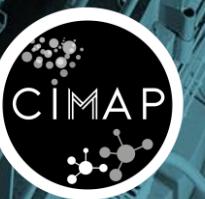
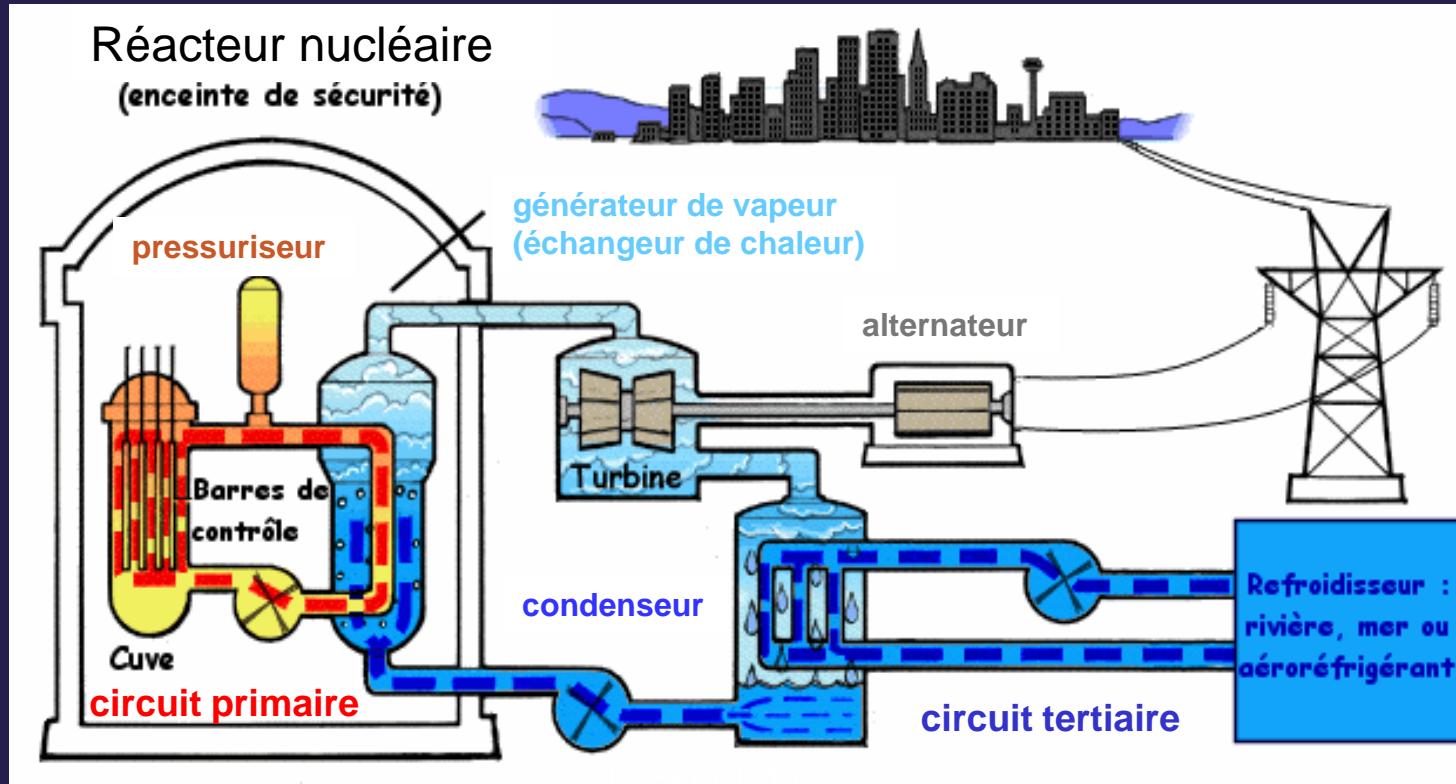


Profs au GANIL



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
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**

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad \rightarrow \text{électricité, gaz ...}$$



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

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

1 t charbon

\Leftrightarrow 4,66 à 8,16 MWh, selon sa qualité

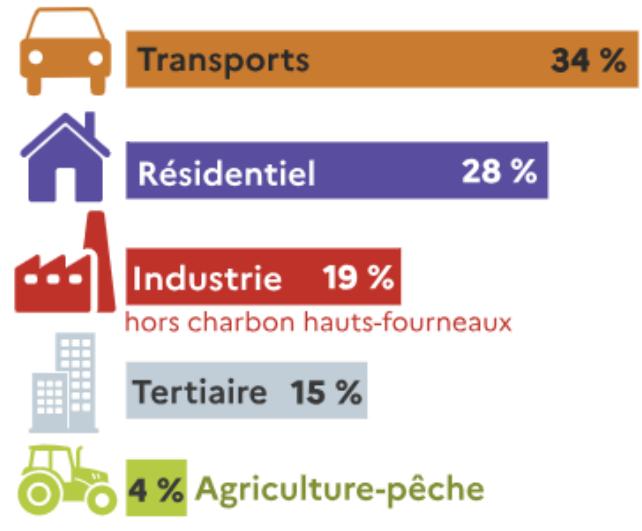
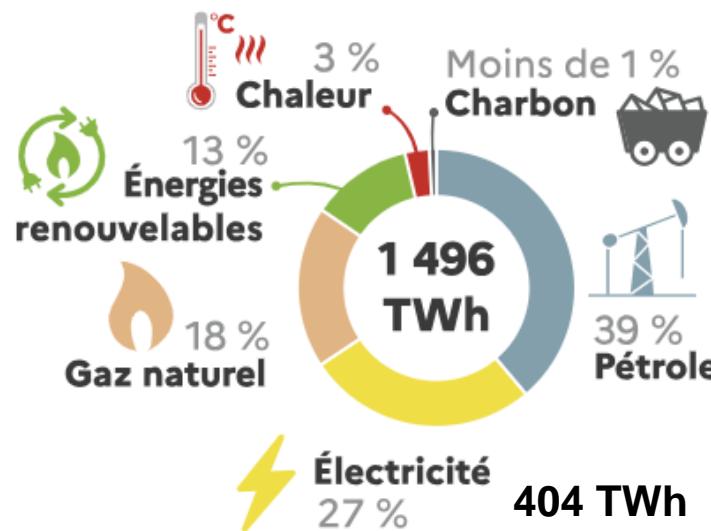
1 t gaz naturel ($\sim 1475 \text{ m}^3$)

\Leftrightarrow 14,5 MWh

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

\Rightarrow Densité énergétique massique du combustible nucléaire très élevée

Consommation finale à usage énergétique en France (2023) : par énergie – par secteur



= 509 TWh - 13 TWh \Rightarrow 2,5 % de son mix

= 418 TWh - 151 TWh \Rightarrow 36 %

= 284 TWh - 102 TWh \Rightarrow 36 % électricité

= 224 TWh - 125 TWh \Rightarrow 56 %

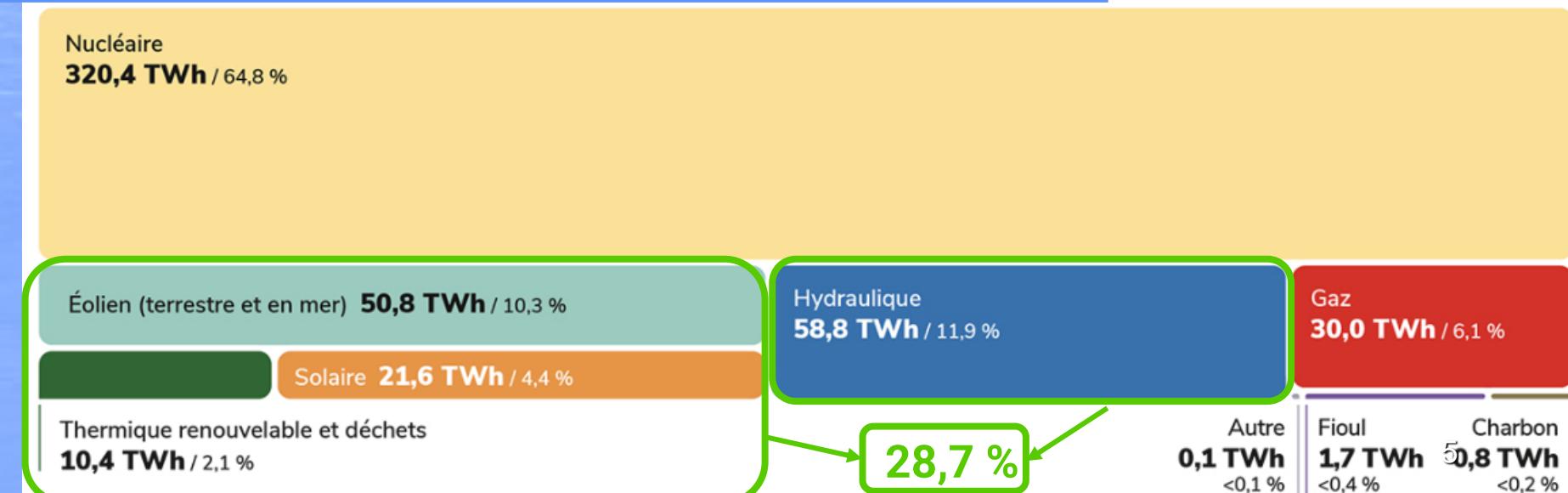
= 60 TWh - 7 TWh \Rightarrow 12 %

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

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique/fr/>

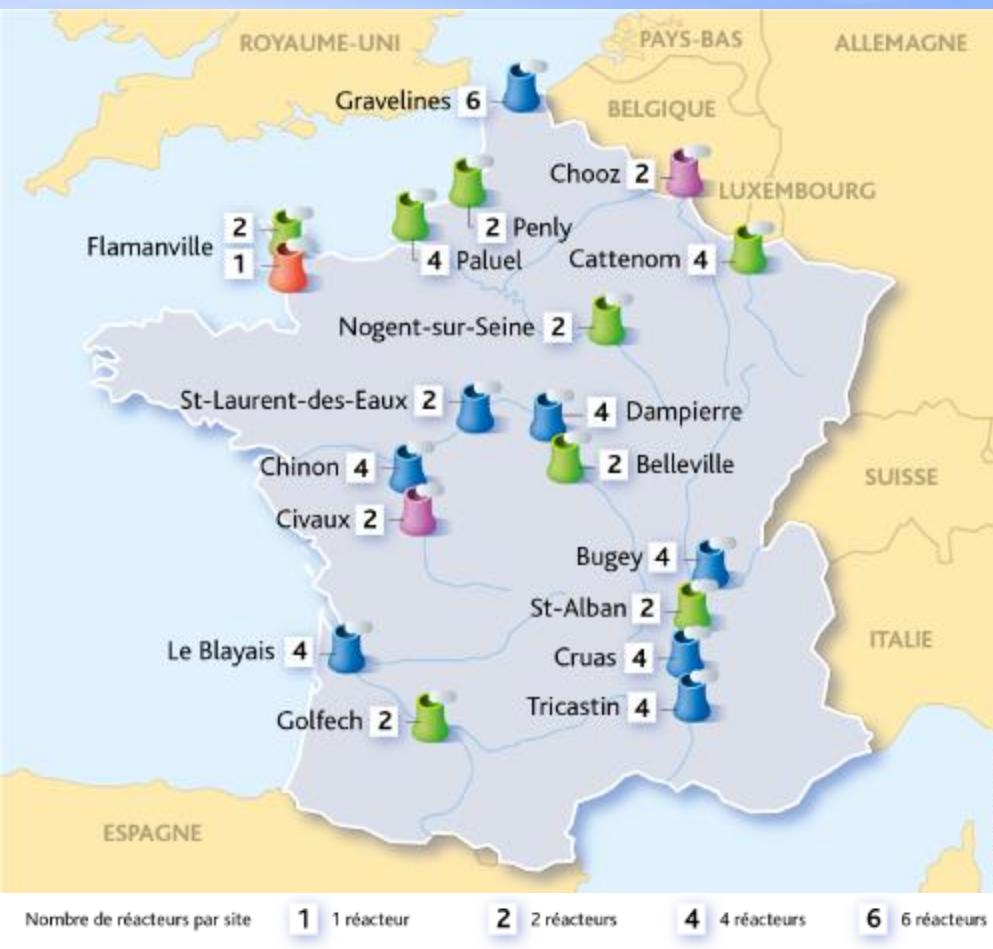
Production totale d'électricité en France (2023) : répartition par filière

Production totale : 494,7 TWh



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

Les 18 centrales nucléaires en France (au 31 décembre 2023)



<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/parc-reacteurs-nucleaires-francais>

Capacité installée de ~ 61,4 GW

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(en construction)	Mi-2024

16 ans



Mise en service 1 EPR (European Pressurized Reactor ⇔ Evolutionary Power Reactor) de Flamanville 2024 (= 1^{ère} depuis 2002 !!)
+ Fermeture 2 réacteurs Fessenheim 29 juin 2020,
→ France compte 57 réacteurs dont 56 REP (réacteur à eau pressurisée)

52 mis en service en 16 ans : 1978 ⇔ 1994

32 + anciens : puissance électrique nette 900 MWe

4 + récents 1500 MWe

20 autres 1300 MWe

1 EPR 1650 MWe

35 réacteurs utilisent combustible UOX,

22 réacteurs de 900 MWe utilisent combustibles MOX + UOX

Réacteurs dans le monde



Agence internationale de l'énergie atomique

416 NUCLEAR POWER REACTORS IN OPERATION

376 261 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

23 NUCLEAR POWER REACTORS IN SUSPENDED OPERATION

19 687 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

62 NUCLEAR POWER REACTORS UNDER CONSTRUCTION

65 040 MW_e TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

24 juin. 2025

Nombre de réacteurs nucléaires par pays (au 27 septembre 2021)

