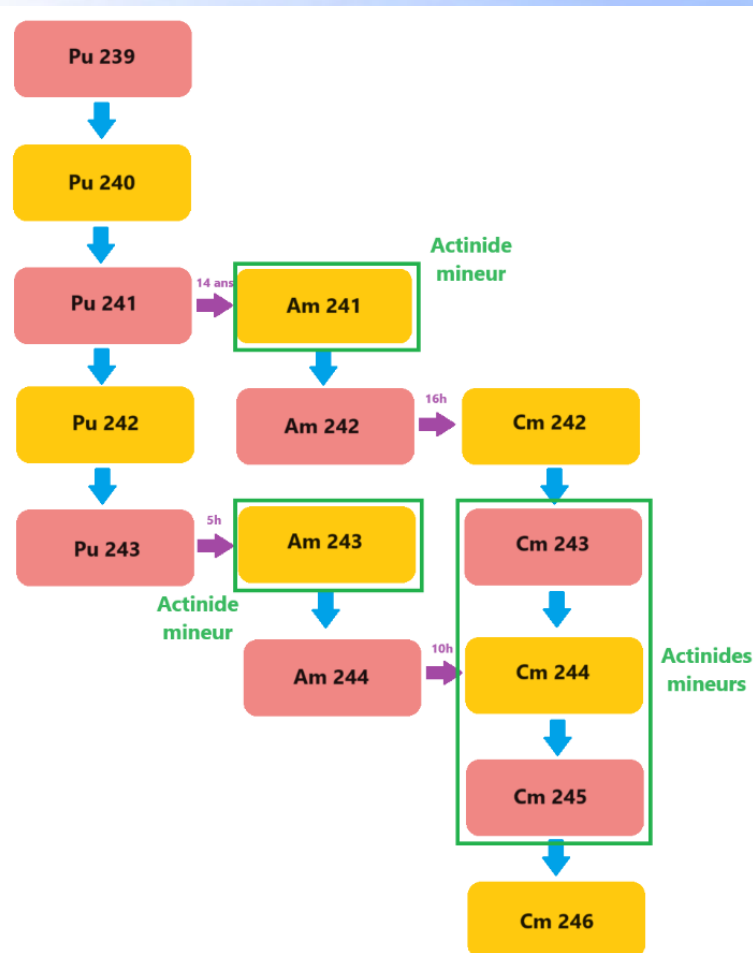
produits de fission (PF)

+ isotopes de Pu :

238, 239, 240, 241, 242 Pu en ≠ proportions

+ actinides mineurs (AM : Np, Am, Cm),

formés en faibles quantités /U et Pu



Actinides =

89	90	90	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
ACTINIUM (227)	THORIUM 232.0377	PROTACTINIUM 231.03	URANIUM 238.02	NEPTUNIUM (237)	PLUTONIUM (244)	AMÉRICIUM (243)	CURIUM (247)	BERKÉLIUM (247)	CALIFORNIUM (251)	EINSTEINIUM (252)	FERMIUM (257)	MENDÉLÉVIUM (258)	NOBÉLIUM (259)	LAWRENCIUM (262)

combustible utilisé UOX (enrichi à 3,7 %, brulé à 45 GWj/t) renferme :

4 % PF + 1% de plutonium (50 % ^{239}Pu + 10 % ^{241}Pu) + 0,1 % AM + 94 %U

usines de retraitement $\Rightarrow$ combustible MOX

- **GWj/t $\rightarrow$ Usure d'un combustible $\rightarrow$ Taux de combustion du combustible**
= énergie thermique totale libérée par unité de masse
des noyaux lourds présents initialement dans le combustible

Fonctionnement d'un réacteur REP

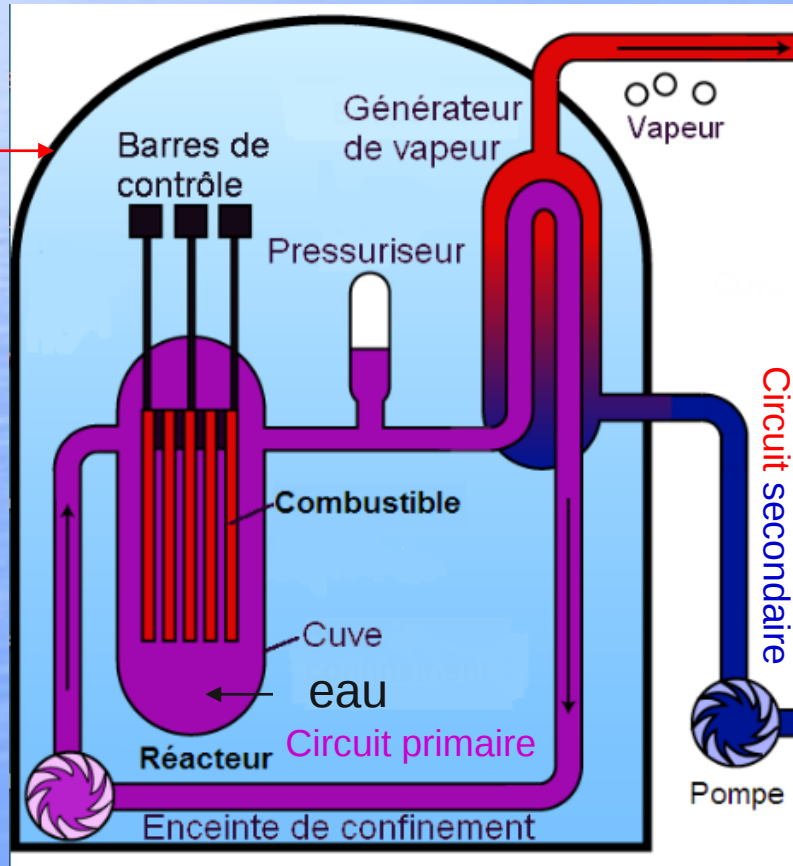
Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporteur

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

Enceinte
80 000 m³,
résiste à 3 bar
Cuve
h = 12 m
d = 4/4,5 m
200/300 t
150/ 200
assemblages
100 kW/dm³



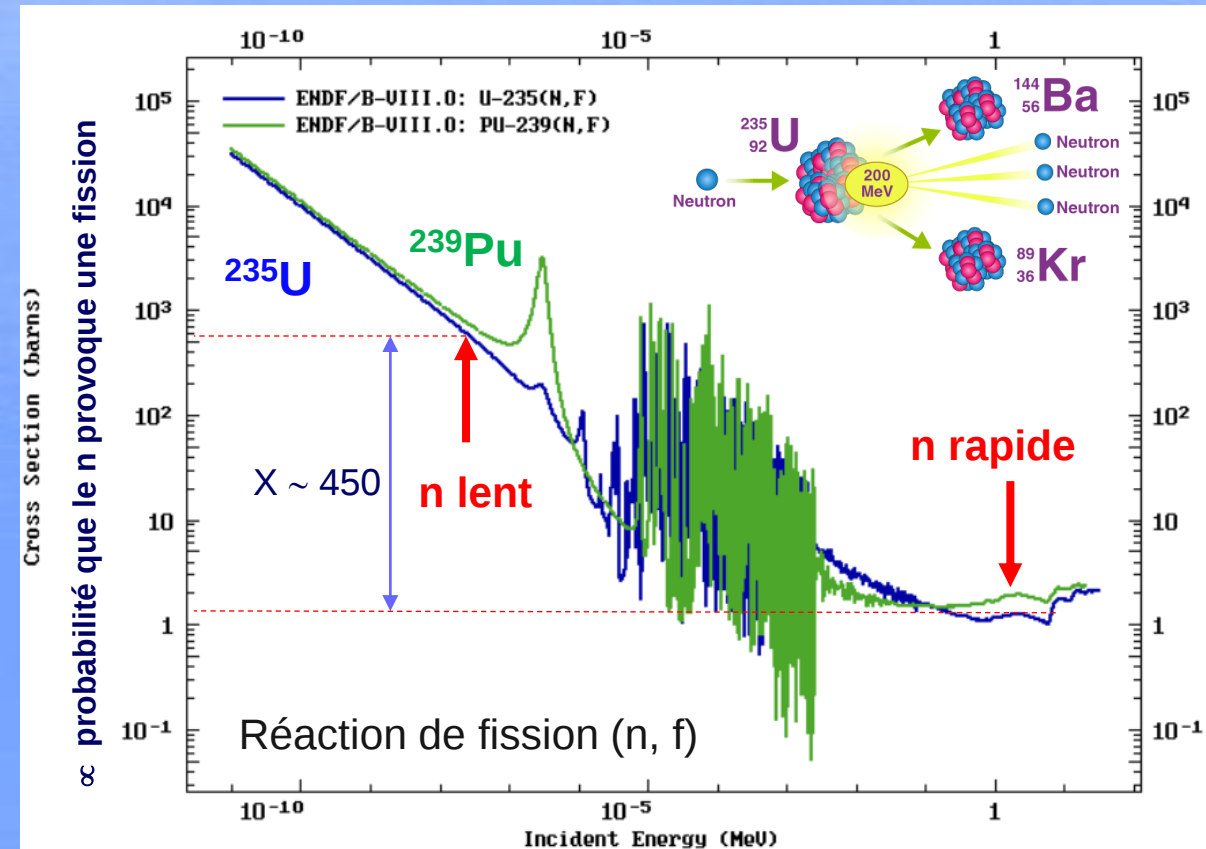
2^{ème} barrière de
confinement

le MODÉRATEUR

⇒ n de fission ~ 20 000 km/s → n "lents" 2,2 km/s
"rapides" ~ 2 MeV → "thermiques" * 0,025 eV

* En équilibre thermique avec le milieu

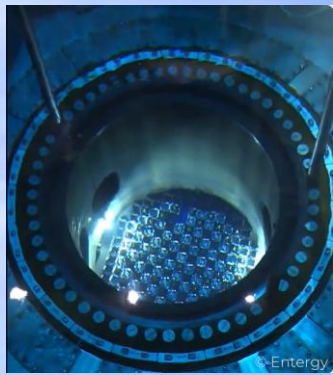
⇒ fissionner + facilement et en + grand nombre noyaux lourds



Fonctionnement d'un réacteur REP

Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporteur

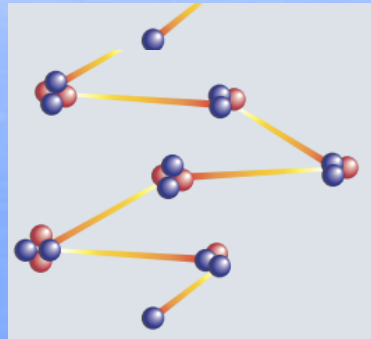
MODÉRATEUR =



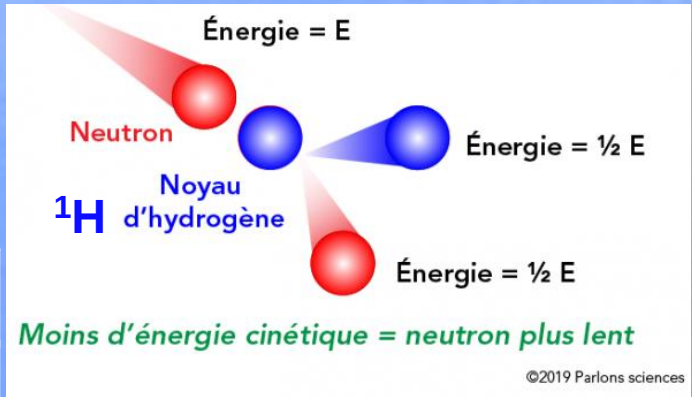
= CALOPORTEUR

Le MODÉRATEUR

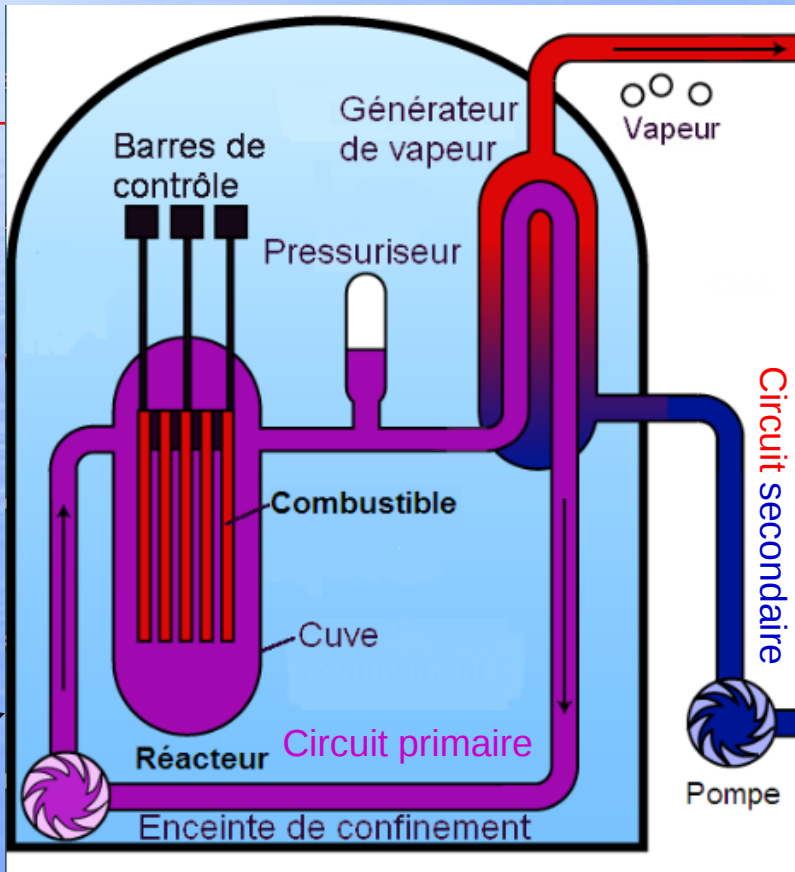
⇒ n de fission ~ 20 000 km/s → n "thermiques" ~ 2,2 km/s
"rapides" ~ 2 MeV → "lents" 0,025 eV



meilleur ralentisseur = l'hydrogène = ^1H



Enceinte
80 000 m³,
résiste à 3 bar
Cuve
h = 12 m
d = 4/4,5 m
200/300 t
150/ 200
assemblages
100 kW/dm³



Neutron 5 MeV → 0,025 eV	
Noyau	Nombre de diffusions nécessaire
^1H	28
^{12}C	125
^{56}Fe	545
^{208}Pb	1997

