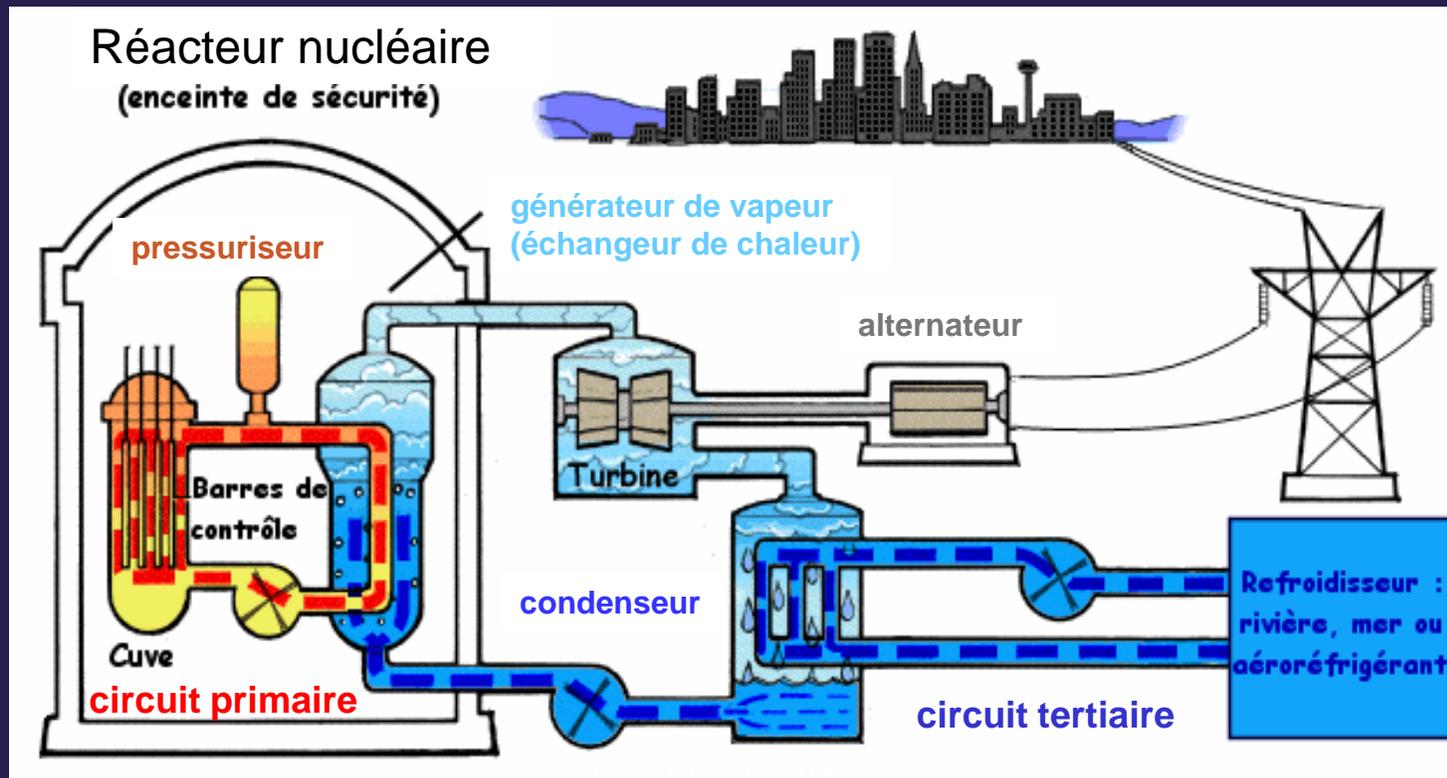


Profs au **CANIL**



L'électronucléaire



L'Electronucléaire

électro → électricité

nucléaire → réacteur nucléaire

Unités et Ordres de grandeurs Définitions formes d'énergie

La France :

Bilans énergétiques

Bilan de production d'électricité

Les sites nucléaires

Le Monde :

Nombre de réacteurs nucléaires

Consommation mondiale d'énergie

Production d'électricité et prévisions

Fonctionnement d'un réacteur :

La fission nucléaire

La réaction en chaîne

La criticité

Calendrier des générations de réacteurs

European Pressurized water Reactor = 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

Conclusions

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 – états

SMR en exploitation ou en construction

SMR en cours de conception en France

Unités & Ordres de grandeur



Unité légale d'énergie = Joule

Formes variées de l'énergie \Rightarrow \neq unités spécifiques



- **tonne-équivalent-pétrole** = énergie dégagée sous forme de chaleur par combustⁿ d'1 t de pétrole brut « moyenne » (\neq gisements \neq pouvoirs calorifiques)

$$1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ} \approx 42 \cdot 10^9 \text{ J}$$

\rightarrow industrie & économie

- **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 ...

$$1 \text{ tep} = 11,63 \text{ MWh} \approx 12 \cdot 10^6 \text{ Wh}$$

- **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

$$\Leftrightarrow 0,4 - 0,7 \text{ tep} = 4,66 \text{ à } 8,16 \text{ MWh, selon sa qualité}$$

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

$$\Leftrightarrow 1,25 \text{ tep} = 14,5 \text{ MWh}$$

1 t uranium naturel, on pourrait extraire $\sim 160 \text{ GWh} \Leftrightarrow 13750 \text{ tep}$

19600 & 11000 X+ d'énergie / charbon & gaz

\Rightarrow Densité énergétique massique du combustible nucléaire très élevée



Définitions



- **L'énergie primaire** = énergie brute n'ayant pas subi de transformation, dont la source se trouve à l'état pur dans l'environnement
Ex : **énergie éolienne, solaire, hydraulique, biomasse, géothermie, pétrole brut, charbon, gaz ou minerai d'uranium, etc**
- **L'énergie secondaire** = énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire
Ex: **électricité obtenue à partir de : énergie nucléaire avec réacteurs, énergie hydraulique avec barrages, etc**
essence, gasoil & biocarburants obtenus par transformation du pétrole brut ou biomasse
- **L'énergie finale** = celle dont dispose le consommateur final
Ex : **électricité domestique, gaz réseau ou bouteille, essence à la pompe**
- **L'énergie utile** = celle qui procure le service recherché sur le lieu de son utilisation
Ex : **énergie cinétique de l'eau d'un lave-vaisselle, chaleur diffusée dans un bâtiment, intensité lumineuse d'une lampe**



$$\begin{aligned} E_{\text{primaire}} \times \text{rendement de conversion} &= E_{\text{secondaire}} \\ E_{\text{secondaire}} \times \text{rendement de transport - distribution} &= E_{\text{finale}} \\ E_{\text{finale}} \times \text{rendement d'utilisation} &= E_{\text{utile}} \end{aligned}$$

Bilan énergétique de la France (DROM inclus) en 2022

1 TWh = 10¹² Wh

(données non corrigées des variations climatiques)

Diagramme de Sankey → Largeur des flèches ∝ flux représenté

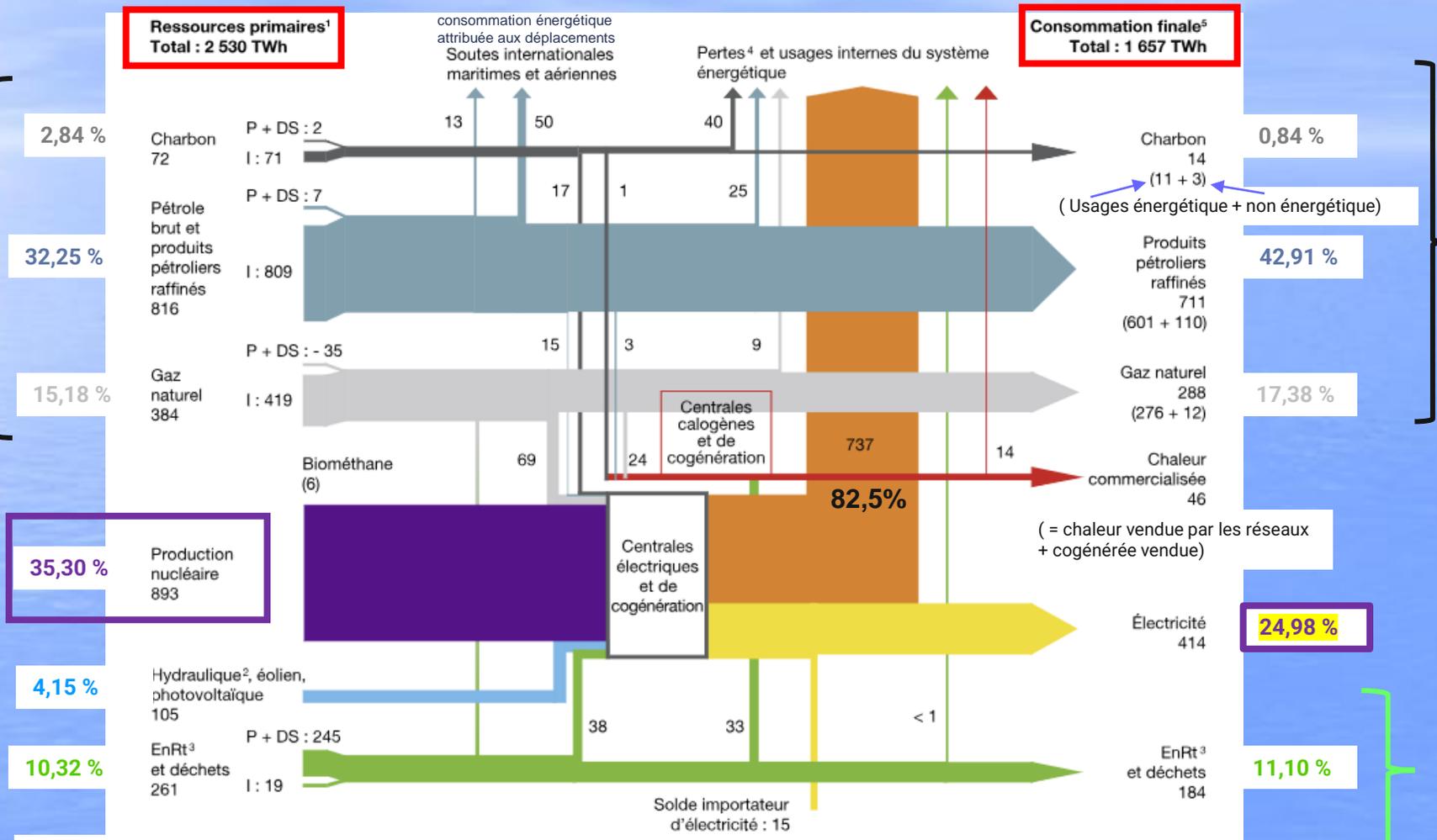
**50 %
ressources
fossiles**

**61%
ressources
fossiles**

**Énergie
produite par
fissions**

**14,5 %
énergies
renouvelables**

**11,1 %
énergies
renouvelables**



EnRt = Energies renouvelables thermiques (bois, déchets de bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur, etc.)

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

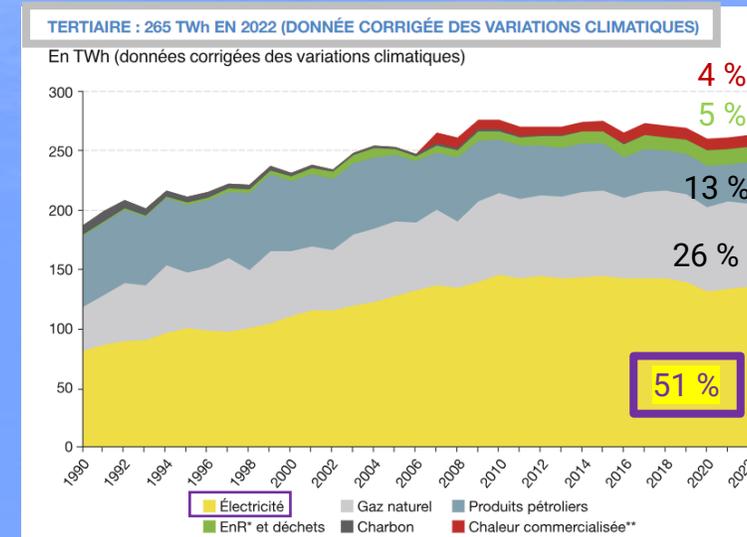
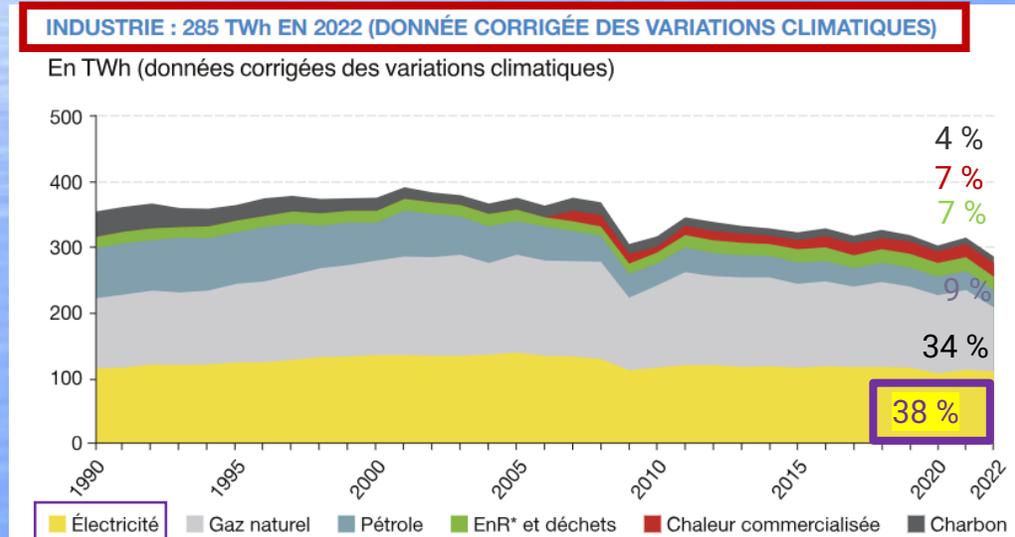
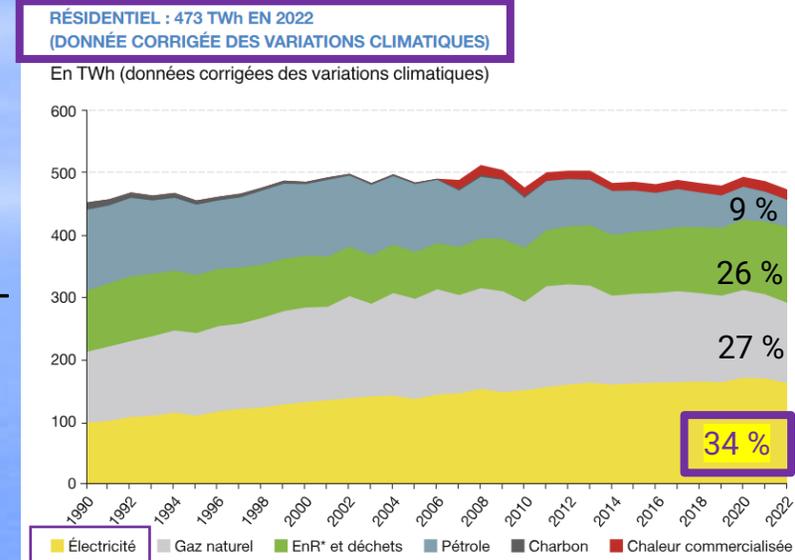
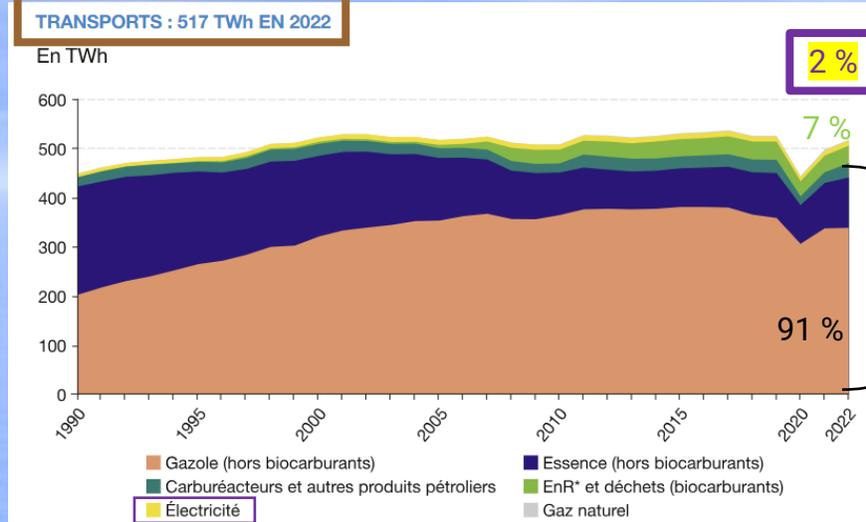
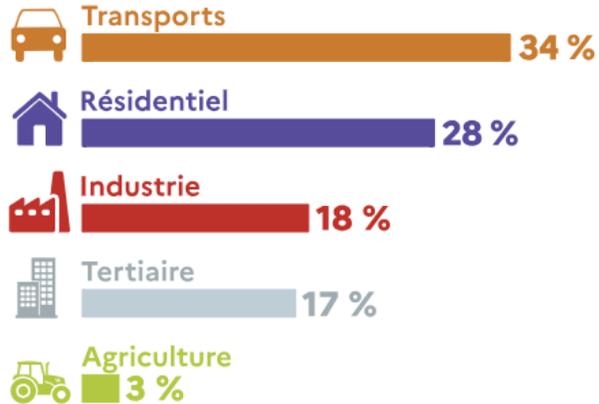
1. consommation primaire = ressources primaires – (solde exportateur d'électricité + soutes)
 P = production nationale DS = déstockage, I = solde importateur