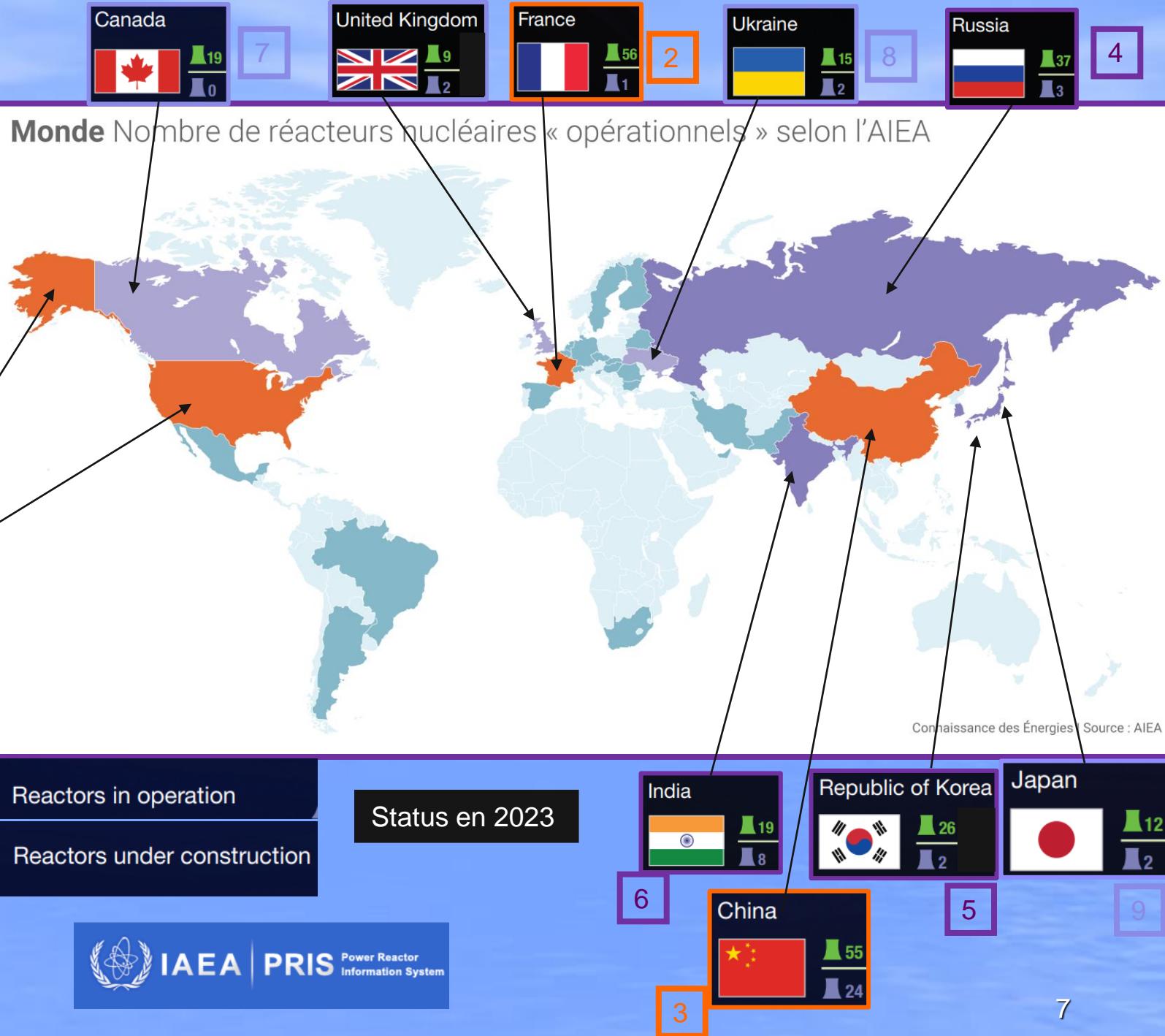
50 et plus

entre 20 et 49

entre 10 et 19

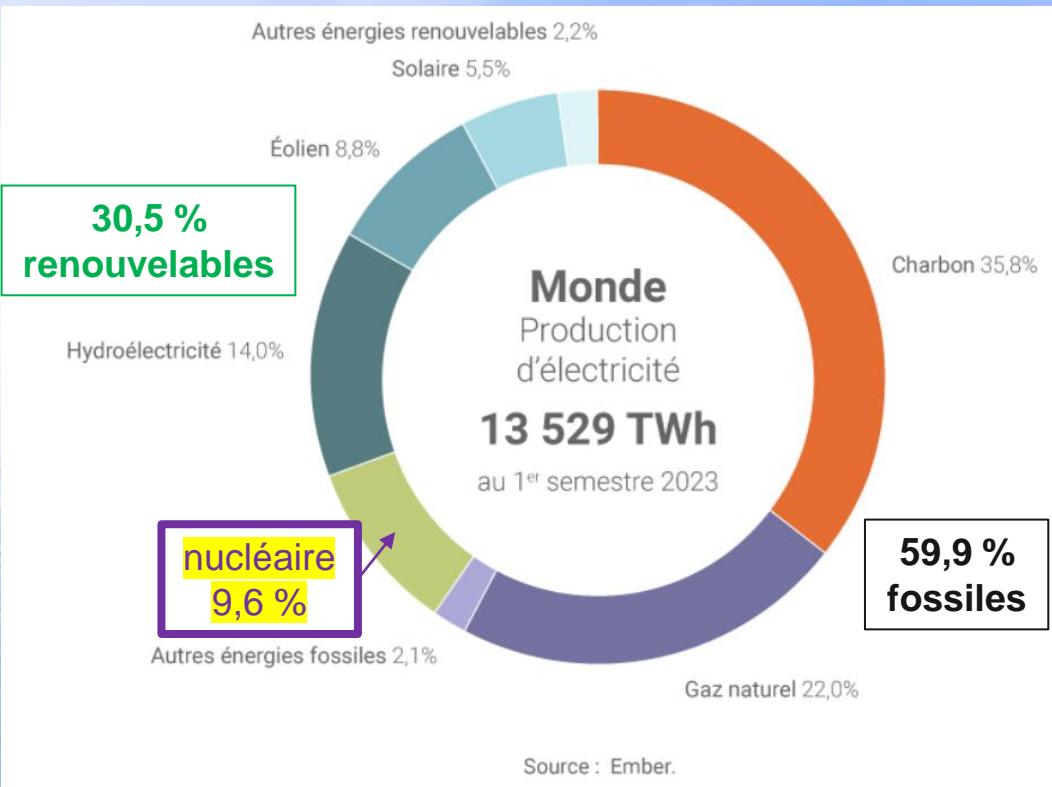
entre 1 et 9

REP + largement utilisés : 308 unités



Monde : Production d'électricité en 2023 & prévisions

En 2023, nucléaire ~ 10 % de production mondiale d'électricité,
contre ~ 60 % pour E fossiles & ~ 30,5 % pour E renouvelables



<https://www.connaissancedesenergies.org>

« La capacité mondiale de production nucléaire devrait passer de **416 GWe** en **2023** à **647 GWe** en **2050** dans un scénario fondé sur les politiques énergétiques existantes, selon les dernières *Perspectives énergétiques mondiales* de l'AIEA ». (World nuclear news 18 oct 2024)

Selon AIEA production mondiale d'électricité X 2 d'ici à 2050

En 2050, part du nucléaire :

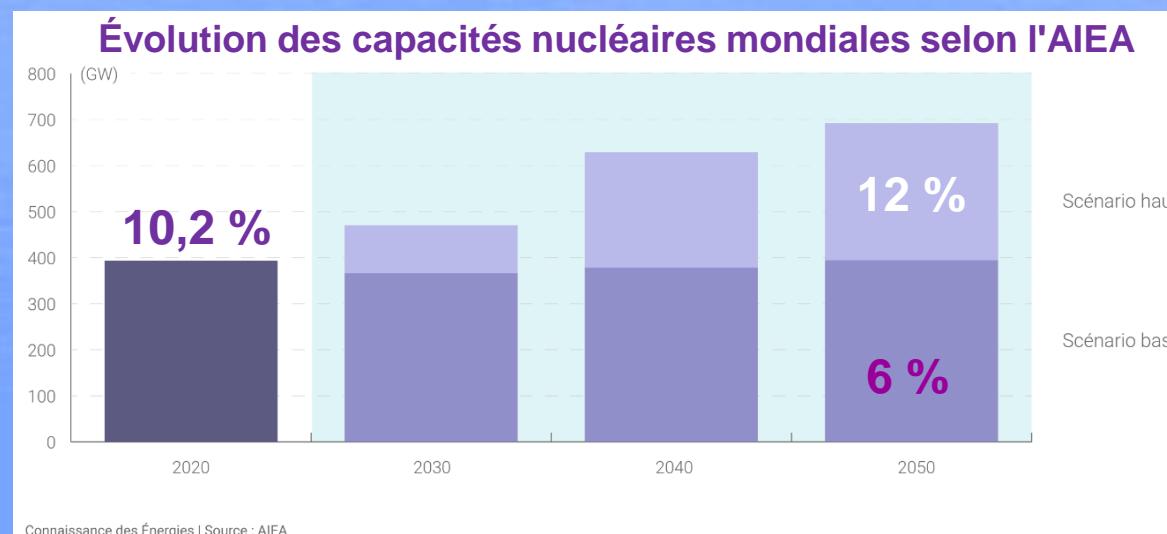
12 % du mix électrique mondial, scénario « haut »

6 %

contre ~ 10,2 %

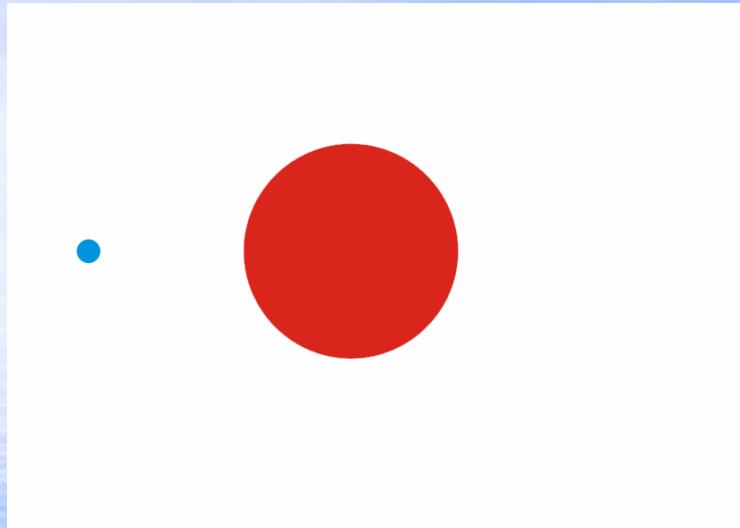
scénario « bas »

en 2020



Fonctionnement d'un réacteur

La fission nucléaire



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

neutron

lors collision avec 1 neutron, noyau lourd se brise en 2 noyaux + petits
= réaction de FISSION

= FRAGMENTS DE FISSION (FF), après désexcitation prompte (émission neutrons et gammas) ⇒ produits de fission (PF), radioactifs

lors fission, énergie dégagée $E \sim 200$ MeV

≈ E cinétique des PF (vitesse ≈ 8000 km/s) + E emportée neutrons faible

PF ralentis lors chocs subis avec atomes environnants, \uparrow arrêtés

→ Énergie perdue par PF échauffe le combustible

→ localement T° combustible \uparrow

chauffe l'eau entourant le combustible (du circuit 1^{aire})

→ transformée en vapeur (dans circuit 2^{aire})

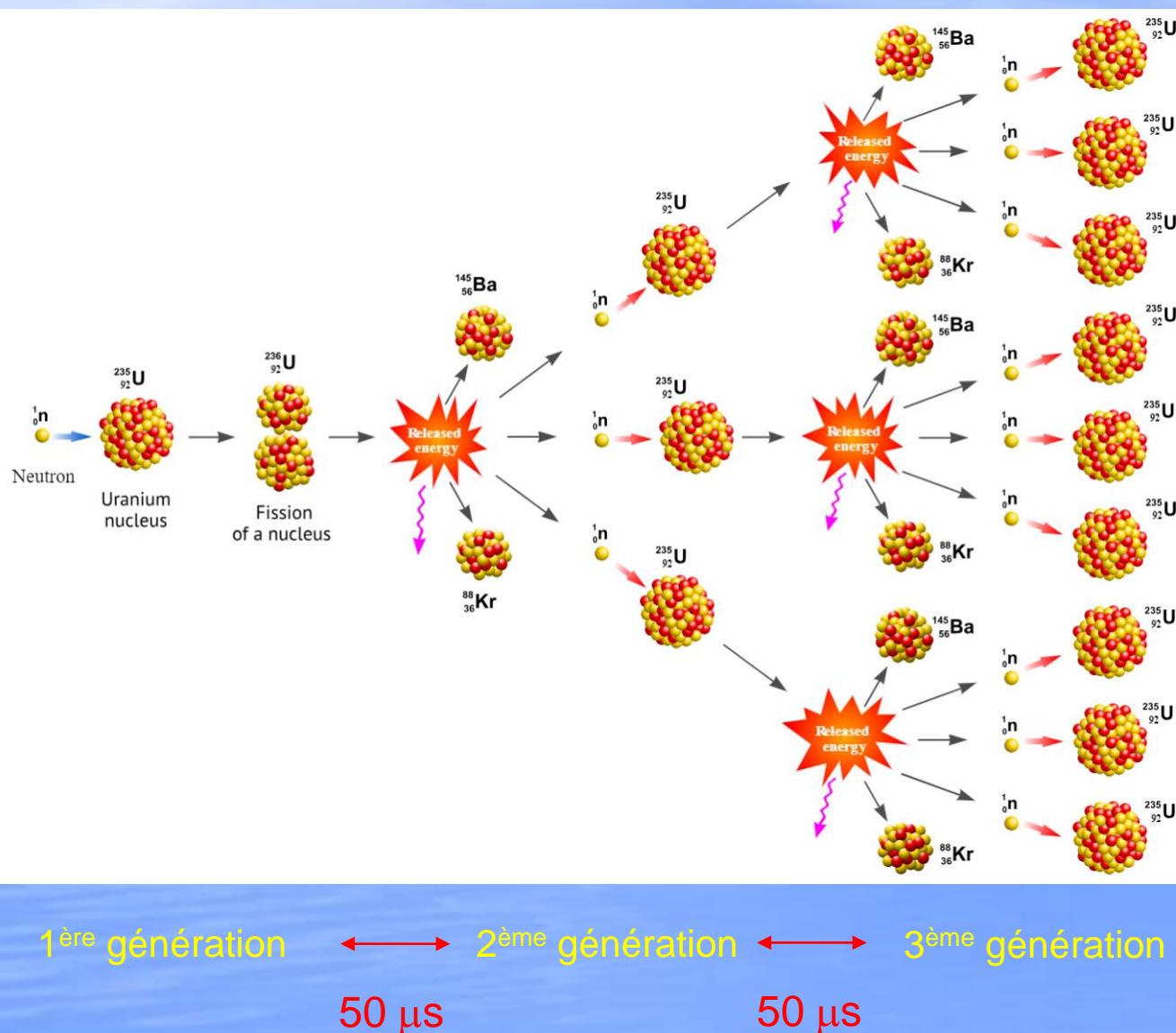
→ actionne turbine

→ production d'ÉLECTRICITÉ

→ couplée à alternateur

Fonctionnement d'un réacteur

La réaction en chaîne



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

chaque n peut interagir avec 1 autre noyau

si ${}^{235}_{92}U \Rightarrow$ nouvelle fission

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

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

= RÉACTION EN CHAÎNE

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

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

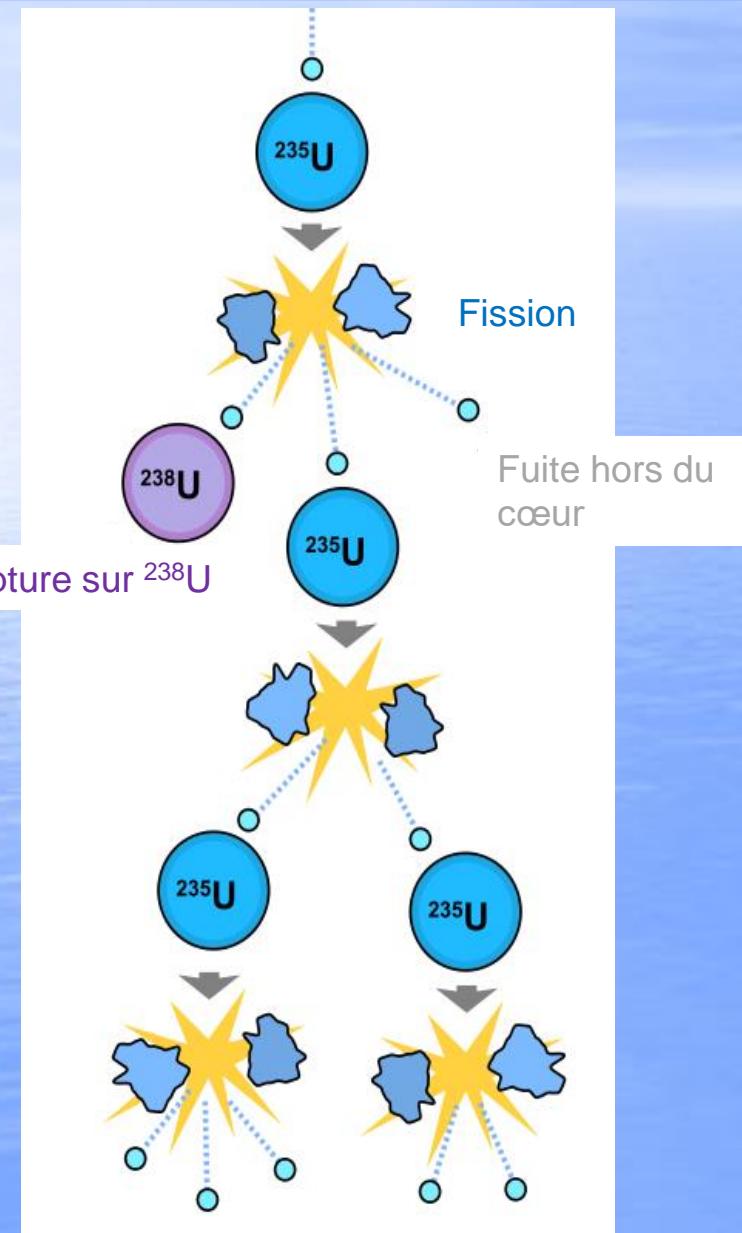
si seul 1 n, issu de chaque fission, provoque 1 nouvelle fission \rightarrow nombre de fissions constant d'1 génération à l'autre

