

CGEA: « Matinées de Formation et de Veille Scientifique et Technologique »

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



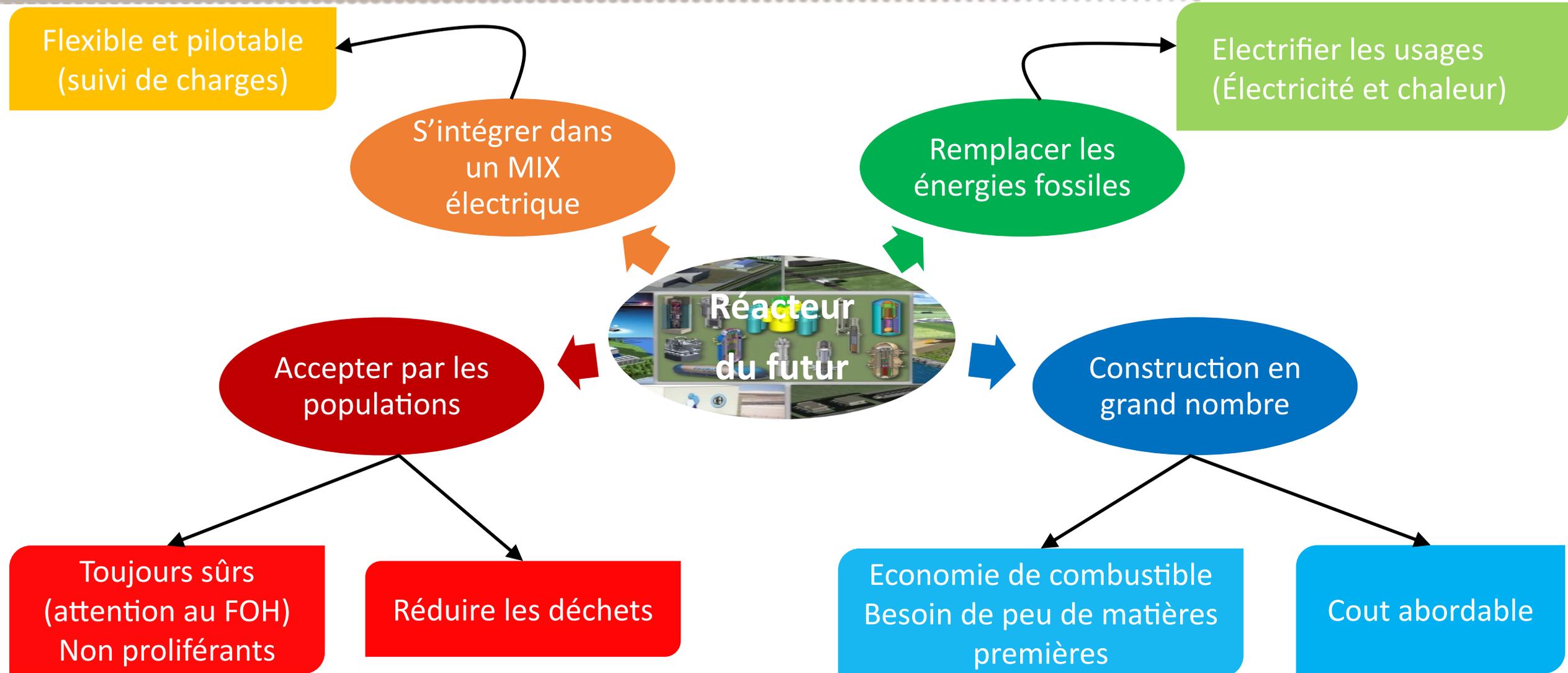
Sommaire

- ❑ Séminaire n°1 : Introduction à la Physique Nucléaire
- ❑ Séminaire n°2 : Réacteurs Nucléaires
- ❑ Séminaire n°3 : Cycle du Combustible
- ❑ **Séminaire n°4 : Nouveaux Types de Réacteurs**
- ❑ Séminaire n°5 : MIX Énergétique dans le Contexte du Réchauffement Climatique

Nouveaux Types de Réacteurs

- Quelles innovations pour quels usages et quels objectifs?
- Le futur proche
- Le futur plus lointain
- Les scénarios

A quoi doit répondre un réacteur aujourd'hui et demain?