Consommation finale à usage énergétique de la France en 2022

Usages non énergétiques majoritairement concentrés dans la pétrochimie

1 532 TWh

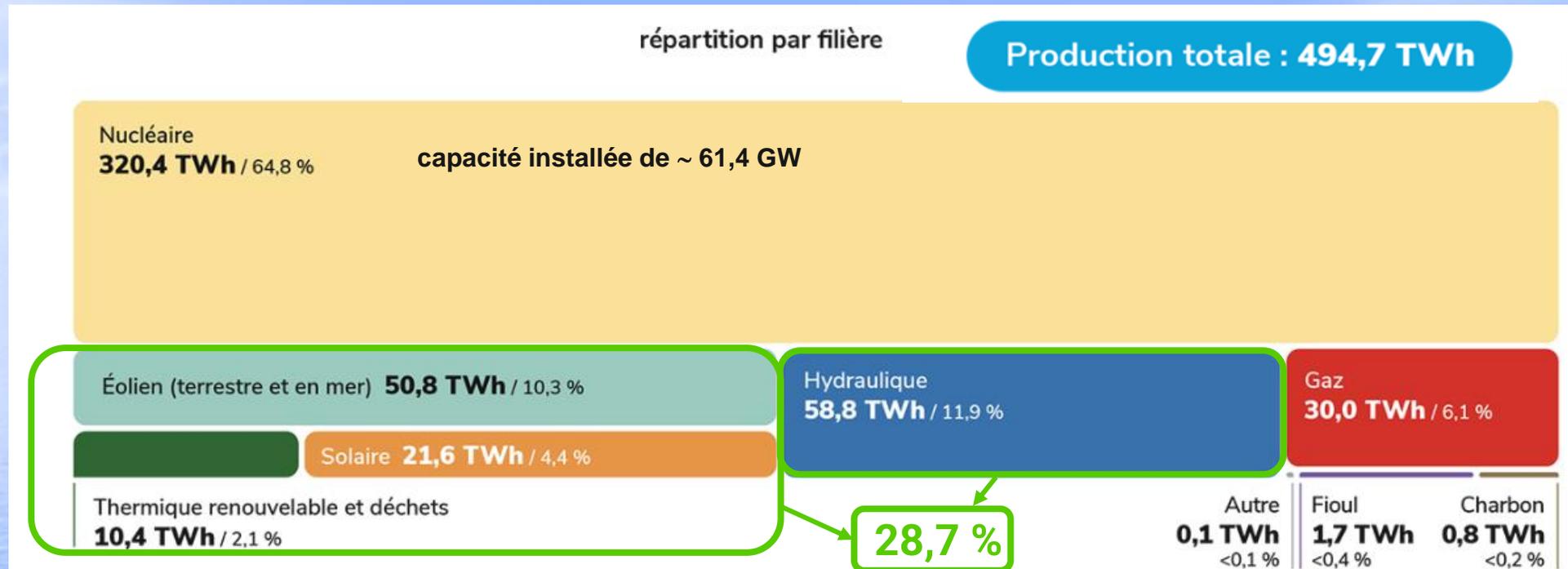
non corrigée du climat



Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM. L'industrie inclut la construction. En revanche, les hauts-fourneaux sont exclus, étant considérés comme faisant partie de la branche énergie dans le bilan de l'énergie.

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Production totale d'électricité en France en 2023



Particularité du parc nucléaire français → standardisation : tous réacteurs nucléaires en fonctionnement
= Réacteurs à Eau Pressurisée : REP (PWR = *Pressurized Water Reactor*)
& EPR = *European Pressurized water Reactor*

Les sites nucléaires en France (au 31 décembre 2022)



Palier REP* standardisé

Puissance électrique nette	Nombre de tranches	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

4 Nombre de réacteurs

* REP : réacteur à eau pressurisée.
 ** EPR : réacteur pressurisé européen.
Source : DGEC

- ◀ Usine de l'amont du cycle du combustible (enrichissement...)
- ▶ Usine de l'aval du cycle du combustible (retraitement...)
- ▼ Centre de stockage des déchets

**mise en service EPR de Flamanville 2024 (= 1^{ère} depuis 2002),
 fermeture 2 réacteurs Fessenheim 29 juin 2020,
 → France compte 57 réacteurs REP
 répartis entre 18 centrales**

52 mis en service en 16 ans : 1978 ↔ 1994
+ anciens ont puissance électrique nette de 900 MW,
+ récents 1500 MW
autres 1300 MW
EPR 1650 MW

□ Circuit ouvert avec prélèvement réduit et rejet d'eau dans les cours d'eau et la mer
 ○ Circuit fermé avec prélèvement réduit et rejet de vapeur dans l'atmosphère via des tours aéroréfrigérantes

**35 réacteurs utilisent combustible UOX,
 22 réacteurs de 900 MWe utilisent combustibles MOX + UOX**

Réacteurs dans le monde



416 NUCLEAR POWER REACTORS IN OPERATION

374 671 MWe TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

18 juin 2024

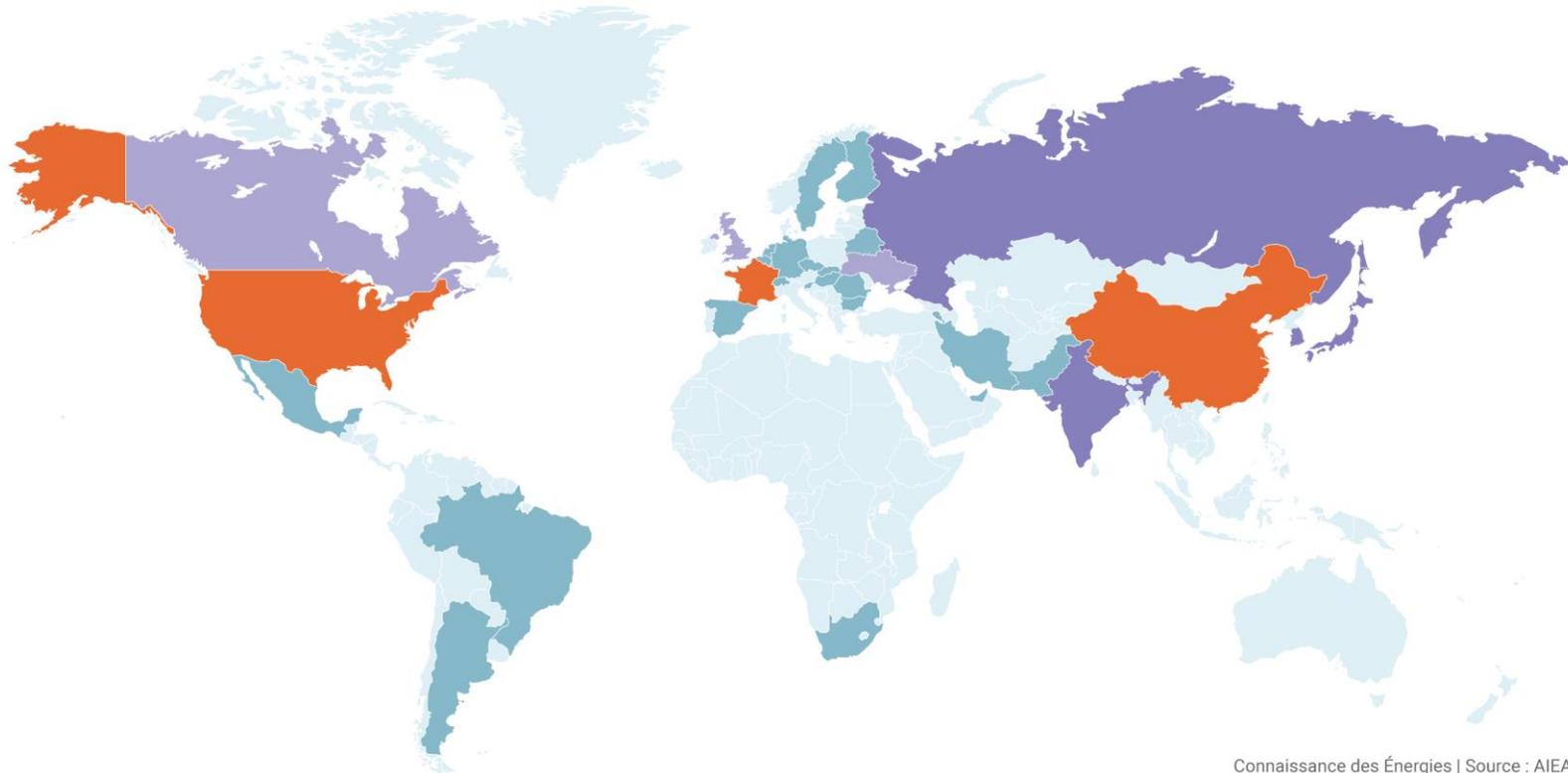
25 NUCLEAR POWER REACTORS IN SUSPENDED OPERATION

21 272 MWe TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

59 NUCLEAR POWER REACTORS UNDER CONSTRUCTION

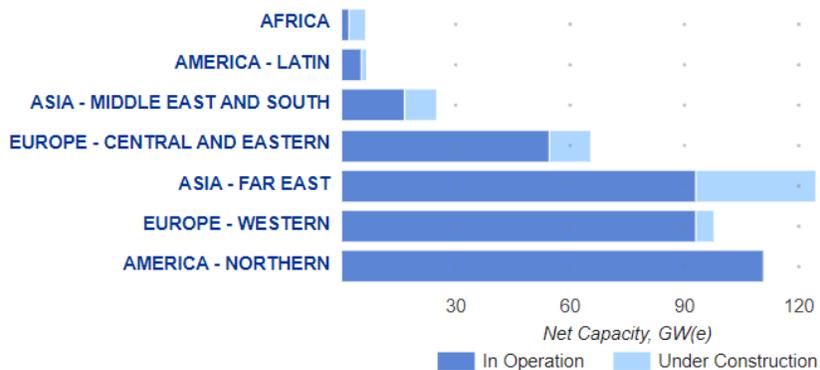
61 637 MWe TOTAL NET INSTALLED CAPACITY

Monde Nombre de réacteurs nucléaires « opérationnels » selon l'AIEA



Connaissance des Énergies | Source : AIEA

REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



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

3 principaux pays

(en nombre de réacteurs « opérationnels »)

États-Unis	93
France	56
Chine	51

Consommation mondiale d'énergie primaire en 2020

En 2020, consommation = 162 400 TWh (64 X + / France), → ~ 2 X + qu'en 1980 (83 600 TWh)

Asie contribue aux 3/4 de cette croissance

énergies fossiles → 80 % mix énergétique primaire :

pétrole, charbon, gaz naturel

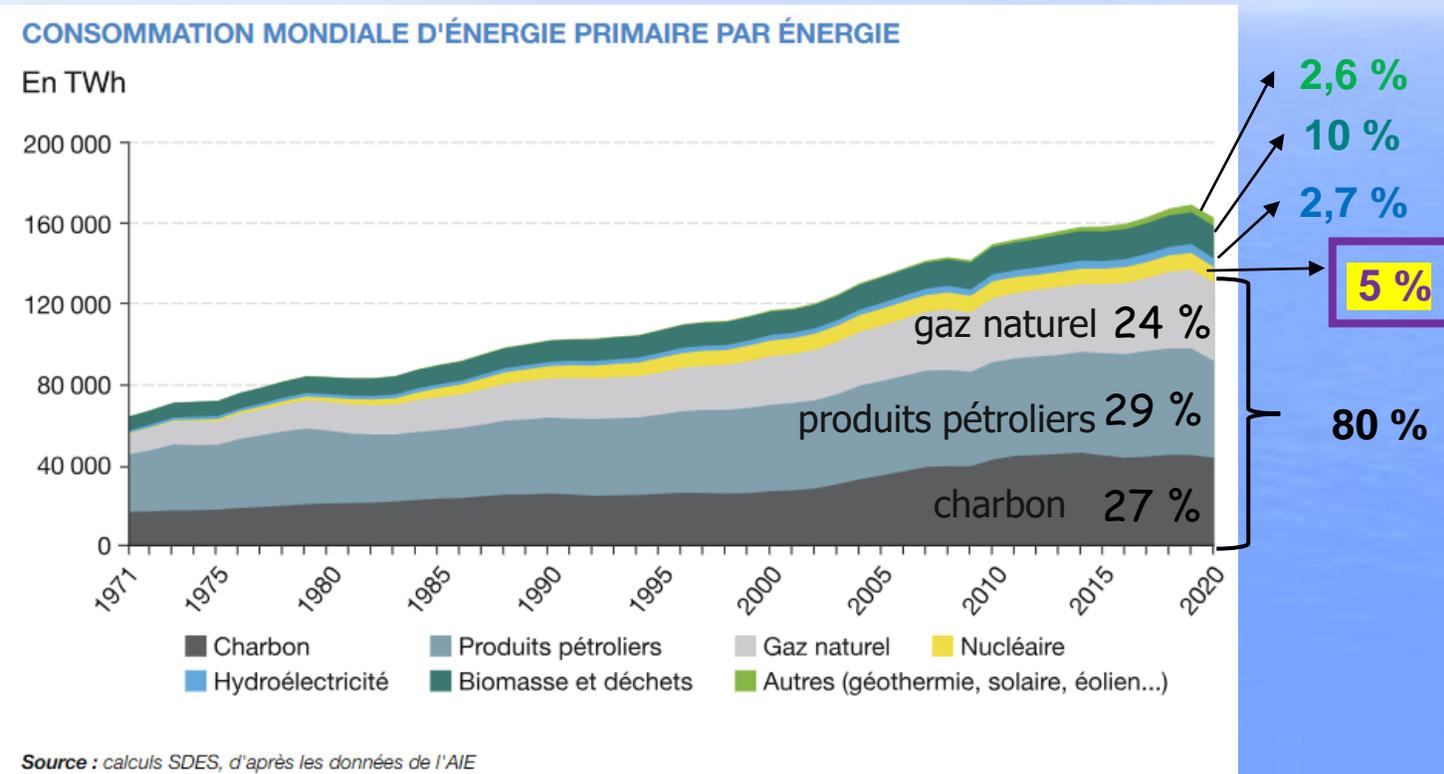
= 3 1ères énergies consommées

contribution nucléaire X 1,9 en 40 ans,
atteignant 5,0 % en 2020

biomasse & déchets dans mix énergétique
≈ stable ≈ 10 %

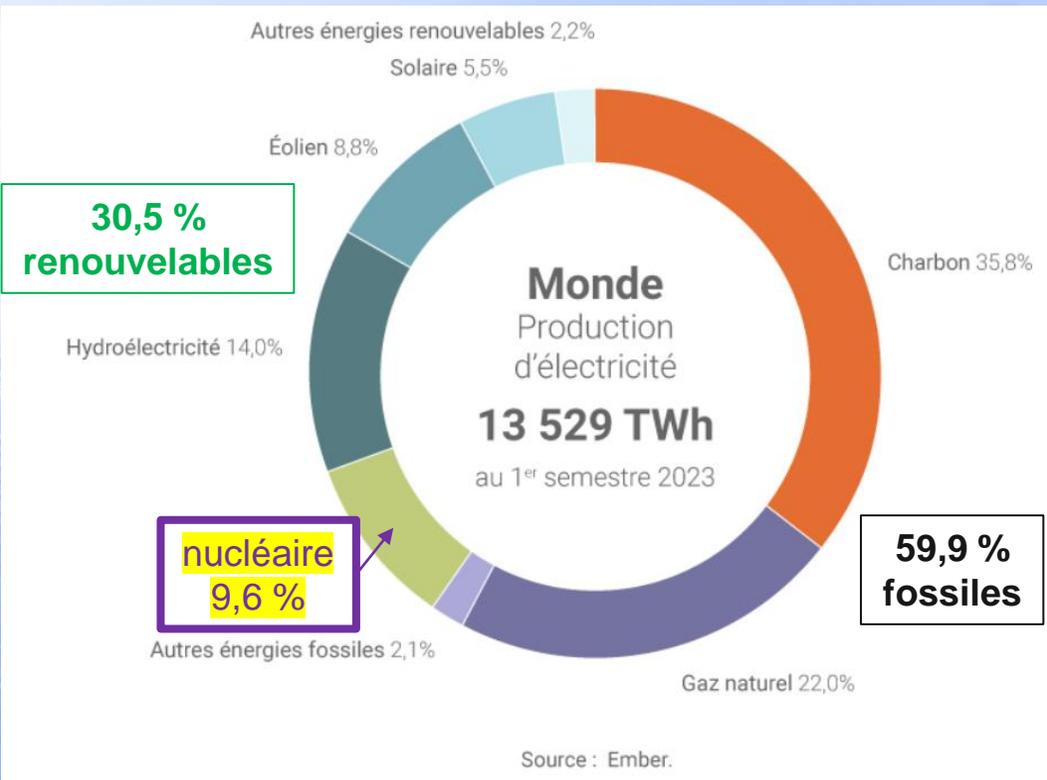
hydroélectricité ≈ stable ≈ 2,7 %

part autres énergies (solaire, éolien, géothermie)
passée 0,2 % à 2,6 % en 40 ans