→ **EAU = modérateur**
(REP : noyaux légers : Graphite, eau lourde = $^2\text{H}_2\text{O}$)

^1H relativement absorbant (= ~10 % des capture stériles de n dans ♥)
→ enrichir l'U en ^{235}U pour entretenir réaction en chaîne

3^{ème} barrière de confinement

Fonctionnement d'un réacteur REP

Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporteur

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

👉 **le CALOPORTEUR**

⇒ transporter hors du ♥ chaleur dégagée dans combustible
→ systèmes → électricité

⇒ maintenir T° du ♥ à valeur compatible avec tenue des matériaux
(ex : gaine métallique du combustible)

eau sort du ♥ à $\approx 330\text{ }^{\circ}\text{C}$,

Rôle du PRESSURISEUR :

- Permettre expansion de l'eau due à sa dilatation
- Maîtrise pression du circuit primaire à 155 bars
⇒ maintenir eau liquide (vapeur)

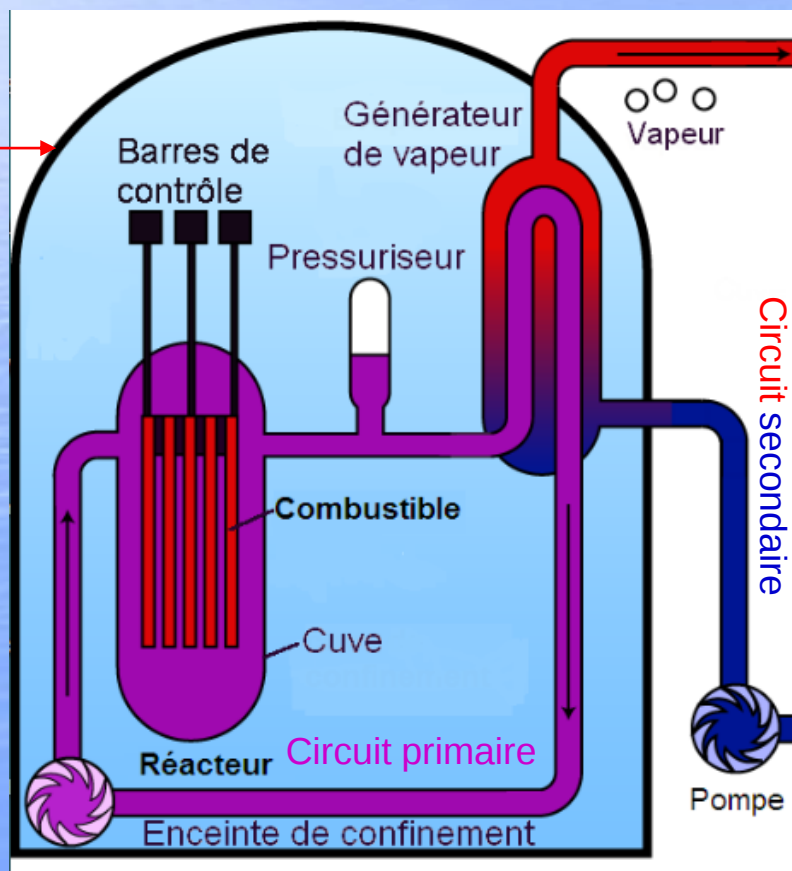
eau du circuit 1^{er} passe dans GÉNÉRATEUR DE VAPEUR ⇒
transfert sa puissance thermique vers eau du circuit 2^{ème},

portée à ébullition → vapeur
($\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sim 70\text{-}80\text{ bars}$)

(REP : fluide d'extraction de la chaleur : métal liquide (sodium ou plomb) ou gaz (gaz carbonique ou hélium))

Enceinte
80 000 m³,
résiste à 3 bar
Cuve
h = 12 m
d = 4/4,5 m
200/300 t
150/ 200
assemblages
100 kW/dm³

2^{ème} barrière de
confinement

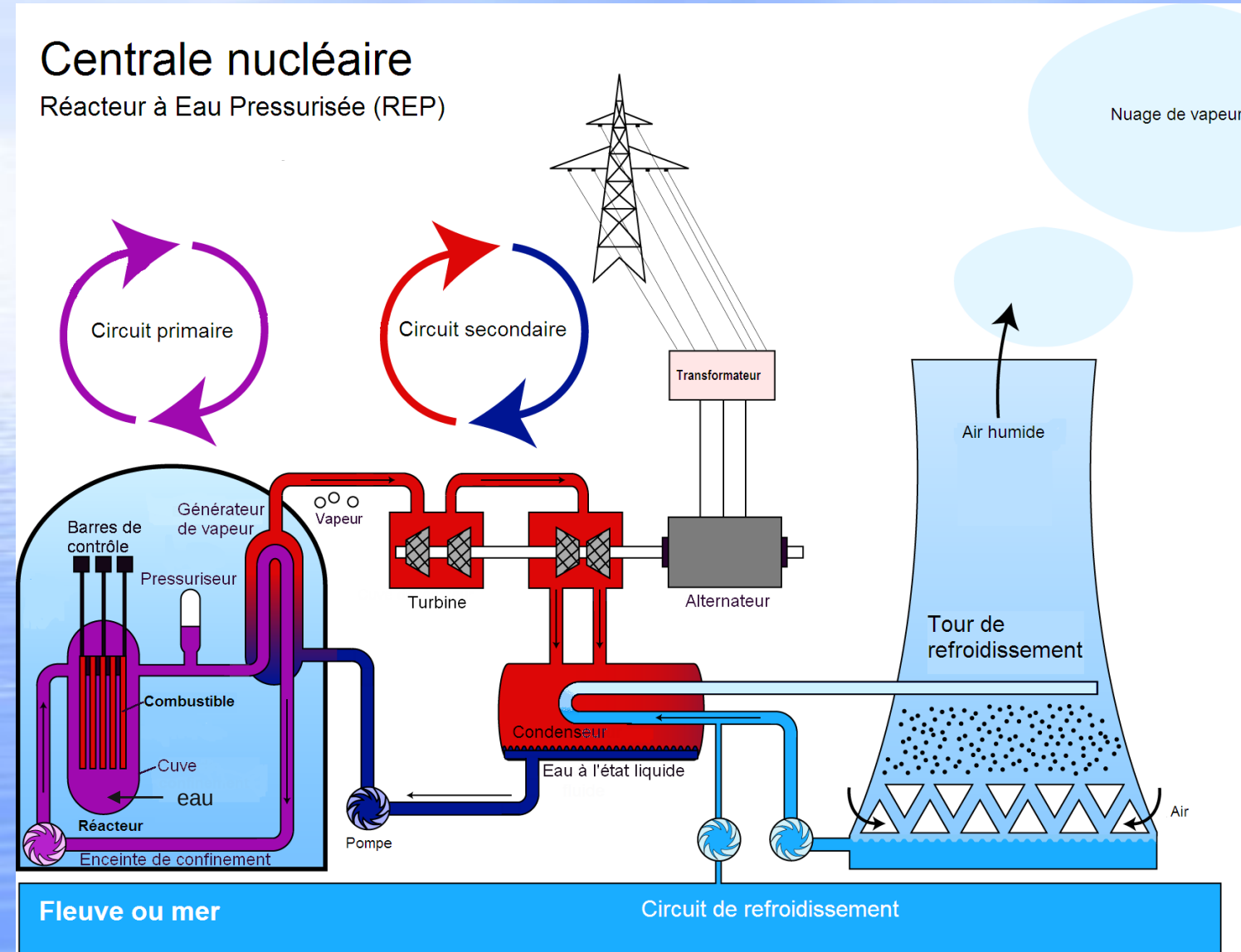


Fonctionnement d'un réacteur REP

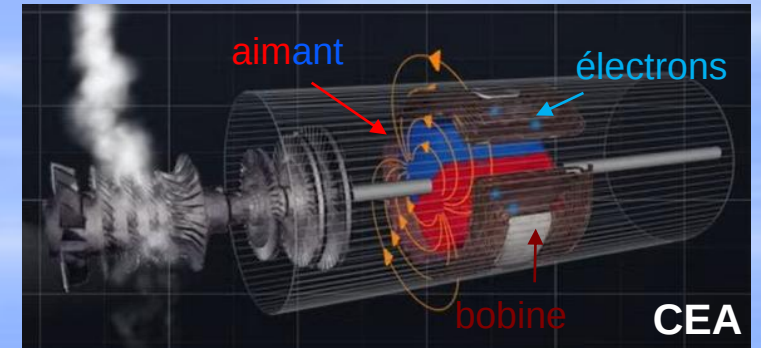
Turbine – alternateur - condenseur

Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



En se détendant, vapeur entraîne la rotation d'**1 TURBINE** couplée à **1 ALTERNATEUR**



à la sortie de turbine, vapeur se condense dans **CONDENSEUR** refroidi par de l'eau d'un **3^{ème}** circuit ou de l'air

Conversion de

E libérée par fissions = E cinétique des PF
→ E thermique → E mécanique → E électricité

a rendement limité :

= puissance **électrique** produite (en **MWe**) /
puissance **thermique** dégagée dans ♥ du réacteur
(en **MWth**)

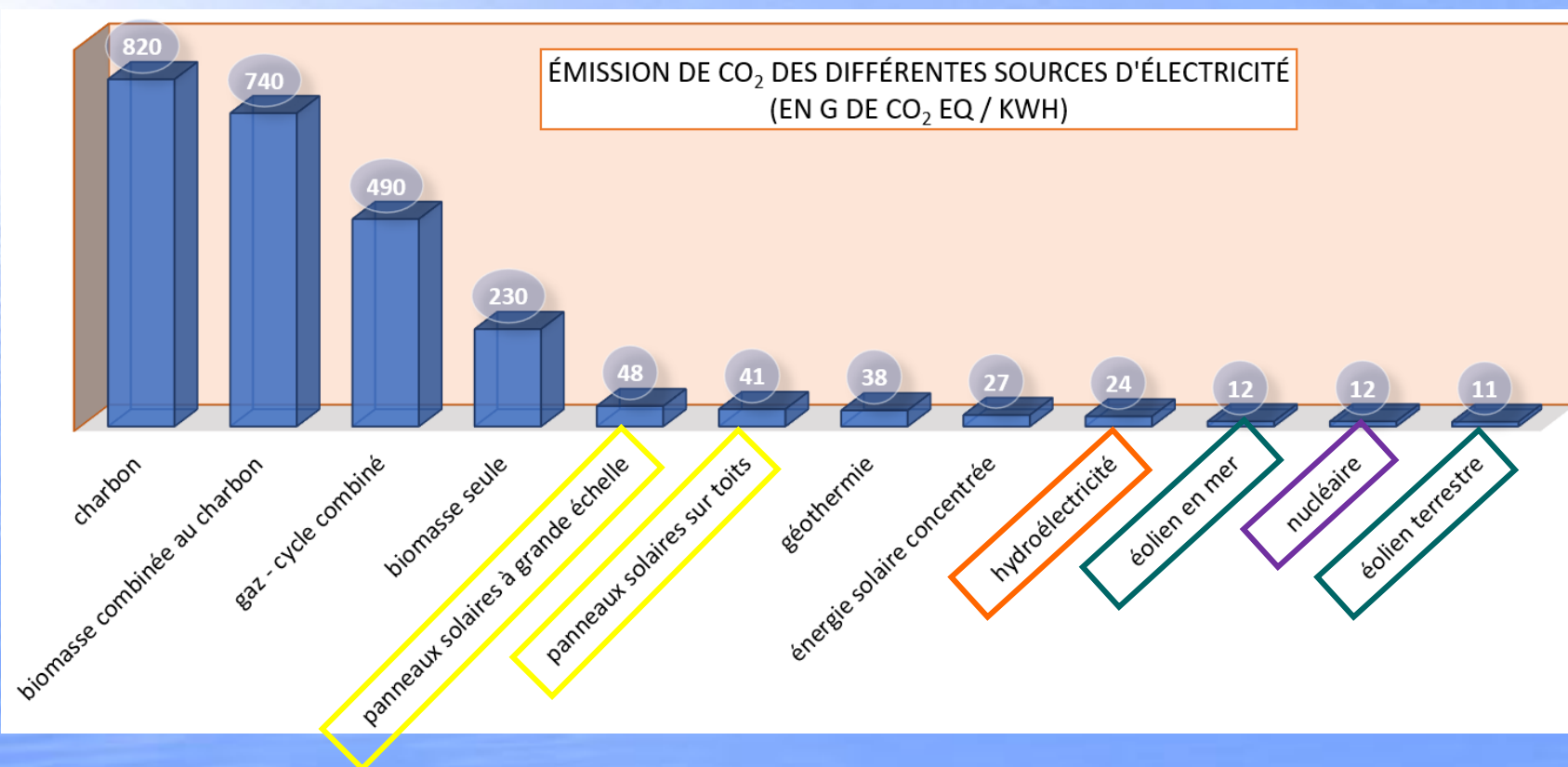
≈ 33 % (REP) à 37 % (EPR)

Comparaisons chiffrées

Pour produire autant d'électricité / an qu'un réacteur de 1 GWe = 1000 MWe, il faut :

- ⇒ 2000 éoliennes de 2 MWe fonctionnant avec un facteur de charge* de 0,25
- ⇒ 38 milliards t d'eau chutant sur 100 m ⇒ 14 millions de panneaux solaires
- ⇒ 5 300 t de fioul ⇒ 7 400 t de charbon ⇒ 4 millions de m³ de gaz

Nucléaire ⇒ Moins d'émission de CO₂ et autres gaz à effet de serre (GES), sur tout le cycle de vie**



* **facteur de charge** d'1 unité de production électrique = ratio entre l'E qu'elle produit sur une période donnée et l'E qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné à puissance max

(**de l'extraction minière des matériaux et du carburant en passant par la construction et l'exploitation des centrales de production jusqu'à la gestion des déchets)

Générations de réacteurs en France

Calendrier

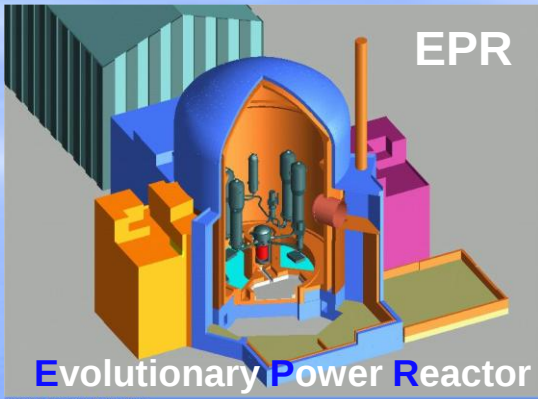
« génération » =
[≠ « filières technologiques »
 ≠ technologies de réacteurs]