\rightarrow quantité de chaleur libérée dans \heartsuit constante

\rightarrow puissance du réacteur stable

Fonctionnement d'un réacteur

Criticité



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

réacteur critique, puissance stable

\Rightarrow mode de fonctionnement RÉACTEURS actuels

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

réaction s'arrête rapidement sans apport extérieur de neutrons
réacteur sous-critique, puissance \downarrow jusqu'à l'arrêt

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

réaction en chaîne diverge vite

réacteur sur-critique, puissance ne fait que \uparrow ,

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

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

(système prompt-surcritique \Rightarrow BOMBES nucléaires)

Réacteur Crocus (Suisse)



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

Le cœur du réacteur : le combustible



pitchblende (U_3O_8),



uranite (UO_2)

Source : Le comptoir géologique

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

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

= fissillent quelque
soit $E_{neutron}$



^{238}U non fissile
→ il existe E_{seuil} ($\sim 1,3$ MeV)

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

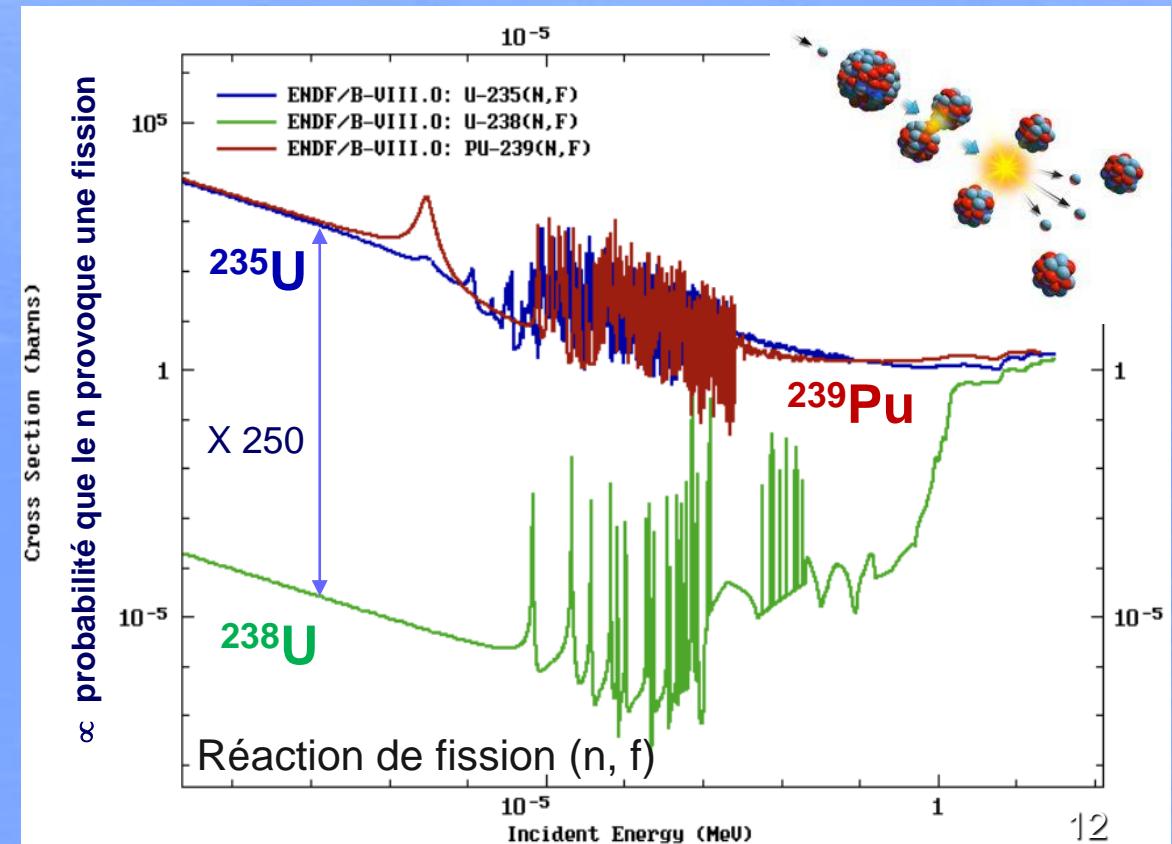
seul U existe dans la nature = métal dans roches uranifères (faible teneur)
combiné à autres éléments chimiques



→ Converti en UF_6

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)



\propto probabilité que le neutron provoque une fission

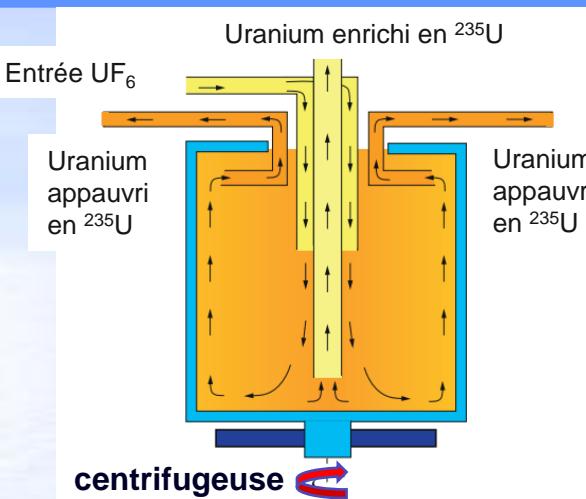
Réaction de fission (n, f)

10⁻⁵ 1 10⁻⁵

12

Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

le cœur du réacteur : le combustible



Assemblage
264 crayons
Crayon
 $h = 6 \text{ m}$
 $d = 1 \text{ cm}$
 $e = 1 \text{ mm}$
272 pastilles
Pastille
 $h = 1 \text{ cm}$
 $d = 8 \text{ mm}$



combustible = pastilles empilées
dans tubes ou « gaines » étanches = crayons
(1^{ère} barrière de confinement)
réunis en faisceaux = assemblages

La France importe 8 000 t à 10 000 t d'U naturel / an (2023)

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)

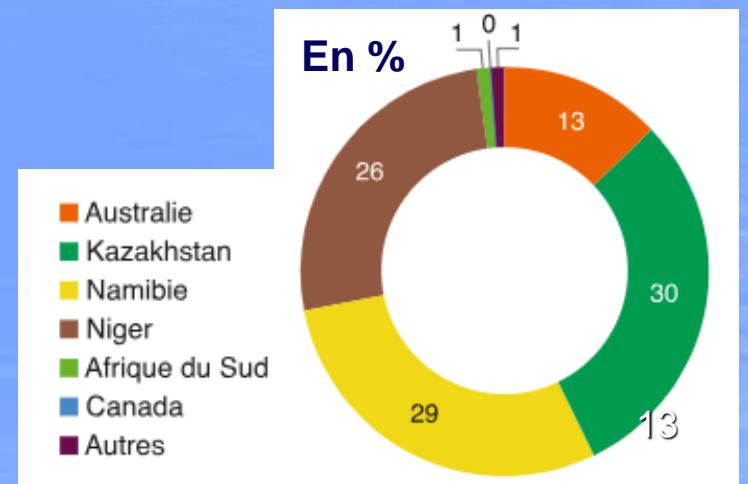
MOX = mixed oxides = $\text{PuO}_2 + \text{U}_{\text{appauvri}}\text{O}_2$

**U appauvri = sous-produit des procédés d'enrichissement de l'U ($\sim 0,28 \text{ \%}$ d' ^{235}U)
& de retraitement du combustible usé ($\sim 0,73 \text{ \%}$ d' ^{235}U)

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

→ différence de mobilité

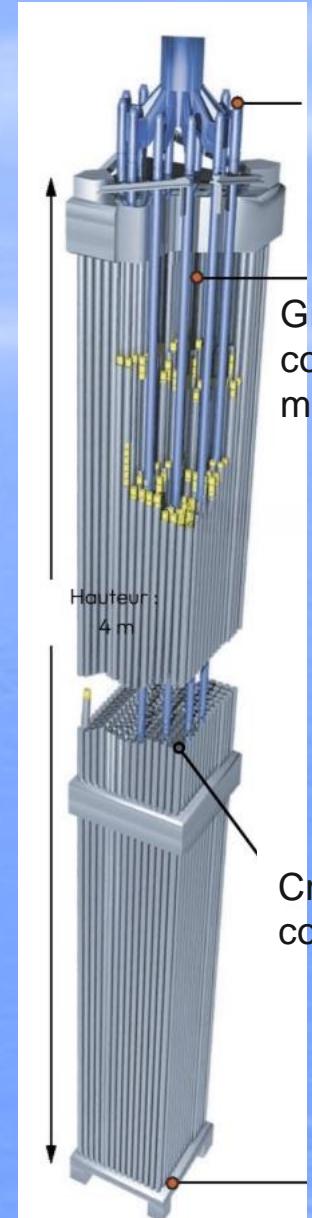
= ultracentrifugation (« essoreuse à salade »), remplace diffusion gazeuse
(UF_6 gazeux à 56°C, passage à travers membranes percées de trous)



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

Le cœur du réacteur : le combustible

Assemblage combustible



araignée

Grappes de commandes mobiles

Hauteur:
4 m

Crayon combustible

Plaque de pied

Réacteur de 1 GWe fonctionnant 1 an consomme :

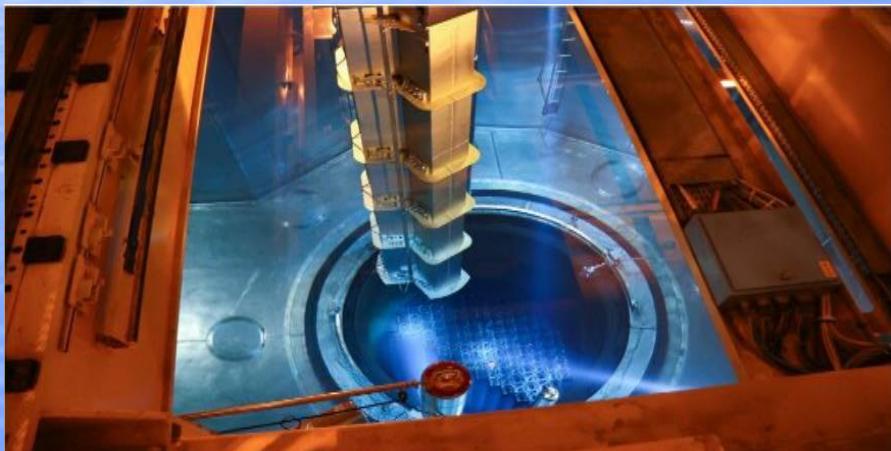
~ 180 t d'U naturel / an, 30 t d'U enrichi (à ~ 4 % en ^{235}U)

combustible usé = contient plus suffisamment noyaux fissiles pour maintenir réaction en chaîne

Combustible, gaine & 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 (relâchement de gaz de fission)

⇒ combustible périodiquement renouvelé



rechargement du combustible ⇒ arrêt du réacteur

fractionné :

seulement 1/3 ou 1/4 combustible rechargeé

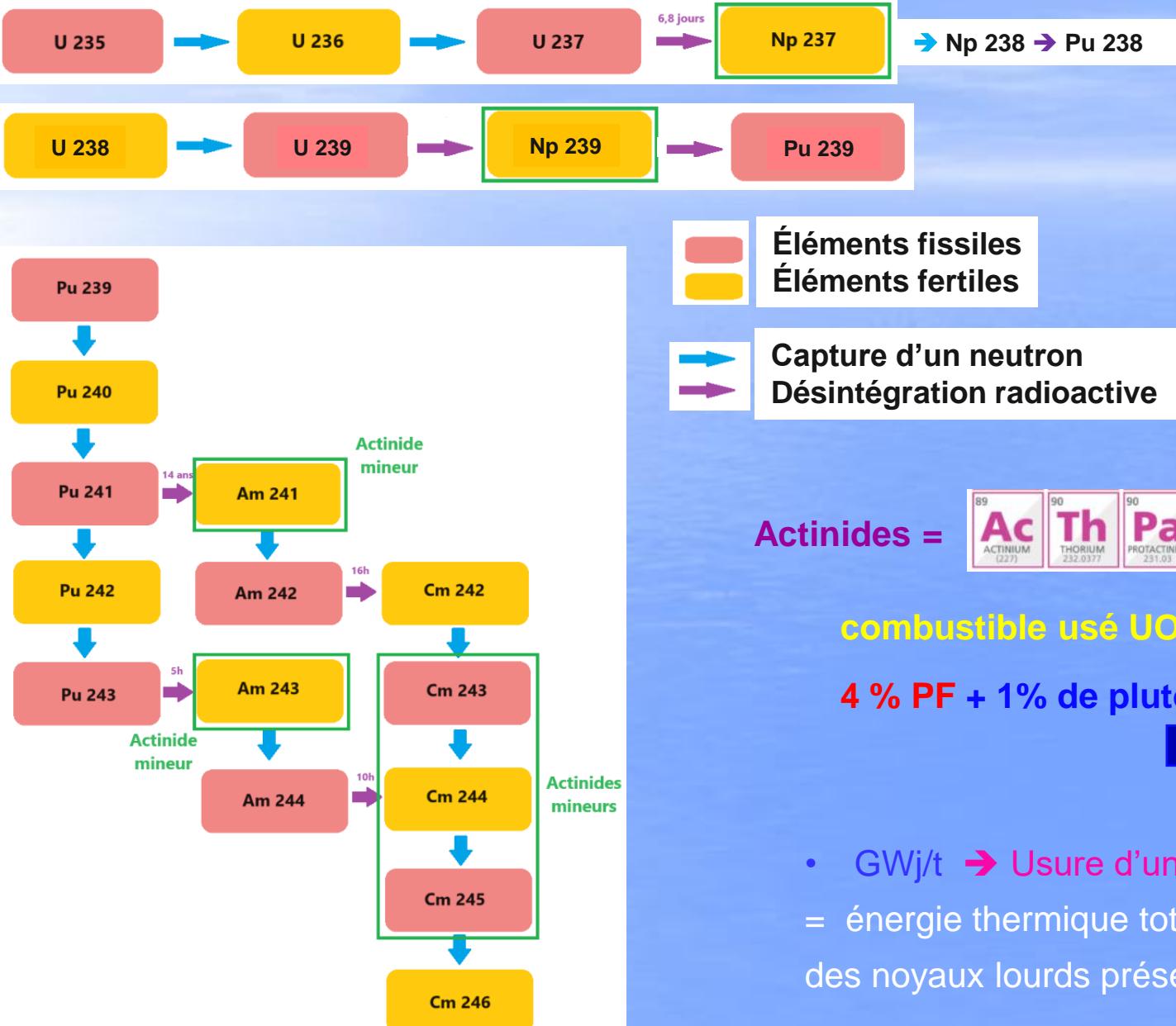
1 cycle ⇒ durée de fonctionnement réacteur entre deux recharges = 12 à 18 mois REP

combustible reste 3 ou 4 cycles dans un REP ⇒ entre 3 et 5 ans

Schéma d'origine : EDF, modifié par Révolution Énergétique

Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisée = REP

Le cœur du réacteur : le combustible



Combustible usé UOX contient :

produits de fission (PF)

+ isotopes de Pu :

238, 239, 240, 241, 242 Pu en \neq 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
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 usé UOX (enrichi à 3,7 %, brûlé 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