Monde : Production d'électricité en 2023 & prévisions

En 2023, le nucléaire compte pour ~ 10 % de la production d'électricité dans le monde, contre ~ 60 % pour les E fossiles & ~ 30,5 % pour les E renouvelables



<https://www.connaissancedesenergies.org>

Selon AIEA production mondiale d'électricité devrait X2 d'ici à 2050

En 2050, part du nucléaire pourrait compter pour :

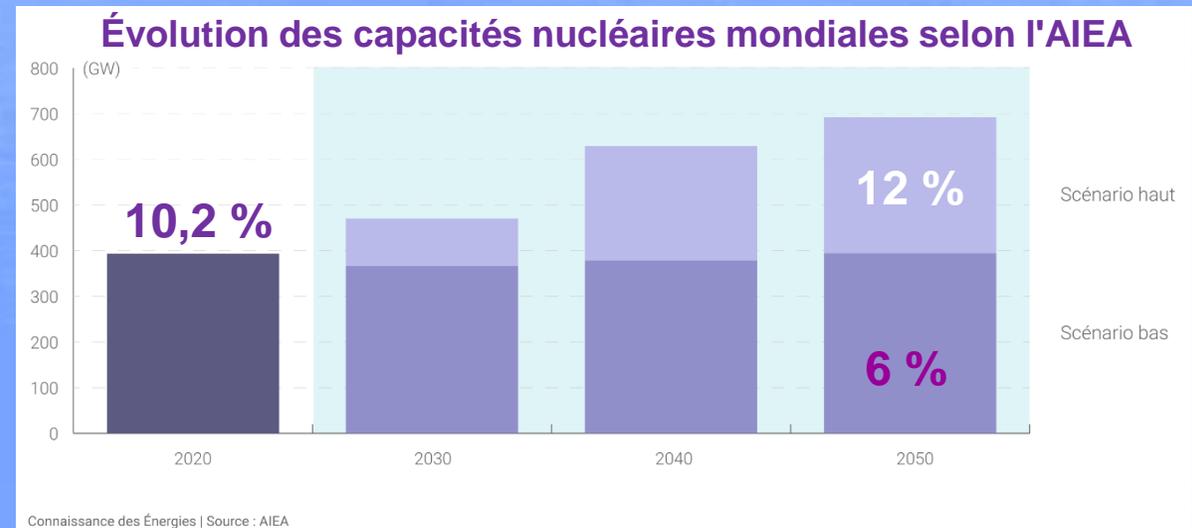
12 % du mix électrique mondial, scénario « haut »

6 %

scénario « bas »

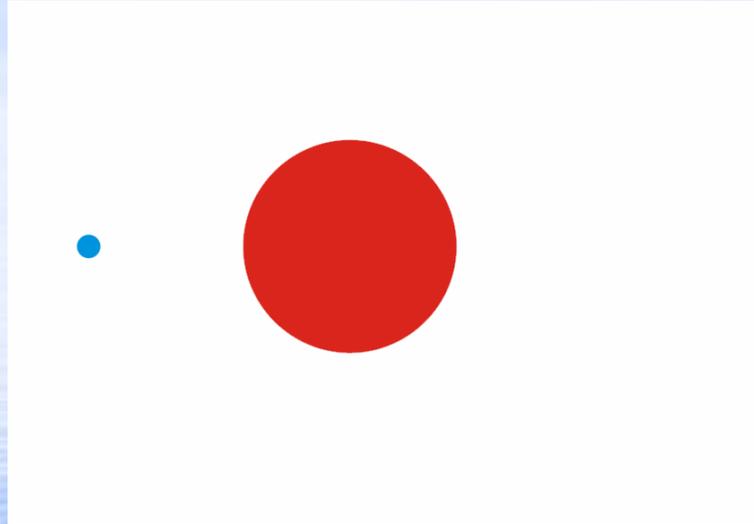
contre ~ 10,2 %

en 2020



Fonctionnement d'un réacteur

La fission nucléaire



Collision avec 1 neutron, noyaux lourds se brisent en 2 noyaux + petits
= réaction de **FISSION**

2 morceaux = **PRODUITS DE FISSION (PF)**, radioactifs

seul noyau fissile naturel = ^{235}U

dégagement d'énergie accompagne fission $E \sim 200 \text{ MeV}$

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

PF ralentis lors chocs subis avec atomes environnants, j \nearrow arrêtés

\rightarrow Énergie perdue par PF chauffe le combustible

\rightarrow leur E transformée en chaleur, localement T° combustible \nearrow

chaleur dégagée chauffe l'eau (du circuit 1^{ère}) entourant le combustible

\rightarrow transformée en vapeur (dans circuit 2^{ème})

\rightarrow actionne turbine

\rightarrow production d'ÉLECTRICITÉ

\rightarrow couplée à alternateur



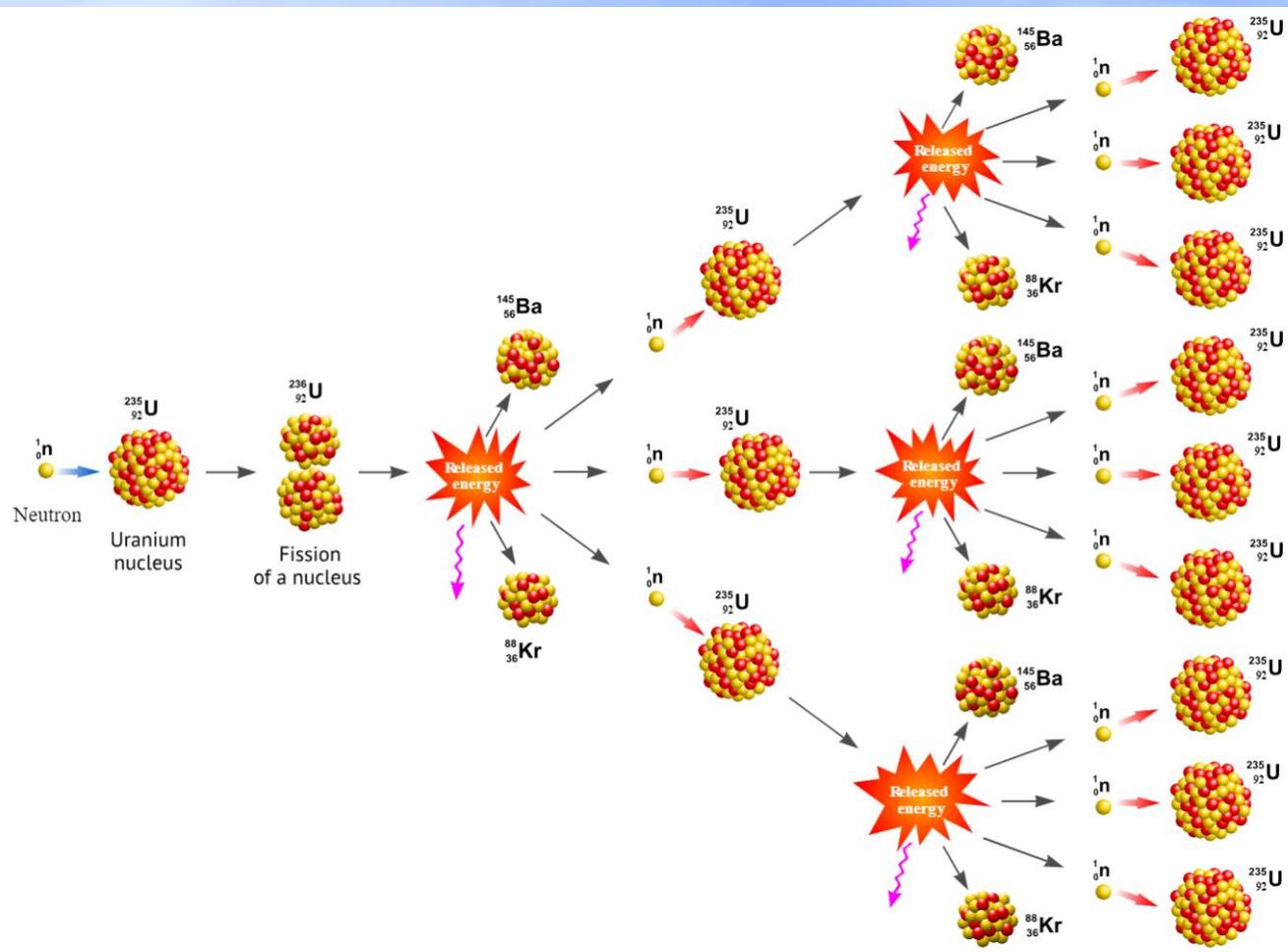
noyau lourd,
 ^{235}U ou $^{239, 241}\text{Pu}$



neutron

Fonctionnement d'un réacteur

La réaction en chaîne



1^{ère} génération \longleftrightarrow 2^{ème} génération \longleftrightarrow 3^{ème} génération
50 μs 50 μs

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

chaque n peut interagir avec 1 autre noyau

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

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

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

= RÉACTION EN CHAÎNE

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

maîtrisée par "barres de contrôle" mobiles composées noyaux absorbant les n (B, Cd, In...)

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 à tout moment 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 $\rightarrow k N_0 \rightarrow k \times k N_0 \rightarrow k \times k \times k N_0 \rightarrow \dots$

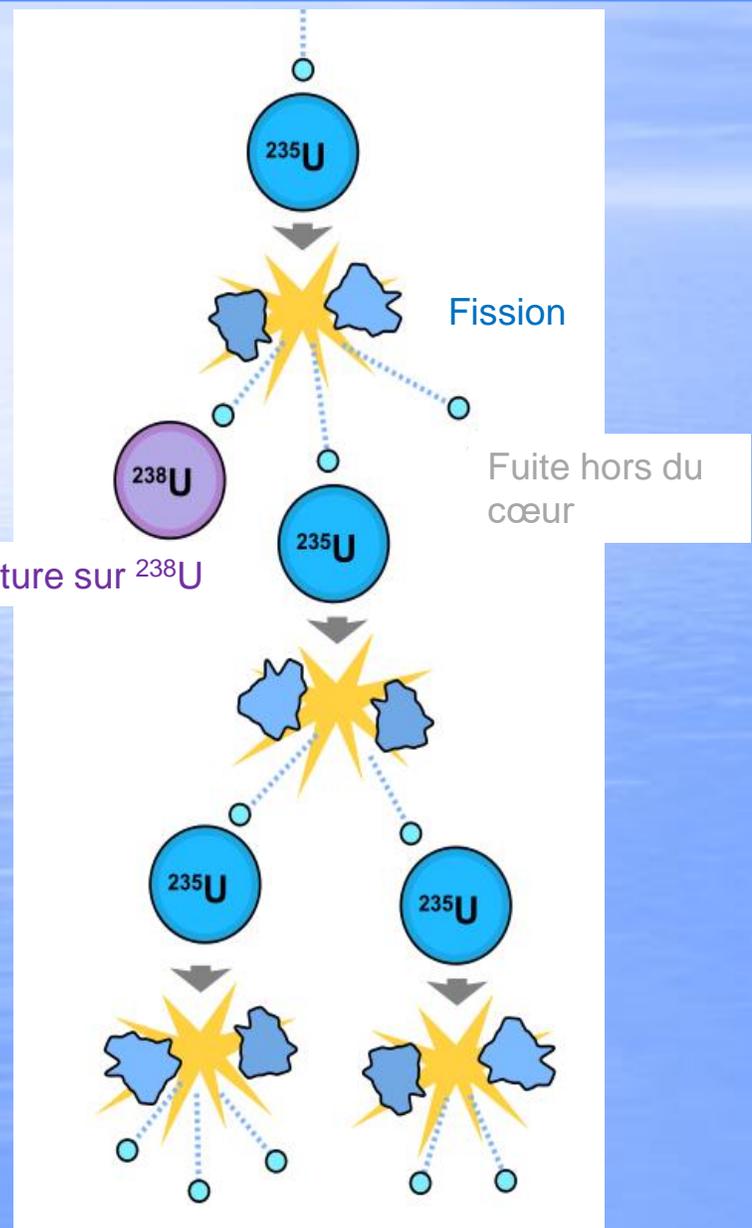
si $k = 1$, chaque fission induit ≈ 1 nouvelle fission
réacteur critique, puissance stable
 \Rightarrow mode de fonctionnement **RÉACTEURS** actuels

si $k < 1$, nombre de fissions \searrow d'1 génération à l'autre
réaction **s'arrête** rapidement sans apport extérieur de n
réacteur sous-critique, puissance \searrow jusqu'à l'arrêt

si $k > 1$, nombre de fissions \nearrow d'1 génération à l'autre,
réaction en chaîne **diverge** vite
réacteur sur-critique, puissance ne fait que \nearrow ,
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 Pressurisé = REP

Le cœur du réacteur : le combustible



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

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

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

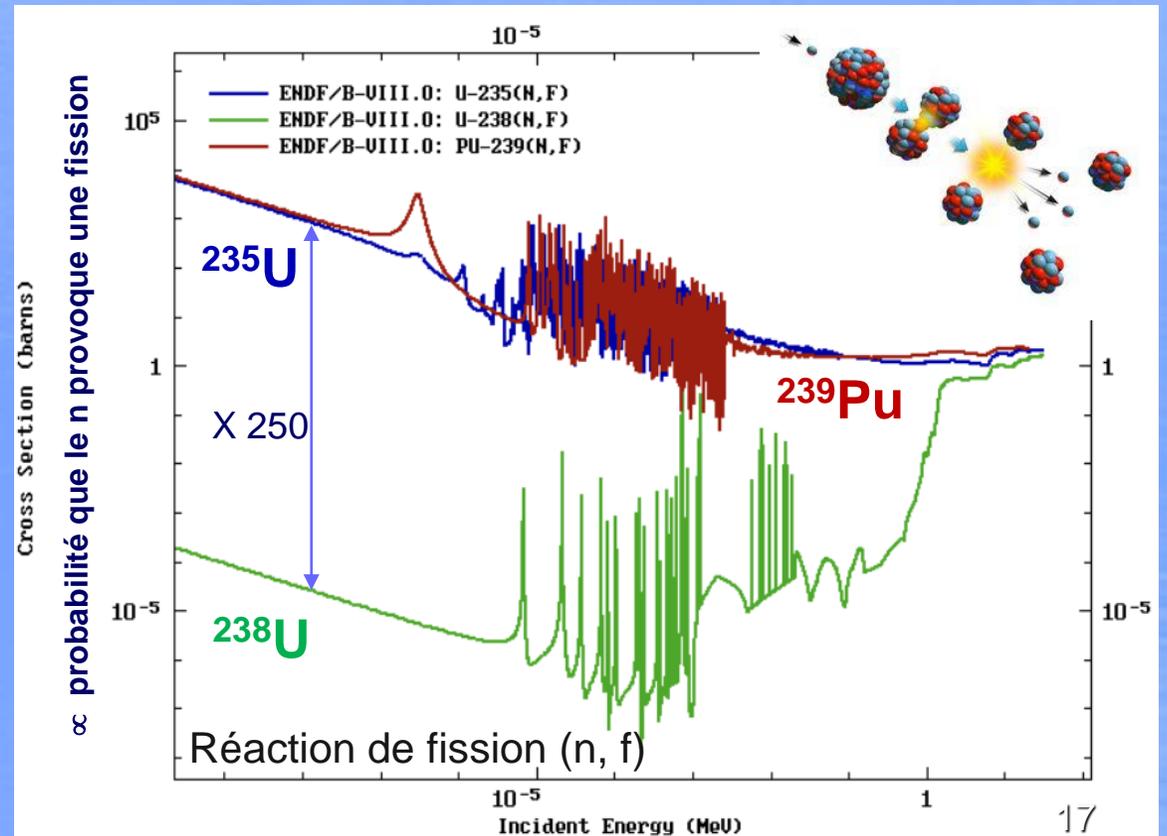
+ 0,7 kg d' ^{235}U ($T_{1/2} = 0,704 \cdot 10^9$ ans)

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

fissiles

= fissionnent $\forall E_{\text{neutron}}$

^{238}U non fissile, $\exists E_{\text{seuil}}$



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisé = REP

le cœur du réacteur : le combustible



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

UOX = uranium oxide = UO_2

ou combustible constitué d'un 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 usines d'enrichissement de l'U (~ 0,28 % d' ^{235}U)

& 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)

combustible formé de pastilles, empilées dans tubes étanches = crayons (1^{ère} barrière de confinement) réunis en faisceaux formant les assemblages