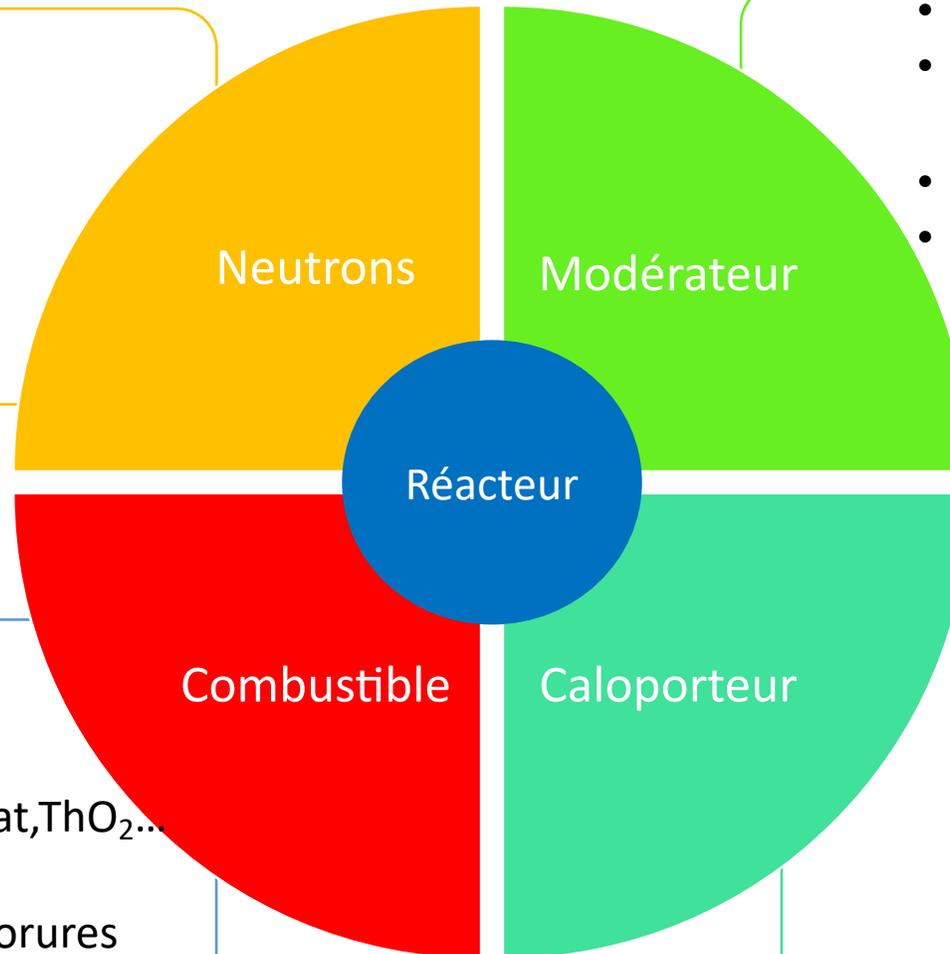


Les multiples filières de réacteurs

- Neutrons thermiques ou rapides
- Nombre suffisant

Cout le plus bas possible
Vigilance sur les ressources
et sur les déchets

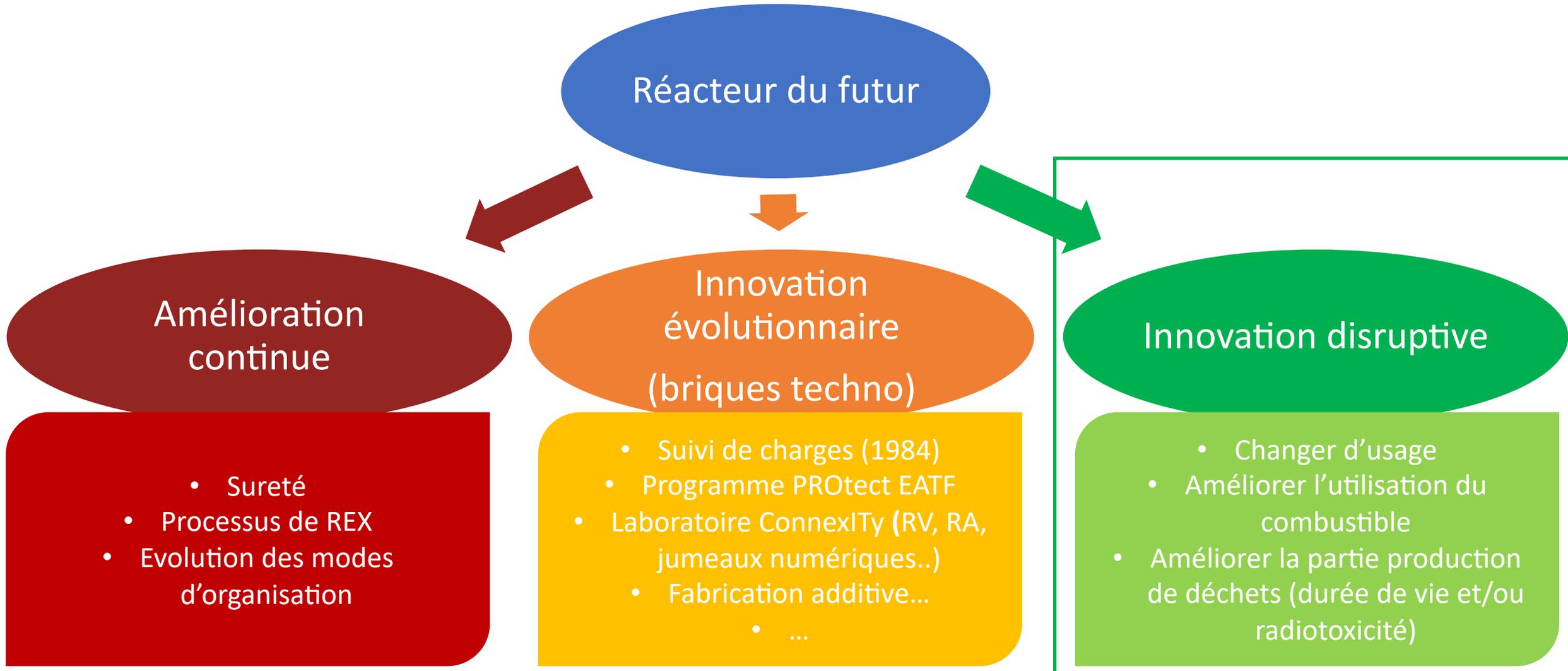
- Noyaux fissiles et/ou fertiles
- Combustible solide: UO_2 , MOX, Unat, ThO_2 ...
- Combustible liquide:
(U/Pu ou Th/U) + sels fluorures ou chlorures



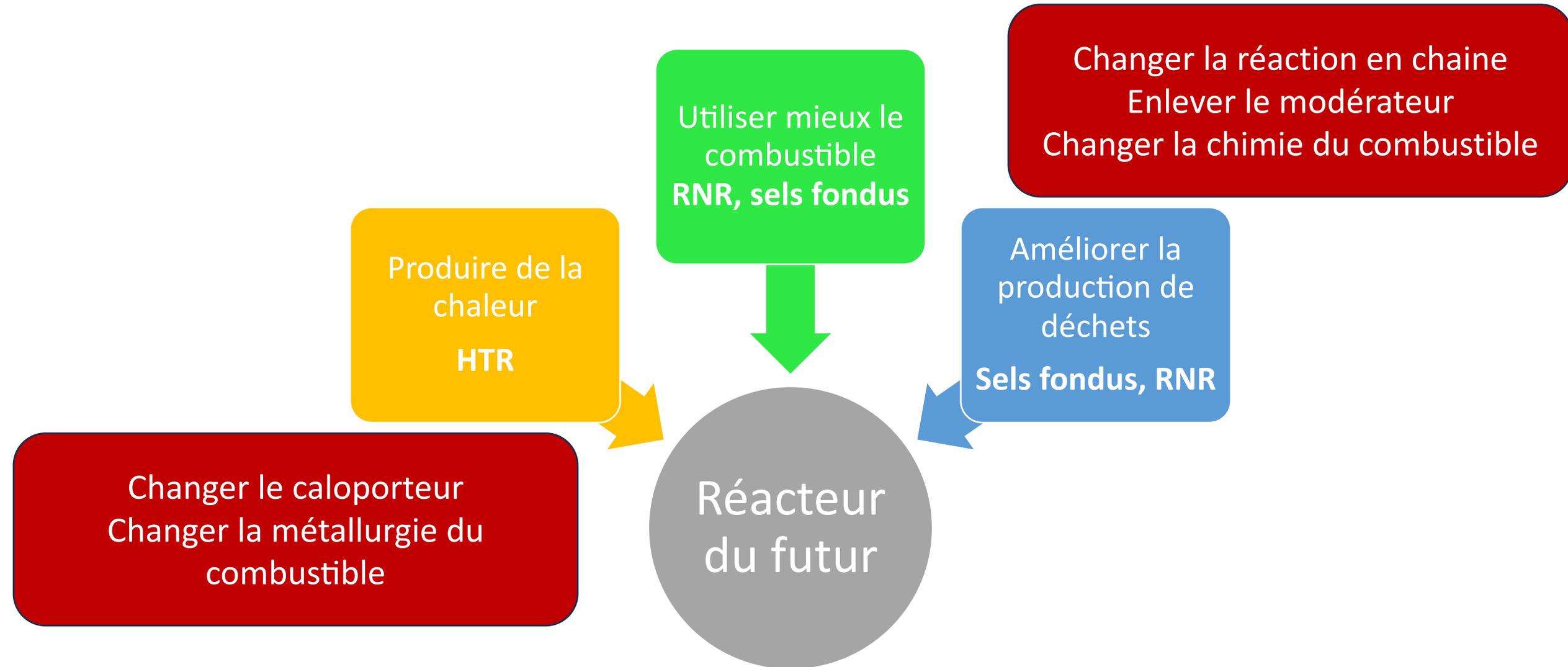
- σ_a petite
- Bon ralentissement : Noyaux légers (H, D, Be, C, H_2O , D_2O , graphite)
- Transparent
- Non dangereux

- Bonne convection
- Liquide (Eau, eau lourde)
- Gaz (hélium, CO_2)
- Sels liquide fluorure
- Métal liquide (sodium, plomb...)