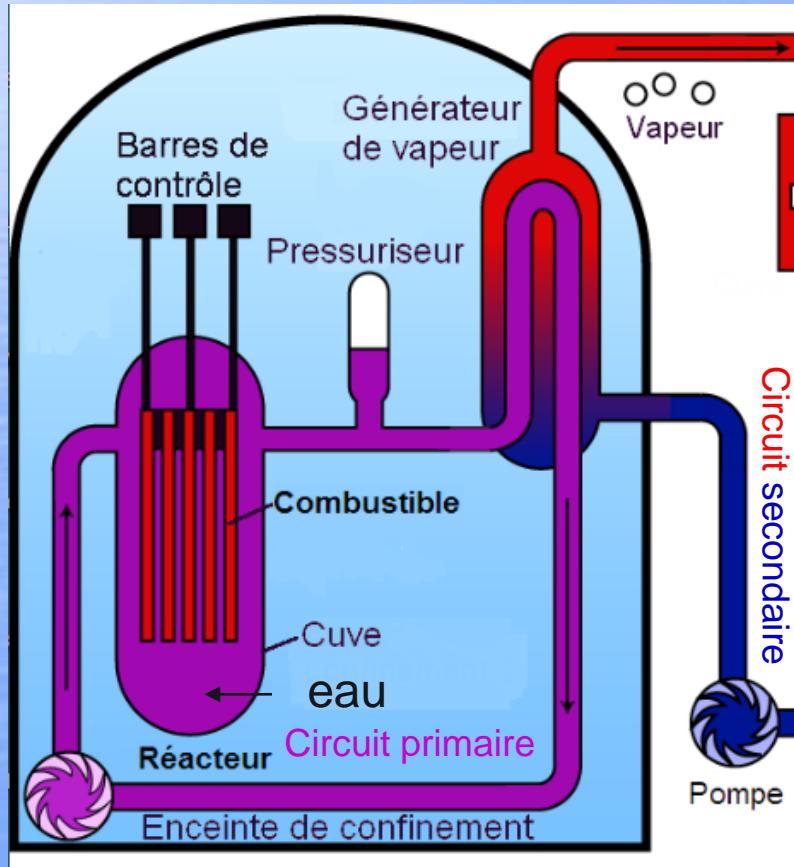
Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporeur

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

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



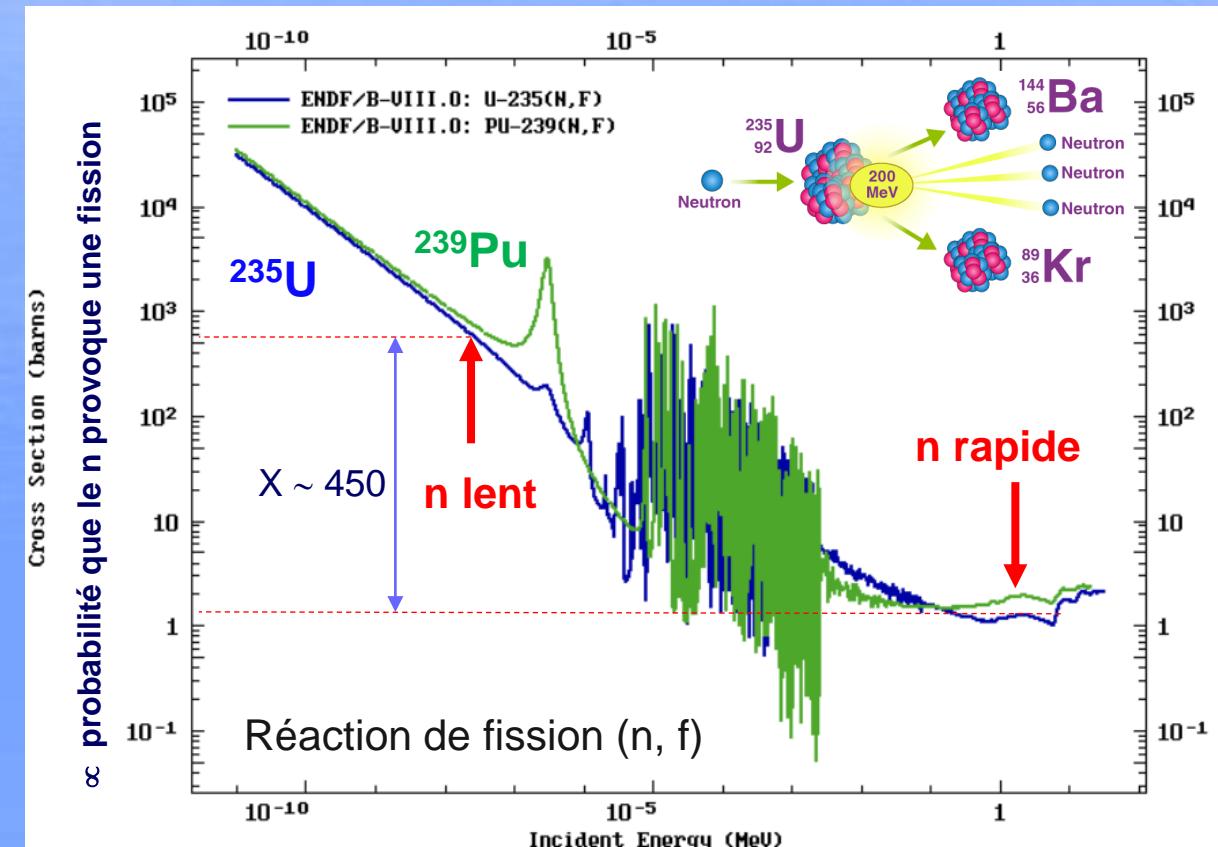
2^{ème} barrière de
confinement

☞ le MODÉRATEUR

⇒ n "rapides" $\sim 20\ 000 \text{ km/s} \rightarrow$ "lents" ou "thermiques"** $2,2 \text{ km/s}$
 $\sim 2 \text{ MeV} \rightarrow 0,025 \text{ eV} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ MeV}$

* En équilibre thermique avec le milieu

⇒ fissions + facilement et en + grand nombre



Fonctionnement d'un réacteur REP

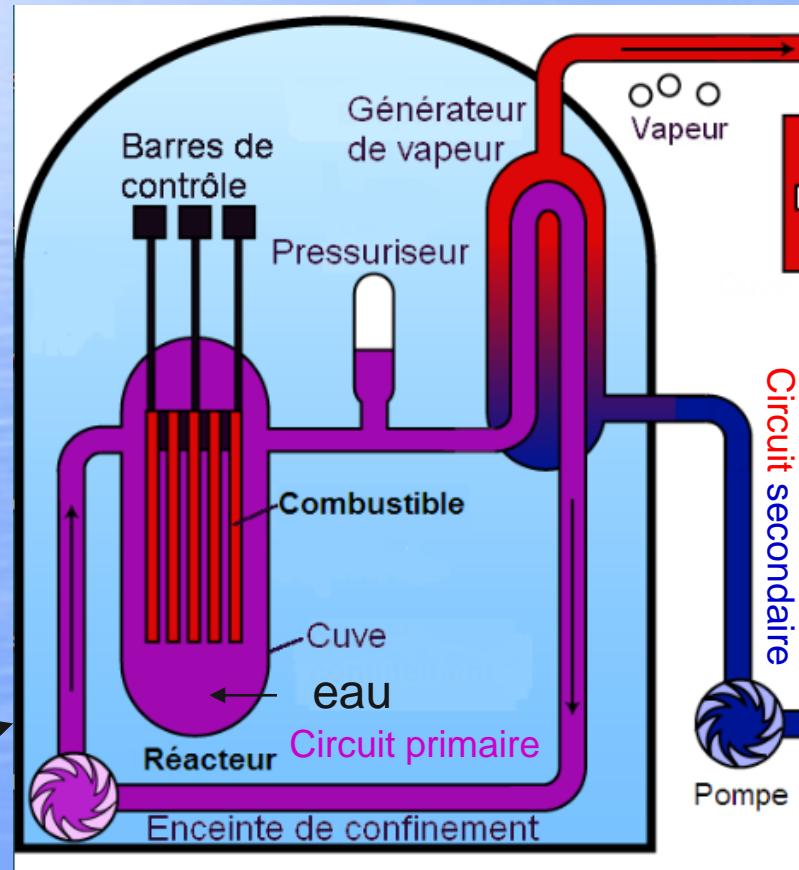
Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporeur

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

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



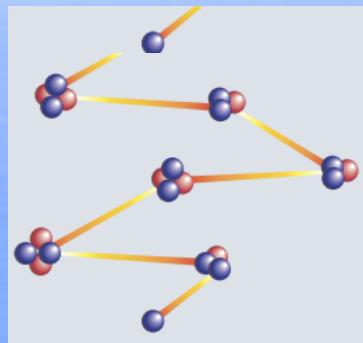
☞ le MODÉRATEUR

⇒ n "rapides" $\sim 20\ 000 \text{ km/s} \rightarrow$ "thermiques" ou "lents" $2,2 \text{ km/s}$
 $\sim 2 \text{ MeV}$
 $\rightarrow 0,025 \text{ eV} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ MeV}$

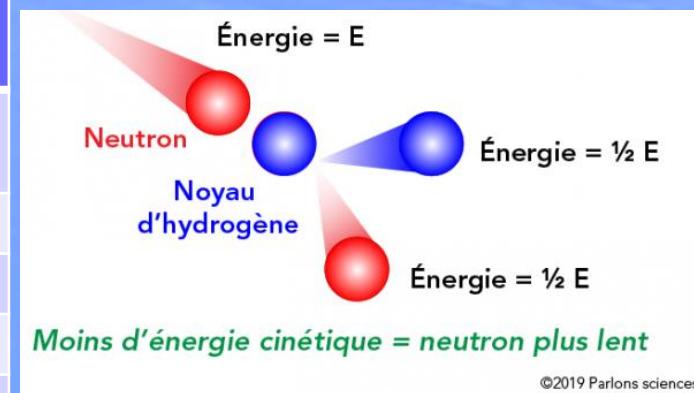
meilleur ralentisseur = l'hydrogène = ^1H

→ EAU

(REP : Graphite, eau lourde = $^2\text{H}_2\text{O}$)



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



^1H relativement absorbant (capture les neutrons)

→ enrichir l'uranium en ^{235}U pour entretenir réaction en chaîne

Fonctionnement d'un réacteur REP

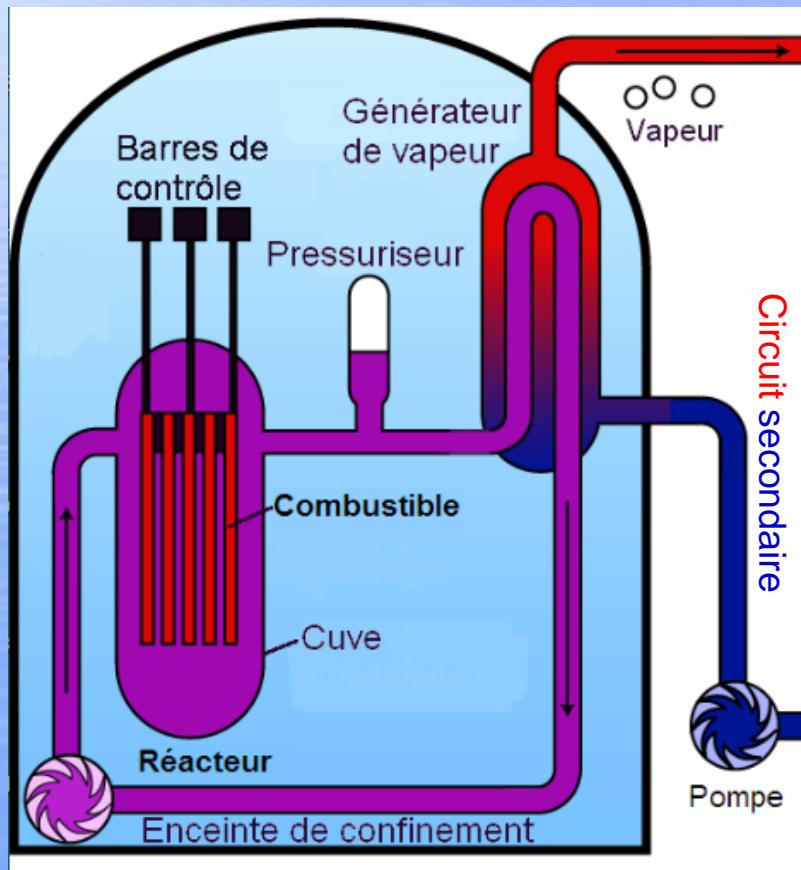
le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporeur

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

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



☞ le CALOPORTEUR

⇒ transporter hors du cœur la chaleur dégagée dans combustible
→ systèmes transformeront chaleur en électricité

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

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

Rôle du PRESSURISEUR :

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

eau passe dans GÉNÉRATEUR DE VAPEUR ⇒ transfert la puissance thermique du circuit 1aire vers eau du circuit 2aire

⇒ eau du circuit 2aire portée à ébullition → vapeur
($\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sim 70\text{-}80$ bars)

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

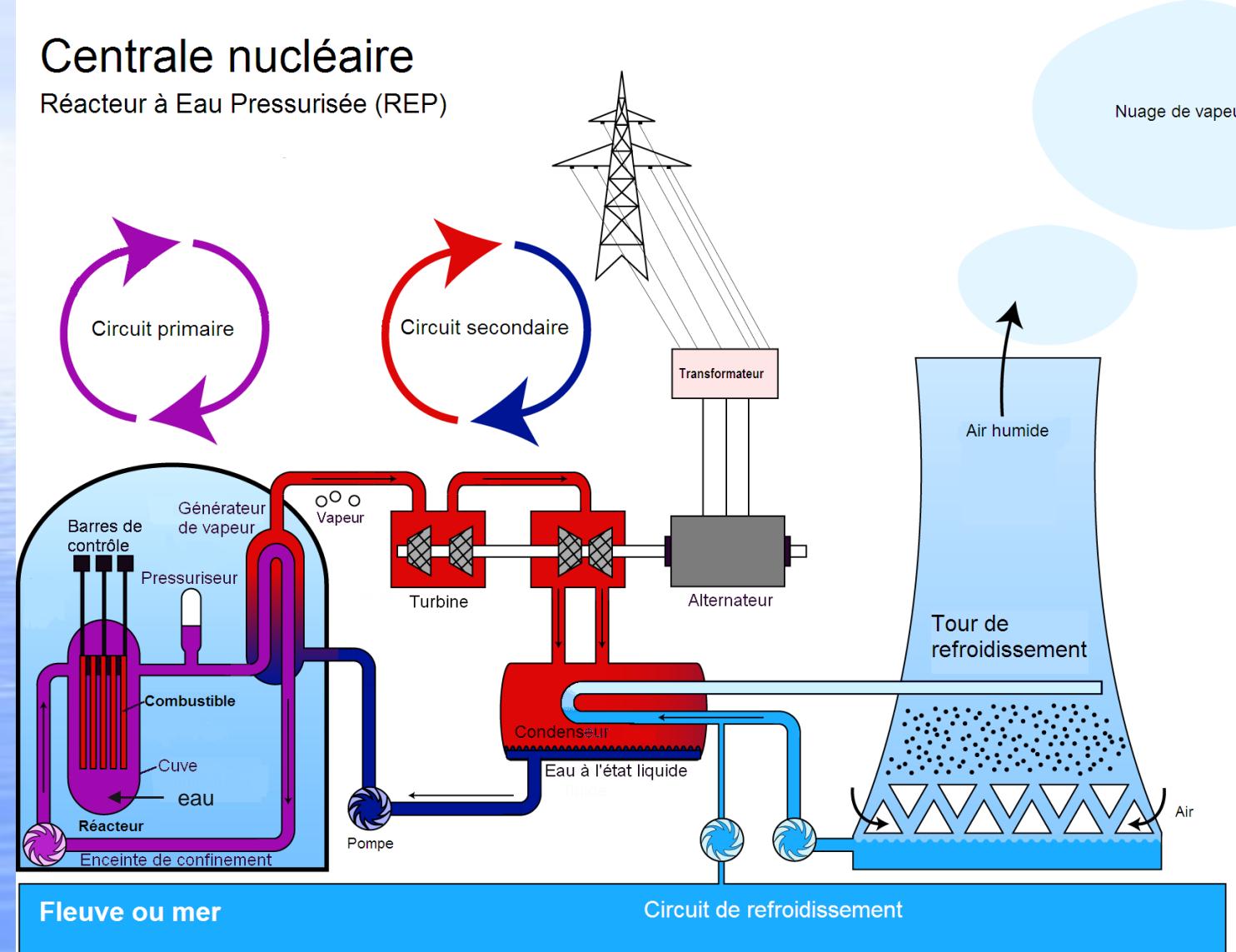
2^{ème} barrière de confinement

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)