La France importe 8 000 à 9 000 t d'U naturel / an du Canada, Australie, Kazakhstan et Niger (2017)



Assemblage
264 crayons
Crayon
h = 6 m
d = 1 cm
e = 1 mm
272 pastilles
Pastille
h = 1 cm
d = 8 mm



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisé = REP

Le cœur du réacteur : le combustible

Réacteur de 1 GWe fonctionnant 1 an consomme :

~ 200 t d'U naturel / an, 30 t d'U enrichi (à ~ 4% en ^{235}U)

combustible est usé = contient plus suffisamment de noyaux fissiles pour réaction en chaîne soit maintenue

gaine étanche contenant combustible peut s'altérer sous l'effet : irradiation

& corrosion en particulier

⇒ combustible périodiquement renouvelé

rechargement du combustible nécessite l'arrêt du réacteur

s'effectue manière fractionnée :
seulement 1/3 ou 1/4 combustible rechargé

1 cycle ⇔ durée de fonctionnement d'un réacteur entre deux recharges
= 1 et 2 ans pour un REP

combustible peut durer 3 ou 4 cycles dans un REP, soit entre 3 et 5 ans



Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Pressurisé = REP

Le cœur du réacteur : le combustible

Combustible utilisé UOX va contenir :

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

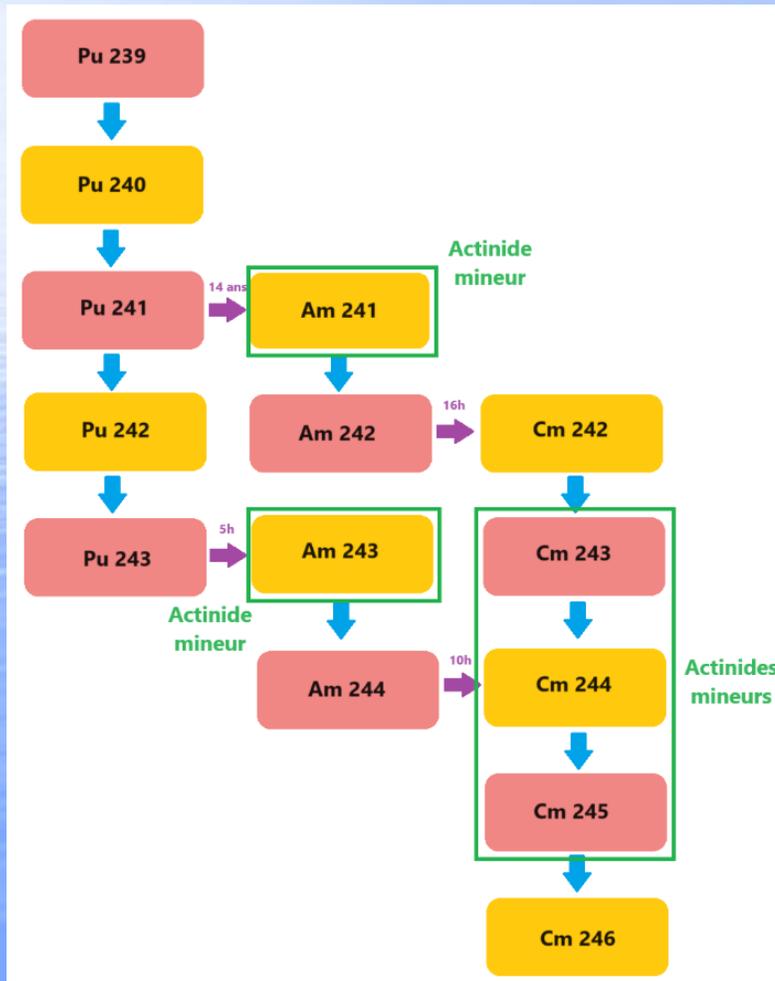
Actinides =

89 Ac ACTINIUM (227)	90 Th THORIUM 232,0377	91 Pa PROTACTINIUM 231,03	92 U URANIUM 238,02	93 Np NEPTUNIUM (237)	94 Pu PLUTONIUM (244)	95 Am AMÉRICIUM (243)	96 Cm CURIUM (247)	97 Bk BERKÉLIUM (247)	98 Cf CALIFORNIUM (251)	99 Es EINSTEINIUM (252)	100 Fm FERMIUM (257)	101 Md MENDÉLÉVIUM (258)	102 No NOBÉLIUM (259)	103 Lr LAWRENCIUM (262)
--------------------------------------	--	---	-------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------	---

combustible utilisé 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

- GWj/t → Usure d'un combustible → 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

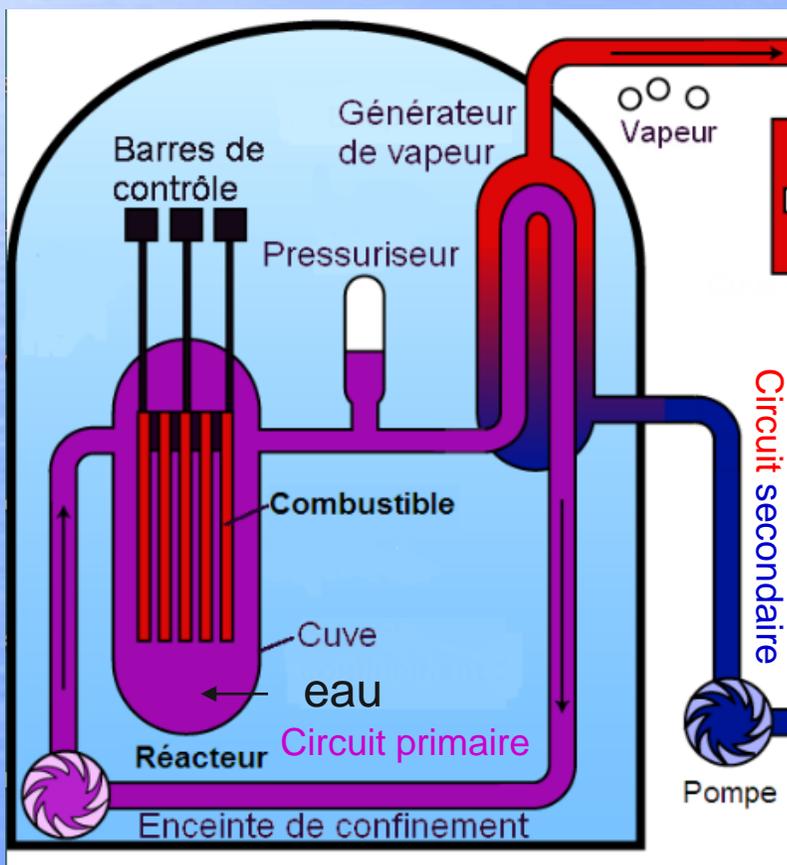
⇒ n "rapides" ~ 20 000 km/s → "lents" ou "thermiques"* 2,2 km/s
 ~ 2 MeV → 0,025 eV = 2,5 · 10⁻⁸ MeV

* En équilibre thermique avec le milieu

⇒ fissions + facilement et en + grand nombre

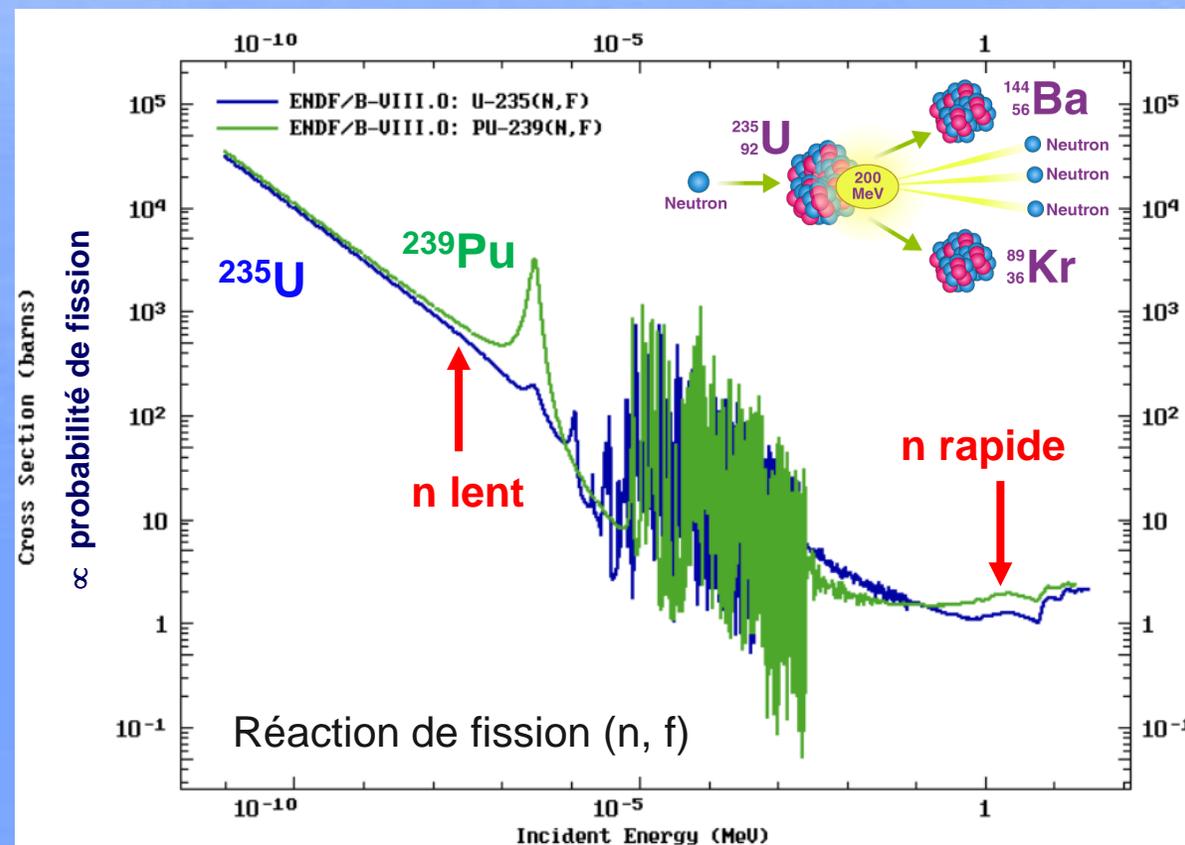
Enceinte
 80 000 m³,
 résiste à 3 bar

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



Fonctionnement d'un réacteur REP

Le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporteur

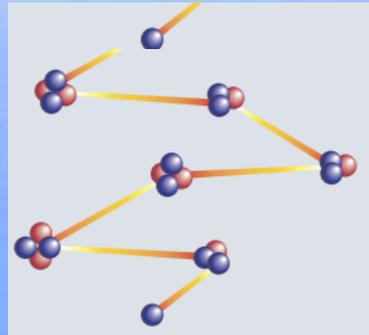
MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

le MODÉRATEUR

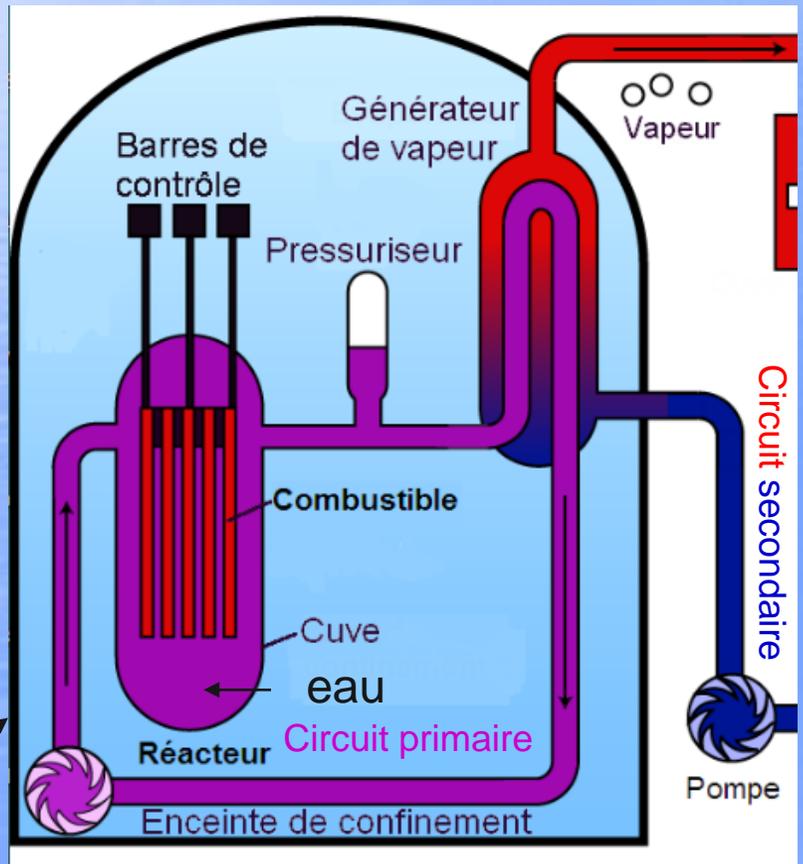
⇒ n "rapides" ~ 20 000 km/s → "thermiques" ou "lents" 2,2 km/s
 ~ 2 MeV → 0,025 eV = 2,5 · 10⁻⁸ MeV



meilleur ralentisseur = l'hydrogène = ¹H
 → **EAU**

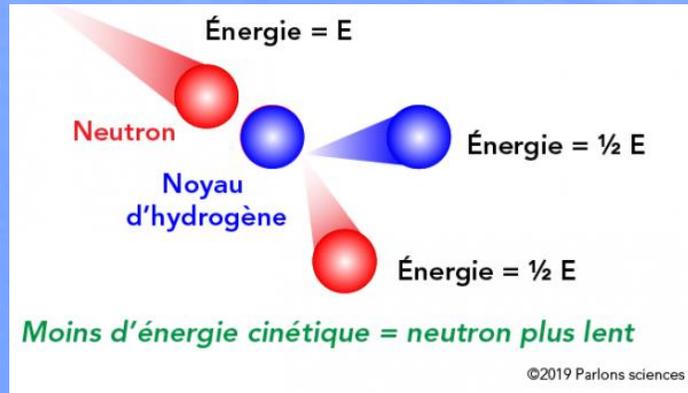
(REP : Graphite, eau lourde = ²H₂O)

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



3^{ème} barrière

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



©2019 Parlons sciences

H relativement absorbant (capture les neutrons)

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

Fonctionnement d'un réacteur REP

le cœur du réacteur : le modérateur - le caloporteur

👉 le CALOPORTEUR

MODÉRATEUR =



= CALOPORTEUR

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

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

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

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)

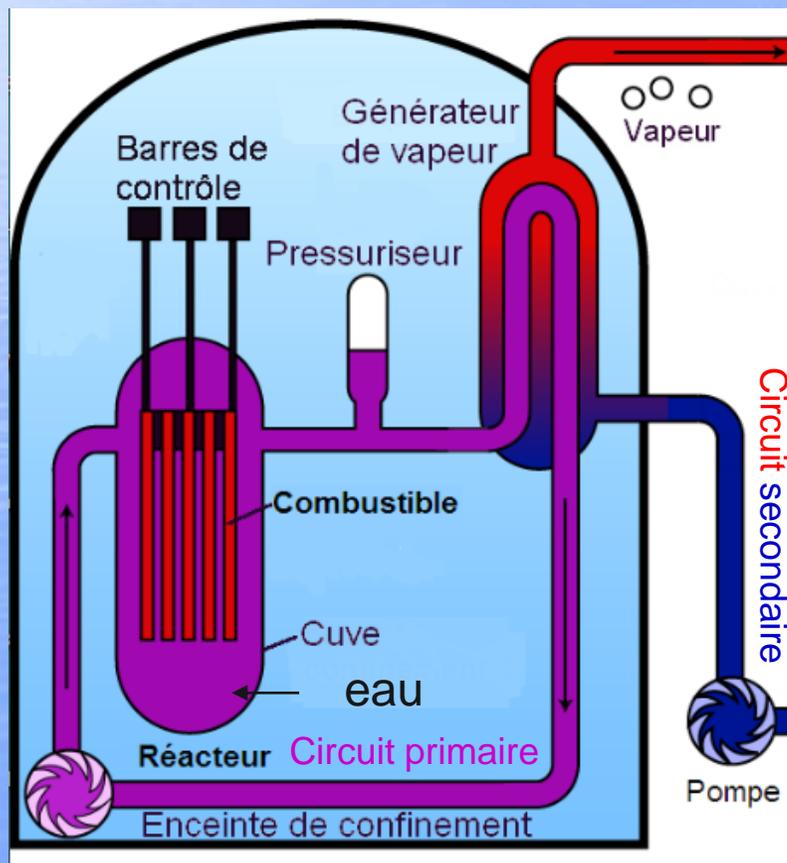
eau passe dans GÉNÉRATEUR DE VAPEUR ⇒ transfert la puissance thermique du circuit 1aire vers le 2aire