Les processus d'innovation dans le nucléaire

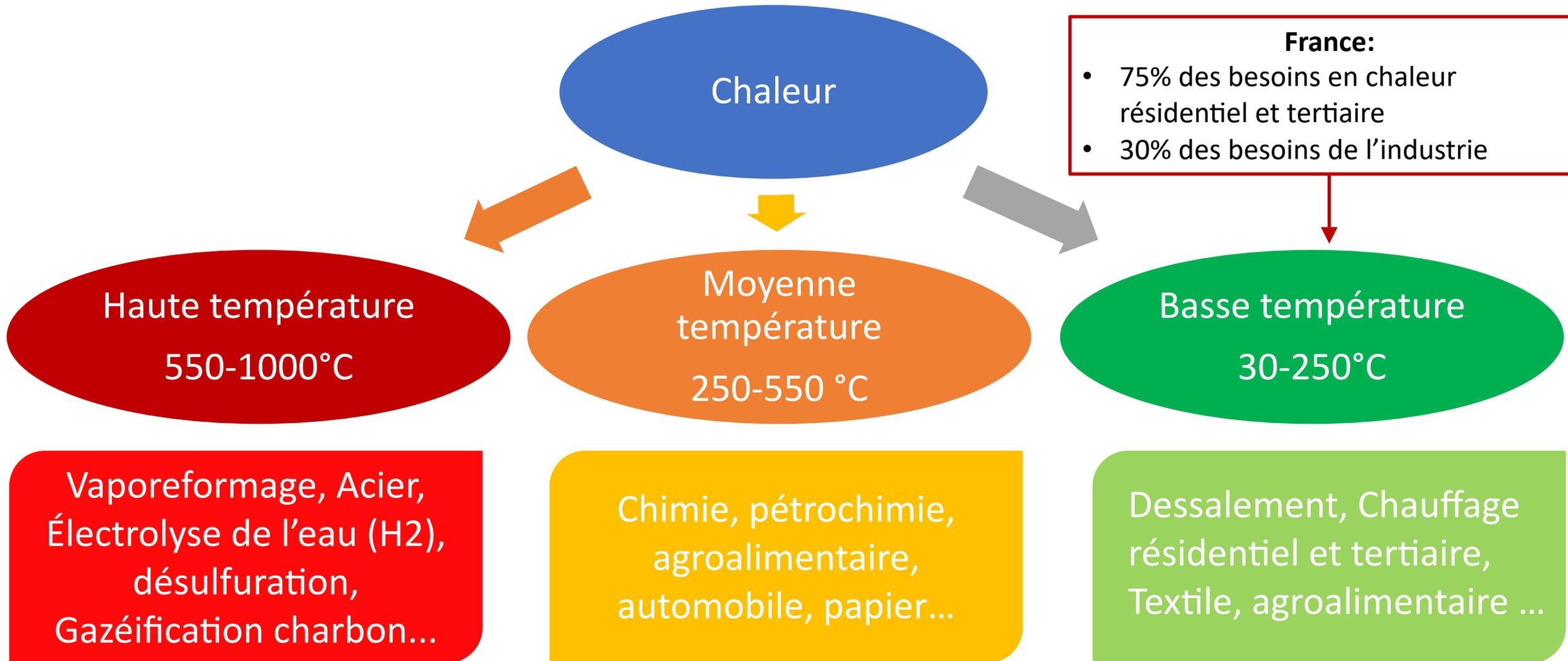


Innovation dans les réacteurs nucléaires



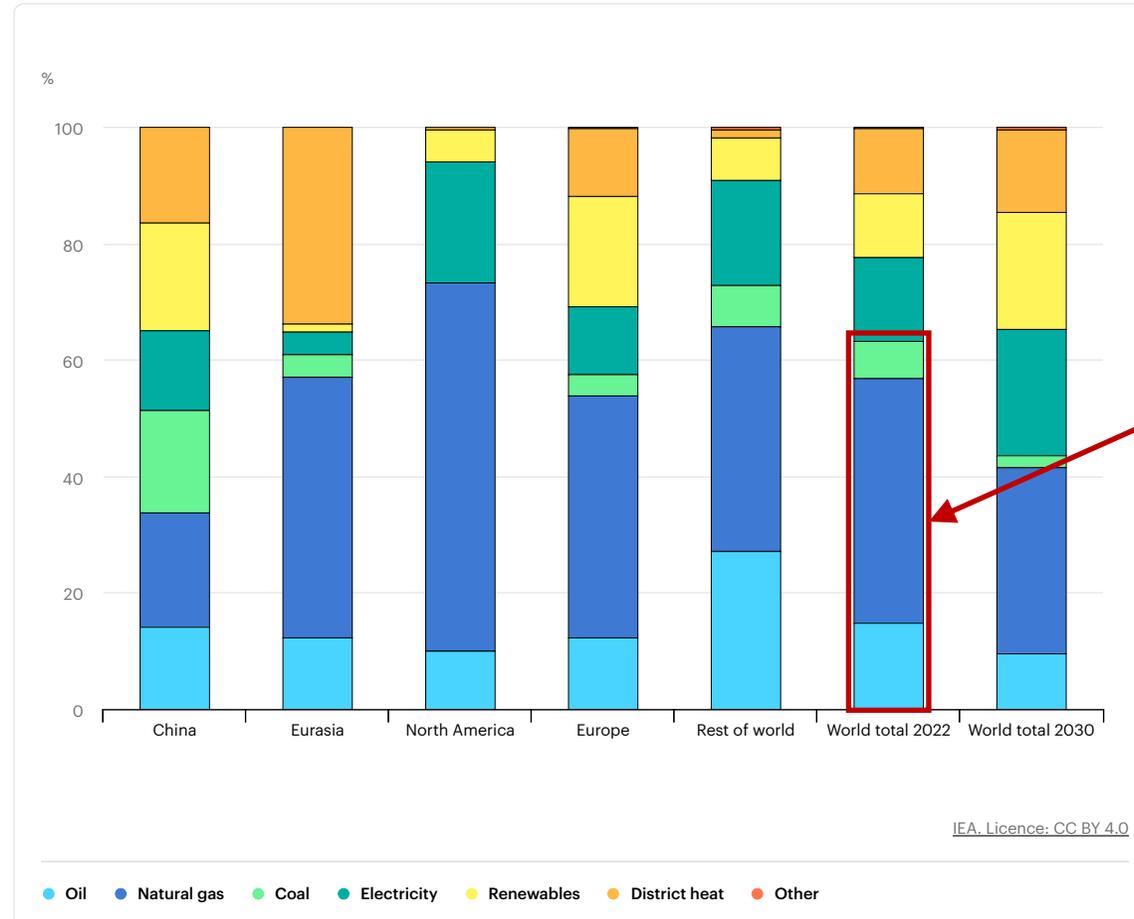
 La chaleur

Le marché de la chaleur



La chaleur dans le monde

Demande énergétique liée aux bâtiments pour le chauffage et part par combustible



Fossiles + de 60%

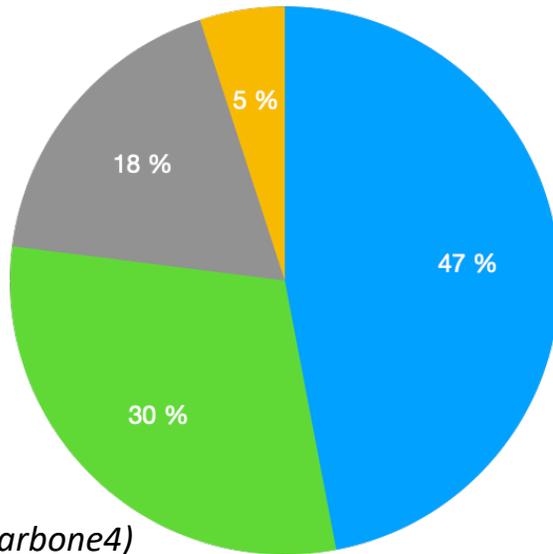
(Source IEA 2022)