Premières réalisations

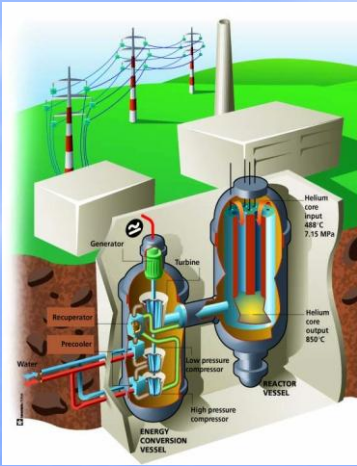
Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Réacteurs GEN-IV



Generation I

1^{ère} génération ⇔ **progrès intégrés** pour répondre aux enjeux majeurs de l'époque de conception : **sûreté, sécurité, économie des ressources en combustible, compétitivité économique, non-prolifération**

Generation II

Uranium Naturel Graphite Gaz
France sans technologies d'enrichissement de l'U
missions 1^{ère} génération :
productⁿ Pu militaire
développement production électricité
abandon ≈ 1970
11 réacteurs UNGG
dernier arrêté 1994

Réacteur à Eau sous Pression (+ 2 RNR)
Construits j'7 ~ 2000, en exploitation
Améliorations continues : mise en oeuvre MOX même qté combustible
⇒ 2X+ d'E qu'il y a 40 ans
⚡ dépendance énergétique vis à vis du pétrole
Politique de recherche sur retraitement déchets

Generation III

Evolutionary Power Reactor = EPR
Retour d'expérience des REP
Renforcés sur sûreté, sécurité, impact environnemental ⚡
avril 2007, construction 1er EPR autorisée à Flamanville
mis en service : France 2012- 2024
2022, en France : lancement construction 6 EPR (service ~ 2038)
+ étude de 8 EPR à l'horizon 2050

Generation IV

+ Performants
En phase de conception
déploiement industriel ~ 2040 - 2050
Critères d'exigence → cf diapos suivantes

6 EPR complétés par petits réacteurs modulaires (SMR) et « innovants » (AMR)

European Pressurized water Reactor = EPR = Evolutionary Power Reactor

Evolutions techniques, économiques, environnementales

EPR = concepts des REP français et allemands, optimisés

Par kWh produit, consomme de 7 à 15 % d'uranium en moins / REP

Meilleure capacité de recyclage du Pu :

Compatible charge 100% MOX (U et Pu)

contre 33% dans REP

Générateur de vapeur et turbine évolués $\Rightarrow$ rendement supérieur

Enrichissement légèrement + élevé (jusqu'à 5 %)

$\Rightarrow$ $\searrow$ nombres de déchargements et de retraitements

$\Rightarrow$ gain sur prix du cycle combustible

Sélection de nouveaux matériaux des composants + sollicités

Configuration modulaire de l'EPR

$\Rightarrow$ Remplacement d'un composant plus rapide

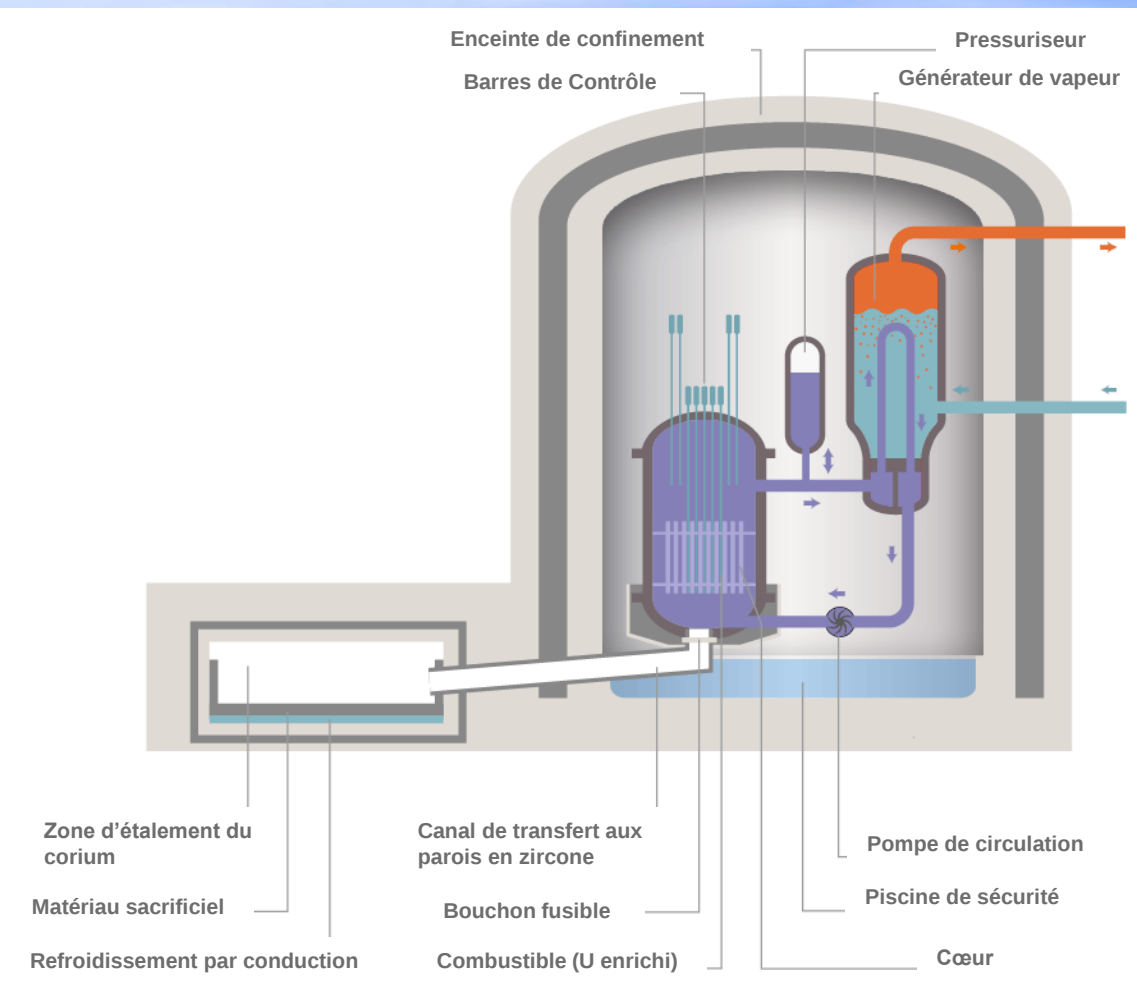
	EPR	REP N4
Puissance thermique (MWth)	4500	4250
Puissance électrique (MWe)	1650	1450
Rendement thermique (%)	37	34
Nombre d'assemblages	241	205
Taux de combustion du combustible (GWj/t)	60	45
Durée de vie (ans)	60	Initialement +30 ans puis 40 ans (+50 ans prog. grand carénage)
Irradiation du personnel (homme.mSv/an/réacteur)	0,4	1

European Pressurized water Reactor

Evolutions de sûreté

SURETÉ ACCRUE

(REX : Three Mile Island, USA 1979 - Tchernobyl, Ukraine 1986 -
11 sept. 2001 - Fukushima, Japon 2011)



double enceinte extérieure en béton armé pour résister
à la chute avion de ligne ou militaire
& à l'explosion exceptionnelle du ♥
étanche ⇒ pas relâchement de matières radio. dans l'atmosphère

récupérateur de corium (= matériaux du ♥ fondu ⇔ fusion du ♥)
l'isoler de l'eau subsistant dans circuits du réacteur
et assurer son refroidissement
éviter contamination du sol

absorbeurs d'hydrogène (gaz explosif produit par contact corium
avec eau (radiolyse) ⇒ ↑ P dans l'enceinte de confinement)
⇒ empêcher son explosion (H₂ avec O)

+ systèmes de secours :
4 systèmes de refroidissement d'urgence indépendants, etc.

résistance sismique X par ~ 1,65 / REP N4

.....

(budget EPR de Flamanville passé de 3.10⁹ à 20.10⁹ d'€, 12 ans de retard)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Contexte

Prochaines décennies : besoins ↗ en énergie,

épuisement progressif des ressources fossiles (~ 100 ans pour l'U),

nécessité ↘ émissions de gaz à effet de serre

Avec Énergies renouvelables

→ Nucléaire susceptible de jouer un rôle fondamental

En 2000, Forum international Génération IV (GIF)

→ cadre international R&D sur systèmes nucléaires du futur

12 pays dont la France & Euratom (Communauté Européenne de l'Energie Atomique)

Fin 2002 : 6 technologies de réacteurs :

RNR sodium, RNR gaz, RNR plomb,

Réacteurs à sels fondus (MSR)

Réacteurs à très haute température (VHTR),

Réacteurs à eau supercritique (SCWR),

critères d'exigence :

sûreté renforcée,

économes en ressources naturelles (U et Th),

économiquement compétitifs,

plus résistants / risques de prolifération,

mieux protégés contre attaques terroristes

minimiser déchets nucléaires produits (recycler Pu et
résorber stocks Pu, transmuter des AM)

usages diversifiés (dessalement, hydrogène, chaleur ...)

Euratom



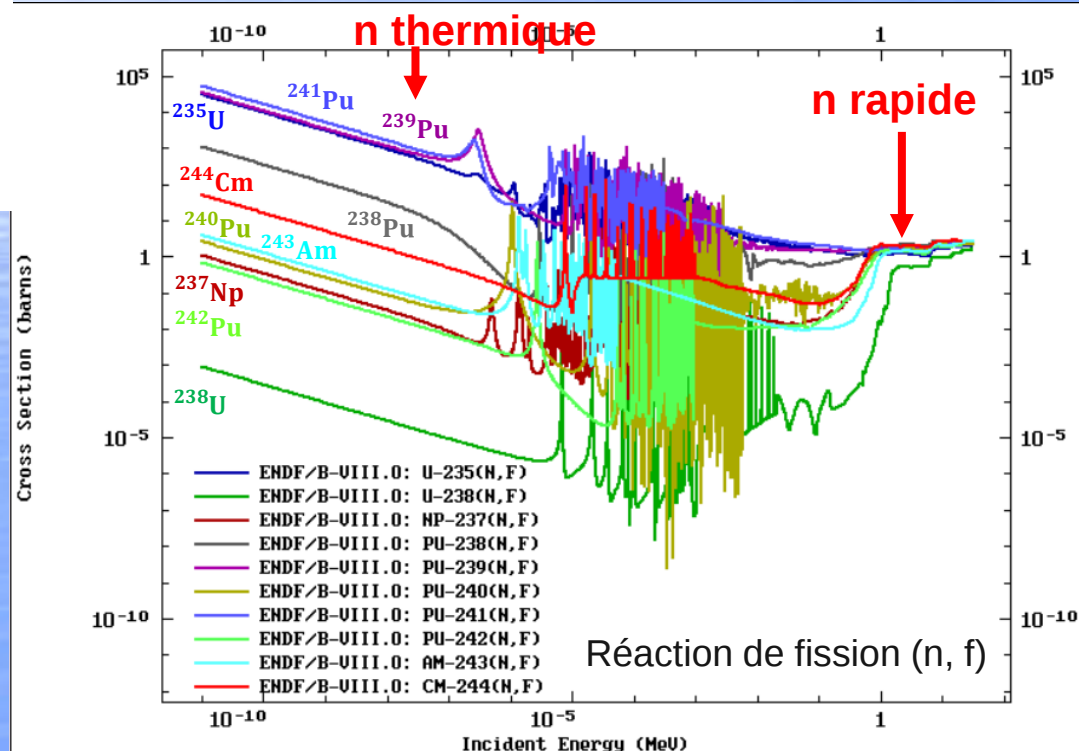
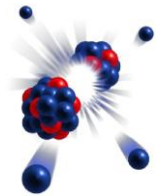
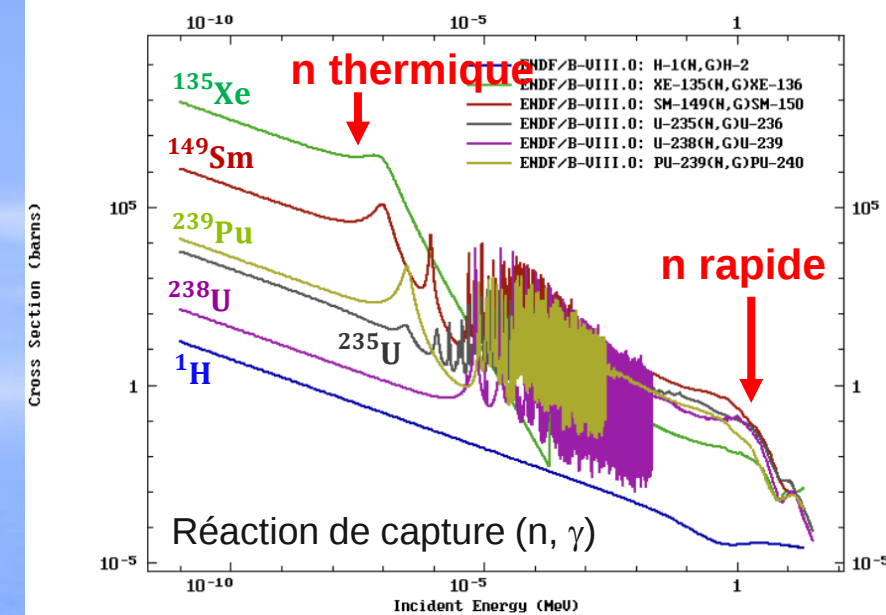
Réacteur à neutrons rapides : RNR

⇒ 3 filières à « neutrons rapides » : $E_{\text{neutron}} \approx E_{\text{émission neutron}} \approx 2 \text{ MeV}$

→ pas de modérateur ⇒ eau interdite

↑ ↘ captures stériles : par PF (^{135}Xe , ^{149}Sm), éléments de structure (aciers des assemblages combustible), barres de contrôle, ^{238}U

↑ n rapides permettent la fission de TOUS les noyaux lourds



↑ Avec sections efficaces de fission ~ même ordre :

^{238}U , ^{235}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , AM : ^{237}Np , ^{244}Cm , ^{243}Am ...