⇒ porter l'eau du circuit 2aire à ébullition → produire vapeur

(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

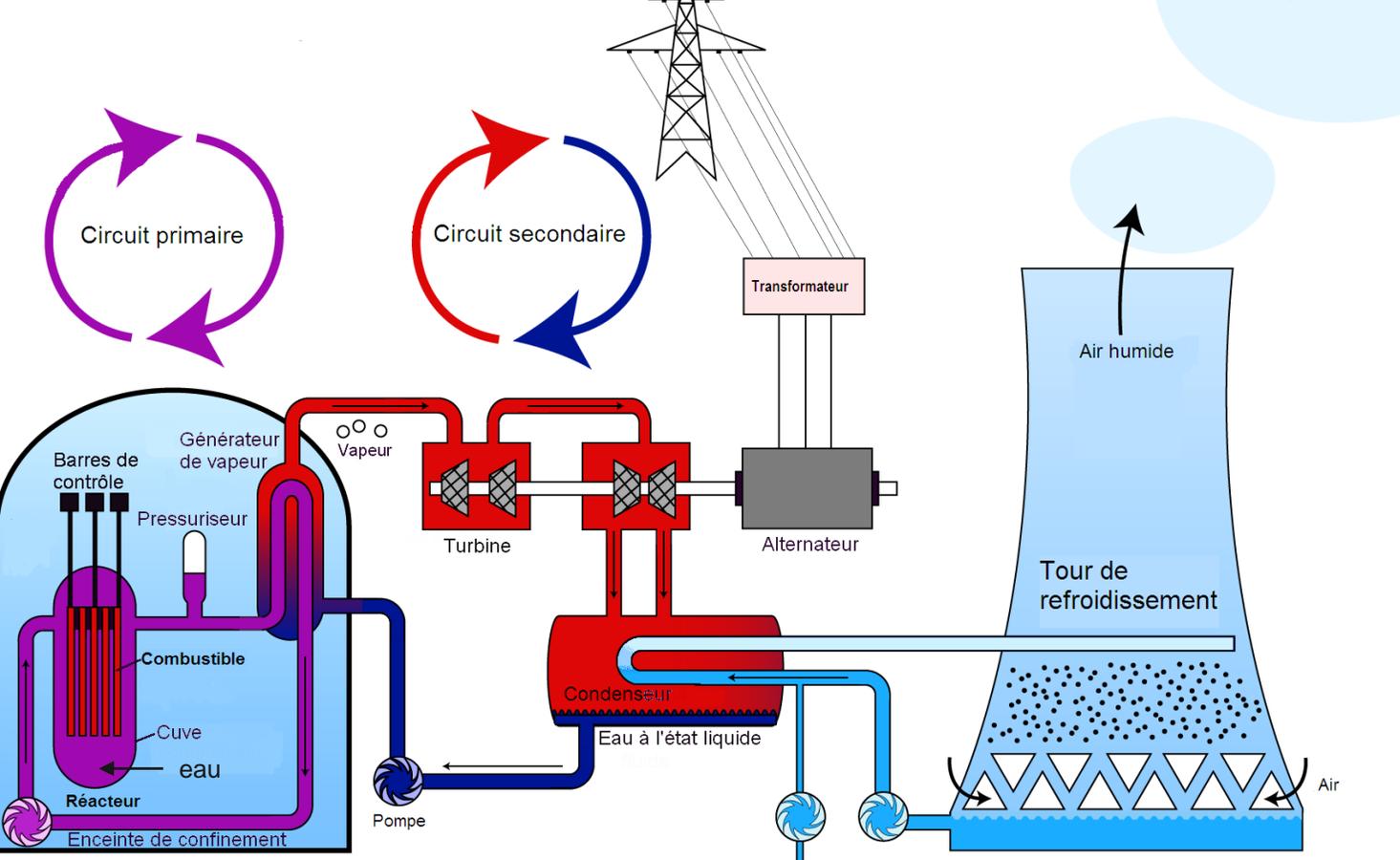


Fonctionnement d'un réacteur REP

Turbine – alternateur - condenseur

Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



En se détendant, vapeur entraîne la rotation d'une **TURBINE** couplée à **ALTERNATEUR** produisant l'électricité

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

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

Conversion a rendement limité :

= puissance électrique produite / puissance thermique dégagée dans ♥ du réacteur

seuls ≈ 33 % (REP) à 37 % (EPR) de la chaleur issue des fissions est convertie en électricité

Comparaisons chiffrées

Pour produire autant d'électricité par an qu'un réacteur nucléaire 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

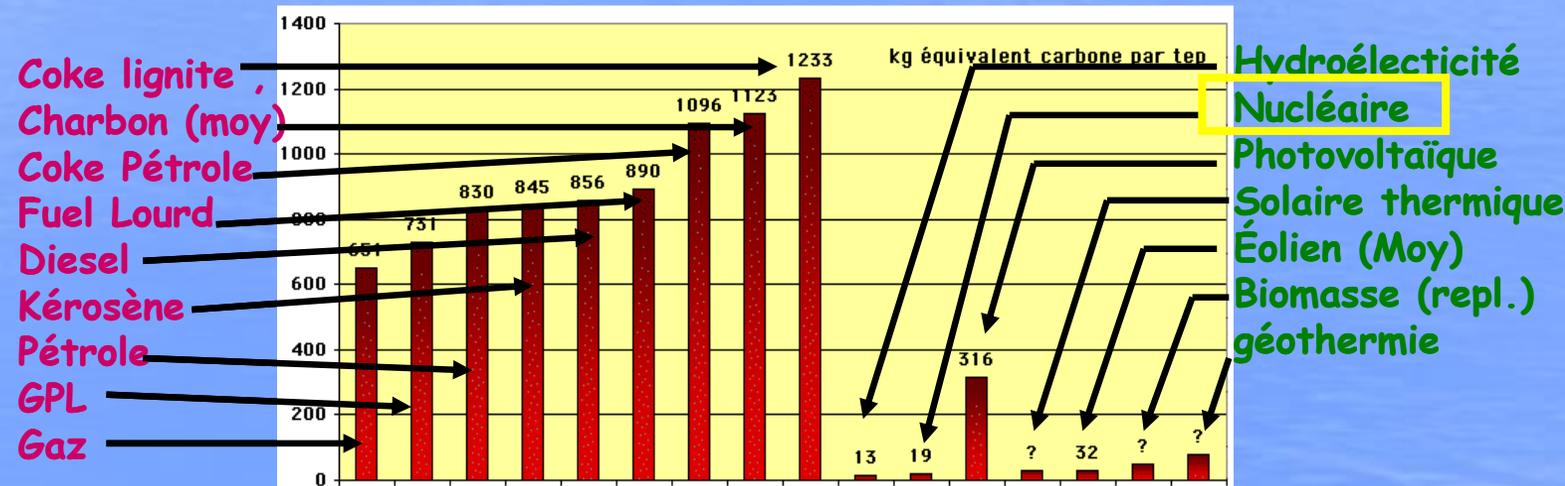
* facteur de charge d'1 unité de production électrique = ratio entre l'E qu'elle produit sur une période donnée et l'E qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné à puissance max

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)

Émissions de CO ₂ des différentes sources d'électricité (en g de CO ₂ eq / kWh) (source CEA)	
Charbon	820
Biomasse combinée au charbon	740
Gaz - cycle combiné	490
Biomasse seule	230
Panneaux solaires à grande échelle	48
Panneaux solaires sur toits	41
Géothermie	38
Énergie solaire concentrée	27
Hydroélectricité	24
Éolien en mer	12
Nucléaire	12
Éolien terrestre	11

Énergies fossiles



Kg-equivalent-C émis par TeP pour diverses énergies. Pour les énergies Produisant de l'électricité, la conversion a été le taux physique (1TeP=42GJ=11,6MWh) Sources Manicore, ADEME, EDF

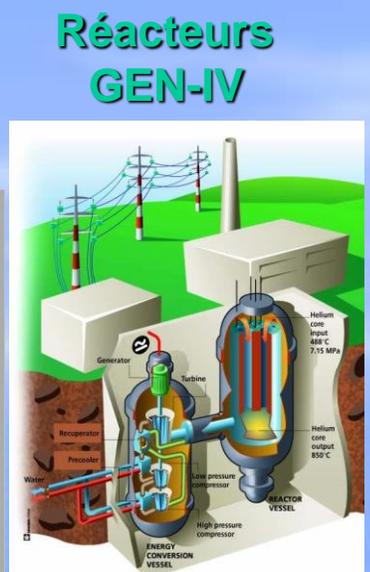
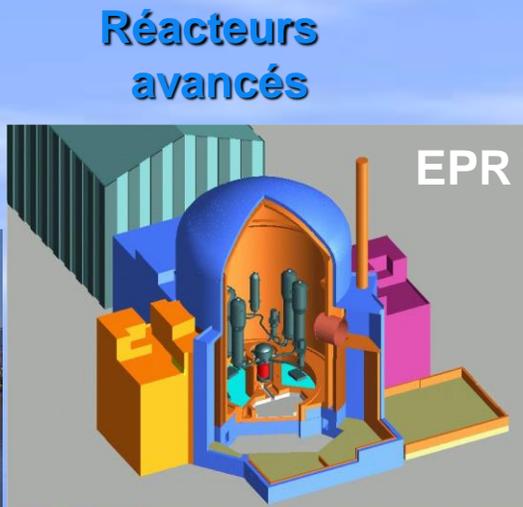
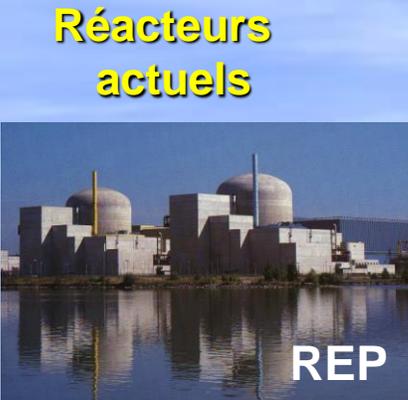
Tableau établi en 2014 par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques).

Génération de réacteurs en France

Calendrier

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

Premières réalisations



Generation I

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**

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'7 ~2000
 Améliorations continues
 MOX
 même qté combustible ⇒ 2X+ d'E qu'il y a 40ans
 ↘ **dépendance énergétique vis à vis du pétrole**
 recherche sur retraitem^t 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
 1 EPR 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

European Pressurized water Reactor = EPR

Evolutions techniques, économiques, environnementales

Techniquement l'EPR s'appuie sur 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% combustible MOX (U et Pu)

contre 33% dans REP actuels

Générateur de vapeur et turbine évolués \Rightarrow rendement supérieur

Enrichissement légèrement + élevé (j'5%)

\Rightarrow Δ 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

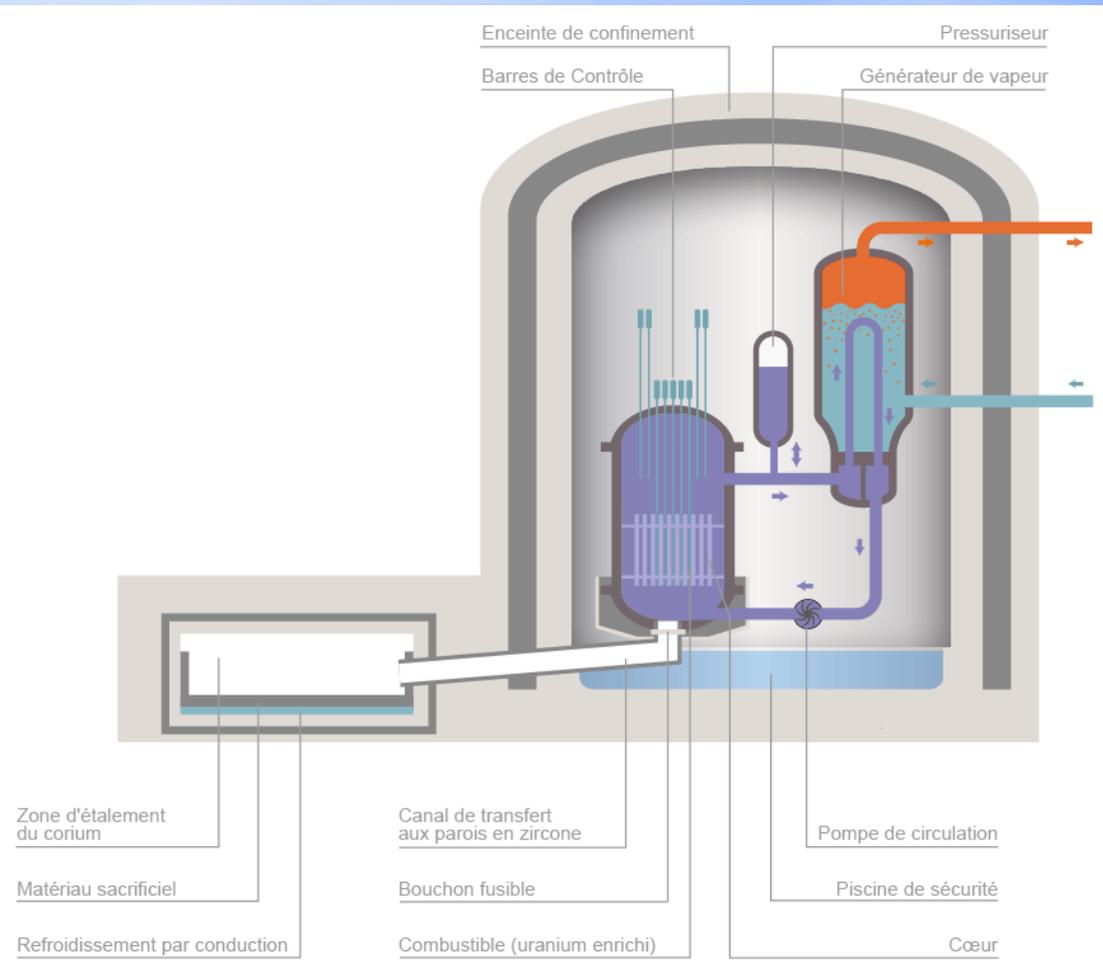
	EPR	REP N4
Puissance thermique (MW)	4500	4250
Puissance électrique (MWe)	1650	1450
Rendement thermique (%)	37	34
Nombre d'assemblages	241	205
Taux de combustion du combustible (GWj/t)	60	45
Durée de vie (ans)	60	40 (<50 grand carénage)
Irradiation du personnel (homme.mSv/an /réacteur)	0,4	1 27

European Pressurized water Reactor

Evolutions de sûreté

SURETE 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
⇒ pas de contamination du sol

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

multiplication des systèmes de secours :
4 systèmes de refroidissement d'urgence indépendants, etc

résistance sismique X par $\sim 1,65$ / 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

→ 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'Énergie Atomique)

Fin 2002 : 6 technologies de réacteurs, critères d'exigence :
sûreté renforcée,

économiques en ressources (U et Th),

économiquement compétitifs,

plus résistants / risques de prolifération,

mieux protégés contre attaques terroristes

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

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



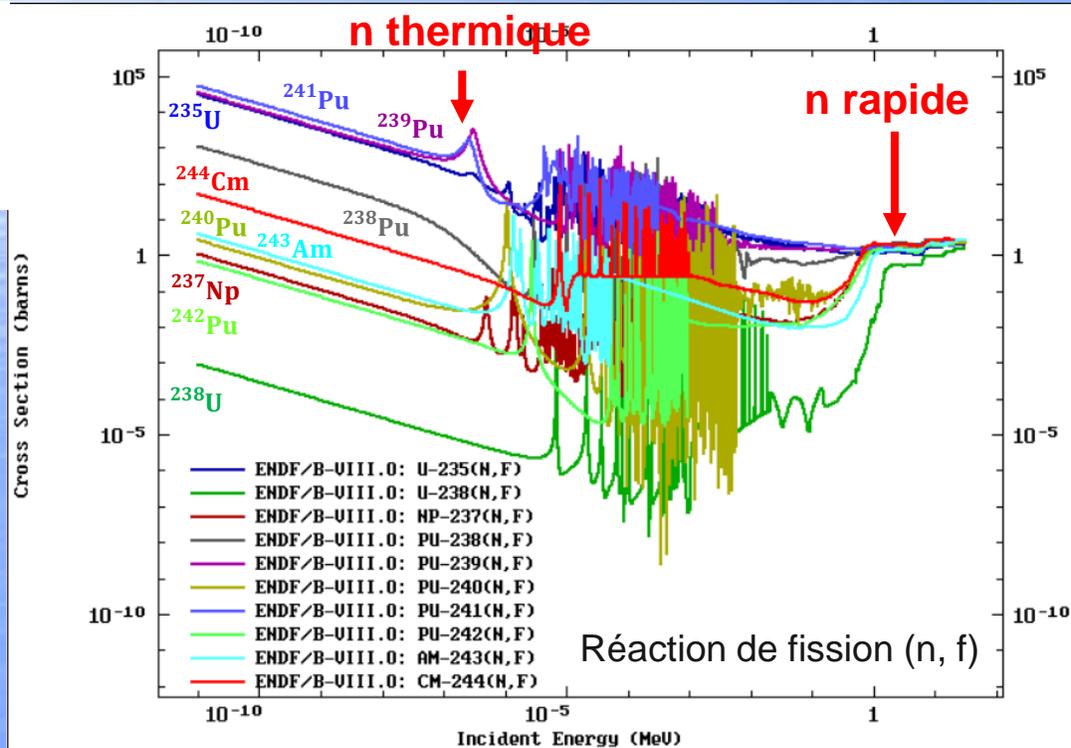
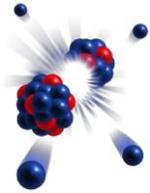
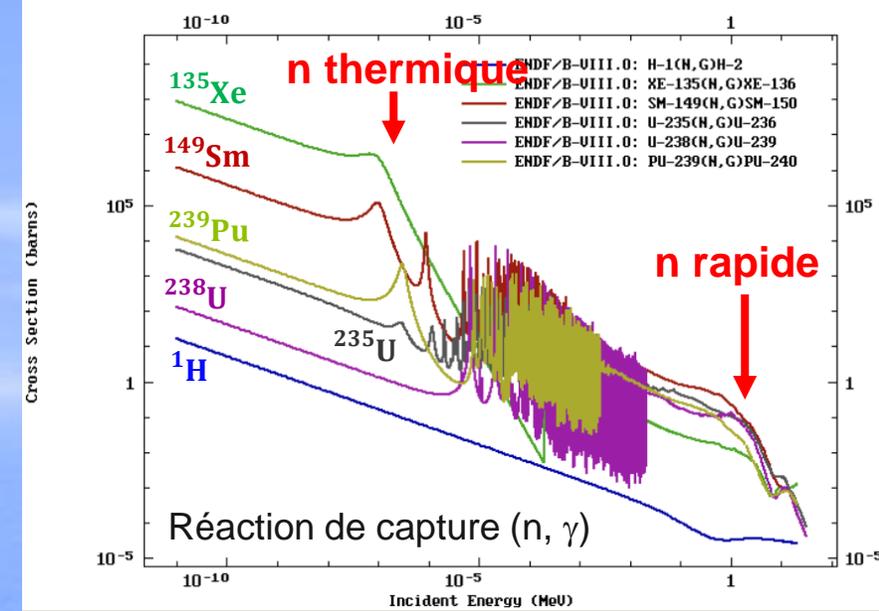
Réacteur à neutrons rapides : RNR