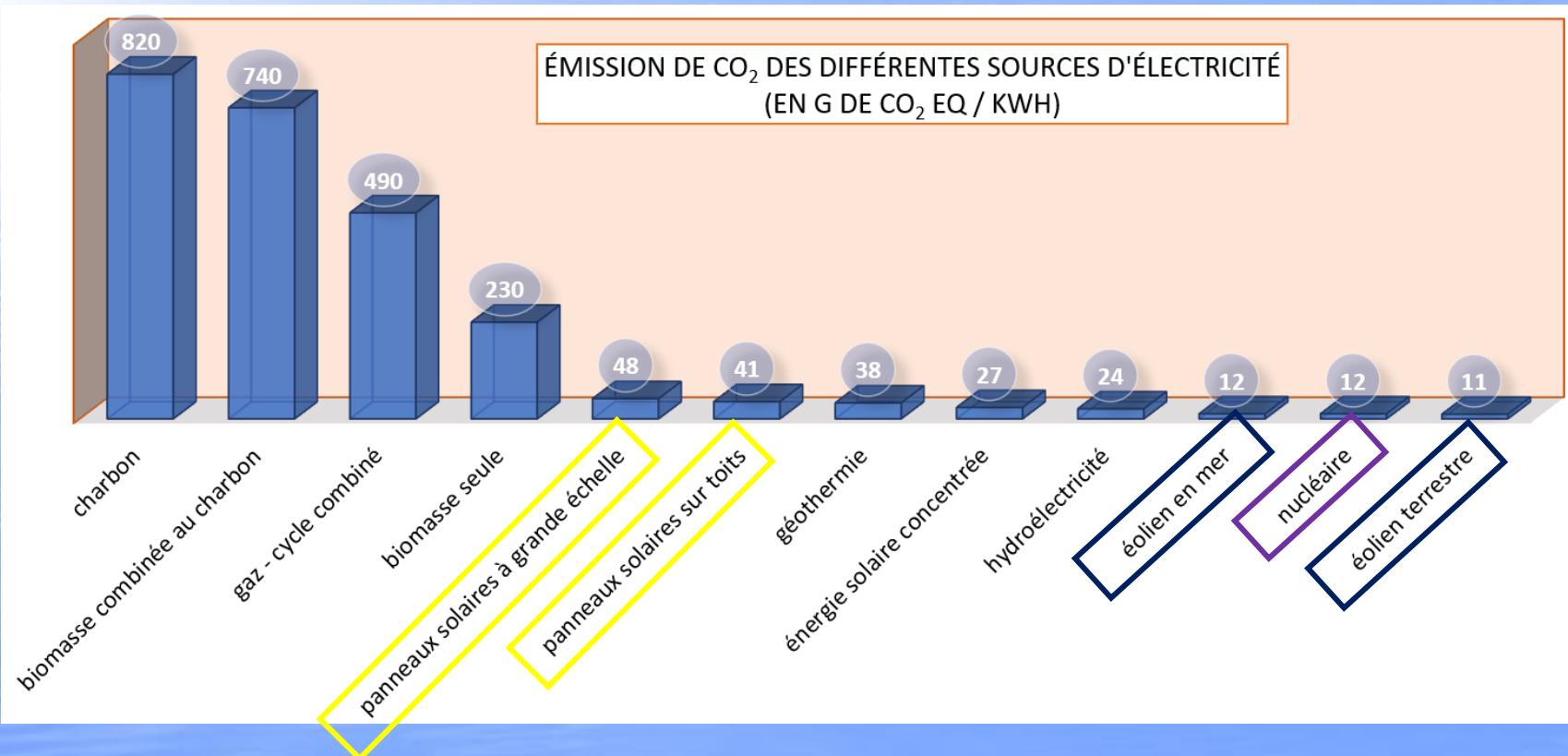
Comparaisons chiffrées

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

- ⇒ 2 000 éoliennes de 2 MWe fonctionnant avec un facteur de charge* de 0,25
 - ⇒ 14 millions de panneaux solaires
- ⇒ 38 Milliards tonnes d'eau chutant sur 100 m

* 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

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



(**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

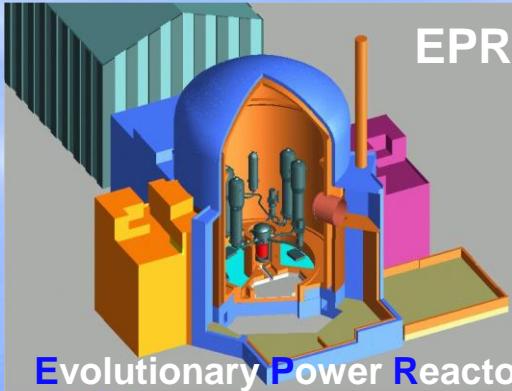
Calendrier

« génération »
≠ « filière technologique »
= technologie d'un réacteur

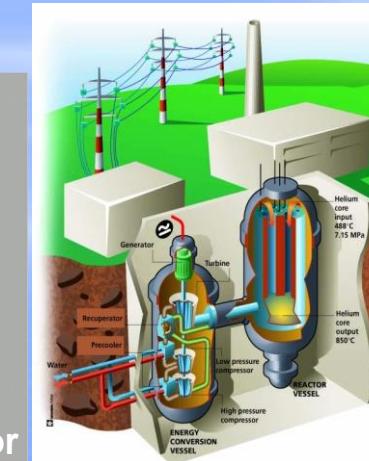
Premières réalisations



Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Réacteurs GEN-IV

1950-1960

1970

2010

2040

2090

Generation I

Uranium Naturel Graphite Gaz
France sans technologies d'enrichissement de l'U
missions :
productⁿ Pu militaire
productⁿ électricité
11 réacteurs
abandon ≈ 1970
dernier arrêté 1994

Generation II

Réacteur à Eau sous Pression (+ 2 RNR)
Construits j' à ~ 2000
Améliorations continues
MOX
même qté combustible
⇒ 2X+ d'E qu'il y a 40ans
↳ dépendance énergétique vis à vis du pétrole
recherche sur retraitement déchets nucléaires

Generation III

European Pressurized water Reactor
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 (1er en 2035) + 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

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

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 ⇒ rendement supérieur

Enrichissement légèrement + élevé (j'5%)

⇒ ↓ nombres de déchargements et de retraitements

⇒ gain sur prix du cycle combustible

Sélection de nouveaux matériaux des composants + sollicités

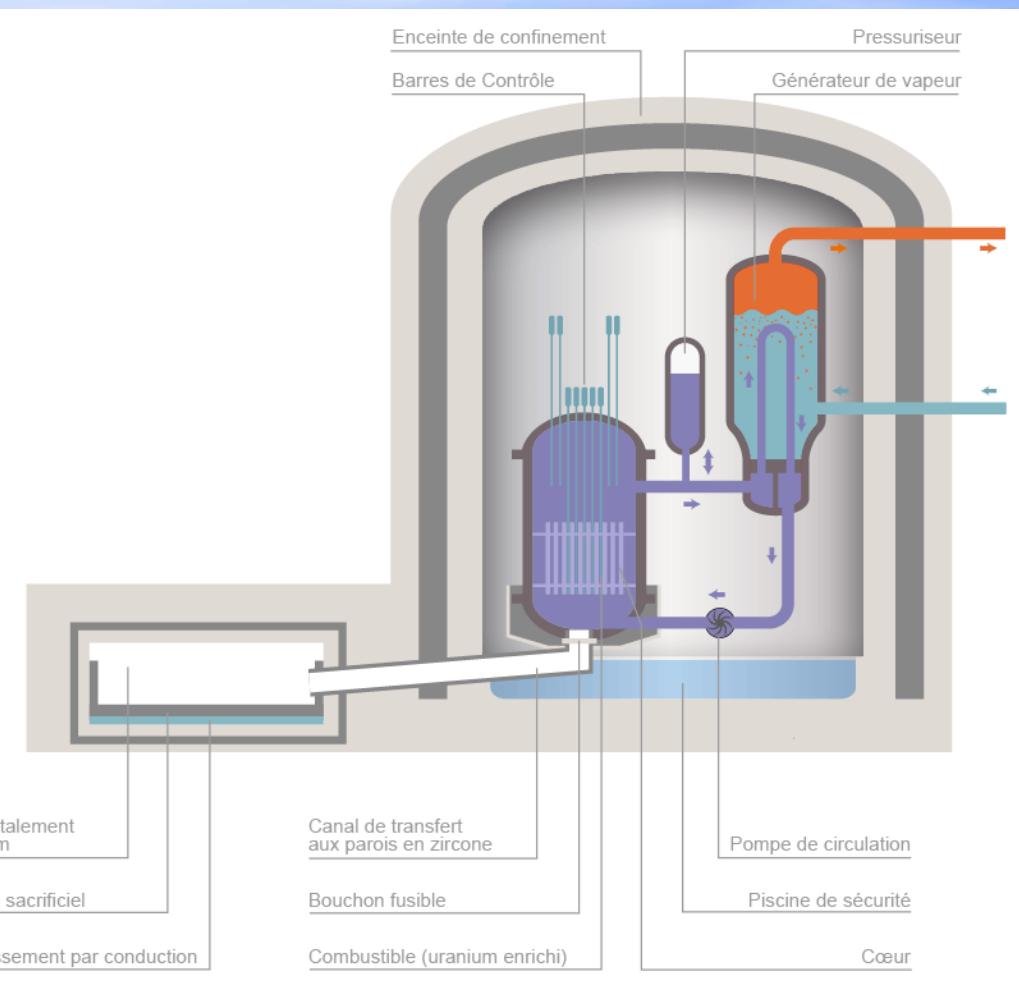
Configuration modulaire de l'EPR

⇒ Remplacement d'un composant plus rapide

	EPR	REP N4
Puissance thermique (MW)	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	40 (<50 grand carénage)
Irradiation du personnel (homme.mSv/an /réacteur)	0,4	1
		22

European Pressurized water Reactor

Evolutions de sûreté



SURETÉ ACCRUE

(REX : Three Mile Island, USA 1978 - 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 cœur fondu)
l'isoler de l'eau subsistant dans circuits du réacteur
et assurer son refroidissement
éviter contamination du sol

absorbeurs d'hydrogène (H_2 gaz explosif, produit par contact
corium avec eau)
⇒ empêcher explosion (H_2 avec O) de enceinte de confinement

+ 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 3.10^9 à 20.10^9 d'euros, 12 ans de retard)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Contexte

Prochaines décennies : besoins ↗ en énergie,
épuisement progressif des ressources fossiles,
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 très haute température (VHTR),

Réacteurs à eau supercritique (SCWR),

Réacteurs à sels fondus (RSF)

critères d'exigence :

sûreté renforcée,

économies en ressources (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 AM)

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



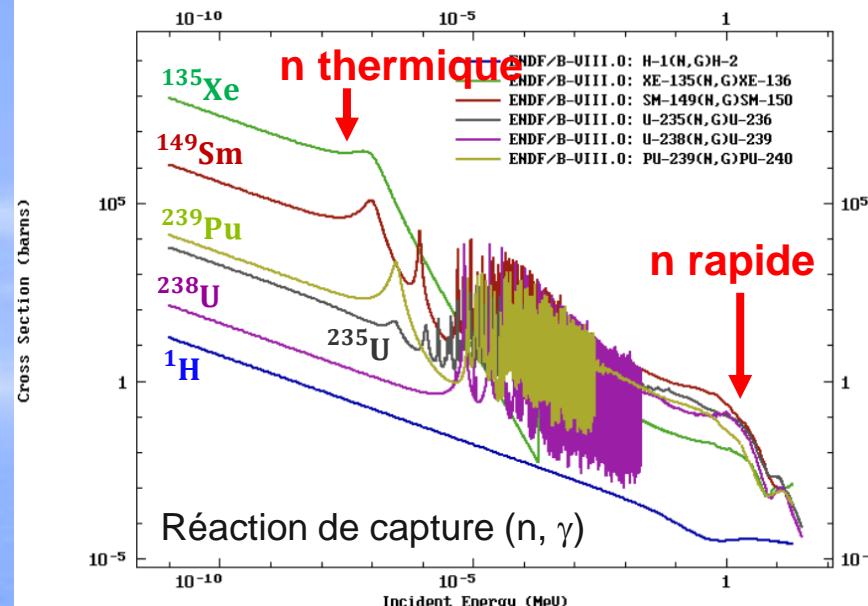
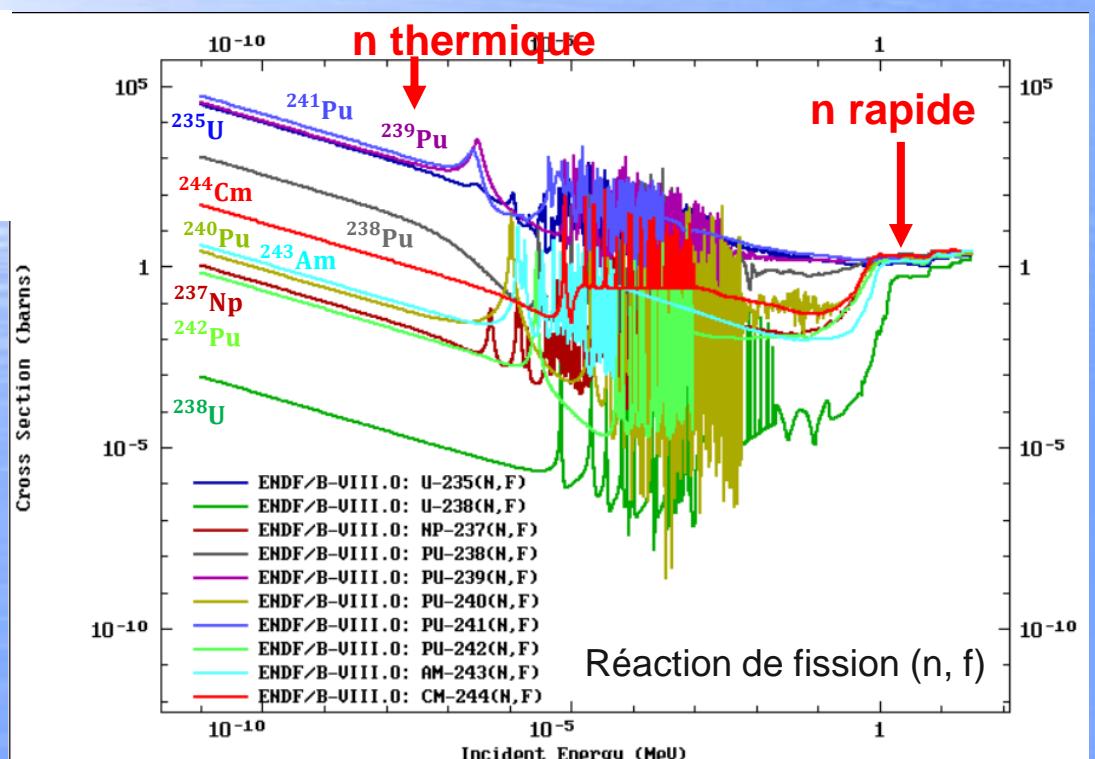
Réacteur à neutrons rapides : RNR

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

→ pas de modérateur → eau interdite

↑ ↓ captures stériles : par PF (^{135}Xe , ^{149}Sm), éléments de structure (acières des assemblages combustible), absorbants dans barres de contrôle

↑ fissions + probables que captures en spectre rapide



↑ Fission de TOUS éléments lourds, notamment ^{238}U , $^{240,242}\text{Pu}$ et AM

Sections efficaces de fission ~ même ordre de grandeur :

$^{238,235}\text{U}$, $^{238, 239, 240, 241, 242}\text{Pu}$, AM (^{237}Np , ^{244}Cm , ^{243}Am ...)