↓ mais + faibles qu'avec n thermiques

⇒ combustible fortement enrichi en noyaux fissiles

j' ~ 20% d' ^{235}U ou de ^{239}Pu pour que $k = 1$

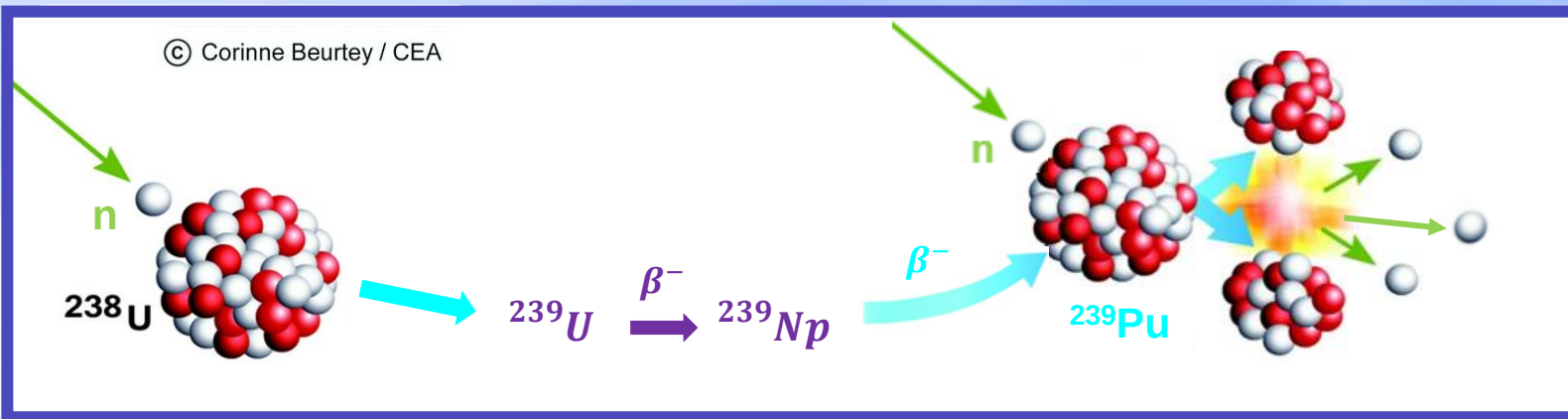
↓ fuites de neutrons hors ♥ du RNR + importantes

⇒ réflecteur + épais ou « couvertures fertiles » autour du ♥ constituées de noyaux fertiles (^{238}U)

⇒ « fabriquent » noyaux fissiles (^{239}Pu) = régénération

Réacteur à neutrons rapides : RNR

Régénération



noyau fertile
capture 1 neutron

vies courtes
fonctionnement du ♥

noyau fissile
fissionne facilement

Dans RNR, à chaque fission d'1 ^{239}Pu :

→ 1 n maintenir réaction en chaîne

→ ~ 0,3 n perdus

(fuite hors du ♥ & par capture stérile)

→ excès de + 1 n

= 1 n disponible pour la régénération

avec n_{rapide} avec $n_{\text{thermique}}$
 → ^{239}Pu (2,33 n / 2,11 n) | ^{235}U (1,88 n / 2,08 n)

↑ nb moy. de n émis par fission pour 1 n_{rapide} absorbé dans le noyau fissile > celui obtenu avec 1 $n_{\text{thermique}}$

➤ Réacteur régénérateur ⇒ chaque X qu'un ^{239}Pu fissionne, il peut être régénéré par la capture du n en excès par ^{238}U

→ Combustible de ^{239}Pu consommé peut être renouvelé

➤ Il faut fournir la 1^{ère} charge de Pu (~ 20 % Pu, ~ 80 % U_{app}), 1 X réacteur démarré, quantité de Pu constante par régénération & retraitement des couvertures fertiles

↑ ↑ Avec régénération → possible utiliser TOUT potentiel énergétique du minerai d'U : 99,3 % ^{238}U + 0,7 % ^{235}U

« Brûler » théoriquement 100 % de l'U, au lieu des 0,7 % dans REP actuels

Réacteur à neutrons rapides : RNR

Régénération



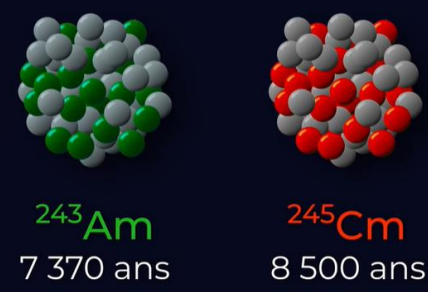
Dans RNR, 1 GWe.an ne requiert plus qu'1 t d'U naturel /an
→ Avec même quantité d'U naturel, avec les RNR, produire
~ + 100 X + d'électricité que dans REP actuels

↑↑ En utilisant stock ~ 350 000 t d'U_{appauvri}, RNR fourniraient de
l'électricité à la France de façon autonome durant ~ 5000 ans

Mars 2026, Conseil de politique nucléaire (CPN) a annoncé
la relance d'un programme de RNR (serait mis en construction en 2030)
ambition : se passer de l'importation d'U naturel à horizon 2100
→ souveraineté énergétique

Réacteur à neutrons rapides : RNR

Transmutation



👉 TRANSMUTATION (par fission majoritaire^t)

= transformer déchets radioactifs à vies longues (AM : Np, Cm, Am)

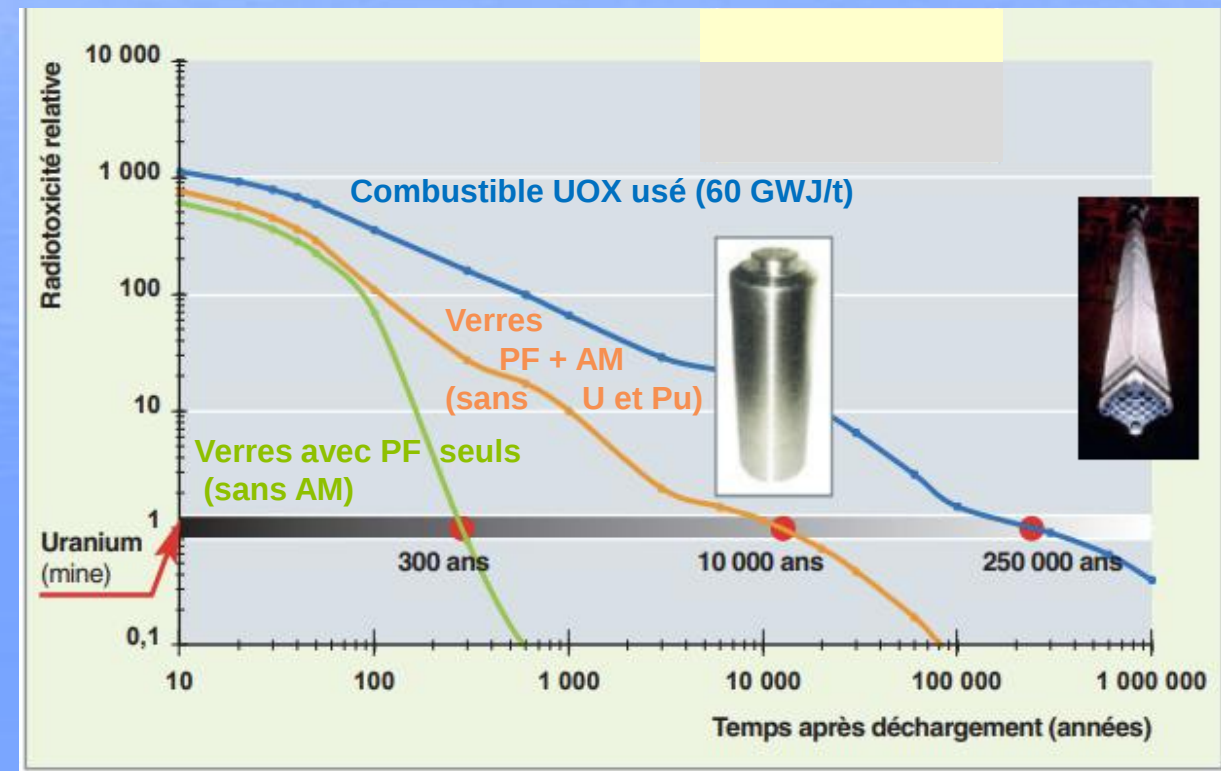
en éléments à périodes courtes, voire stables

En étant recyclés en RNR, les AM disparaîtraient des déchets radioactifs



Déchets ultimes limités aux PF ($T_{1/2} < 30$ ans), plus aisément stockables ($\searrow$ chaleur résiduelle, $\searrow$ empreinte au sol (par 10 pour déchets HAVL))

Niveau de radiotoxicité de l'uranium naturel retrouvé au bout de ~ 300 ans (10^4 ans avec colis contenant PF et AM)

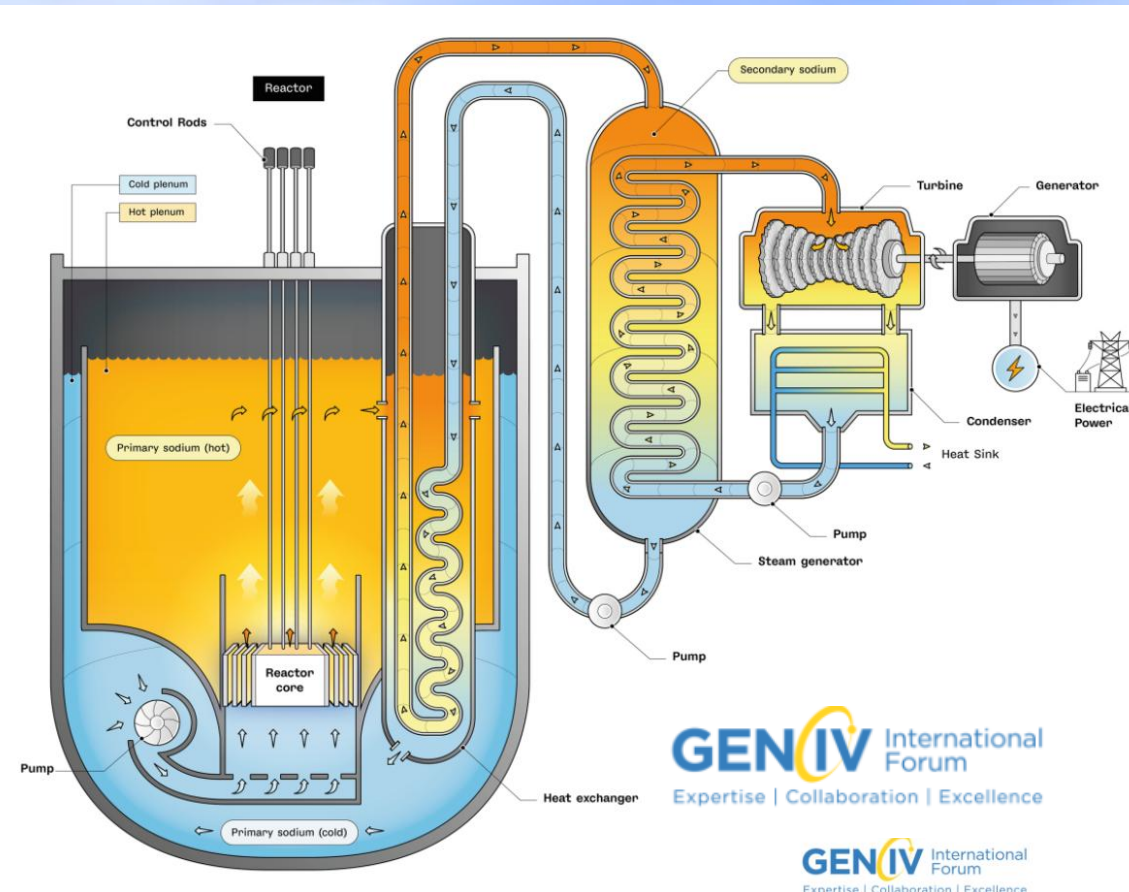


Radiotoxicité = nocivité de nature radioactive que peut subir tout organisme en cas d'ingestion ou d'inhalation de isotopes radioactifs

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Sodium Fast Reactor, **SFR** ou RNR-Na

Caloporteur = SODIUM LIQUIDE (Na - métal)



↑ excellentes propriétés thermo-hydrauliques pour évacuer chaleur
(liquide 97,8°C - 881,5°C ébullition, grande fluidité)

↑ capture peu de neutrons, les ralentit peu, faiblement corrosif

↑ caloporteur à 400-500°C ⇒ rendement thermodynamique > 40 %

↑ opéré à pression atmosphérique (P_{atm})

↘ difficultés associées à l'ingénierie cuves & circuits sous pression / REP + minimise risques de fuites en cas d'incident

↓ réaction eau + Na produit de la chaleur et de l'H gazeux = gaz hautement INFLAMMABLE et EXPLOSIF ⇒ circuits du Na étanches

↓ opacité complexifie manutentⁿ, inspectⁿ, réparatⁿ

➔ technologie relativem^t complexe & coût élevé

est industriellem^t validée

à améliorer

→ rentabilité économique

→ être commercialisable

dans décennies à venir



Superphénix

Exemples = Rapsodie (1967), Phénix (1973 à 2009) &
Superphénix seul prototype de taille industrielle (1985 à 1998)

En exploitation : 2 en Russie - BN-600 et BN-800, en Chine - CFR600, Inde - PFBR : criticité en 2026, comb. MOX