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

→ pas de modérateur ⇒ eau interdite

↑ ↘ captures stériles (PF (^{135}Xe , ^{149}Sm), éléments de structure, absorbants des barres de contrôle)

fissions deviennent + probables que captures en spectre rapide



↑ Fissionnent 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 » placées autour du ♥ constituées de noyaux fertiles (^{238}U) pour régénération

Réacteur à neutrons rapides : RNR

Régénération

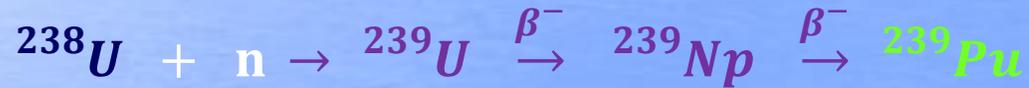
↑ ↑ fission induite par n_{rapide} donne en moyenne + de n qu'avec $n_{\text{thermique}}$ → ^{239}Pu (2,4 n / 2,1 n) | ^{235}U (1,9 n / 2,07 n)

→ Dans RNR, excès de n (+1) / à ceux utilisés pour maintenir la réaction en chaîne (- 1 n) & ceux perdus (- 0,3 n)

par capture stérile & fuite hors du ♥

→ n disponibles pour la **Régénération**

Réaction
de
capture



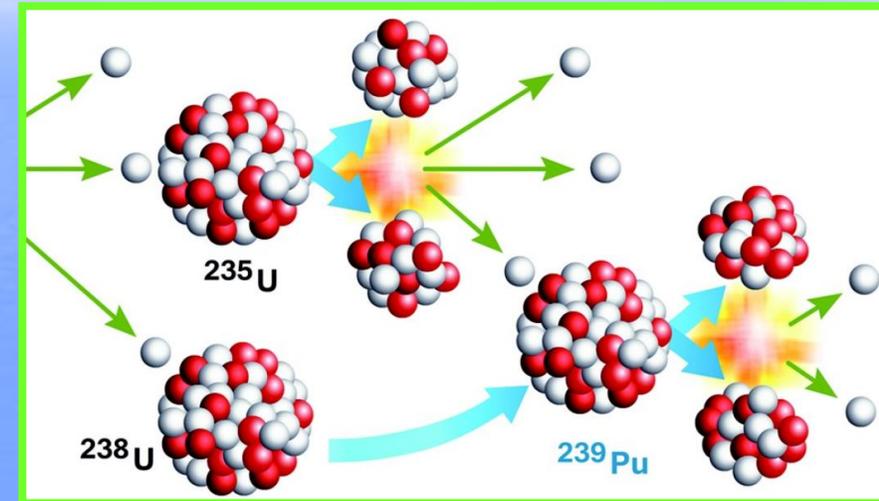
fertile
capture 1 neutron

rapide

vies courtes

fissile

fissionne facilement



© Corinne Beurtey / CEA

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 toujours renouvelé

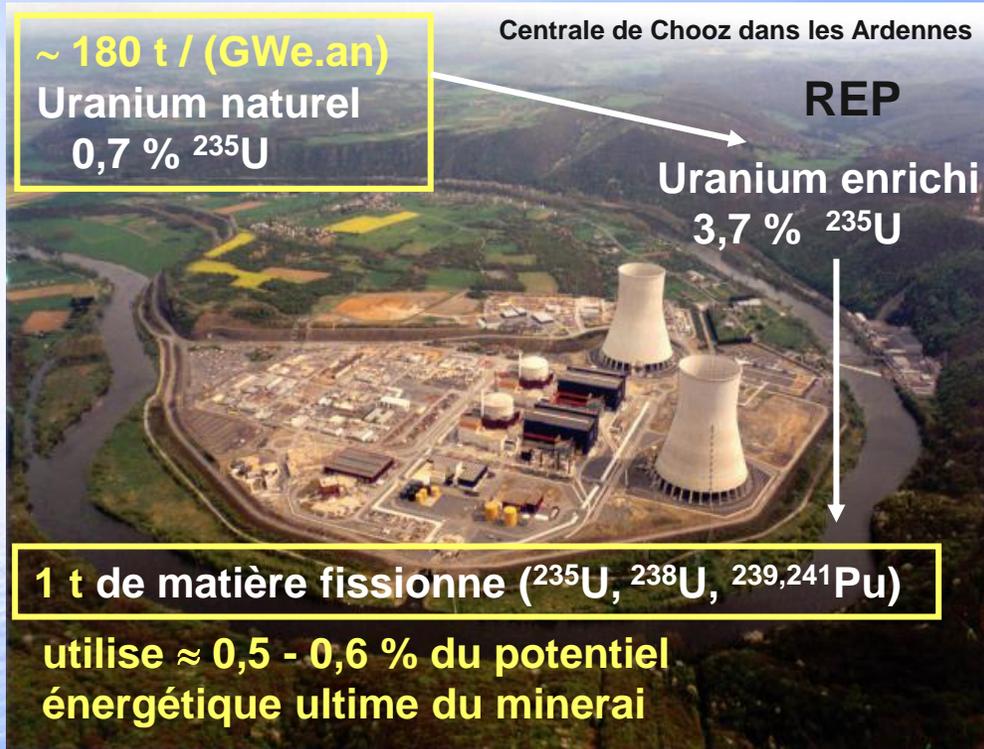
Il faut fournir la 1ère charge de Pu (~ 20 % ^{239}Pu , ~ 80 % ^{238}U), 1 X réacteur démarré, quantité de Pu maintenue constante par régénération & retraitement des couvertures fertiles

↑ ↑ 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 – Transmutation



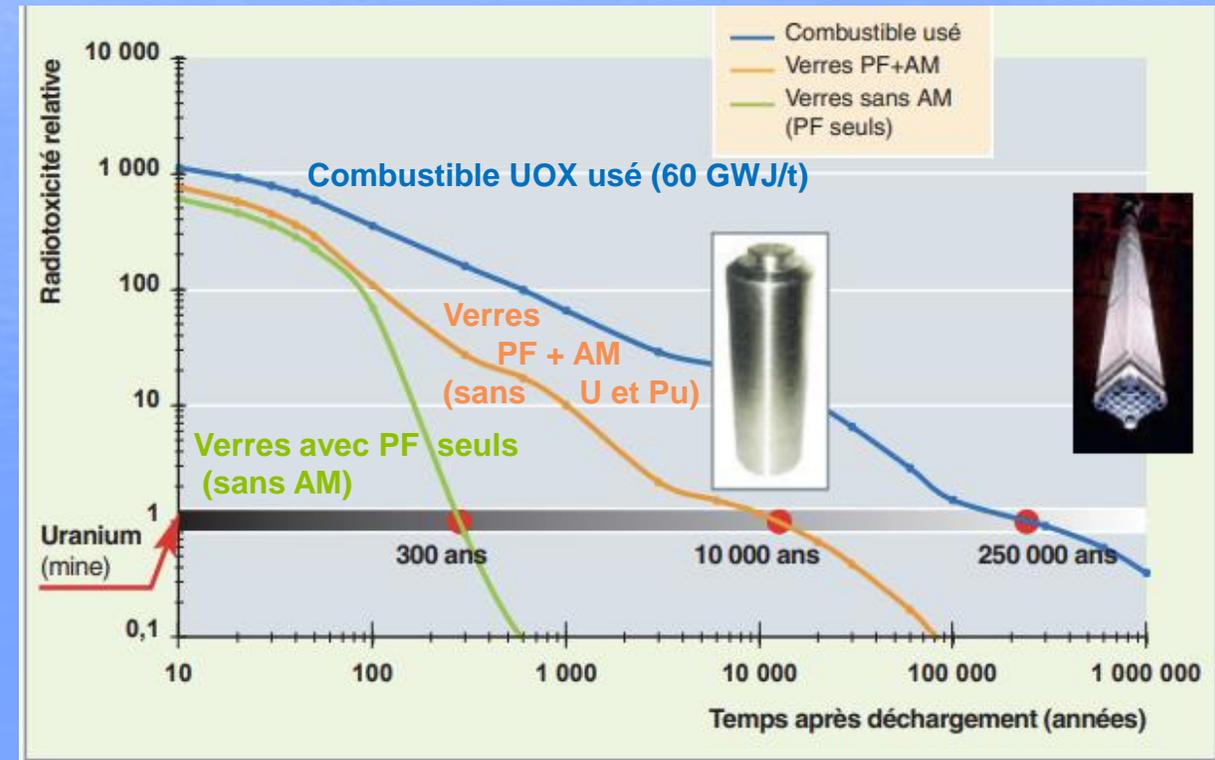
☞ **TRANSMUTATION** (par fission principale^t ou capture)
= transformer déchets radioactifs à vies longues (AM : Np, Cm, Am) en éléments à périodes courtes, voire stables

Déchets ultimes limités aux PF ($T_{1/2} \sim 30$ ans), plus aisément stockables

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'uranium naturel
→ production d'au moins 100 X + d'électricité que dans REP actuels

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

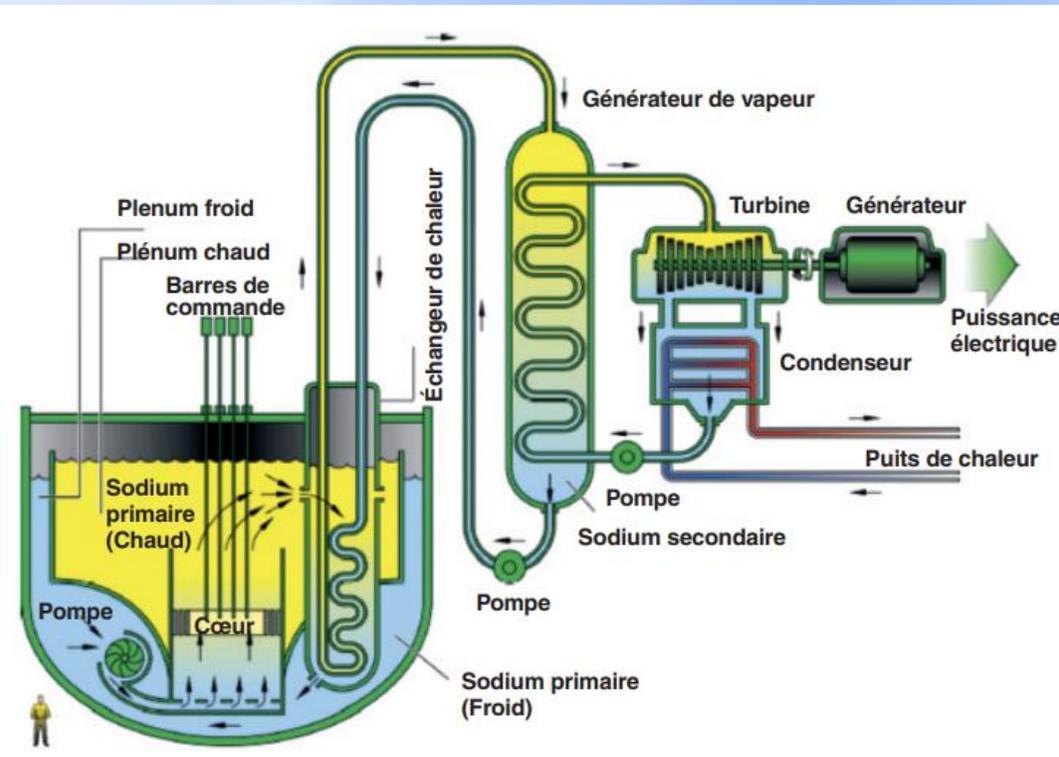


Radiotoxicité = nocivité de nature radioactive que peut subir tout organisme en cas d'ingestion ou d'inhalation de radioisotopes

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Sodium Fast Reactor, SFR ou RNR-Na

Caloporteur = SODIUM LIQUIDE (Na - métal)



- ↑ excellentes propriétés thermo-hydrauliques (liquide 97,8°C - 881,5°C ébullition)
- ↑ capture peu de neutrons, les ralentit peu
- ↑ caloporteur à 400-500°C ⇒ rendement thermodynamique ~ 40 %
- ↑ Peut être 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 ⇒ circuit étanche
 - ↳ opacité à la lumière complexifie manutentⁿ, inspectⁿ, réparatⁿ

...
→ technologie relativement complexe & coût élevé
industriellement validée

à améliorer → rentabilité économique
→ être commercialisable



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

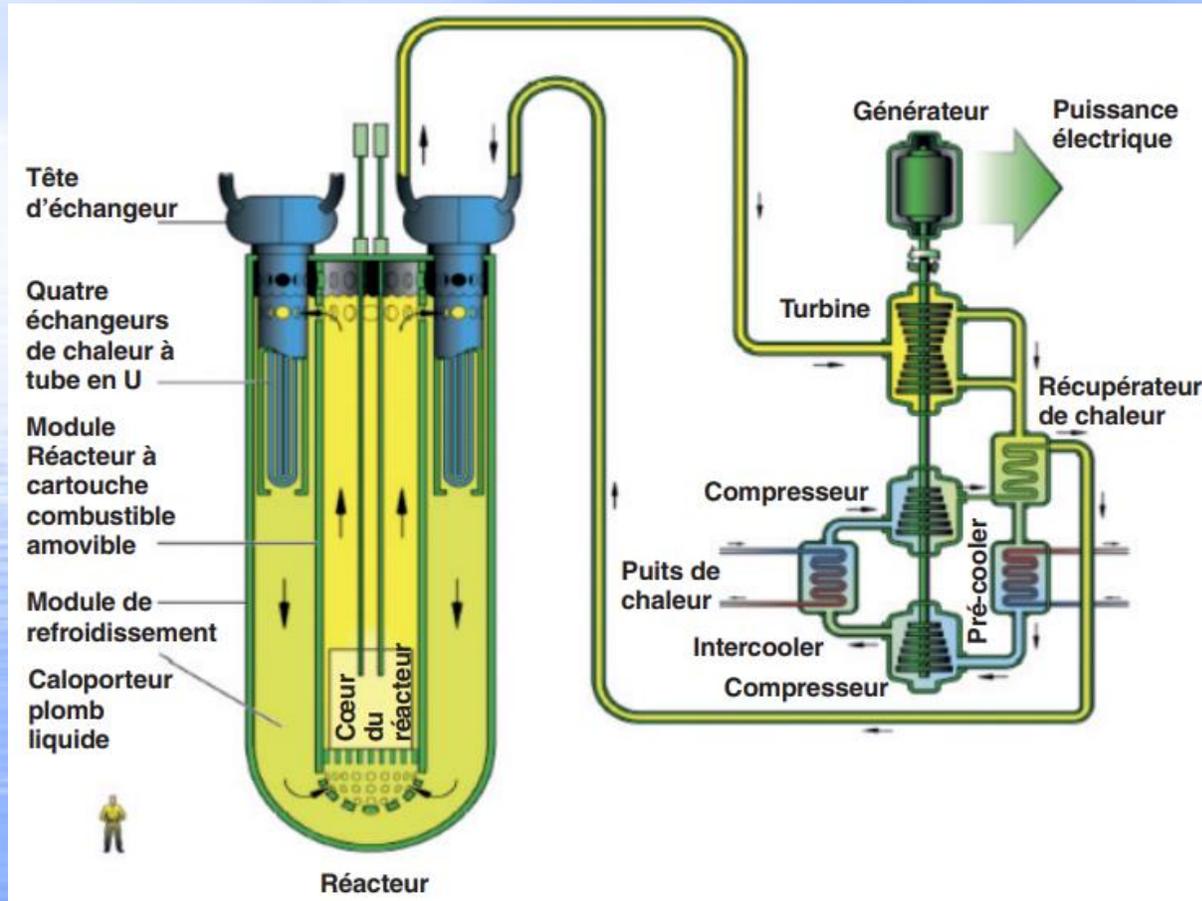
2 en exploitation en Russie, BN-600 et BN-800

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

Les réacteurs de IV^{ème} génération

Lead Fast Reactor, LFR ou RNR-L



La filière au sodium la + aboutie, 2 alternatives explorées :

refroidissement au PLOMB ou Pb/Bi fondu = métal liquide

↑ faiblement réactif avec l'eau et l'air

↓ toxique

↓ très corrosif, problèmes considérables au niveau des matériaux de structure

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

⇒ recherches sur ce problème

...