↓ sections efficaces de fission + faibles qu'en thermique

⇒ combustible fortement enrichi en noyaux fissiles

j' 20% d' ^{235}U ou ^{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 = régénération

Réacteur à neutrons rapides : RNR

Régénération

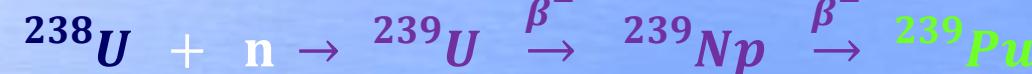
↑ fission induite par n_{rapide} donne en moyenne + de n qu'avec $n_{thermique}$ → ^{239}Pu (2,33 n / 2,11 n) | ^{235}U (1,88 n / 2,08 n)

→ Dans RNR, à chaque fission, excès de n (+1) / à n (-1) maintenir réaction en chaîne & n perdus (- 0,3)

par capture stérile & fuite hors du ♡

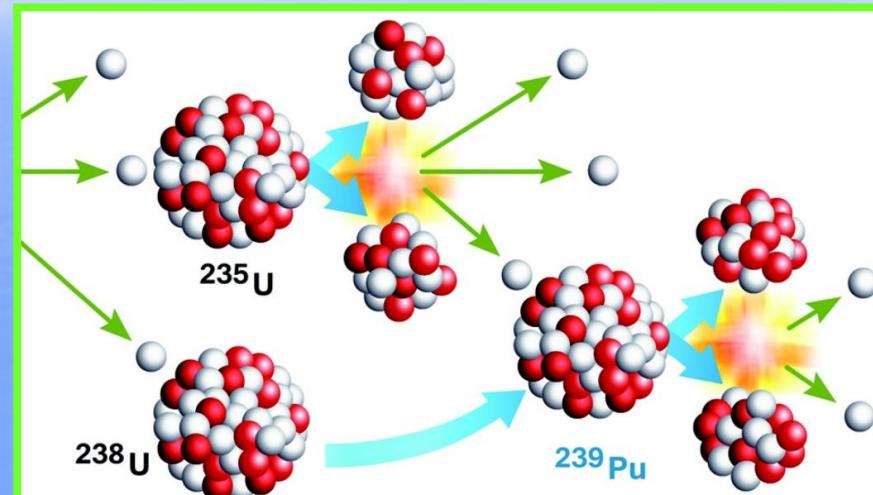
→ 1 n disponible pour la **Régénération**

Réaction de capture



fertile rapide vies courtes fissile
capture 1 neutron fonctionnement du ♡ fissionne facilement

avec n_{rapide} avec $n_{thermique}$



chaque X qu'un ^{239}Pu fissionne, il peut être régénéré par 1 nouvelle capture d'1 n par ^{238}U

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

Il faut fournir la 1ère charge de Pu (~ 20 % ^{239}Pu , ~ 80 % ^{238}U), 1 X réacteur démarré, quantité de Pu constante par régénération & retraitement des couvertures fertiles

↑ ↑ Avec régénération → possible utiliser TOUT potentiel énergétique du mineraï 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 – Transmutation

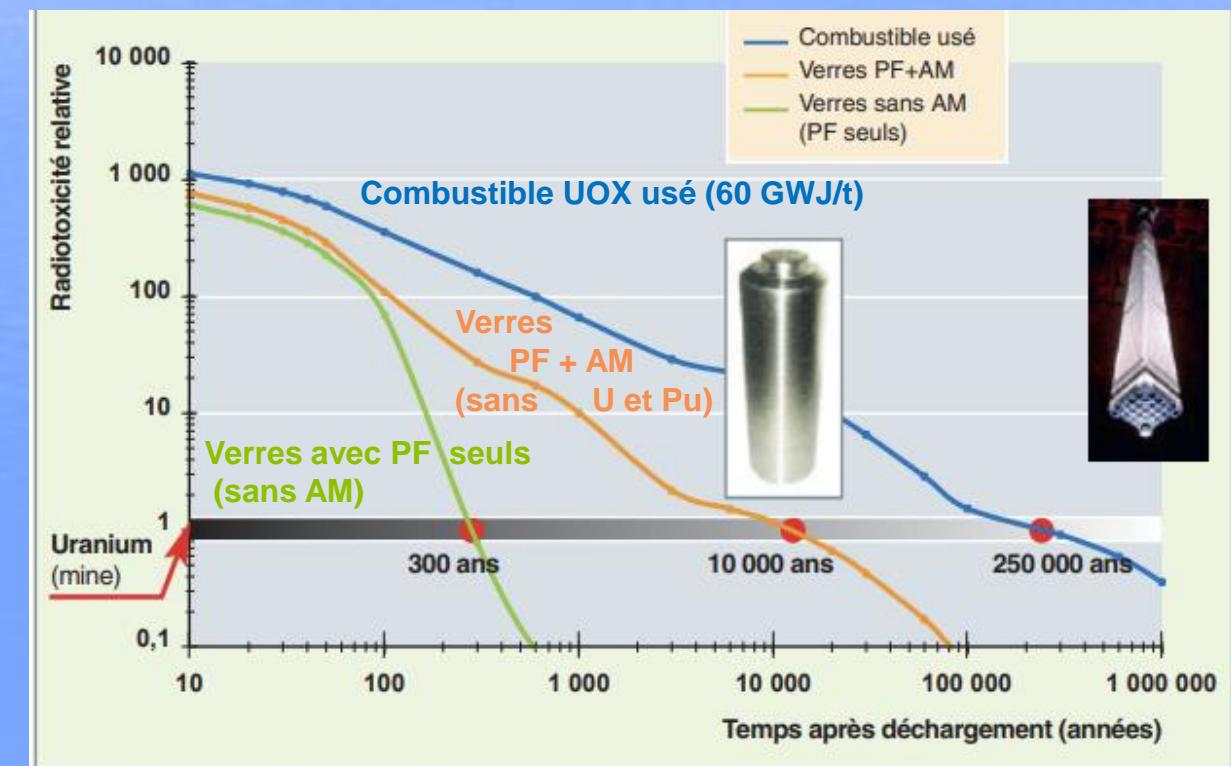


☞ **TRANSMUTATION** (par fission majoritairem^t)
= transformer déchets radioactifs à vies longues (AM : Np, Cm, Am) en éléments à périodes courtes, voire stables

Déchets ultimes limités aux PF ($T_{1/2} < 30$ ans), plus aisément stockables (↓ chaleur, ↓ emprise au sol)
niveau de radiotoxicité de l'uranium naturel retrouvé au bout de ~ 300 ans (10 000 ans)

Dans RNR, 1 GWe.an ne requiert plus qu'1 t d'U naturel /an
→ production + 100 X + d'électricité que dans REP actuels

↑↑ En utilisant stock ~ $3,5 \cdot 10^5$ t d'U_{appauvri}, RNR fourniraient de l'électricité à la France de façon autonome durant ~ 5000 ans



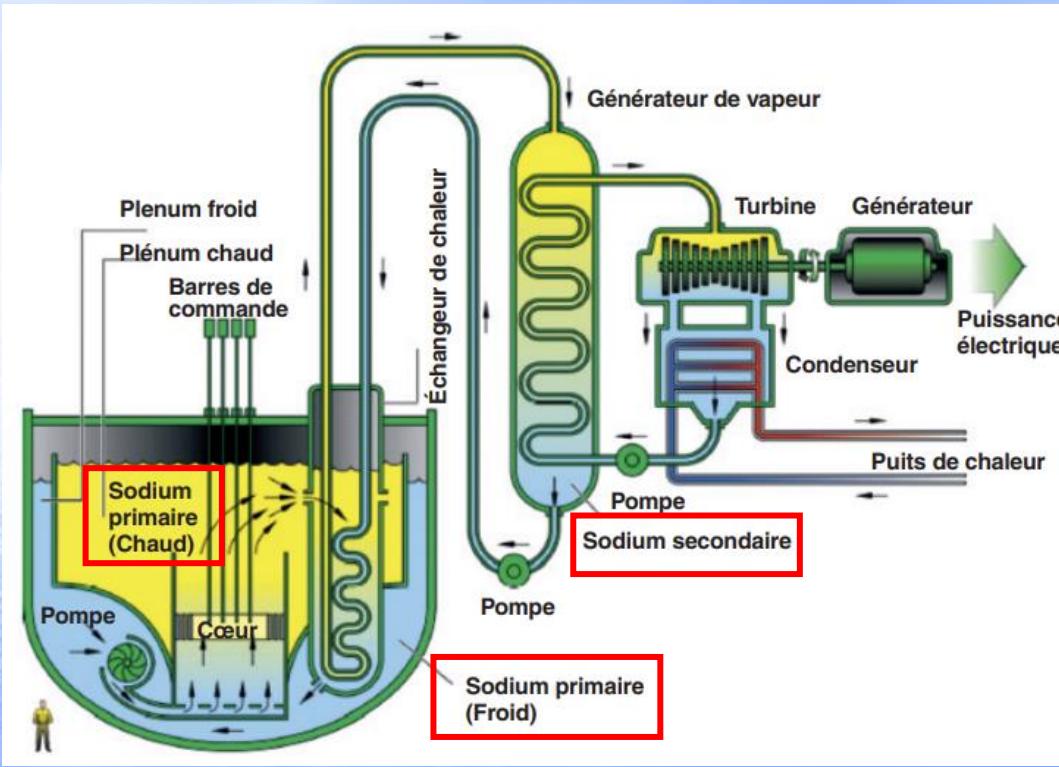
27

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

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Sodium Fast Reactor, SFR ou RNR-Na

Caloporeur = SODIUM LIQUIDE (Na - métal)



Exemples = Phénix (1973 à 2009) & Superphénix
seul prototype de taille industrielle (arrêté en 1998)

En exploitation : 2 en Russie - BN-600 et BN-800, d'autres Chine, Inde

Dans cadre de H2020, l'Europe étudie « design » d'un RNR-Na de 1,5 GWe (ESFR-SMART)

Pas de déploiement industriel avant 2100 en France

- ↑ excellentes propriétés thermo-hydrauliques
(liquide 97,8°C - 881,5°C ébullition, grande fluidité)
- ↑ capture peu de neutrons, les ralentit peu, faiblement corrosif
- ↑ caloporeur à 400-500°C ⇒ rendement thermodynamique ~ 40 %
- ↑ opéré à pression atmosphérique
- ↓ difficultés associées à l'ingénierie cuves & circuits sous pression / REP + minimise risques de fuites en cas d'incident
- ↓ brûle facilement dans l'air et peut exploser au contact de l'eau
⇒ son circuit étanche
- ↓ opacité à la lumière complexifie manutentⁿ, inspectⁿ, réparatⁿ
- ...
- ➔ technologie relativem^t complexe & coût élevé
industriellem^t validée
- à améliorer → rentabilité économique
- être commercialisable

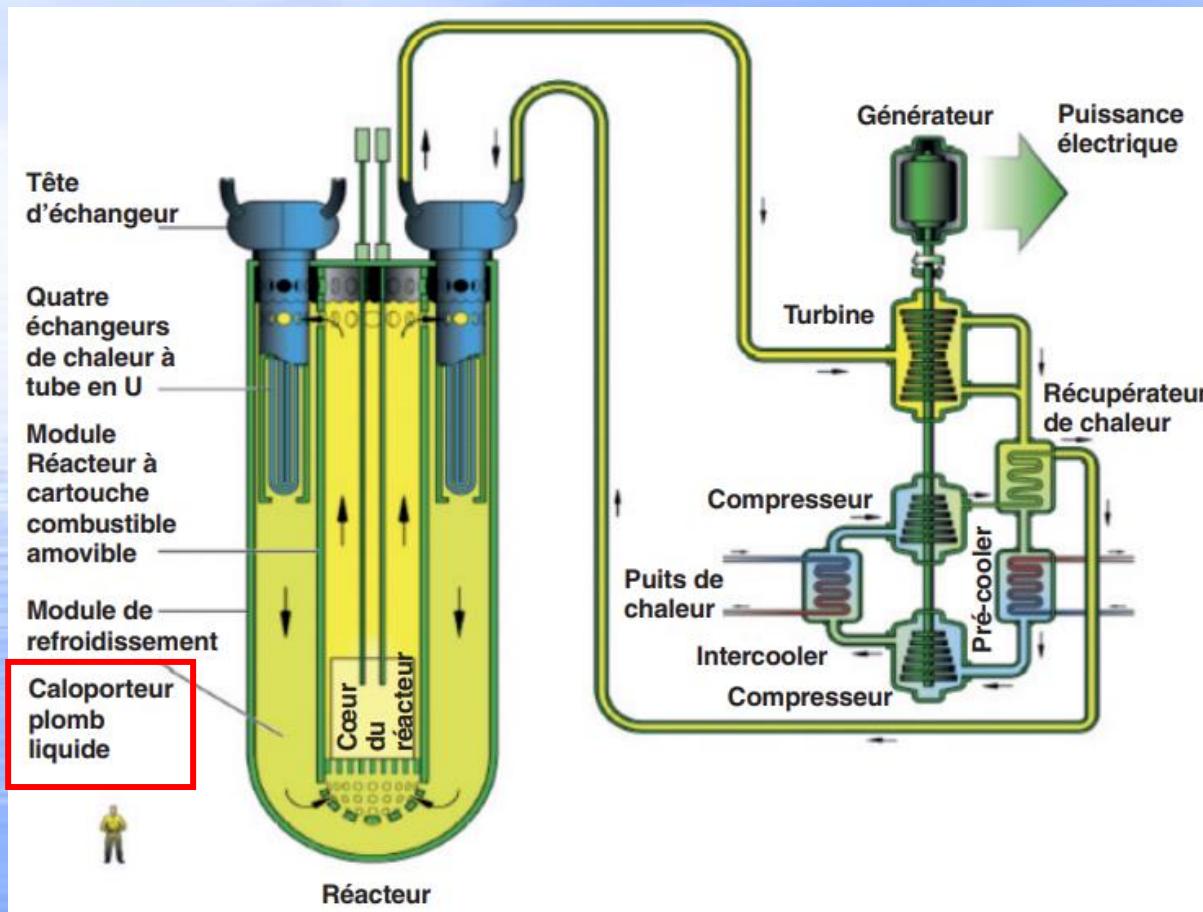


Superphénix

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Lead Fast Reactor, LFR ou RNR-L

1^{ère} Alternative



refroidissement au PLOMB ou Pb/Bi fondu = métal liquide

- ↑ faible réactif avec l'eau et l'air
- ↑ ralentit moins et capture moins les n que le Na
- ↑ point d'ébullition élevé
- ↓ toxique ↓ s'active en produisant du ^{210}Po très nocif
- ↓ opaque comme Na
- ↓ très corrosif ⇒ problèmes pour matériaux de structure
- ↓ résistance de la cuve pendant 10^{aines} d'années ?
-
- ⇒ recherches sur cette problématique

Exemple = réacteurs russes de 7 sous-marins de la classe « Alpha »