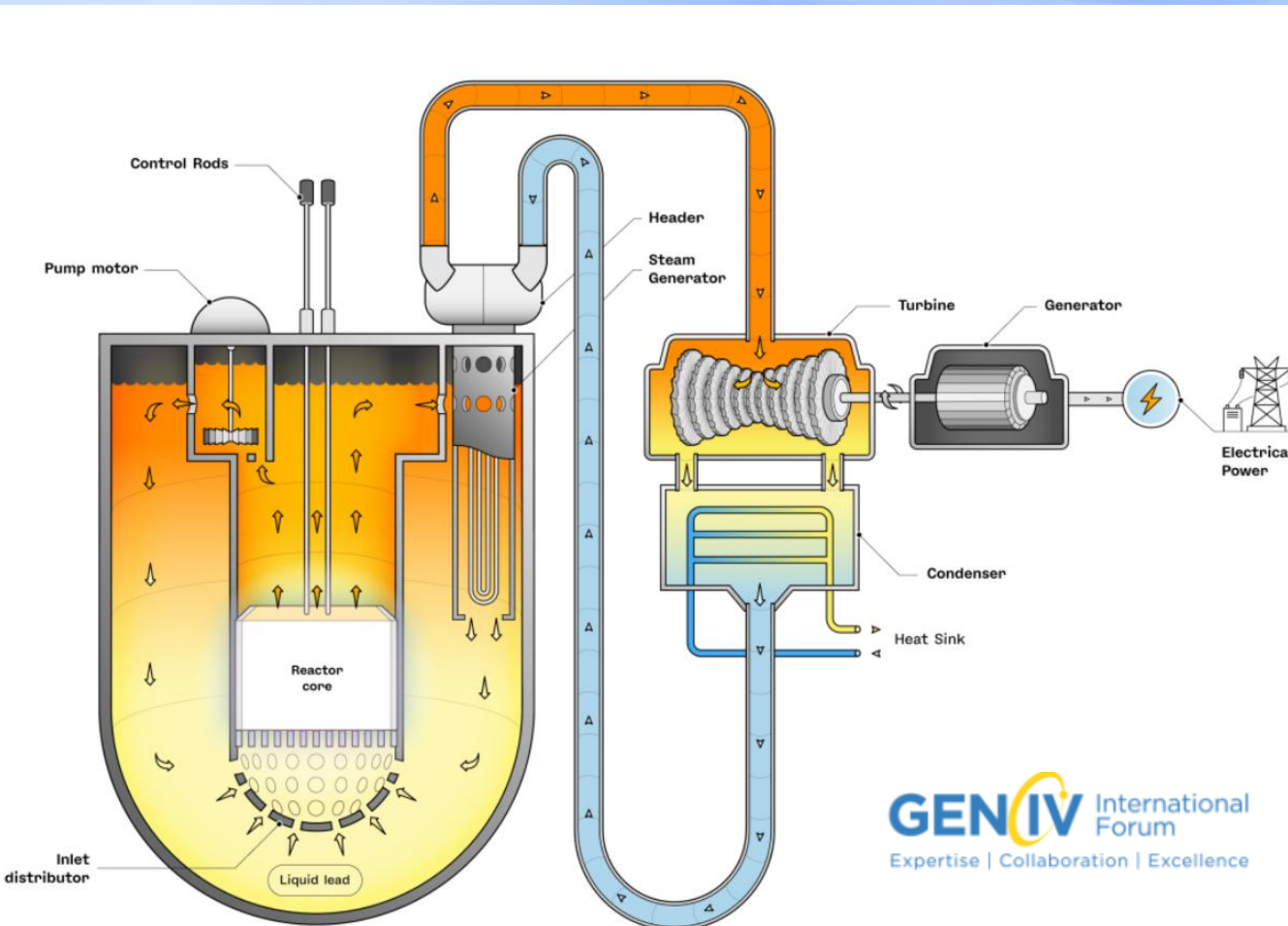
Projets USA, Corée, Europe étudie design d'un RNR-Na de 1,5 GWe (ESFR-SMART)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Lead Fast Reactor, **LFR** ou RNR-L

1^{ère} Alternative

Caloporteur = PLOMB (Pb) ou Pb / Bismuth fondu
= métal liquide



↑ faiblement réactif avec l'eau et l'air

↑ ralentit moins et capture moins les n que le Na

↑ point d'ébullition élevé (1749°C pour Pb) ⇒ haut rendement > 40 %

↑ opéré à pression atmosphérique (P_{atm})

↓ opaque comme Na

↓ toxique ↓ s'active en produisant du ^{210}Po très nocif

↓ CORROSIF ⇒ problèmes pour matériaux de structure

↓ résistance de la cuve pendant 10^{aines} d'années ?

....

⇒ recherches sur cette problématique

Concept RNR-L ← réacteurs russes (Pb/Bi) de 7 sous-marins de la classe « Alpha » (155 MWth), fonctionné ~ 15 ans

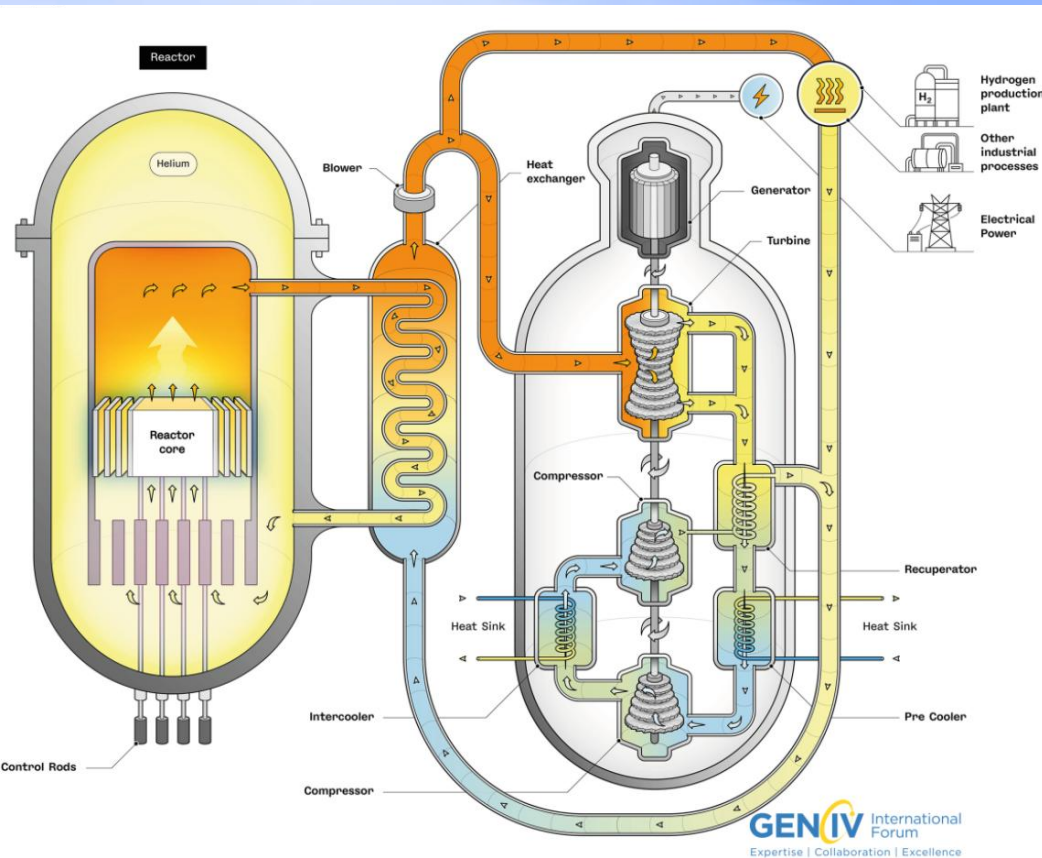
Depuis 2021, en Russie, construction d'1 LFR (BREST-OD-300 Mwe, cuve en béton armé), entrerait en fonction fin 2026

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Gas Fast Reactor, **GFR** ou RNR-G

2^{ème} Alternative

Caloporteur = l'HÉLIUM = gaz léger sous pression



↑ en faible quantité, ne nuit pas à l'obtention de n rapides

↑ rendement > 45 %

↑ haute température (800 à 850°C) pour applications industrielles

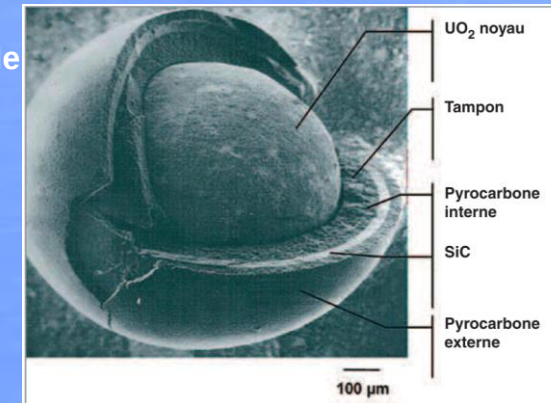
↓ évacuation de puissance résiduelle (= énergie des désintégrations de noyaux radioactifs) en cas de dépressurisation de l'hélium

↓ confinement des matières radioactives portées à très haute T° lors d'un ACCIDENT DE REFROIDISSEMENT

...



microbilles de combustible
entourées de multiples
couches de carbone et
céramique
= particules enrobées



une particule UO₂-TRISO-SiC
(source CEA) (enrichi jusqu'à 20
% en 235 U)

⇒ recherches sur le MATERIAU de la coque des microbilles contenant le combustible qui assurerait le CONFINEMENT en situation accidentelle.

Exemple = réacteur expérimenté au Royaume-Uni (1962 – 1975)

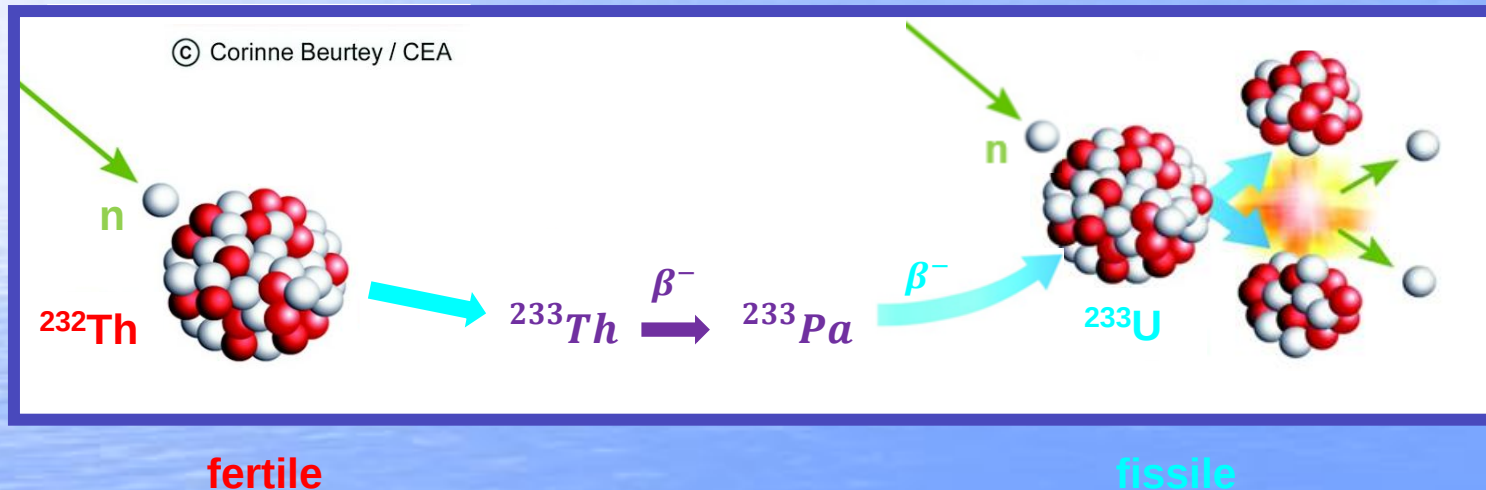
Les réacteurs de IV^{ème} génération

Régénération avec le thorium

Autre noyau pour régénération : ^{232}Th

↑ abondant sur Terre, 3 à 4 X + que l'uranium

Inde : 25 % des réserves mondiales connues de Th



↑ Th moins massif que l'U,
production moindre d'AM

Th n'a pas d'isotope fissile,
⇒ pour amorcer un réacteur au Th,
il faut de l'U enrichi en ^{235}U ou du Pu
↑ réduction des stocks de Pu

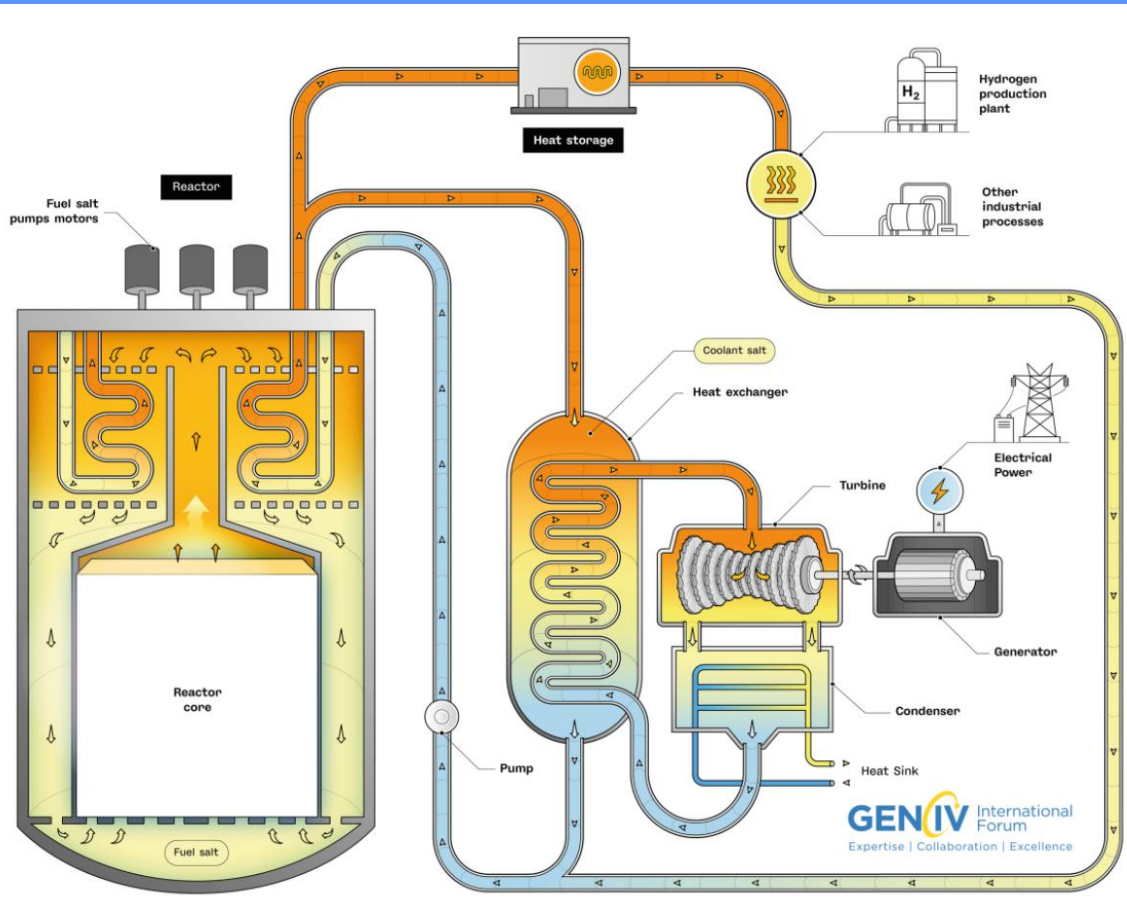
↑ Contrairement cycle $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$, cycle $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ envisageable avec neutrons thermiques

↓ production de ^{233}Pa ($T_{1/2} = 27 \text{ j}$) absorbant les neutrons, "empoisonne" le ♥

↓ retraiter rapidement le combustible (extraire ^{233}Pa et les PF)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Molten Salt Reactor, **MSR**, réacteurs à sels fondus RSF



⇒ combustible liquide

dissous dans SEL fondu (LiF , BeF_2) à $600\text{-}900^\circ\text{C}$
= fluide caloporteur

↑ ↓ régénérateur si retraitement du sel en ligne (bilan neutronique)

↑ rechargement possible sans arrêt du réacteur
modéré par du graphite (n_{th}) ou sans modérateur (n_{rap}),

↑ peut fonctionner sous P_{atm}

↑ rendement > réacteurs actuels (car T° élevée)

↑ avec des n rapides, possible incinérer Pu et AM = combustibles

↑ capacités de suivi de charge (variatⁿ la puissance ⇔ +/- de sel)

↓ technologie complexe en totale rupture avec réacteurs existants

↓ considérable effort de recherche sur sel et matériaux (corrosion,, physico-chimie, ...)