Exemple = réacteurs russes pour propulsion navale

Les réacteurs de IV^{ème} génération Gas Fast Reactor, GFR ou RNR-G

refroidissement à l'HÉLIUM = gaz léger sous pression

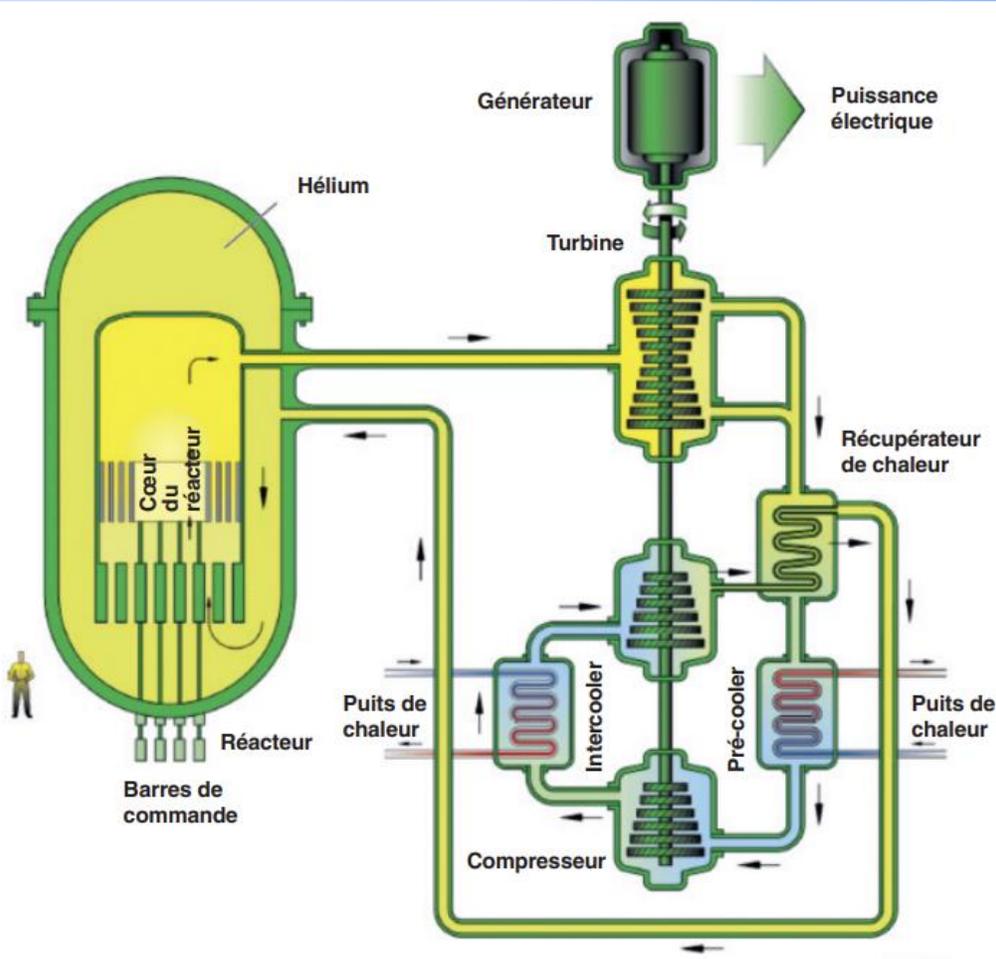
↑ en faible quantité, ne nuit pas à l'obtention de n rapides
↑ rendement > 45 % (gaz actionne directement les turbines)

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

↓ évacuation de puissance résiduelle en cas de dépressurisation de l'hélium

↓ confinement des matières radioactives portées à très haute T° lors d'un accident de refroidissement

...



⇒ 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 : ${}^{232}\text{Th}$

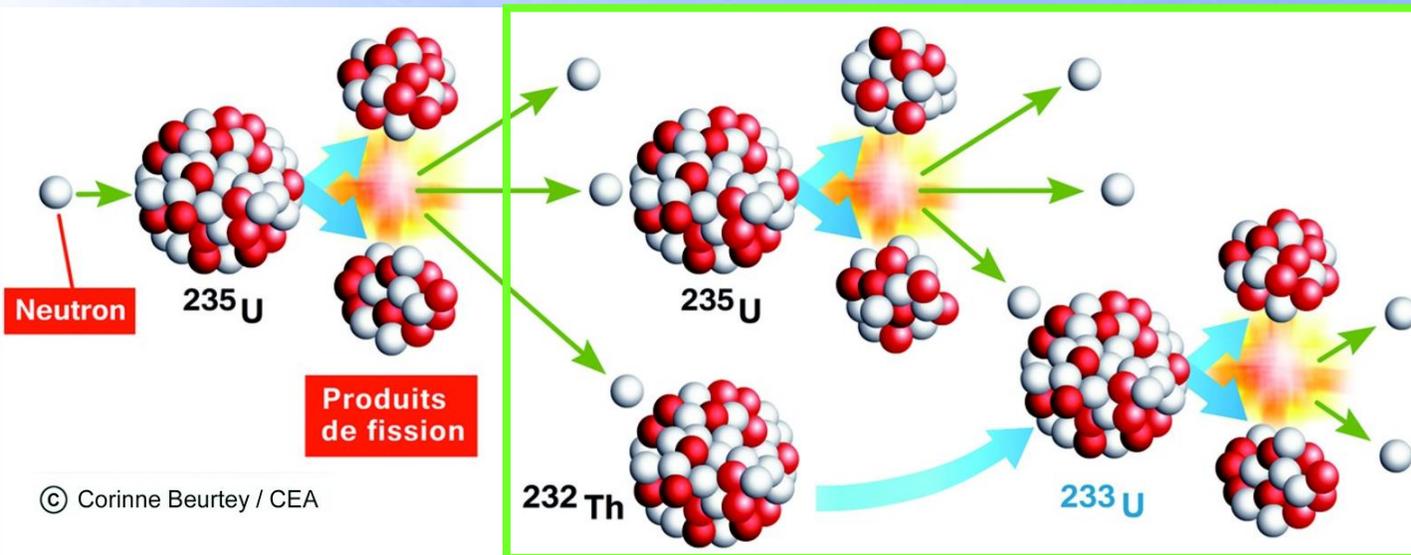
↑ abondant sur Terre, 3 à 4 X + que l'uranium

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

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

fertile

demi-vie = 27 jours fissile



↑ 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 ${}^{235}\text{U}$ ou du Pu

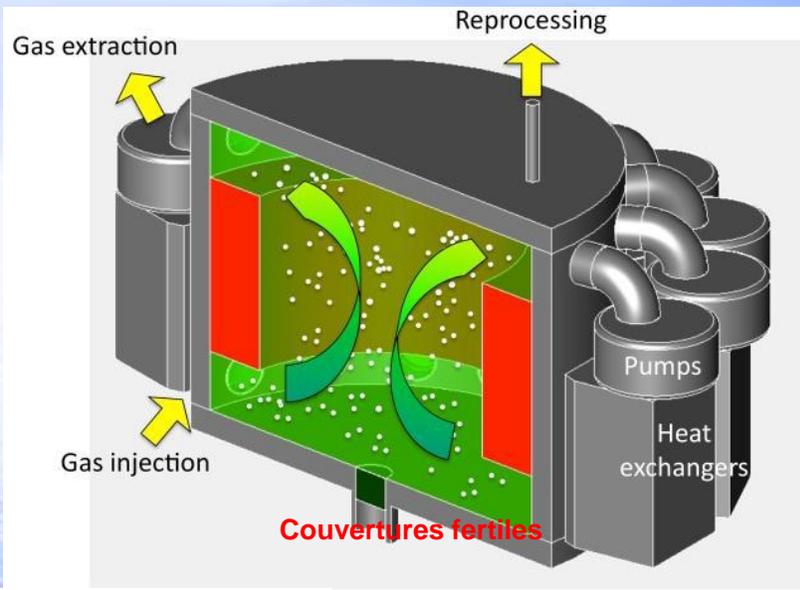
↑ réduction des stocks de Pu

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

↓ nécessité de retraiter rapidement le combustible (extraire ${}^{233}\text{Pa}$, PF, ${}^{233}\text{U}$, Th, ...)

Les réacteurs de IV^{ème} génération

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



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

modéré par du graphite (n thermiques) ou sans modérateur (n rapides)

↑ en spectre rapide, possibilité d'incinérer Pu et AM produits par les autres filières

↑ ↓ régénérateur avec retraitement du sel en ligne pour maintenir dans ♥ un bilan neutronique favorable

↑ excellentes capacités de suivi de charge

↓ 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)

...

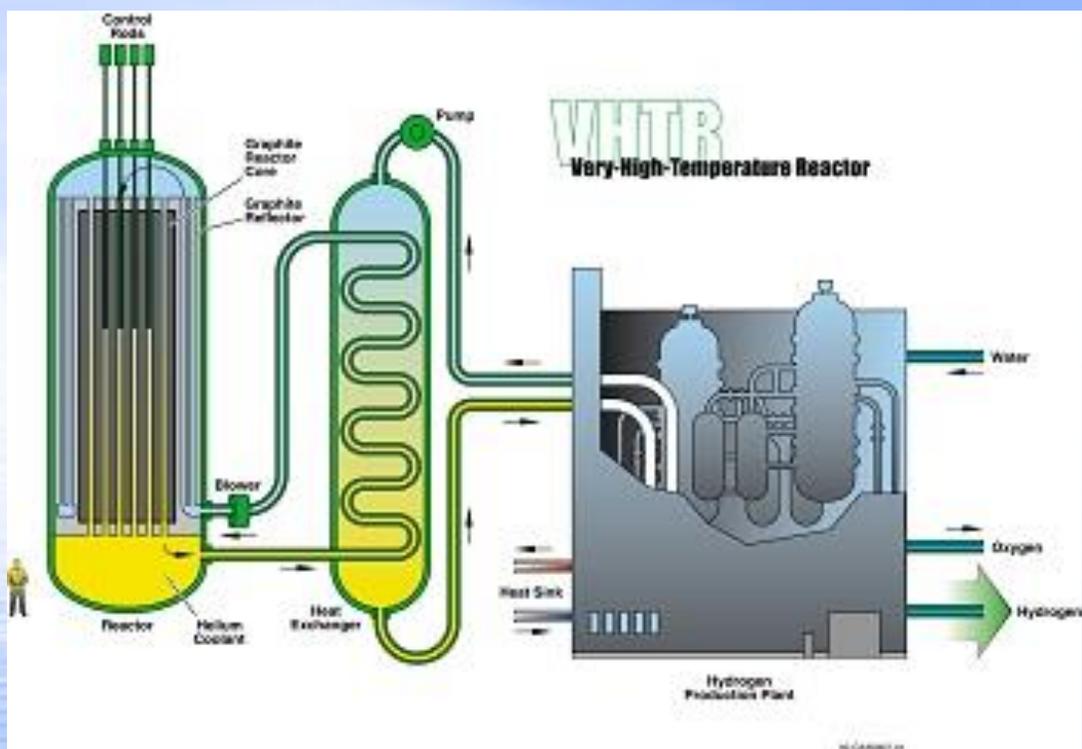
Recherches sur MSFR (Molten Salt Fast Reactor) menées par le CNRS, projets avec partenaires CEA, Framatome, ORANO

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

Prototype en construction en Chine, 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)

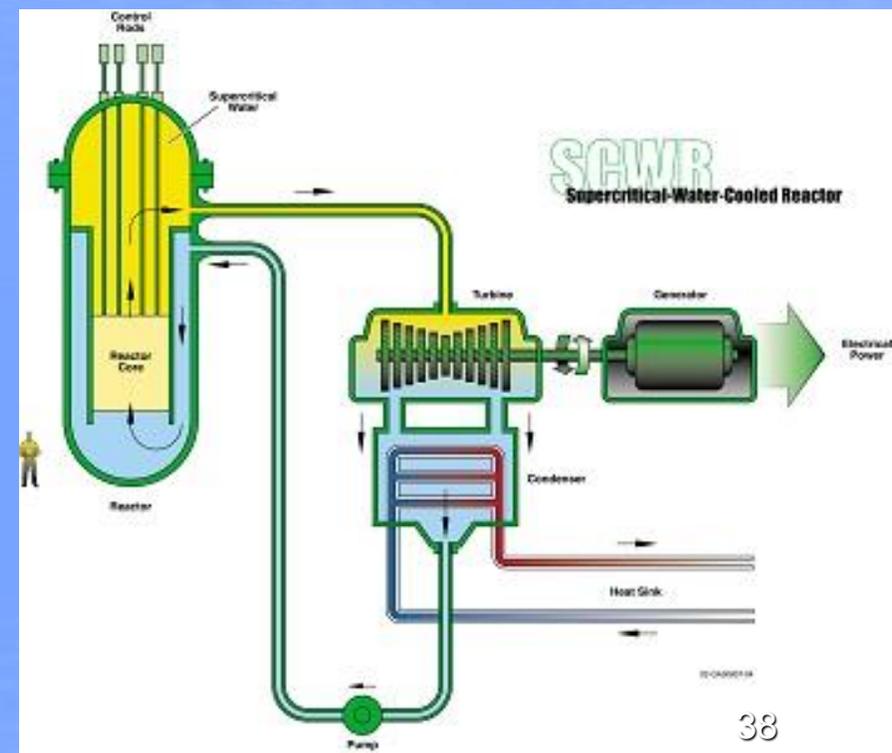
→ neutrons thermiques ou rapides selon design ♥

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

↓ qualification des matériaux aux hautes T°

↓ démonstration sûreté passive du système

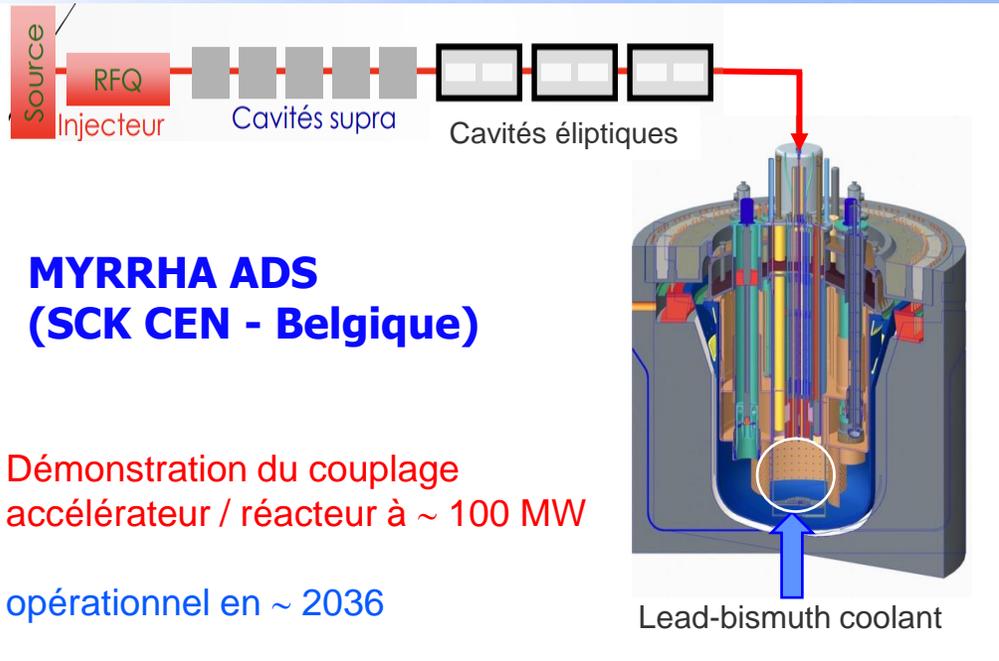
...