IEA. Licence: CC BY 4.0

La chaleur en France en 2020

Part des usages dans la consommation finale d'énergie

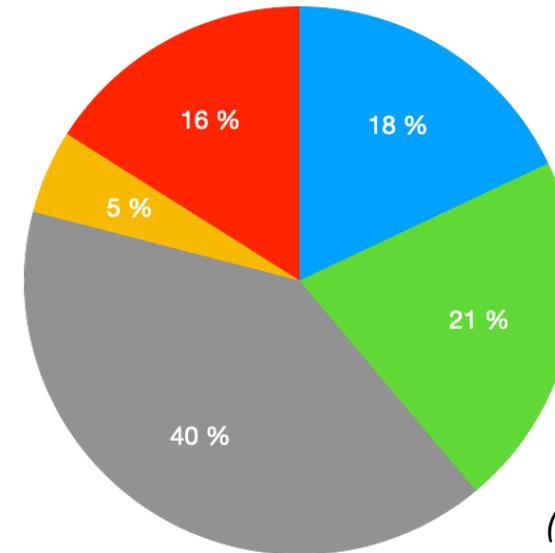
● Chaleur résidentielle ● Chaleur tertiaire ● Industrie ● Agriculture



(Source d'après Carbone4)

Répartition des sources de chaleur

● Électricité ● Chaleur renouvelable ● gaz ● Charbon ● Fioul

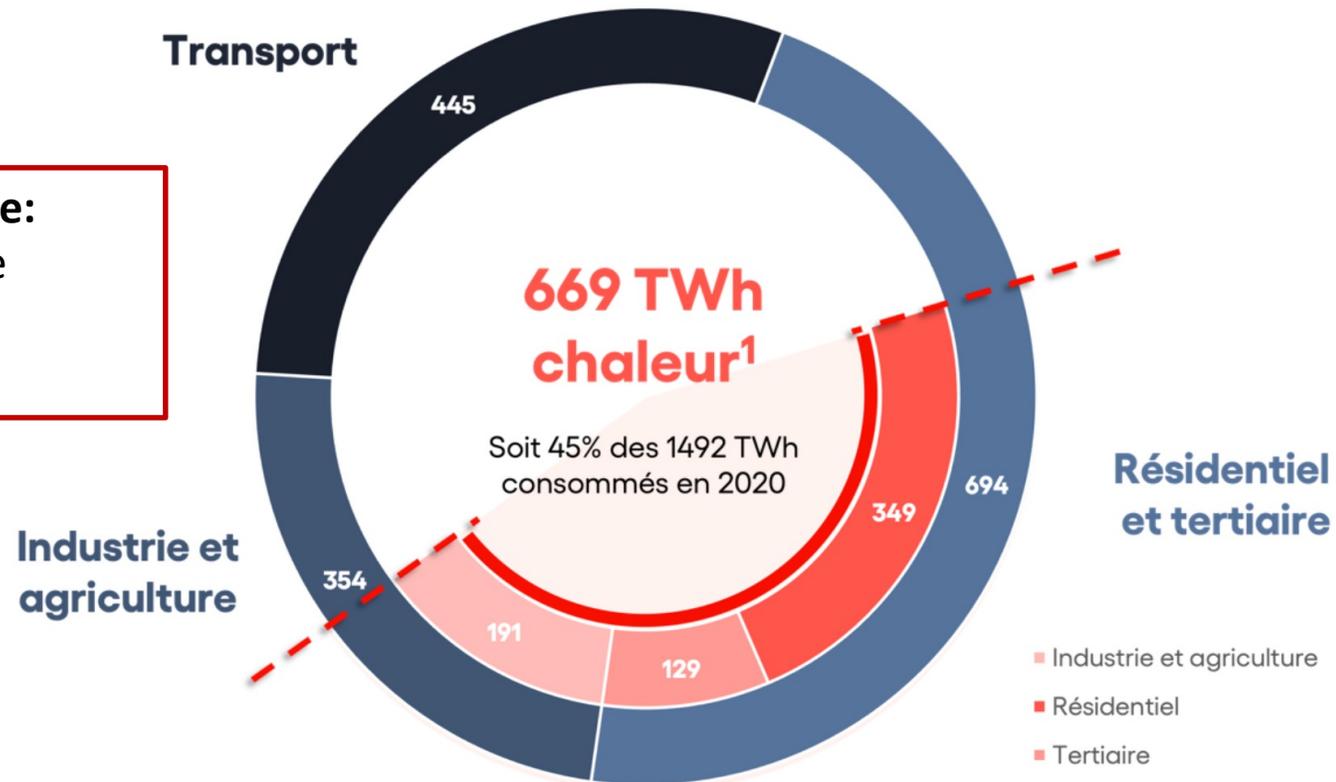


(Source d'après Carbone4)

Chaleur = 1^{er} usage énergétique en France

Chaleur par secteur en France (2020)

Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finale en France (2020)

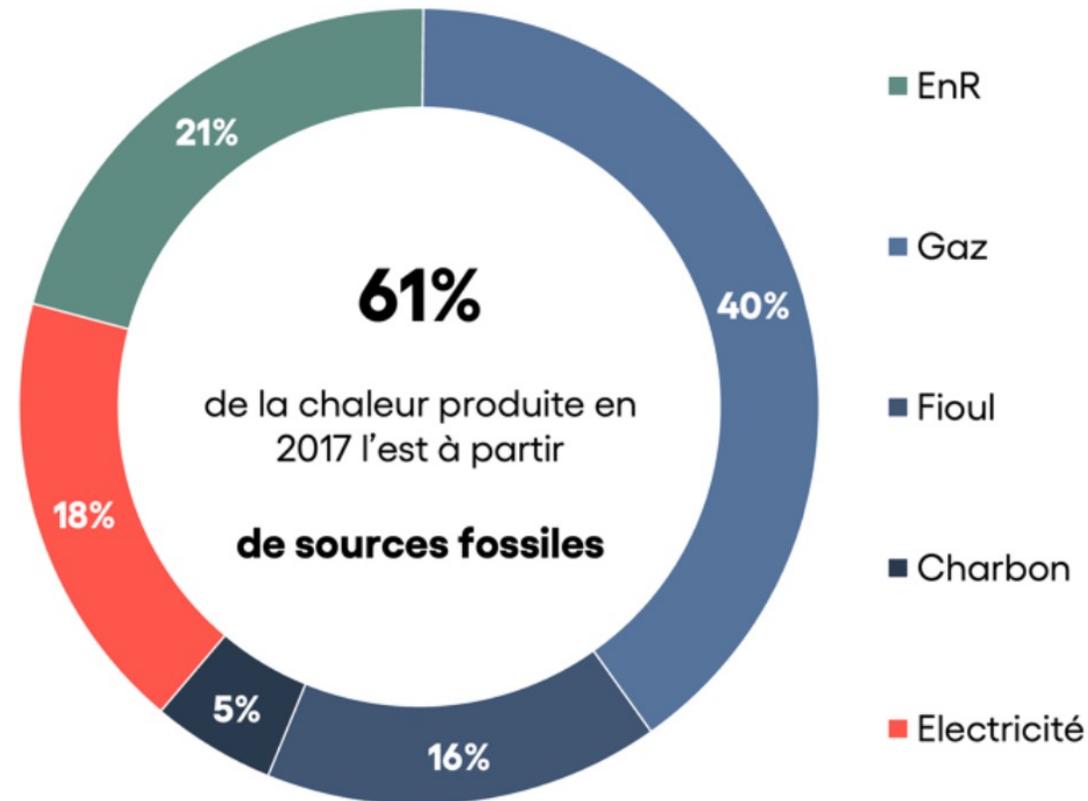


La chaleur en France:

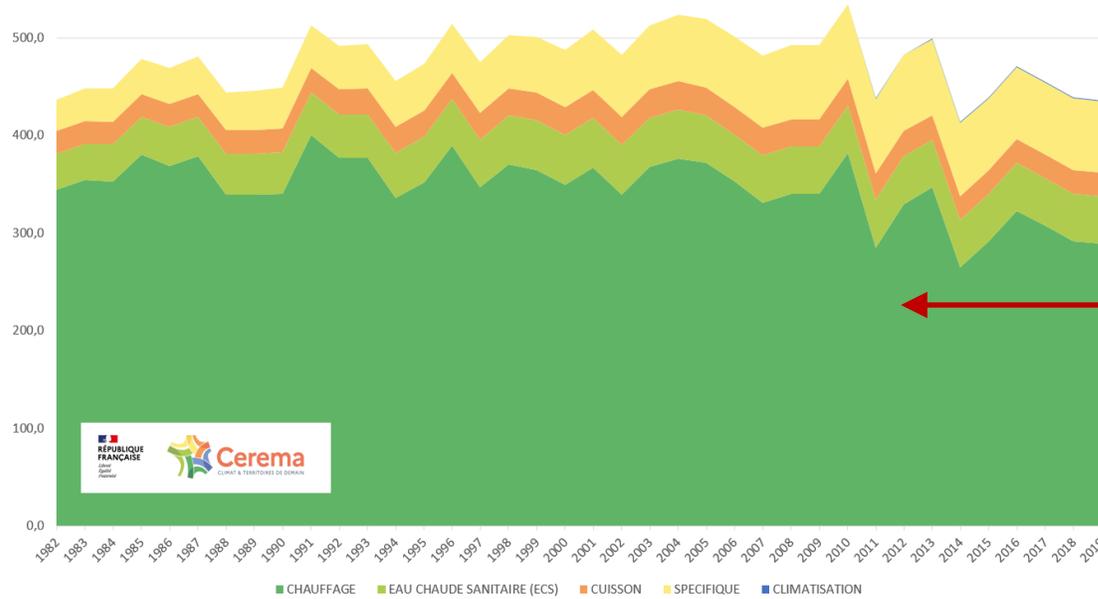
- 40% de l'énergie finale
- 60% produite par des énergies fossiles

(Source Carbone4)

Quelle énergie primaire pour la chaleur?

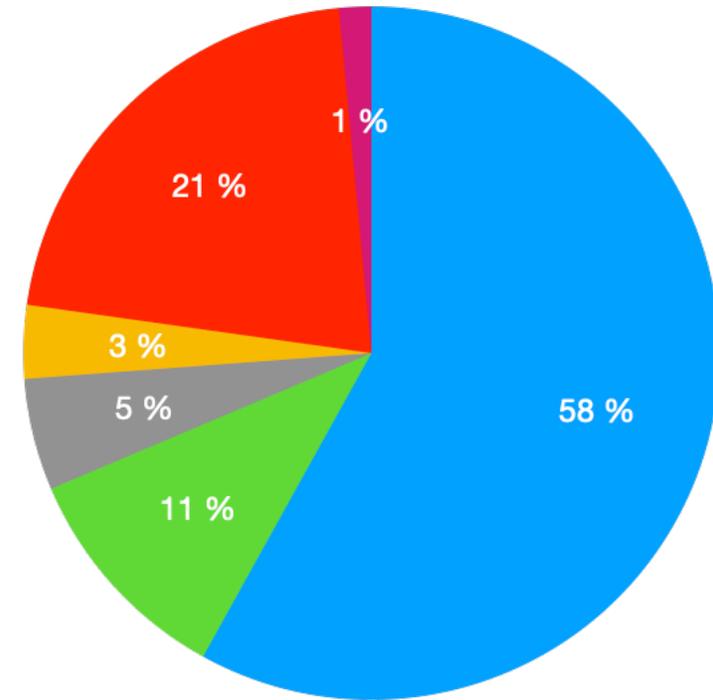


Evolution de la consommation énergétique du secteur résidentiel selon les usages (TWh)



Chauffage
~65%

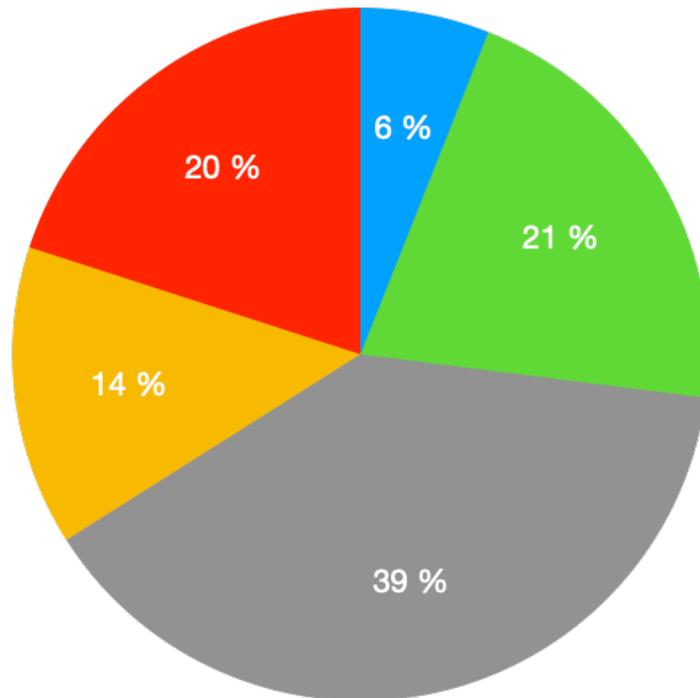
Usage de la chaleur dans le résidentiel+tertiaire



- Chauffage
- Eau chaude sanitaire
- cuisson
- refroidissement
- Électricité spécifique
- Autres

La chaleur dans l'industrie

Usage de la chaleur dans l'industrie



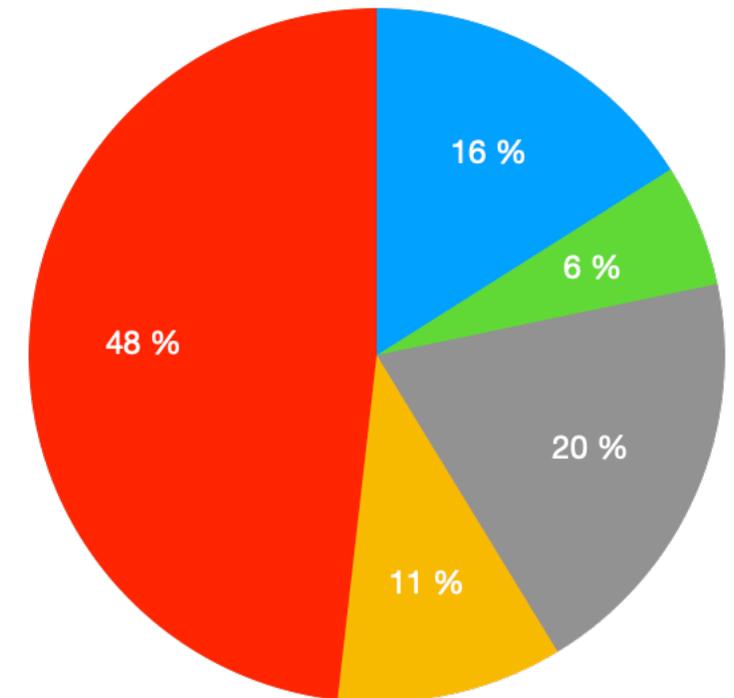
Consommation Chaleur:

- Monde ~ 33 000 TWh/an
- Europe ~ 3000 TWh/an
- France ~ 300 TWh/an

besoin en température :

- $T < 200^{\circ}\text{C}$: 42%
- $T > 500^{\circ}\text{C}$: 48%

Quelle température pour quel usage dans l'industrie ?