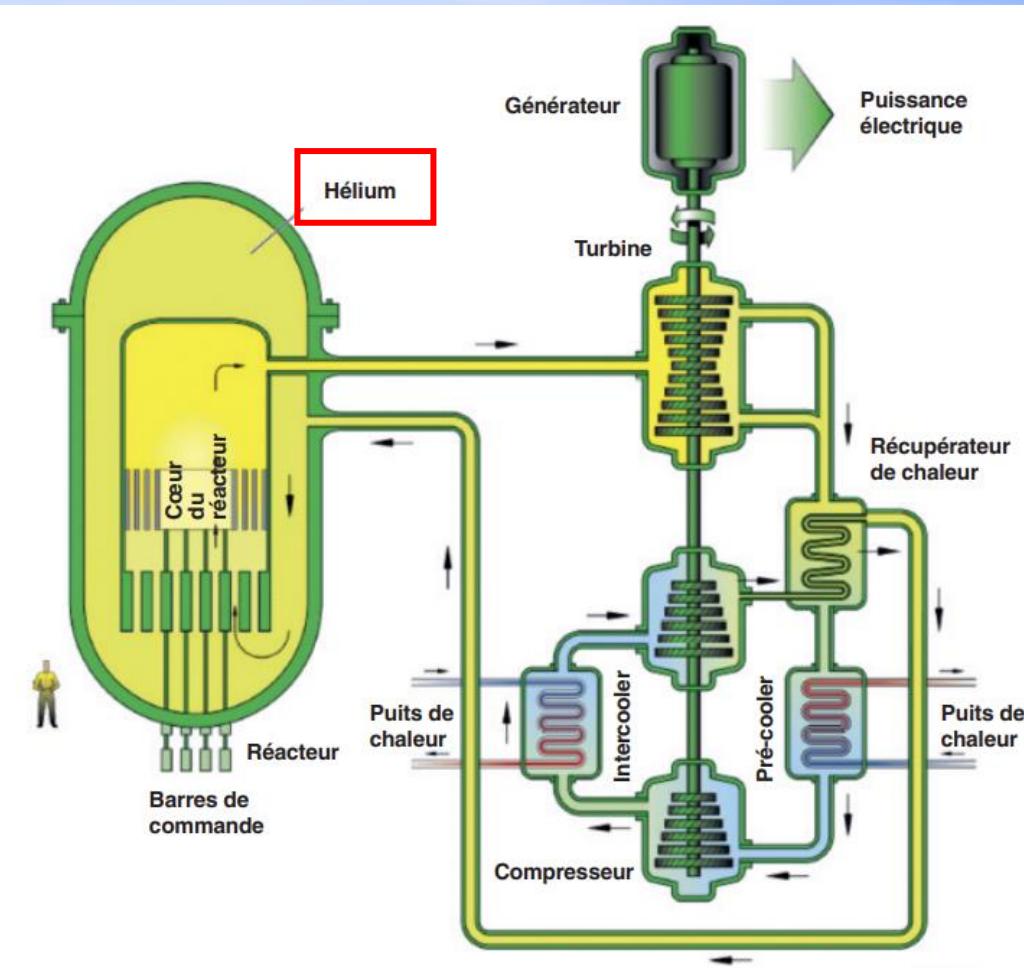
qui ont fonctionné 15 ans environ

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Gas Fast Reactor, GFR ou RNR-G

2^{ème} Alternative

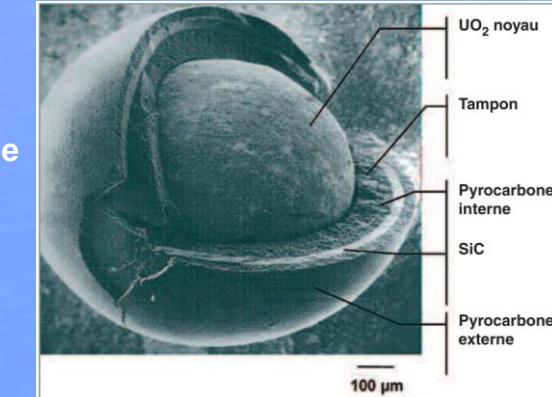
refroidissement à l'HÉLIUM = gaz léger sous pression



- ↑ en faible quantité, ne nuit pas à l'obtention de n rapides
- ↑ rendement > 45 % (gaz actionne directement les turbines)
- ↑ 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 entourées de multiples couches de carbone
= particules enrobées



⇒ recherches sur le matériau de la coque des microbilles contenant le combustible

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

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Régénération avec le thorium



Autre noyau pour régénération : ^{232}Th

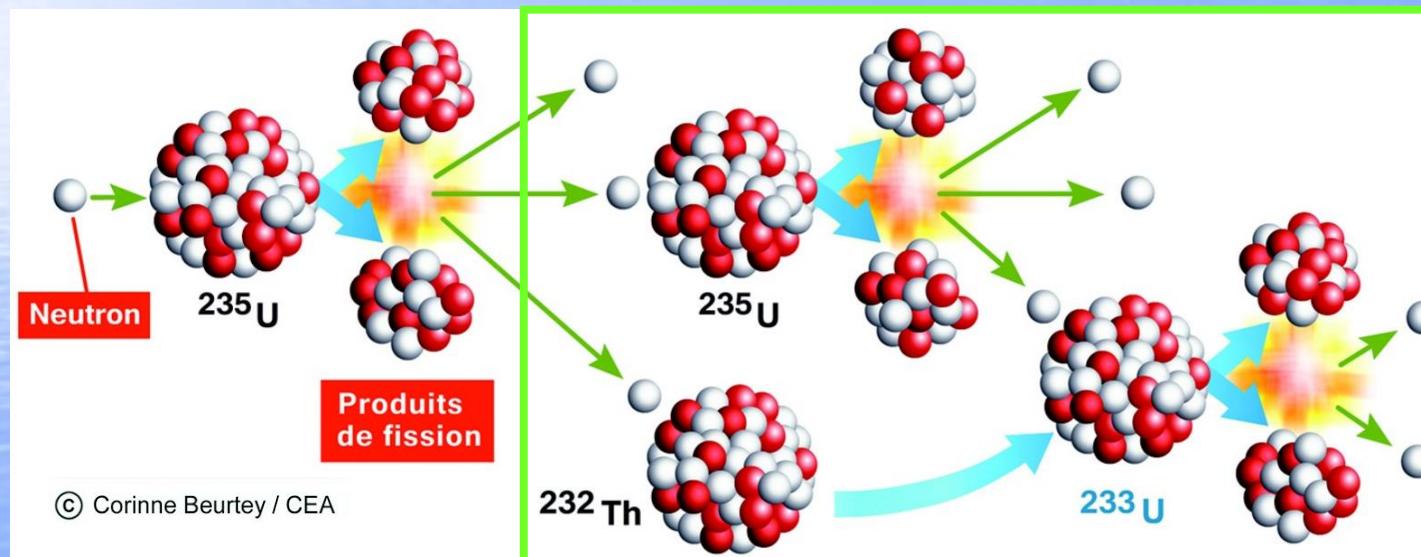
fertile

demi-vie = 27 jours fissile

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

Inde : réserves importantes de Th (25 % des réserves mondiales connues)

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



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

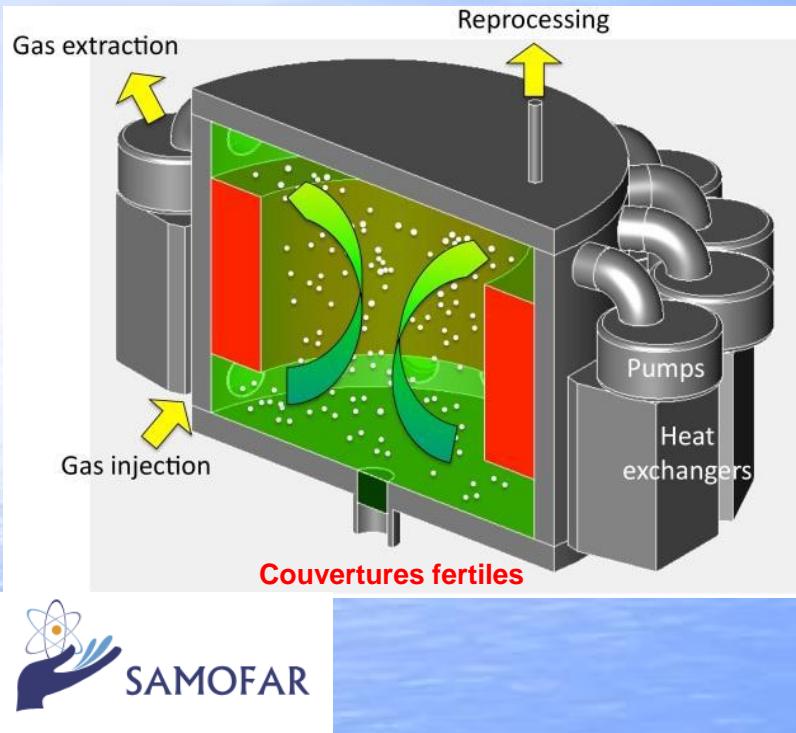
Th n'a pas d'isotope fissile, ⇒ pour amorcer un réacteur au Th, il faut de l'U enrichi en ^{235}U ou du Pu
↑ réduction des stocks de Pu

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

↓ nécessité de retraiter rapidement le combustible (extraire ^{233}Pa , PF)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Molten Salt Reactor, MSR, réacteurs à sels fondus RSF



⇒ combustible liquide dissous dans SEL fondu (à 600-900° C)
= fluide caloporteur

- ↑ ↓ régénérateur avec retraitement du sel en ligne pour maintenir dans ♥ un bilan neutronique favorable
- modéré par du graphite (n thermiques) ou sans modérateur (n rapides)
- ↑ en spectre rapide, possible incinération Pu et AM utilisés comme combustibles
- ↑ excellentes capacités de suivi de charge (variatⁿ la puissance ⇔ variat^{ns} demande)
 - ↓ technologie complexe en totale rupture avec réacteurs existants
 - ↓ considérable effort de recherche sur sel et matériaux (corrosion, retraitement, physico-chimie, ...)
 - ↓ sur neutronique d'un combustible en mouvement (combustible-caloporteur, pilotage de la criticité)

...

Recherches sur MSR menées par le CNRS, avec CEA, Framatome, ORANO, EDF

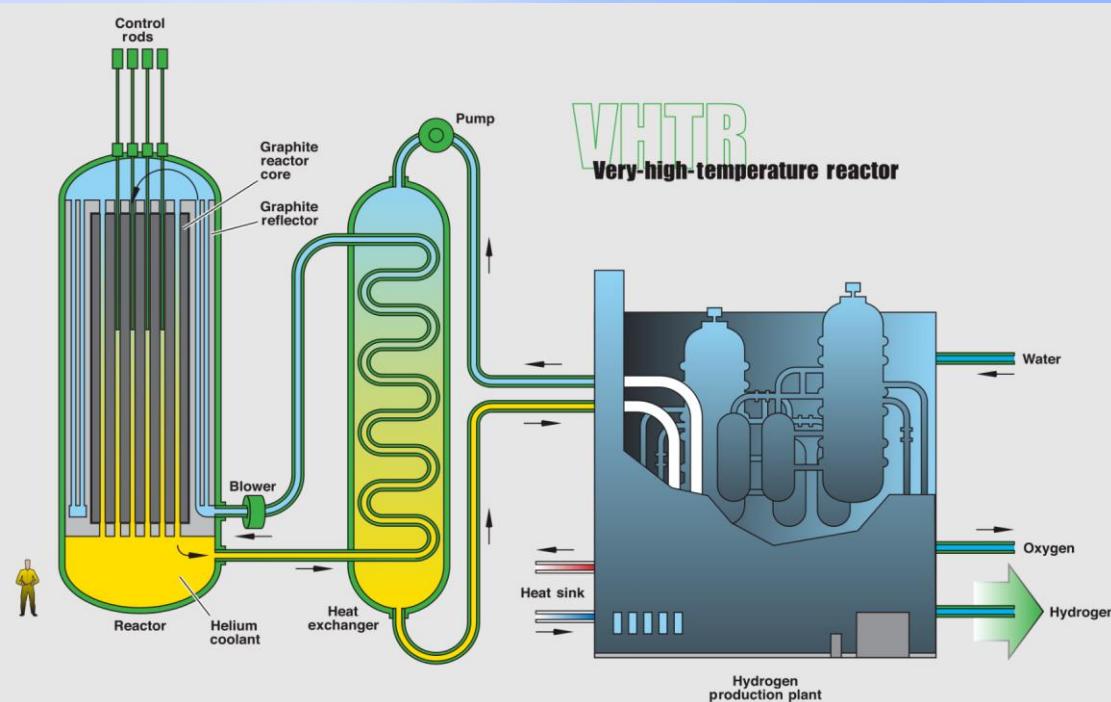
Actuellement, réalisation 2 prototypes américains de faible puissance

2 MSR ont fonctionné aux USA 1954 - 1965→1970

1 réacteur en fonctionnement en Chine depuis 2023, projet Canada, études en cours en Europe

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

...

⇒ Réacteur à eau supercritique = SCWR

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

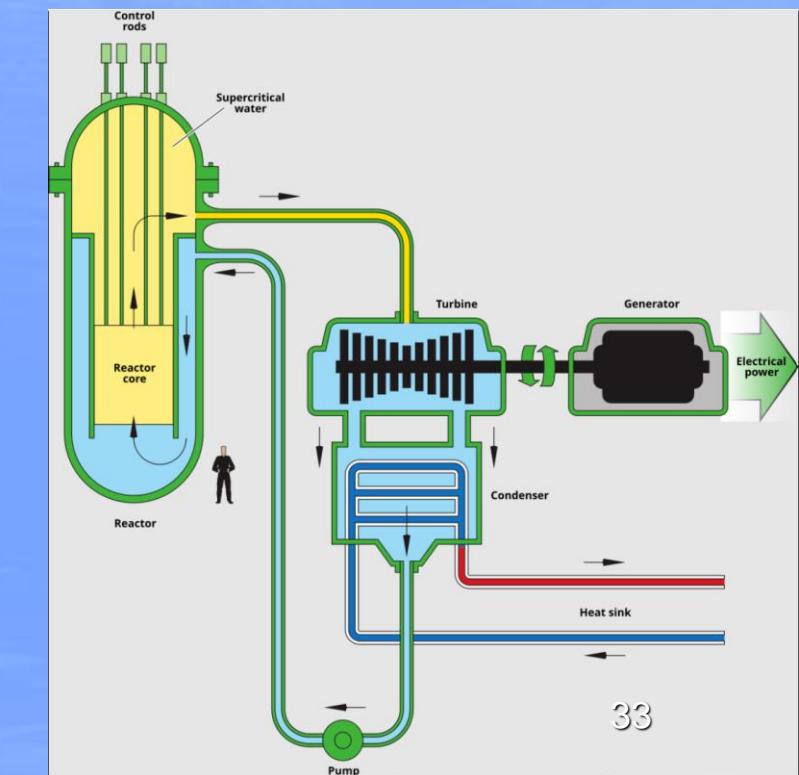
→ neutrons thermiques ou rapides selon design ♥

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

↓ qualification des matériaux aux hautes T°

↓ démonstration sûreté passive du système

...