↓ + sur neutronique d'un combustible en mouvement (combustible-calporteur, pilotage de la criticité), procédés retraitement ...

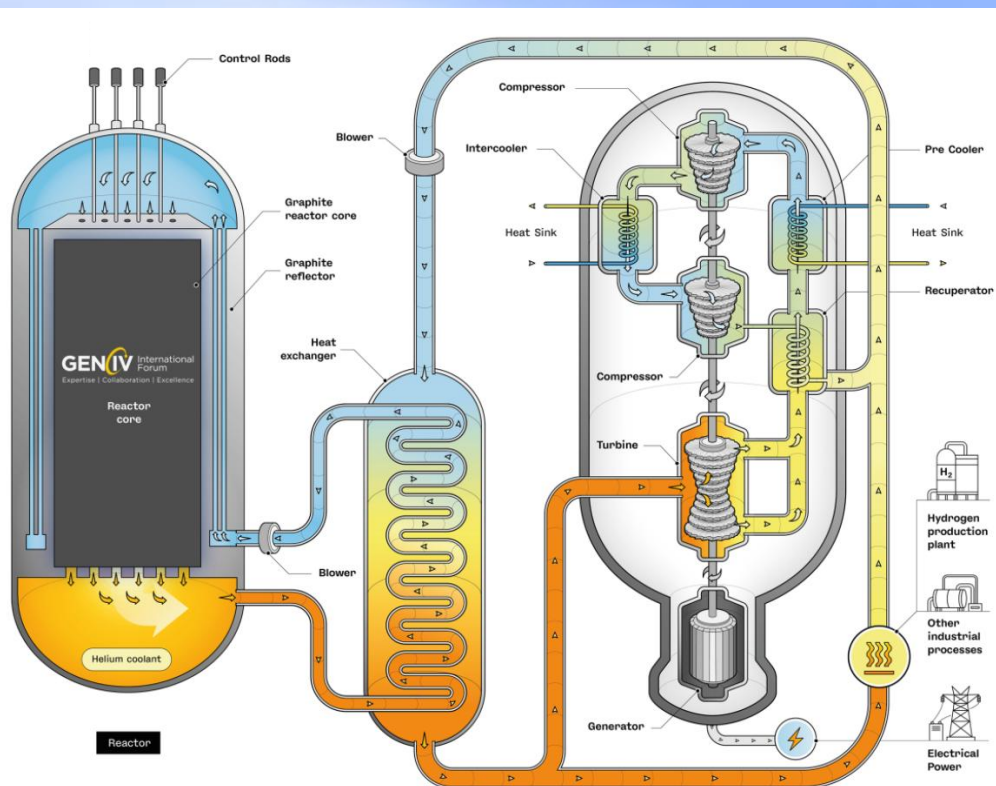
Recherches sur RSF menées par le CNRS, avec CEA, Framatome, ORANO, EDF, en Europe avec SAMOFAR

Actuellement, réalisation 2 prototypes américains de faible puissance 2 MSR ont fonctionné aux USA 1954 - 1965 → 1970

1 réacteur en fonctionnement en Chine depuis 2023, projets au Canada, Norvège, Russie

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Very High Temperature Reactor, **VHTR** – Super Critical Water cooled Reactor, **SCWR**



⇒ Réacteur à très haute température = **VHTR**

modérateur = graphite → n thermiques

caloporteur = gaz d'hélium

combustible = U ou Pu ou déchets (AM)

↑ haut rendement thermodynamique (70 %)

↑ 1000°C à la sortie du ♥,

☞ chaleur fournie à des industries

↓ Tenue des matériaux

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

⇒ Réacteur à eau supercritique = **SCWR**

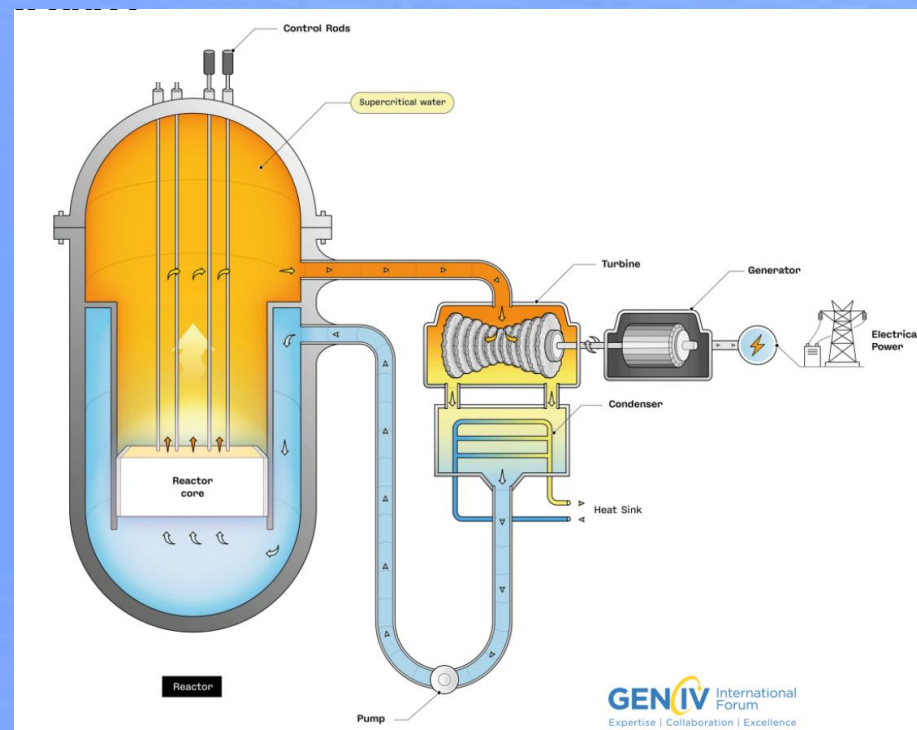
modérateur = eau = caloporteur (> 374 °C, > 221 bars)

→ neutrons thermiques ou rapides selon design ♥

↑ rendement élevé ≈ 45 % (~ 33 % réacteurs actuels)

↓ qualification des matériaux aux hautes T°

↓ démonstration sûreté passive du système

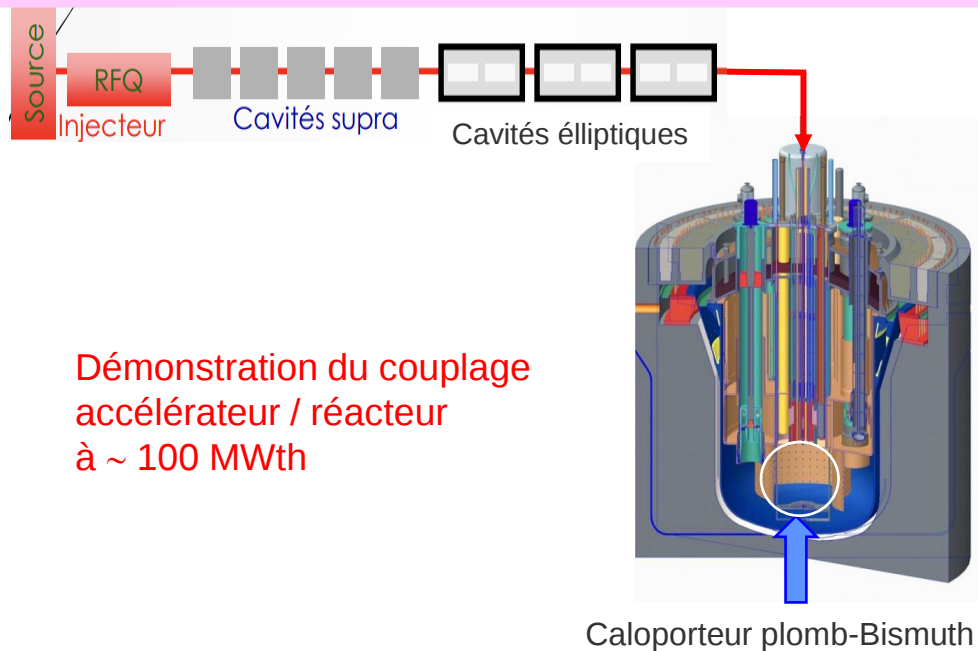


Les réacteurs pilotés par accélérateurs

Accelerator Driven System, ADS

Accélérateur LINAC	
Particules	Protons
Energie	600 MeV
Faisceau	4 mA

Réacteur	
Puissance	65 to 100 MW _{th}
k_{eff}	~ 0,95
Combustible	MOX



ADS MYRRHA = Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications

ADS $\Rightarrow$ objet d'intenses études de faisabilité

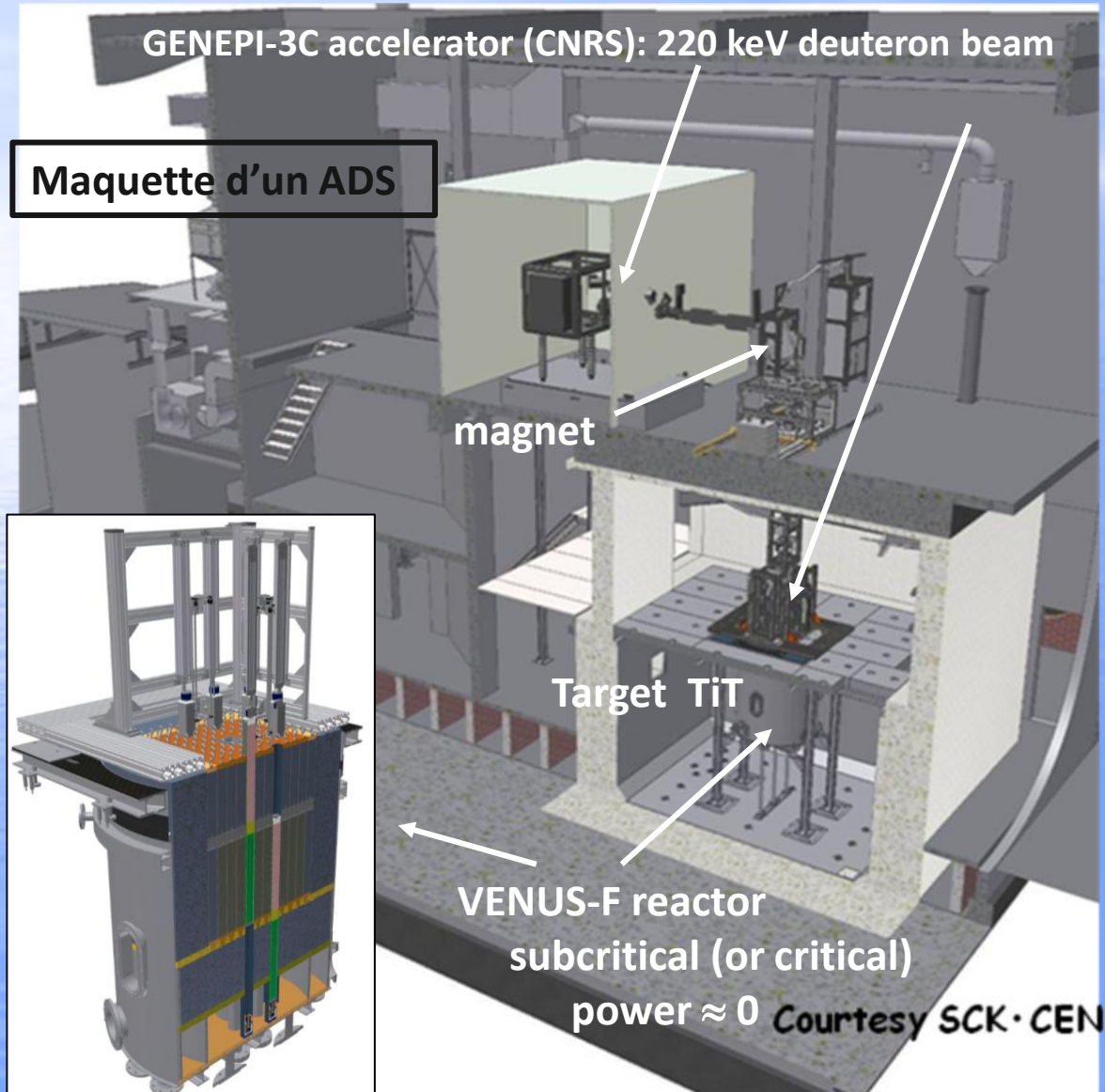
- ✓ potentielle capacité à transmuter des AM (= Np, Am, Cu) produits par les filières actuelles
- ✓ particularité : « sous-critiques » ($k < 1$) $\Rightarrow$ réaction en chaîne ne peut ni démarrer ni s'entretenir sans apport de n externes
- ✓ accélérateur $\Rightarrow$ protons de 600 MeV + cible de métal lourd au ♥ du réacteur (ex : Pb/Bi (45%/55%) liquide $\Rightarrow$ réacteur = RNR)
- ✓ $\Rightarrow$ réactions de spallation (= fragmentation du noyau cible) libèrent des n (+ particules), jusqu'à ~ 30 n pour 1 p d'1 GeV
- ✓ $\Rightarrow$ n provoquent fissions dans combustible (U, Pu, AM)
 $\Rightarrow$ générer certaine puissance, $\searrow$ à 0 par arrêt de accélérateur

Construction démonstrateur MYRRHA ~ 100 MWth, (SCK-CEN-Belgique - 1,6 Milliard d'euros) :

- accélérateur, achevé en ~ 2033
- réacteur, mis en service en ~ 2036

Les réacteurs pilotés par accélérateur

Maquette d'un ADS = Guinevere



- ✓ Contrôle de puissance par accélérateur $\Rightarrow$ utiliser combustibles avec AM en forte concentration ($j' \nearrow 45\%$),

AM produisant peu de n retardés*, rendent très délicat le pilotage des réacteurs REP en mode critique

* n émis par PF avec retard de qq secondes en moy. après la fission. Par ce décalage, ils permettent le pilotage des réacteurs

- ✓ Défis pour ADS :

- maîtriser chimie du Pb liquide

- haut niveau de fiabilité du faisceau de particules

ADS étudiés depuis + 20 ans, en particulier en Europe
& en France,

avec intense R&D sur les accélérateurs linéaires

Equipes du LPC (Laboratoire de Physique Corpusculaire) de Caen et LPSC (Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie) de Grenoble (CNRS & UNICAEN) travaillent sur l'installation GUINEVERE à Mol, Belgique au SCK-CEN.