Les réacteurs pilotés par accélérateurs

Accelerator Driven System , ADS

LINAC accelerator		Reactor	
Particles	Protons	Power	65 to 100 MW _{th}
Energy	600 MeV	k_{eff}	~ 0,95
Beam	4 mA	fuel	MOX



ADS ⇒ objet d'intenses études de faisabilité

- ✓ potentielle capacité à transmuter des AM produits par les filières actuelles
- ✓ réduire radiotoxicité et chaleur résiduelle de ces déchets ⇒ surfaces de stockage
- ✓ particularité : « sous-critiques » ($k < 1$) ⇒ réaction en chaîne ne peut ni démarrer ni s'entretenir sans apport neutrons externes
- ✓ accélérateur ⇒ protons de haute énergie + cible de métal lourd (ex : Pb) au ♥ du réacteur.
- ✓ ⇒ réactions de spallation (= fragmentation du noyau cible) libèrent neutrons (+ particules), jusqu'à ~ 30 n pour p d'1 GeV
- ✓ ⇒ provoquent fissions dans ♥ ⇒ générer certaine puissance qui pourra devenir nulle par arrêt accélérateur

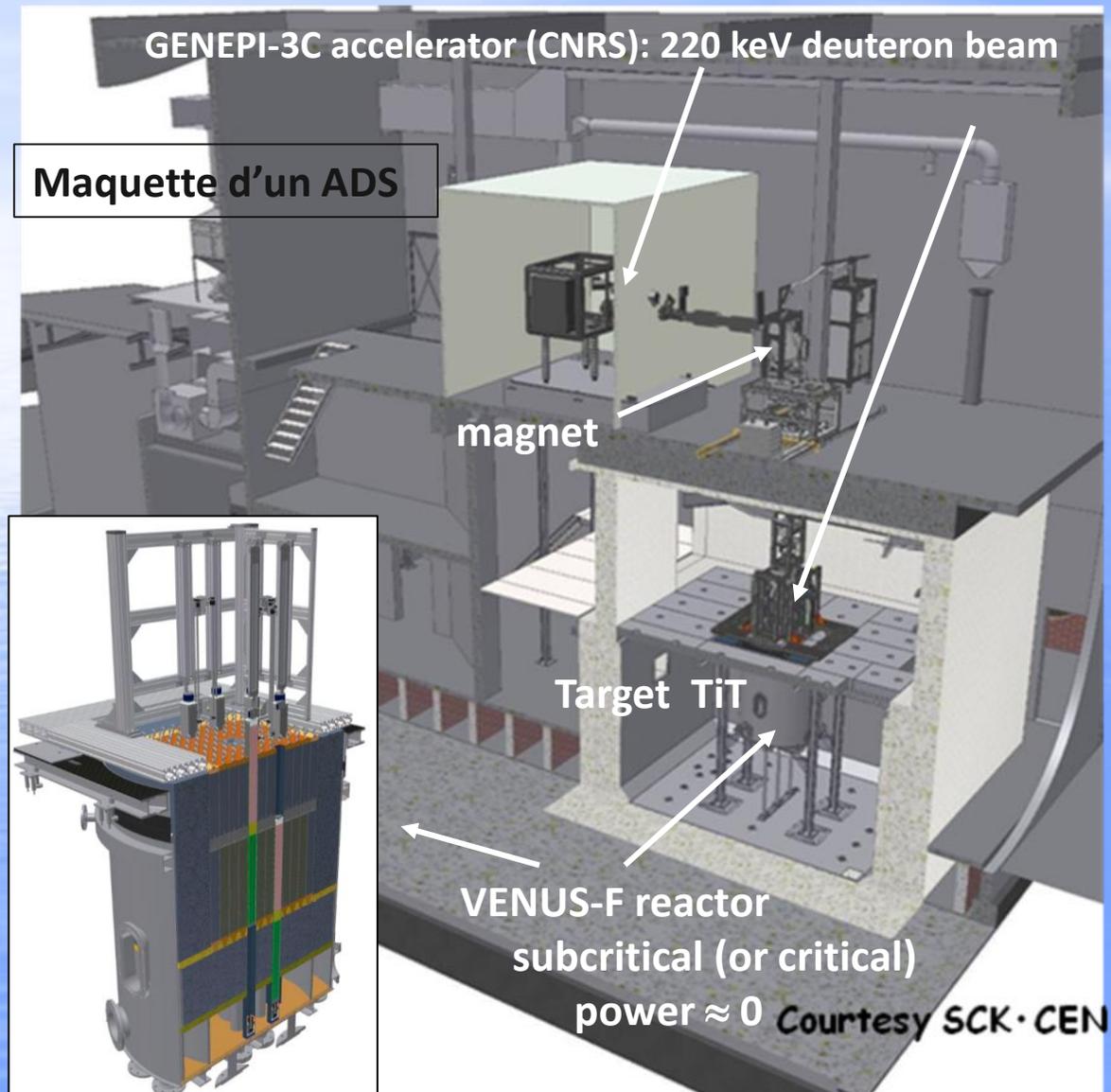
Construction démonstrateur d'~100 MW_{th}, MYRRHA (1,6 Milliard d'euros), programmée en 2 étapes :

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 ($j' \gtrsim 50\%$),**

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 fission. Ce sont eux qui par ce décalage, permettent pilotage des réacteurs

- ✓ **Réacteur de l'ADS à neutrons rapides**
- ✓ **avec Pb/Bi liquide = caloporteur et cible de spallation**
- ✓ **défis pour mise en œuvre des ADS :**

maîtriser chimie du Pb liquide

obtenir niveau de fiabilité du faisceau de particules encore jamais atteint

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

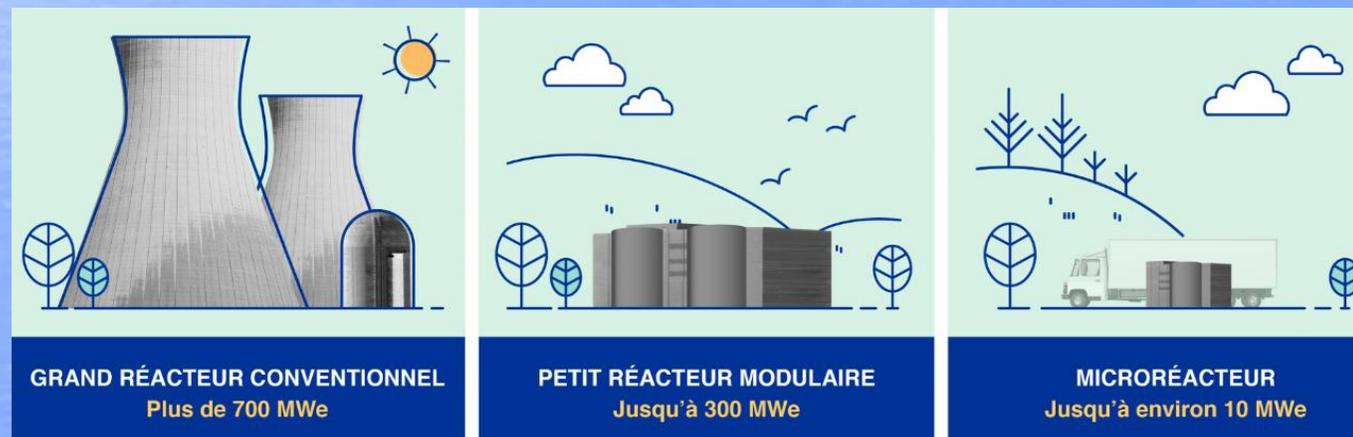
Les technologies du futur

Small Modular Reactor, SMR = petits réacteurs modulaires

Ce qui les distingue :

- ✓ **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
- ✓ **puissance généralement < à 300 MWe, (moyenne SMR existants ≈ 100 MWe)**
- ✓ **Sous-catégories** : MMR = Micro Modular Reactor, **microréacteurs de puissance < 10 MWe (≈ consommation de + 5 000 foyers 24 h/24, tous les jours, pendant au moins 10 ans)**

AMR = Advanced Modular Reactor, réacteurs « innovants » de faible / moyenne puissance présentant des avancées technologiques similaires à celles des réacteurs GEN-IV



- ✓ **Adaptables** : Plusieurs unités ou modules connectés entre elles/eux pour fournir une puissance adaptable à l'évolution des 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 variations de consommation ou de production des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire)
- ✓ Leur concept de sûreté repose sur des systèmes passifs et des caractéristiques de sûreté intrinsèques (ex : puissance et pression d'utilisation faibles) **pour éliminer ou réduire considérablement le risque de rejets radioactifs si accident**
- ✓ **Marges de sécurité accrues pour lutter contre les risques de prolifération**
Certains SMR immergés dans piscine et / ou construits en souterrain
- ✓ **Besoins en combustible réduits. Combustible renouvelé tous 3 à 7 ans, moins fréquemment que dans centrales traditionnelles (1 rechargement tous 1 ou 2 ans)**
Certains conçus pour fonctionner jusqu'à 30 ans sans renouvellement du combustible

Défis :

Concepts doivent répondre aux exigences spécifiées dans normes de sûreté de l'AIEA et orientations en matière de sécurité nucléaire & de non-prolifération

Leur compétitivité économique doit encore être prouvée par un déploiement à grande échelle

Acceptabilité du public et des industriels si proximité ?

SMR : petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor)

Ambitions

Température cœur SMR	Fluide de refroidissement	Filière	Applications SMR (hors électricité)	Fin 2018 : 54
100-200°C	Eau bouillante	BWR	Chauffage urbain (cogénération)	2
200-400°C	Eau pressurisée lourde	PWR parfois qualifié de « i-PWR » (module intégré)	Désalinisation Électronucléaire (II ^e et III ^e génération)	24
	Eau lourde	HWR		
400-550°C	Métal liquide, sodium, eau supercritique	SFR (fast) LFR (fast) SCWR	Pâte à papier Raffinage hydrocarbures Fabrication méthanol	7
550-700°C	Sels fondus	MSR MSFR	Production hydrogène par reformage du méthane	9
700-1 000°C	Refroidissement gaz	GCR GFR	Production hydrogène par dissociation thermique Gaz de houille	9
> 1 000°C VHTR	Hélium	VHTR	Métallurgie Production hydrogène	3

✓ ↘ coûts & risques d'investissement,
↘ délais de construction

✓ ouvrent de nouveaux marchés de fourniture d'électricité à très faible émission de carbone :

- aux sites isolés, endroits difficiles d'accès (Grand Nord, archipels d'Asie du Sud-Est, communautés minières isolées, etc)
- aux petits réseaux de distribution électrique
- en remplacement centrales utilisant combustibles fossiles (charbon), groupes électrogènes alimentés au gazole

✓ // à la production d'électricité, SMR souvent conçus pour assurer des services non électriques ou produire d'autres vecteurs d'énergie

Design	Output MW(e)	Type	Designers	Country	Status
WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS					
CAREM	30	PWR	CNEA	Argentina	Under construction
ACP100	125	PWR	CNNC	China	Under construction
NUWARD	2 × 170	PWR	EDF, CEA, TA, Naval Group	France	Conceptual design
SMART	107	PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea	Standard design approval received
KLT-40S	2 × 35	PWR in floating NPP	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	In operation
RITM-200N	2 × 53	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	Detail design
UK SMR	443 ^a	PWR	Rolls-Royce and Partners	United Kingdom	Conceptual design
VOYGR™	6 × 77	PWR	NuScale Power Corporation	United States of America	Received Standard Design Approval
SMR-160	160	PWR	Holtec International	United States of America	Preliminary Design Completed
BWRX-300	270–290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi GE Nuclear Energy	United States of America and Japan, Canada	Pre-licensing
HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS					
HTR-PM	210	HTGR	INET, Tsinghua University	China	In operation
GTHTR300	100–300	HTGR	JAEA	Japan	Pre-licensing
Xe-100	82.5	HTGR	X-Energy LLC	United States of America	Basic design
EM ²	265	GFR	General Atomics	United States of America	Conceptual Design
FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS					
SVBR	265	SFR	JSC AKME Engineering	Russian Federation	Conceptual design
MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS					
Integral MSR	195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Canada	Conceptual design
KP-FHR	140	Pebble bed salt cooled Reactor	KAIROS Power, LLC.	United States of America	Conceptual design
MICROREACTORS					
U-Battery	4	HTGR	Urenco	United Kingdom	Conceptual design
MMR	5–10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	United States of America, Canada	Conceptual design
Aurora	1.5	FR	OKLO, Inc.	United States of America	Conceptual design

Note: CNEA — National Atomic Energy Commission (of Argentina); CNNC — China National Nuclear Corporation; EDF — Électricité de France; CEA — French Alternative Energies and Atomic Energy Commission; KAERI — Korea Atomic Energy Research Institute; K.A.CARE — King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy, Saudi Arabia.

^a Power rating above 300 MW but considered an SMR by the UK government.

Différents types, états

✓ SMR mettent en œuvre tous les types de technologies de réacteurs : versions réduites de modèles existants de réacteurs nucléaires, jusqu'à des concepts innovants (GEN- IV)

✓ Actuellement, + de 80 modèles de SMR à divers stades d'élaboration :

SMR

25 refroidis à l'eau
(basés à terre)

8 refroidis à l'eau
(en mer)

AMR

17 refroidis au gaz
à haute T°

8 RNR refroidis
par métal liquide.

13 à sel fondu

12 MMR

✓ En 2022, + de 20 États membres de l'AIEA avaient des programmes nationaux actifs sur les SMR la plupart d'entre eux étant menés dans le cadre d'une collaboration internationale

en vue d'un déploiement d'ici 2035

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.

Son exploitation commerciale a débuté en mai 2020

Il est utilisé pour fournir de l'électricité et de la chaleur aux communautés locales



- ✓ en Chine, le HTR-PM de 210 MWe, centrale de démonstration industrielle d'un réacteur à haute température refroidi au gaz (HTGR), a été connectée au réseau en décembre 2021.

- ✓ 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



- ✓ Canada, Corée du Sud, Russie et USA (Nuscale Power, 12 modules de 60 MW, 1er module pourrait entrer en service en 2026 (2027 pour l'ensemble de la centrale).

NuScale Power Module



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 :

Naarea = microréacteur à sels fondus et à neutrons rapides (qq 10^{aines} de MWe)

Newcleo = réacteur à neutrons rapides refroidis au Pb liquide (200 MWe)

Nuward = REP, 2 X 170 MWe (porté par EDF, CEA, TechnicAtome, Naval Group, Tractebel engie, Framatome), chantier de démonstrateur débutera en ~ 2030

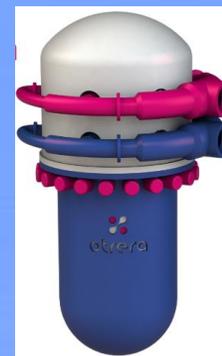
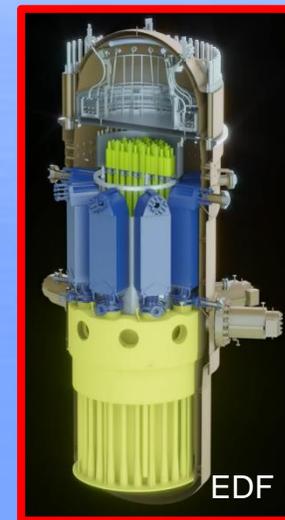
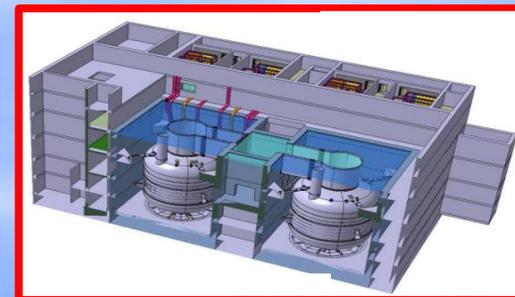
Jimmy = réacteur à haute température

Calogena = REP 30 MWe

Blue Capsule = réacteur à haute température, fournit de la chaleur industrielle à 700°C en utilisant l'air ambiant comme source froide

Hexana = RNR-Na, 150 MWe à 400 MWth, startup essaimée du CEA

Otrera = RNR-Na, 110 MWe, offrant 105 MW de chaleur utilisable en cogénération



- **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) dont pénurie annoncée + très émettrices de GES



Il faut :

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

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

▫ **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

Acceptable si EFFORTS

régler de façon satisfaisante :

- ↓ problème des déchets
- ↓ sûreté et sécurité des centrales
- ↓ ↗ 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 & SMR

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

Bilan énergétique de la France en 2023 - Données provisoires

[datalab_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.iaea.org>

<https://www.connaissancedesenergies.org>

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

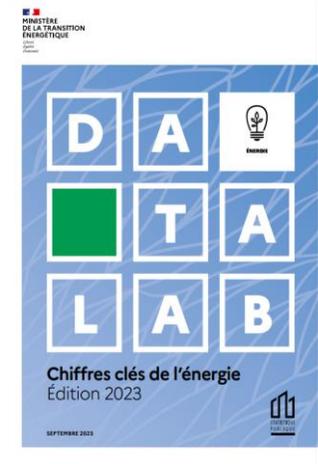
<https://nuclear-safety.asn.fr>

<https://fr.wikipedia.org>



Bilan énergétique de la France en 2023 - Données provisoires

Mai 2024



<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%81lectrique%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/bulletin/elelectronucleaire-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>