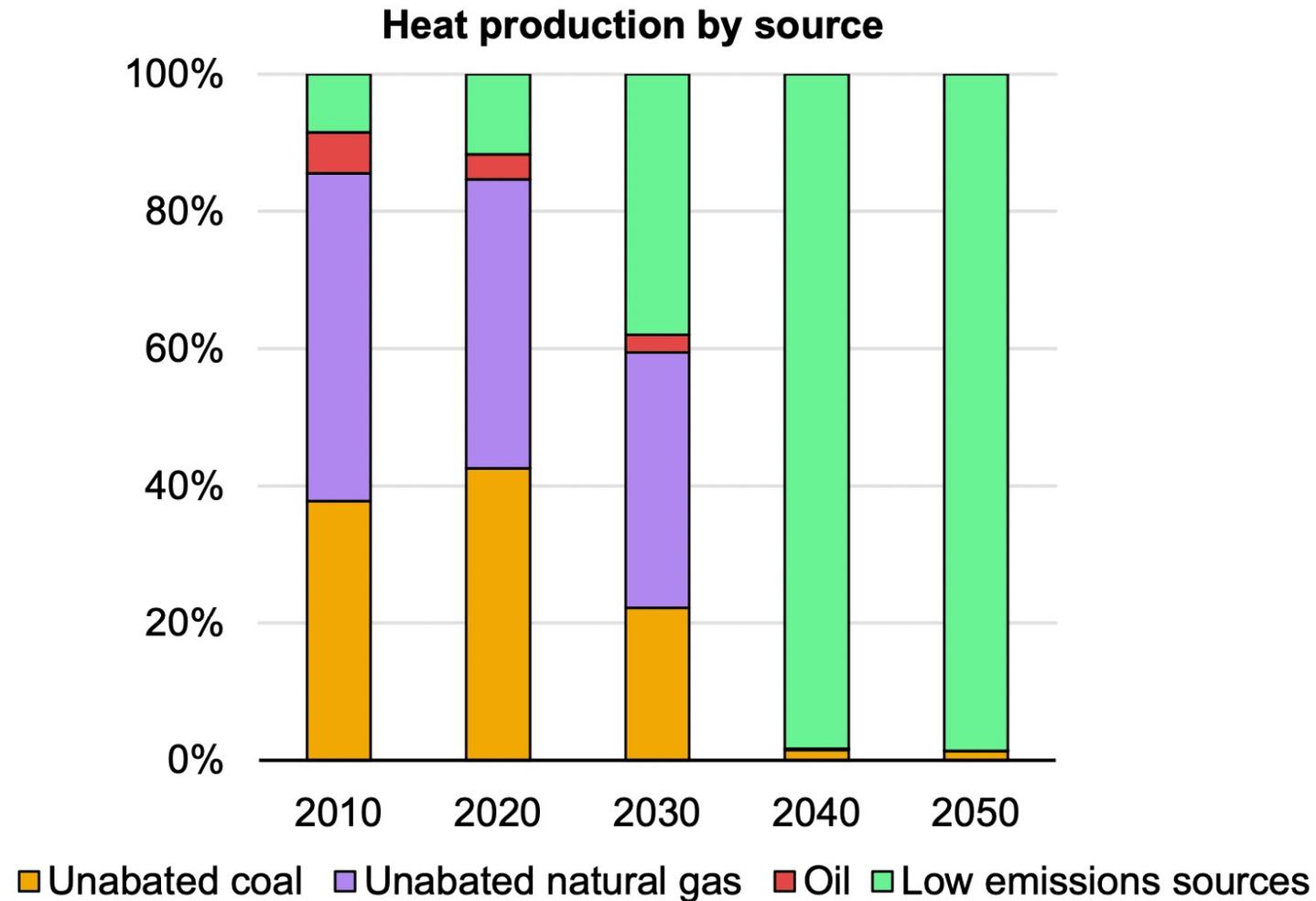


● Chauffage locaux ● Séchage ● Fours ● matières ● autres

● Chauffage locaux ● $T < 100^{\circ}\text{C}$ ● $T = 100-200^{\circ}\text{C}$ ● $T = 200-500^{\circ}\text{C}$ ● $T > 500^{\circ}\text{C}$

(Source d'après Adème et CEREN)

La chaleur dans le scénario NZE de l'IEA



(Source NuclearPowerandSecureEnergyTransitions, IEA 2022)

Quelle température pour quel réacteur?