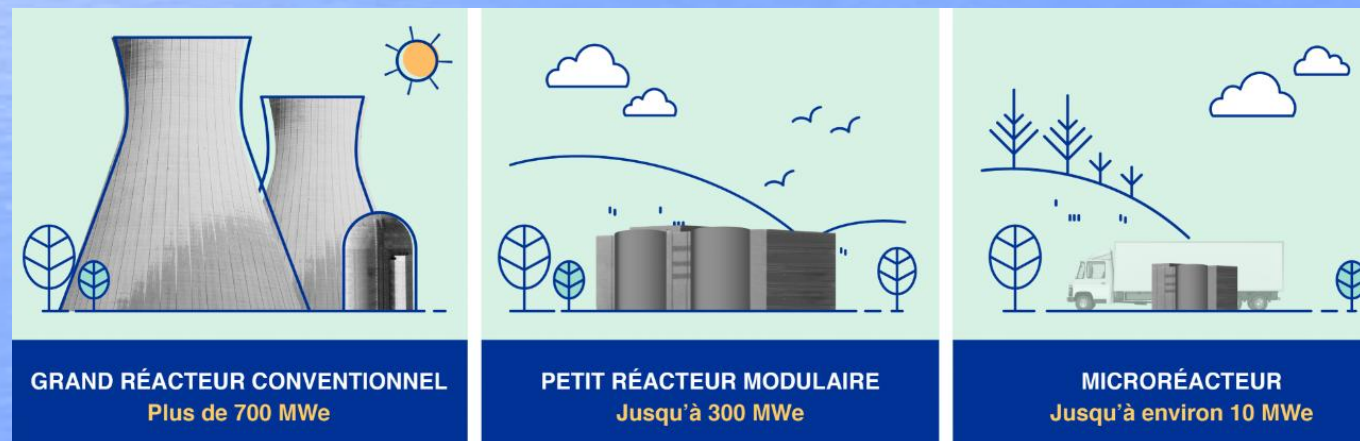
Les technologies du futur

Small Modular Reactor, SMR = petits réacteurs modulaires

Distinctions :

- ✓ Modulaires : systèmes et composants fabriqués en série, testés et assemblés en usine, puis transportés en tant qu'unité ou module vers un site d'implantation
- ✓ Faible puissance : < à 300 MWe, moyenne SMR existants $\approx$ 100 MWe
- ✓ Sous-catégories : MMR = Micro Modular Reactor = microréacteurs < 10 MWe ($\approx$ consommation de + 5 000 foyers 24 h/24, tous les jours, pendant + 10 ans)

AMR = Advanced Modular Reactor = réacteurs « innovants » de faible / moyenne puissance
Avec avancées technologiques des réacteurs GEN-IV



- ✓ Adaptables : Plusieurs unités ou modules connectés pour fournir une puissance adaptable aux besoins
- ✓ Compacts : faible empreinte au sol, utilisation moindre d'eau de refroidissement

Small Modular Reactor, SMR = petits réacteurs modulaires

Différences - Défis



- ✓ **Flexibles** : mieux adaptés à un suivi de charge pour compenser les variations :
 - de consommation
 - ou de production des E renouvelables intermittentes (éolien, solaire)
- ✓ Sûreté repose systèmes passifs et caractéristiques intrinsèques + sécurité accrue :
 - ⇒ **éliminer ou ↘ considérablement le risque de rejets radioactifs si accident**
 - ⇒ **lutter contre les risques de prolifération**
 - Ex : **SMR immergés dans piscine et / ou construits en souterrain**
- ✓ **Besoins en combustible ↘, renouvelé tous 3 à 7 ans (≠ centrales traditionnelles : 12 à 18 mois)**
 - ex : **conçus pour fonctionner j'↗ à 30 ans sans renouvellement du combustible**

Défis :

Répondre normes de sûreté de l'AIEA et orientations en matière de sécurité nucléaire & de non-prolifération

Compétitivité économique à prouver par un déploiement à grande échelle

Développement / qualification nouveaux composants / combustibles,

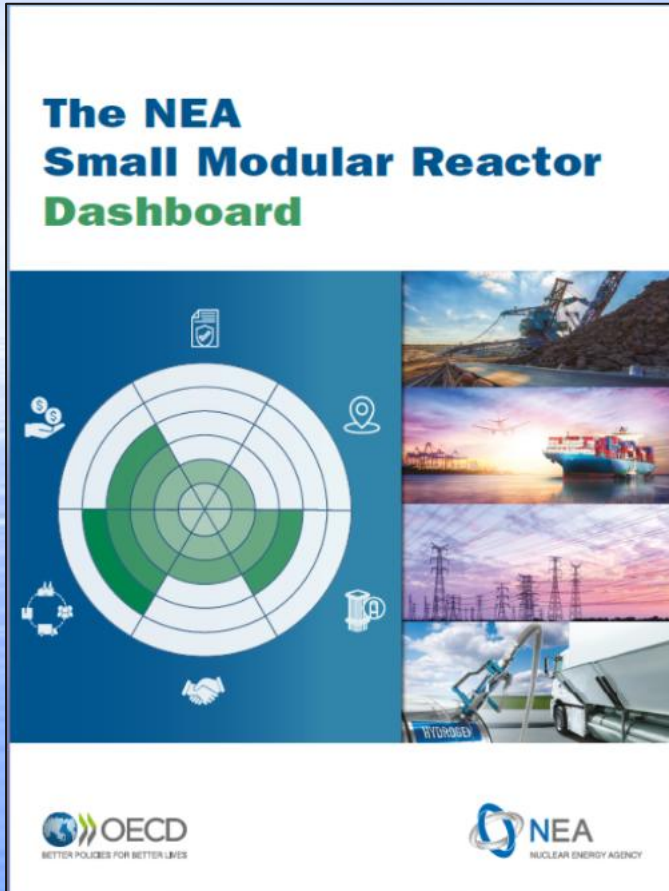
Acceptabilité sociale ?

Modalités de fonctionnement ? **Gestion des combustibles usés ?**

SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

Ambitions

Ambitions :



- ✓ ↘ coûts & risques d'investissement, ↘ délais de construction
(EPR Flamanville 3 G€ → 20 G€, retard 12 ans)
- ✓ déploiement d'ici 2035
- ✓ Ouvrir marchés de fourniture d'électricité à très faible émission de C :
 - sites isolés, difficiles d'accès (Grand Nord, archipels d'Asie du Sud-Est, communautés minières isolées, plateformes offshore ...)
 - petits réseaux de distribution électrique
 - remplacer centrales utilisant combustibles fossiles (charbon, gaz), groupes électrogènes alimentés au gazole

→ édition 2025 du tableau de bord des SMR par l'



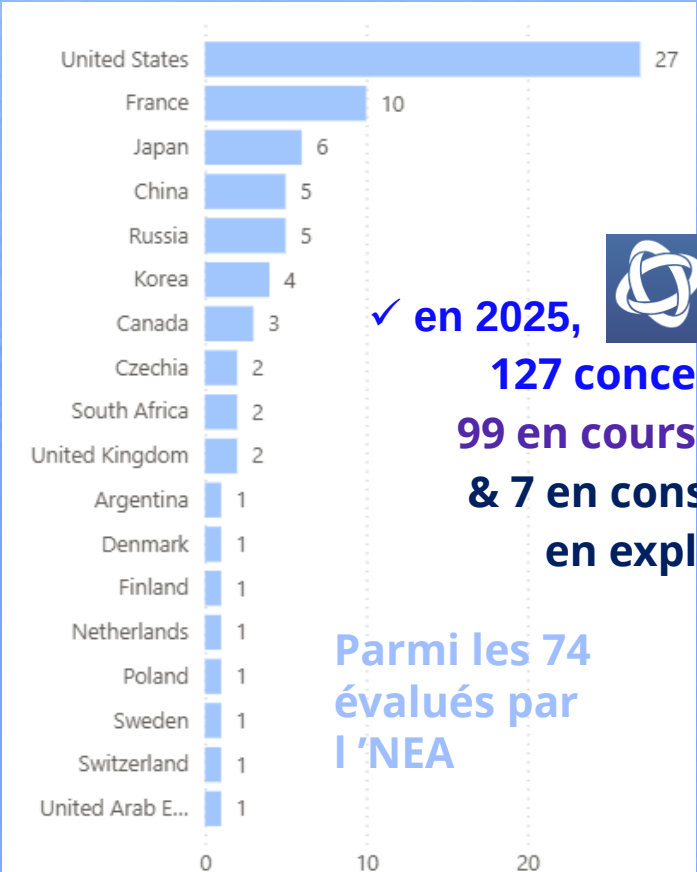
SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

Ambitions - Types

Température cœur SMR	Fluide de refroidissement	Filière	Applications SMR (hors électricité)
100-200°C	Eau bouillante	BWR	Chauffage urbain (cogénération)
200-400°C	Eau pressurisée lourde	PWR parfois qualifié de « i-PWR » (module intégré)	Désalinisation Électronucléaire (II ^e et III ^e génération)
	Eau lourde	HWR	
400-550°C	Métal liquide, sodium, eau supercritique	SFR (fast) LFR (fast) SCWR	Pâte à papier Raffinage hydrocarbures Fabrication méthanol
550-700°C	Sels fondus	MSR MSFR	Production hydrogène par reformage du méthane
700-1 000°C	Refroidissement gaz	GCR GFR	Production hydrogène par dissociation thermique Gaz de houille
> 1 000°C VHTR	Hélium	VHTR	Métallurgie Production hydrogène

➤ //t à la production d'électricité, assurer des services non électriques ou produire d'autres vecteurs d'E

✓ SMR : toutes technologies de réacteurs = versions réduites de modèles existants et éprouvés, jusqu'à des concepts innovants (GEN- IV)



✓ en 2025,  a identifié 127 concepts de SMR dont 99 en cours de développement & 7 en construction ou en exploitation

Parmi les 74 évalués par l'NEA

SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

SMR en exploitation ou en construction

- ✓ Aux abords de la côte arctique de la Russie, la centrale nucléaire flottante Akademik Lomonosov abrite 2 SMR KLT-40S de 35 MWe chacun (REP).

connecté au réseau en 2019, exploitation commerciale en 2020

utilisée pour fournir de l'électricité et de la chaleur aux communautés locales



- ✓ en Chine, centrale de démonstration industrielle d'1 HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) de 210 MWe, connectée au réseau en décembre 2021

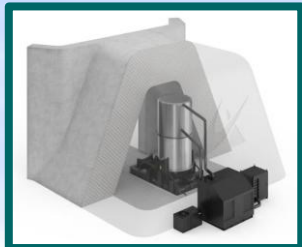
Japon : HTGR de 30 MWth de l'Agence japonaise de l'énergie atomique a redémarré ses activités le 30 juillet 2021



- ✓ D'autres SMR sont en construction ou au stade de l'autorisation :
ex : en Argentine (réacteur Central Argentina de Elementos Modulares = CAREM de 27 MWe), prototype petit REP

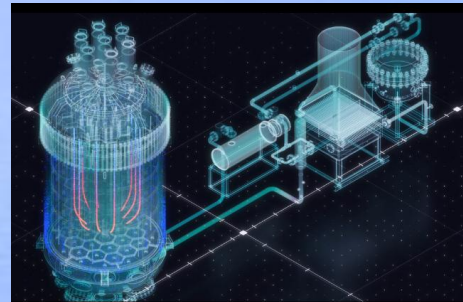
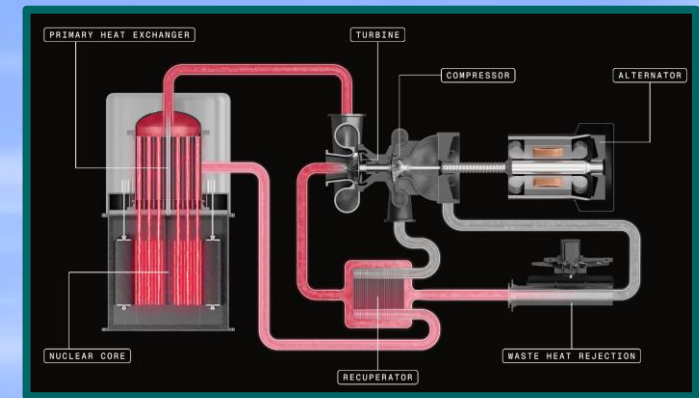
SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

USA 5 SMR ont atteint la criticité en 2026



Antares Nuclear, 4 juin, prototype réacteur (Mark-0) refroidi au sodium, alimenté en combustible Triso (mise en service en 2028)

⇒ précurseur du réacteur R1 pour applications de défense et spatiales



Valar Atomic, 18 juin, réacteur d'essai Ward 250 (100-kWth).

Réacteur à gaz (He) à haute température, combustible TRISO (à base d'U moyent enrichi (Haleu)), modéré par du Gr (100 kWth)

Deployable Energy, 1^{er} juil., microréacteur Unity de 1 MWe = « batterie nucléaire », modéré à l'eau et refroidi au gaz et fonctionnant à haute T°

⇒ alimenter potentiellem^t des centres de données, installat^{ns} de recherche et sites d'extraction de ressources en zones reculées.



Aalo Atomics, 4 juil., réacteur expérimental (Critical Test Reactor, CTR), microréacteur refroidi au sodium et alimenté en U faiblement enrichi, 10 MWe, sera déployé par 5 modules (Aalo Pods de 50 MWe)

⇒ alimenter des centres de données dédiés à l'intelligence artificielle.