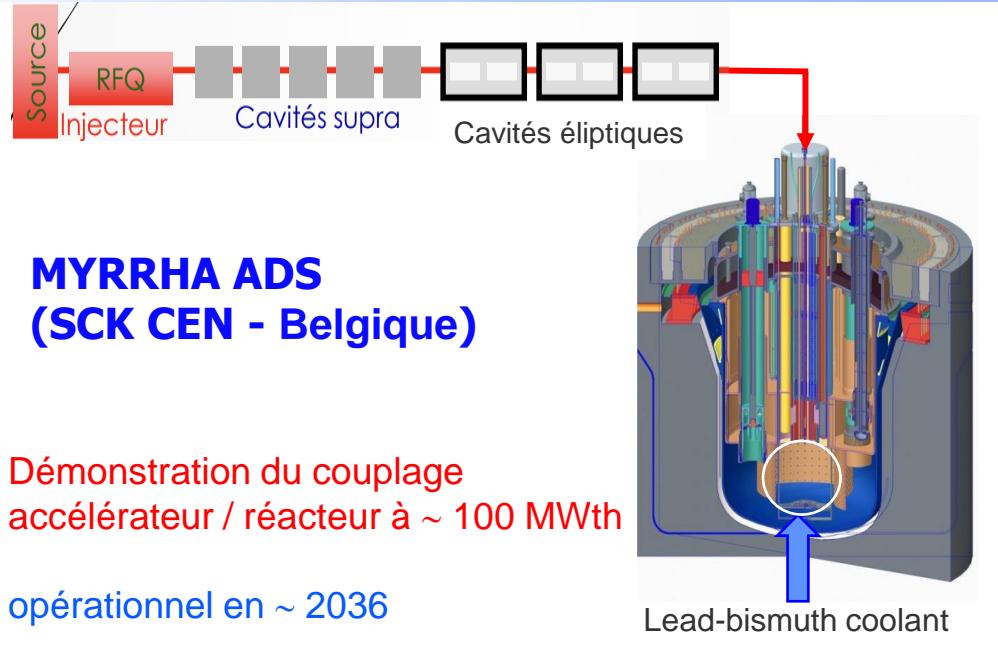


Les réacteurs pilotés par accélérateurs

Accelerator Driven System, ADS

LINAC accelerator	
Particles	Protons
Energy	600 MeV
Beam	4 mA

Reactor	
Power	65 to 100 MW _{th}
k_{eff}	~ 0,95
fuel	MOX



ADS ⇒ objet d'intenses études

- ✓ potentielle capacité à transmuter des AM produits par les filières actuelles
- ✓ réduire radiotoxicité & chaleur résiduelle des déchets nucléaires ⇒ ↘ surfaces de stockage (facteur ≈ 10 pour zone déchets HA)
- ✓ particularité : « sous-critiques » ($k < 1$) ⇒ réaction en chaîne ne peut ni démarrer ni s'entretenir sans apport de n externes
- ✓ accélérateur ⇒ protons de haute énergie + cible de métal lourd au ♥ du réacteur.
- ✓ ⇒ réactions de spallation (= fragmentation du noyau cible) libèrent des n (+ particules), jusqu'à ~ 30 n pour 1 p d'1 GeV
- ✓ ⇒ provoquent fissions dans combustible (U, Pu, AM) du ♥
⇒ générer certaine puissance, ↘ à 0 par arrêt de accélérateur

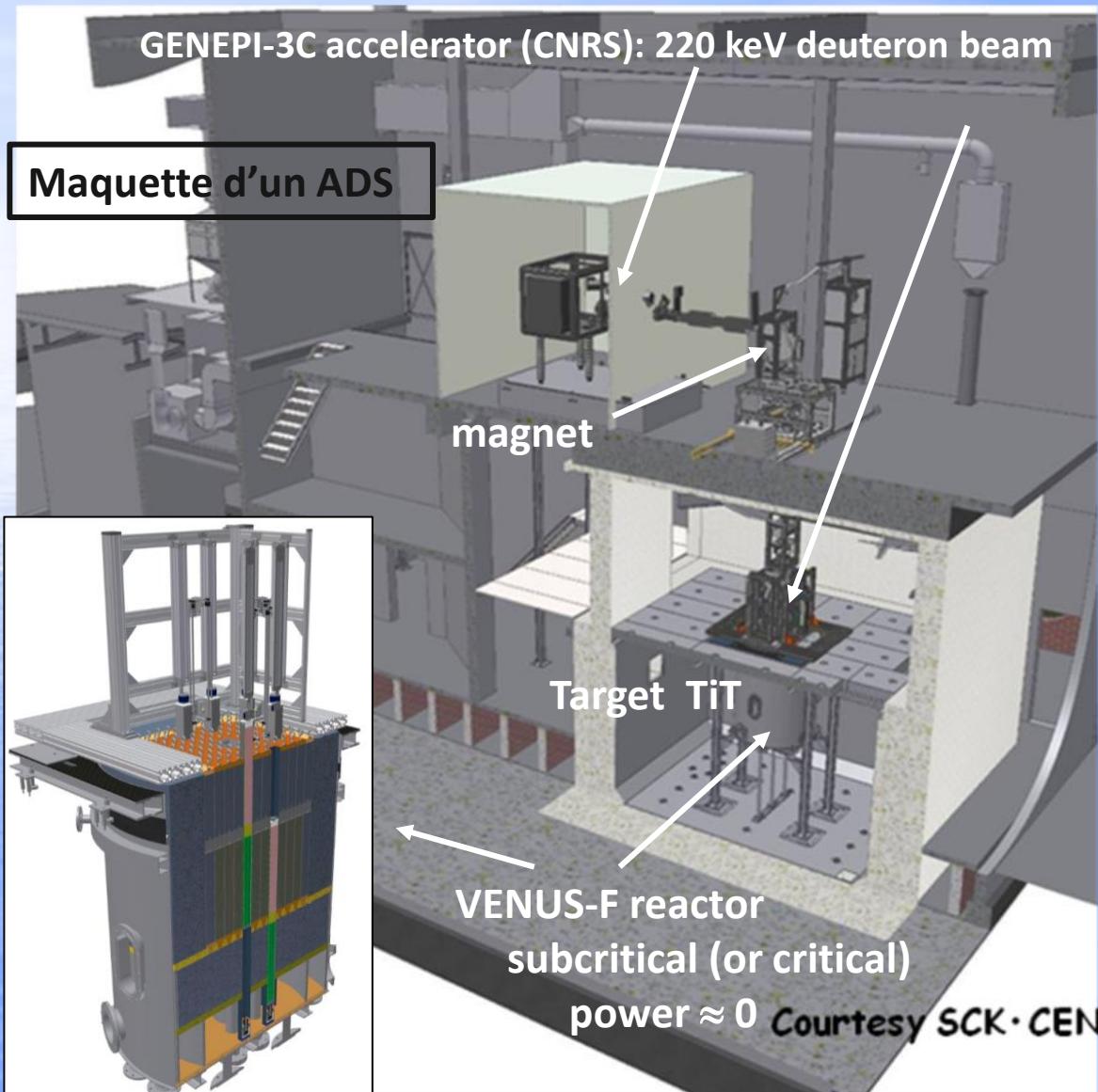
Construction démonstrateur ~100 MW_{th}, MYRRHA
(1,6 Milliard d'euros) :

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 ($j \geq 45\%$),

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

\Rightarrow Réacteur de l'ADS à neutrons rapides

\Rightarrow avec Pb/Bi (45%/55%) liquide = caloporeur et cible de spallation

✓ 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

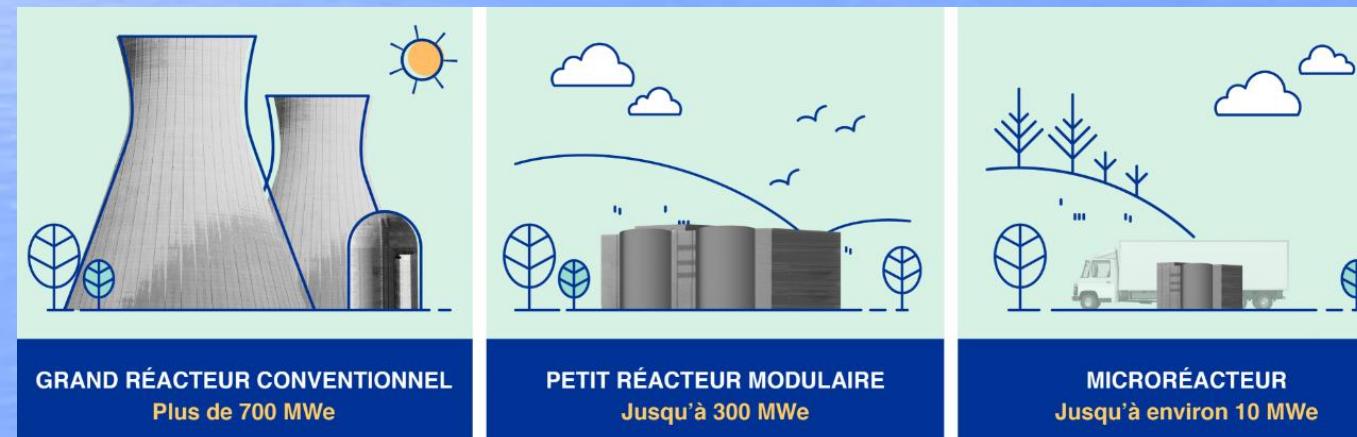
Equipes du LPC Caen et LPSC Grenoble (CNRS & UNICAEN) travaillent sur l'installation GUINEVERE à Mol, Belgique

Les technologies du futur

Small Modular Reactor, SMR = petits réacteurs modulaires

Distinctions :

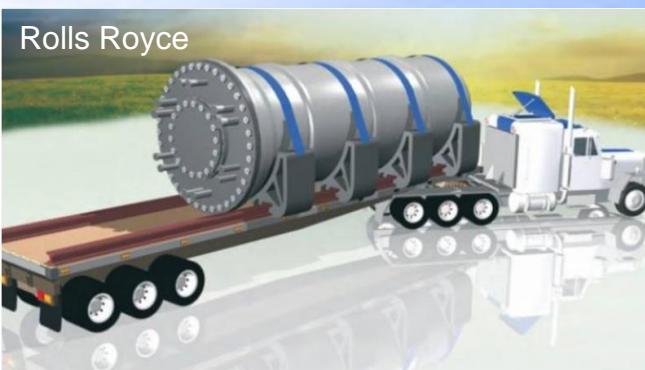
- ✓ **Modulaires** : systèmes et composants fabriqués en série, testés et assemblés en usine, puis transportés en tant qu'unité ou module vers un site d'implantation
- ✓ **Faible puissance** : < à 300 MWe, moyenne SMR existants ≈ 100 MWe
- ✓ **Sous-catégories** : MMR = Micro Modular Reactor = microréacteurs < 10 MWe (≈ 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



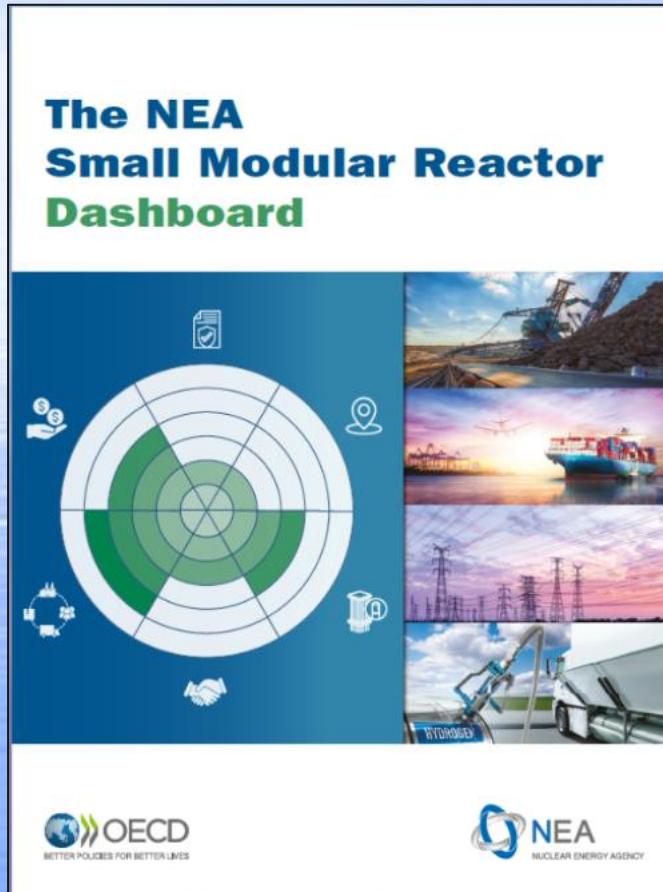
Défis :

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 Acceptation sociale (impact sur l'environnement réduit car \propto leur puissance) ? Développement/qualification nouveaux composants/ combustibles, modalités de fonctionnement, gestion des combustibles usés

- ✓ **Flexibles** : mieux adaptés à un suivi de charge pour compenser les variations :
 - de consommation
 - ou de production des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire)
- ✓ Leur concept de sûreté repose sur des :
 - systèmes passifs
 - caractéristiques de sûreté intrinsèques (ex : P et T° d'utilisation faibles)

⇒ éliminer ou réduire considérablement le risque de rejets radioactifs si accident
- ✓ Marges de sécurité accrues pour lutter contre les risques de prolifération
Certains SMR immersés dans piscine et / ou construits en souterrain
- ✓ Besoins en combustible réduits. Combustible renouvelé tous 3 à 7 ans (≠ centrales traditionnelles 1 rechargement tous 12 à 18 mois)
Certains conçus pour fonctionner jusqu'à 30 ans sans renouvellement du combustible



Ambitions :

- ✓ ↗ coûts & risques d'investissement, ↗ délais de construction
(EPR Flamanville 3 G€ → 20 G€, retard 12 ans)
 - ✓ nouveaux marchés de fourniture d'électricité à très faible émission de carbone :
 - aux sites isolés, difficiles d'accès (Grand Nord, archipels d'Asie du Sud-Est, communautés minières isolées, plateformes offshore (Newcleo) ...)
 - aux petits réseaux de distribution électrique
 - en remplacement centrales utilisant combustibles fossiles (charbon, gaz), groupes électrogènes alimentés au gazole
- L'NEA (Nuclear Energy Agency) publie son édition 2025 du tableau de bord des SMR.

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_73678/nea-small-modular-reactor-smr-dashboard

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_107879/nea-small-modular-reactor-digital-dashboard

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 Propulsion navale ou spatiale

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

✓ SMR : toutes technologies de réacteurs = versions réduites de modèles existants, 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

utilisé 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.



Photo/credit : Commission nationale de l'énergie atomique.

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

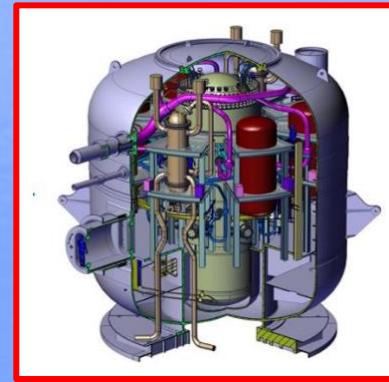
SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

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 horizon 2035					
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					
LFR-AS-200	newcleo	France	480,00	530	Metal-cooled
prototype mis en service d'ici 2031 à Chinon					
NUWARD SMR	NUWARD	France	1 000,00	307	Water-cooled
chantier de démonstrateur débutera en ~ 2030					
Otrera 2x300	Otrera New Energy	France	600,00	550	Metal-cooled
mise en service 2032					
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 de l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants », lancé par le programme France 2030 :





- Lutter contre dérèglement 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

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

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

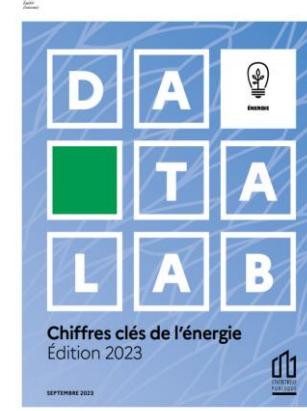
- atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050
- réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français

Acceptable si EFFORTS

- ↳ problème des déchets
- ↳ maintenir sûreté et sécurité élevée
- ↳ ↗ rendement des réacteurs

...

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



Commissariat à l'énergie atomique
e-den
Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire

Les combustibles nucléaires



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

Bilan énergétique de la France en 2023 - Données provisoires

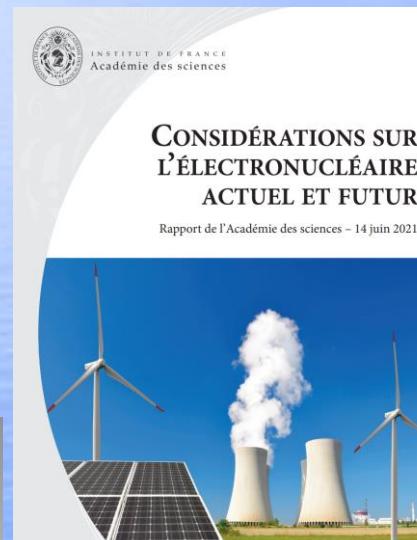
databl_essentiel_342_bilan_energetique_donnees_provisoires_mai2024.pdf



<https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees>

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

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



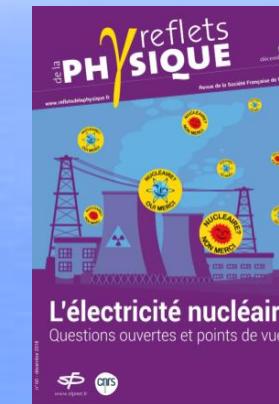
<https://www.cea.fr>

<https://www.irsn.fr>

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

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

<https://www.connaissancedesenergies.org>



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

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

<https://fr.wikipedia.org>



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

e-den
Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire

Les réacteurs nucléaires
à caloporteur sodium