Réacteurs à eau

Réacteurs à n.
rapides refroidis
par métal liquide

Réacteurs
avancés refroidis
au gaz

Réacteurs à haute
température
refroidis au gaz

→
~300°C

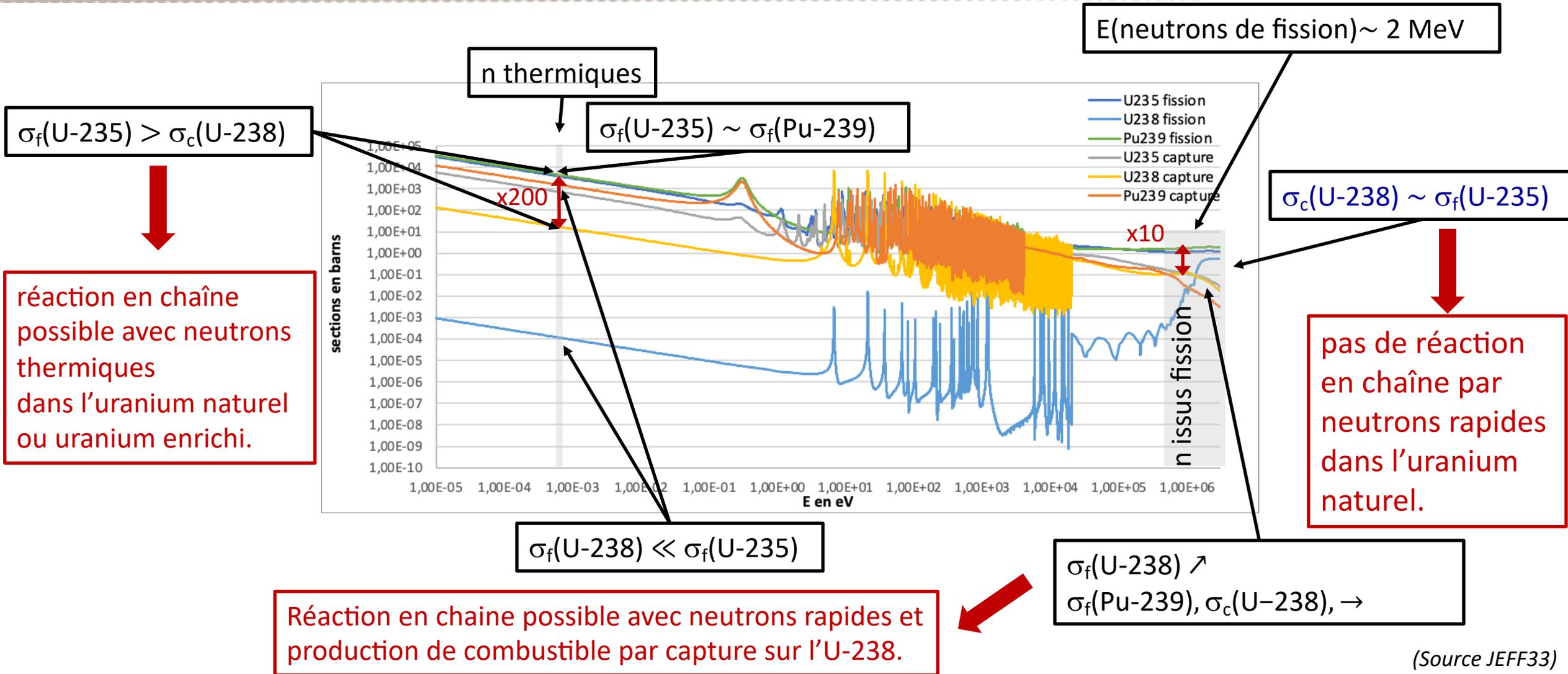
→
~550°C

→
~650°C

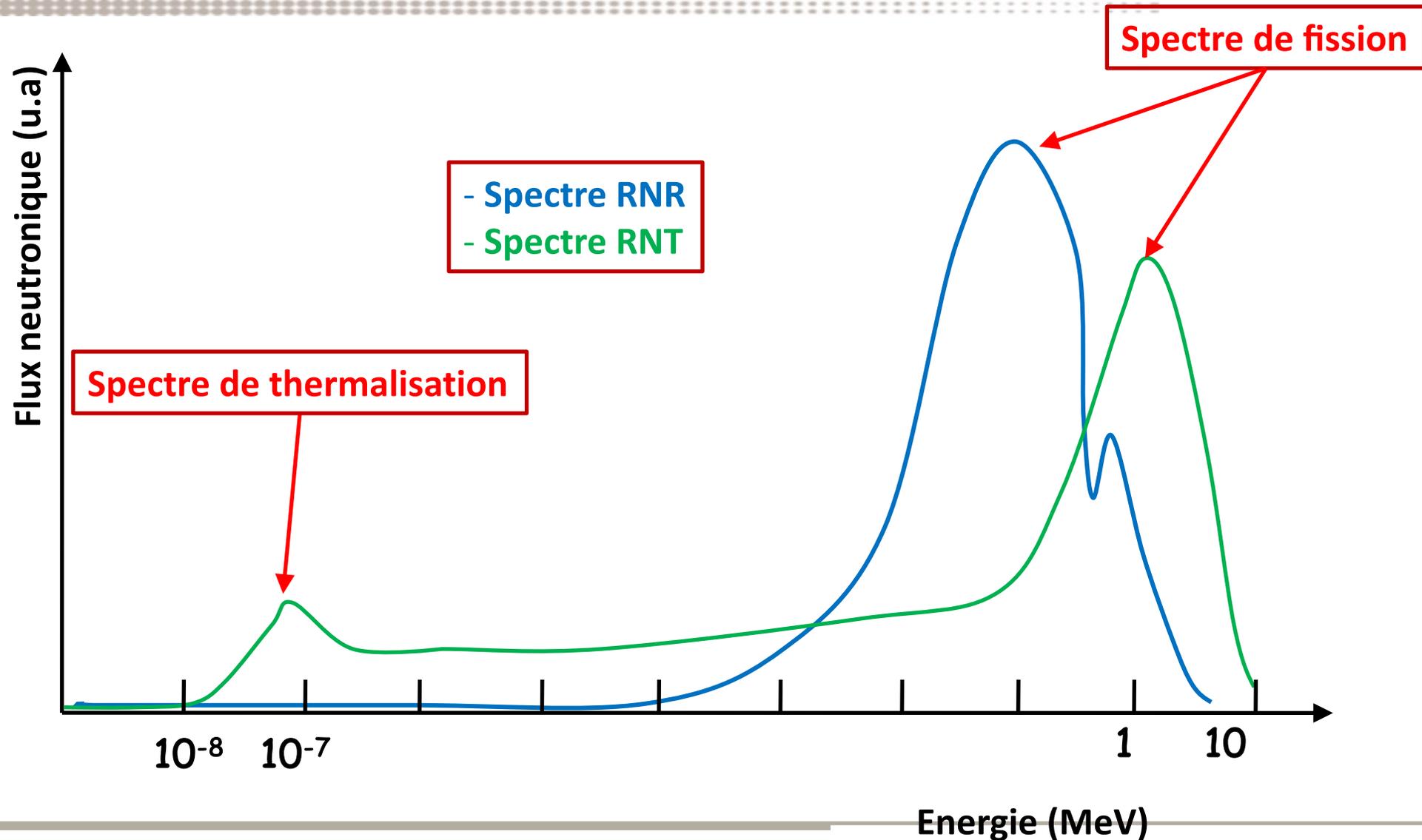
→
~1000°C

Changer la réaction en chaîne

Sections efficaces microscopiques



Spectre en dessin...



Les deux voies possibles: RNR et RNT

- ❑ Pour réaliser une réaction en chaîne: deux voies possibles:
 1. La voie de l'uranium enrichi et des neutrons rapides: **les réacteurs à neutrons rapides RNR**: les neutrons sont utilisés directement lorsqu'ils sont produits par la fission.
 2. La voie de l'uranium peu enrichi et des neutrons thermiques: **les réacteurs à neutrons thermiques RNT**: les neutrons sont utilisés aux énergies thermiques et doivent donc être ralentis en franchissant les résonances.
- ❑ Ces deux voies furent développées par la France la première dans Phénix et Superphénix et la seconde dans les REP actuellement en fonctionnement.
- ❑ Ces deux voies peuvent être appelées **filières de réacteurs**.
- ❑ Un cœur de réacteur est composé:
 - un combustible contenant des noyaux fissiles,
 - un fluide caloporteur permettant l'extraction de l'énergie produite par la fission,
 - pour les RNT, un modérateur contenant des noyaux légers destinés au ralentissement des neutrons,
 - des structures métalliques qui permettent la tenue mécanique de l'ensemble et la séparation des différents milieux.

Revue schématique des filières

Filière	Combustible	Modérateur	Caloporteur
Graphite -gaz	U naturel	graphite	CO ₂ ou Hélium
Eau lourde	U nat ou enrichi	D ₂ O	D ₂ O + H ₂ O
Eau pressurisée	U enrichi	H ₂ O	H ₂ O
Eau bouillante	U enrichi	H ₂ O	H ₂ O
Haute température	U enrichi-Thorium	graphite	Hélium
Surgénérateur	U + Pu	aucun	Sodium

□ Propriétés du caloporteur ou du modérateur

Propriétés des matériaux

Matériaux caloporteurs

Condition		Coefficient de transfert convectif ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
convection naturelle	gaz	5 – 30
	eau	100 – 900
convection forcée	gaz	10 – 300
	eau	300 – 11 000
	métaux liquides	6 000 – 110 000
changement de phase	liquides en ébullition	3 000 – 60 000
	condensation	6 000 – 110 000

- Les gaz sont moins efficaces que l'eau, laquelle est moins efficace que les métaux en fusion.
- En général, la convection forcée est plus efficace que la convection naturelle.
- L'évaporation et la condensation sont très efficaces, (mélange vigoureux à la surface de contact du fluide).