Oklo, août, réacteur d'essai Groves, RNR
⇒ Production d'isotopes

SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

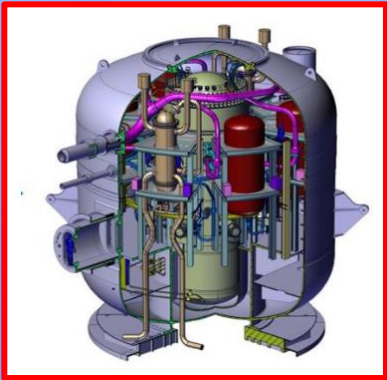
SMR en cours de conception en France en 2025

Nom	Entreprise	Siège	puissance thermiq. (MWth)	T° sortie de cœur (°C)	Concept
Blue Capsule	Blue Capsule Technology	France	150,00	750	Metal-cooled
démarrage démonstrateur en 2035					
Cal-30	Gorgé-Calogena	France	30,00	110	Water-cooled
début construction 2030, achevée en 2033					
HEXANA	HEXANA	France	800,00	530	Metal-cooled
tête de série 2031, exploitation 2035 (dans le Gard)					
Jimmy HTR	Jimmy	France	10,00	550	Gas-cooled
prêt 2026-2027					
XAMR	NAAREA	France	80,00	625	Molten salt-cooled
1ères unités opérationnelles d'ici 2030 (janv. 2026 : dépôt de bilan)					
LFR-AS-200	newcleo	France	480,00	530	Metal-cooled
1er réacteur tête de série fin 2033					
NUWARD SMR	NUWARD	France	1 000,00	307	Water-cooled
chantier de démonstrateur ~ 2030, mise en service 2035					
Otrera 2x300	Otrera New Energy	France	600,00	550	Metal-cooled
mise en service 2035 (usine aux Pieux)					
Stellarium	Stellaria Design	France	1 080,00	750	Molten salt-cooled
LFR-AS-30	newcleo	France	90,00	530	Metal-cooled
prototype mis en service d'ici 2031 à Chinon					

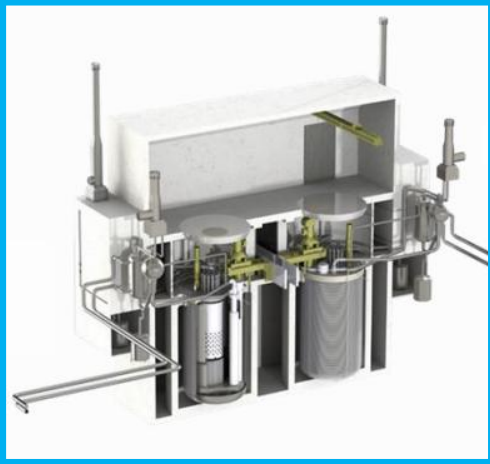
Projets portés par les industriels du nucléaire ou des start-ups

En 2023, 8 lauréats appel à projets réacteurs nucléaires innovants, lancé par le programme France 2030

En 2026 : 2 lauréats phase 2 du prog. (dédiés production de chaleur)



NEA SMR Dashboard
2025





- Lutter contre réchauffement climatique majeur
- Répondre à l'explosion de la demande énergétique française et mondiale
- Ne plus recourir aux énergies fossiles non renouvelables (pétrole, gaz ou charbon) très émettrices de GES

Il faut :

- ✚ faire des économies d'énergie
- ✚ réduire notre consommation
- ✚ développer les énergies renouvelables

✚ DÉVELOPPER davantage
le NUCLÉAIRE

ATOUTS

- ↑ produire massivement de l'électricité
- ↑ contribue très peu à l'effet de serre
- ↑ pas intermittente
- ↑ source d'E ~ illimitée si on change de technologie :
régénérateurs à neutrons rapides
ou réacteurs à cycle Thorium

Ambitions de La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) en France :

- atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050
- réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français

Acceptable si continue efforts :

- ✓ Améliorer / trouver solutions robustes, durables pour gestion des déchets
- ✓ maintenir sûreté et sécurité élevées
- ✓ rehausser standards de non-prolifération
- ✓ ↗ rendement des réacteurs

...

Décisions & budgets conséquents à court/moyen terme pour effets à long terme

✚ points essentiels ont été pris en compte dans les concepts de réacteurs de génération III et IV & ADS & SMR

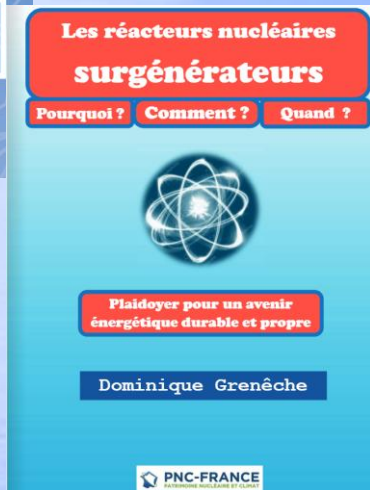


<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie>

[datalab_essentiel_342_bilan_energetique_donnees_provisoires_mai2024.pdf](#)

<https://analysesetdonnees.rte-france.com>

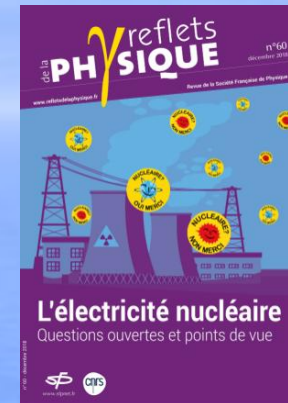
<https://www.pnc-france.org/les-reacteurs-nucleaires-surgenerateurs/>



<https://www.cea.fr>

<https://www.academie-sciences.fr>

<https://www.refletsdelaphysique.fr/>



<https://www.iaea.org> <https://pris.iaea.org/pris/>

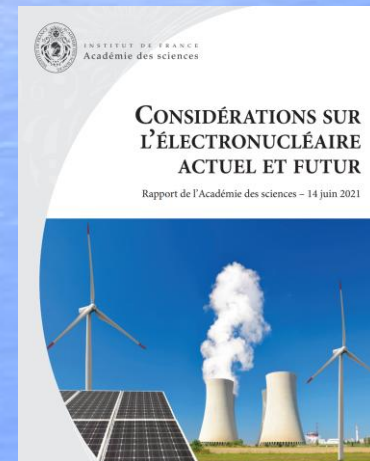
<https://www.irsn.fr>

<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/composants-dun-reacteur-detail>

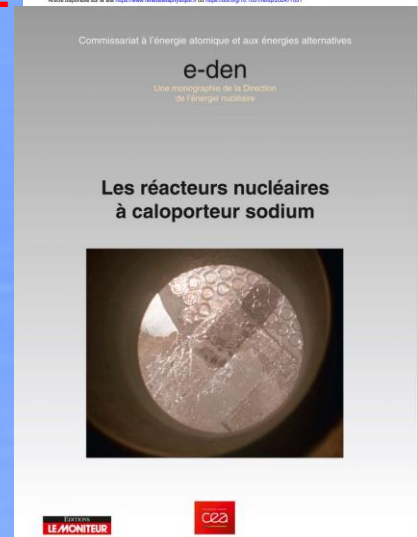
<https://www.connaissancedesenergies.org>

<https://fr.wikipedia.org>

<https://nuclear-safety.asn.fr>



<https://recherche-expertise.asnr.fr/savoir-comprendre/surete/presentation-generale-dun-reacteur-eau-sous-pressure>





<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2023/livre>
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7346/download?inline>

Bilan énergétique de la France en 2023 - Données provisoires

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7346/download?inline>

[datalab_essentiel_342_bilan_energetique_donnees_provisoires_mai2024.pdf](#)



<https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/apport-energie-nucleaire-transition-energetique.html>
https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/210614_rapport_nucleaire.pdf

https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/202403/20240207_CP_BilanElectrique2023_VF.pdf

https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-02/Bilan%20e%CC%81ectrique%202023%20synthe%CC%80se_29fev24.pdf

https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-03/Bilan%20%C3%A9lectrique%202023%20rapport%20complet_29fev24.pdf

<https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2023/production#Vuedensemble>

<https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/livret-reacteur.pdf>

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-reacteurs-nucleaires-du-futur.aspx>

https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/archives/fr/ence-abf_53fr.pdf

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-fonctionnement-reacteur-nucleaire-electrogene.aspx>

https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-pt-vue/lenergie_sous_toutes_ses_formes_-_definitions.pdf

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/histoire-de-lelectronucleaire-en-france>

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-nucleaire-smr-petits-reacteurs-modulaires>

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-nucleaire>

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reacteur-nucleaire-epr>

<https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-quune-energie-fossile>

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2024/01/refdp2024-77/refdp2024-77.html>

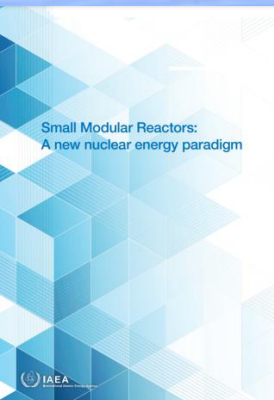
<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2024/01/refdp2024-77.pdf>

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2018/05/contents/contents.html>

<https://www.iaea.org/fr/bulletindelectronucleaire-et-la-transition-vers-une-energie-propre/petits-reacteurs-grand-potentiel>

<https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/Small%20Modular%20Reactors%20a%20new%20nuclear%20energy%20paradigm.pdf>

<https://nuclear-safety.asn.fr/l-asn-informe/actualites/rapport-de-l-asn-sur-l-etat-de-la-surete-nucleaire-et-de-la-radioprotection-en-france-en-2022>



<https://fr.wikipedia.org>

<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/differents-types-dechets-radioactifs>

SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

SMR en cours de conception en France

En 2023, 8 lauréats de l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants », lancé par le programme France 2030 :

Naarea = microréacteur RnR à sels fondus 40 MWe (**MSR**) (réacteur XAMR (extra-small advanced modular reactor) – 1ères unités opérationnelles d'ici 2030)

Newcleo = RnR refroidi au Pb liquide (**LFR**) avec MOX (30 MWe ou 200 MWe), prototype mis en service d'ici 2031 à Chinon, Startup associée avec Orano pour le développement de sa production de combustible

<https://www.youtube.com/watch?v=rYtRpR52T08>

Nuward = **REP**, 400 MWe et j'100 Wth en cogénération, REP sans bore (porté par EDF, CEA, Naval Group, Tractebel engie, Framatome), chantier de démonstrateur débutera en ~ 2030

Jimmy = réacteur à h^{te} température (**HTR**) (chaleur industrielle $T_{\text{fournie}} = 450^{\circ}\text{C}$, 60 MWth, Gr et He, chaleur échangée avec circuit rempli de CO_2 , durée = 20 ou 30 ans, fuel à particule TRISO, prêt 2026-2027)

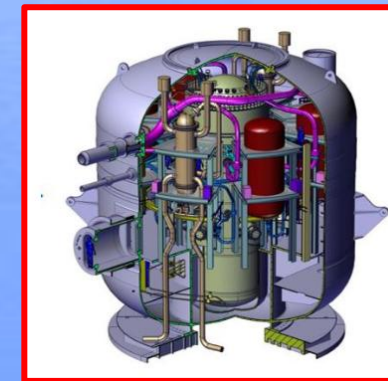
<https://www.sfen.org/rgn/reacteurs-innovants-nouveaux-acteurs-nouvelles-technologies-episode-5-jimmy/>)

En avril 2024, [la start-up Jimmy](#), a annoncé avoir déposé la première demande d'autorisation de construction pour un SMR, initialement envisagé sur le site industriel du sucrier Cristanol, à Bazancourt (Marne).

Calogena = combustible REP raccourci, 30 MWth, techno REP dérivée des réacteurs de recherche piscine, dédié au chauffage urbain, T° de sortie à $70^{\circ}\text{-}100^{\circ}\text{C}$, début construction 2030, achevée en 2033, durée > 60 ans, rechargement par $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ par an

https://www.sfen.org/rgn/calogena-et-le-cea-vont-etudier-limplantation-dun-smr-a-cadarache/?utm_source=Newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=RGN%20Hebdo%20-%20%2003/09/2025 :

Le CEA et Calogena ont signé une lettre d'intention le 27 août 2025 pour des études d'implantation d'un SMR calogène à Cadarache. Calogena a déposé en novembre 2024 [sa demande d'homologation auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire \(ASN\)](#), encore en cours d'instruction

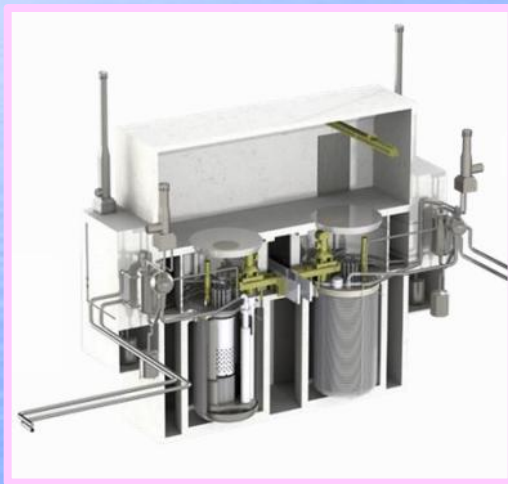


SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

SMR en cours de conception en France

En France, en 2023, 8 lauréats de l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants », lancé par le programme France 2030 :

Blue Capsule = RNR à haute température = HTR, combustible TRISO refroidi au Na, modérateur = graphite, échangeurs Na-air, fournit de la chaleur industrielle à 700°C max (ammoniac, verre, acier, soude, hydrogène), enterré, 150 MWth, 50 MWe /module, démarrage démonstrateur en 2035, startup essaimée du CEA, durée de vie chaudière 60 ans



Hexana = RNR-Na, 2 x 400 MWth, startup essaimée du CEA, chaleur industrielle Tmax = 500°C & électricité, réacteur + module stockage de chaleur, tête de série horizon 2035+, combustible MOX

Otrera = RNR-Na avec azote, 110 Mwe, 185 MWth, offrant 105 MW de chaleur utilisable en cogénération, mise en service 2032 (pas d'eau, pas d'air, 3^{ème} enceinte rapprochée, cœur renouvelé tous 10 ans, pas circuit intermédiaire, pas bâtiment cathédrale, 4 barrières de confinement, enterré, utilise assemblages usés des réacteurs)