Matériaux modérateurs

Élément	H2O	D2O	Be	C
Masse atomique	18	20	9	12
σ (neutrons thermiques) (b)	0,64	0,0013	0,0092	0,0034
Nombre de chocs (2MeV \rightarrow 1 eV)	19	35	86	114
Pouvoir modérateur	62	4830	126	216

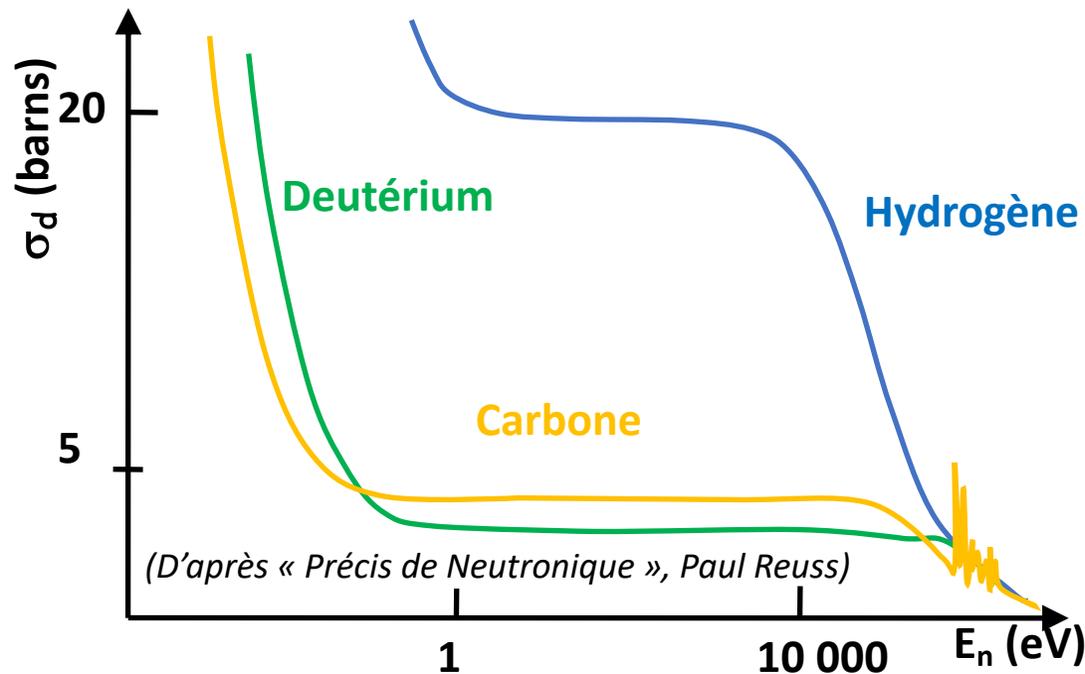
Un bon modérateur doit bien ralentir les neutrons et ne pas les capturer.

- σ_d grande \rightarrow noyaux légers
- σ_a petite

Section efficace de diffusion

Les sections efficaces de diffusion ont:

- comportement relativement constant dans la plus grande partie du domaine d'énergie
- pratiquement du même ordre de grandeur pour tous les noyaux sauf H.



Diffusion élastique

$$A = \frac{m_2}{m_1}$$

$$\alpha = \left(\frac{A - 1}{A + 1} \right)^2$$

$$\alpha \leq \frac{E_2}{E_1} \leq 1$$

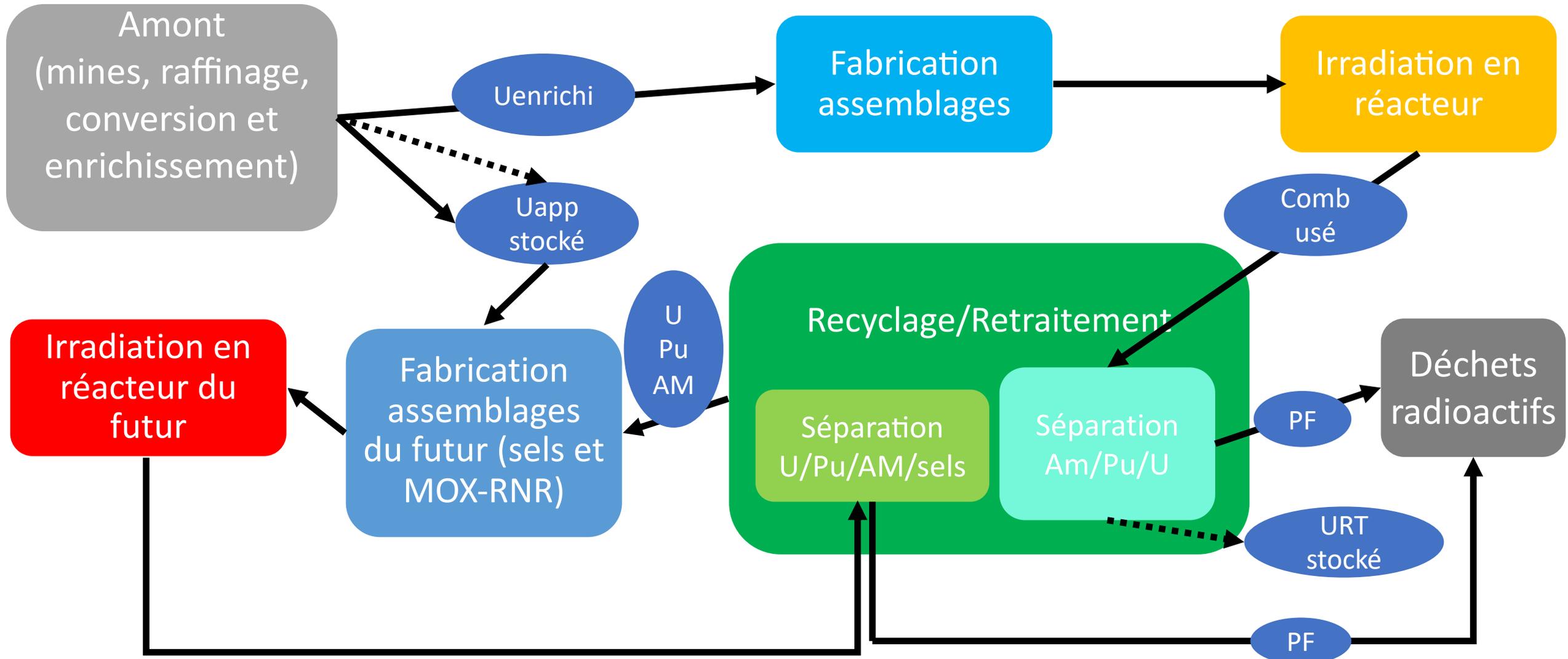
$\alpha = 0$ si $A = 1$ (hydrogène)

$\alpha = 0,983$ si $A = 238$ (uranium)

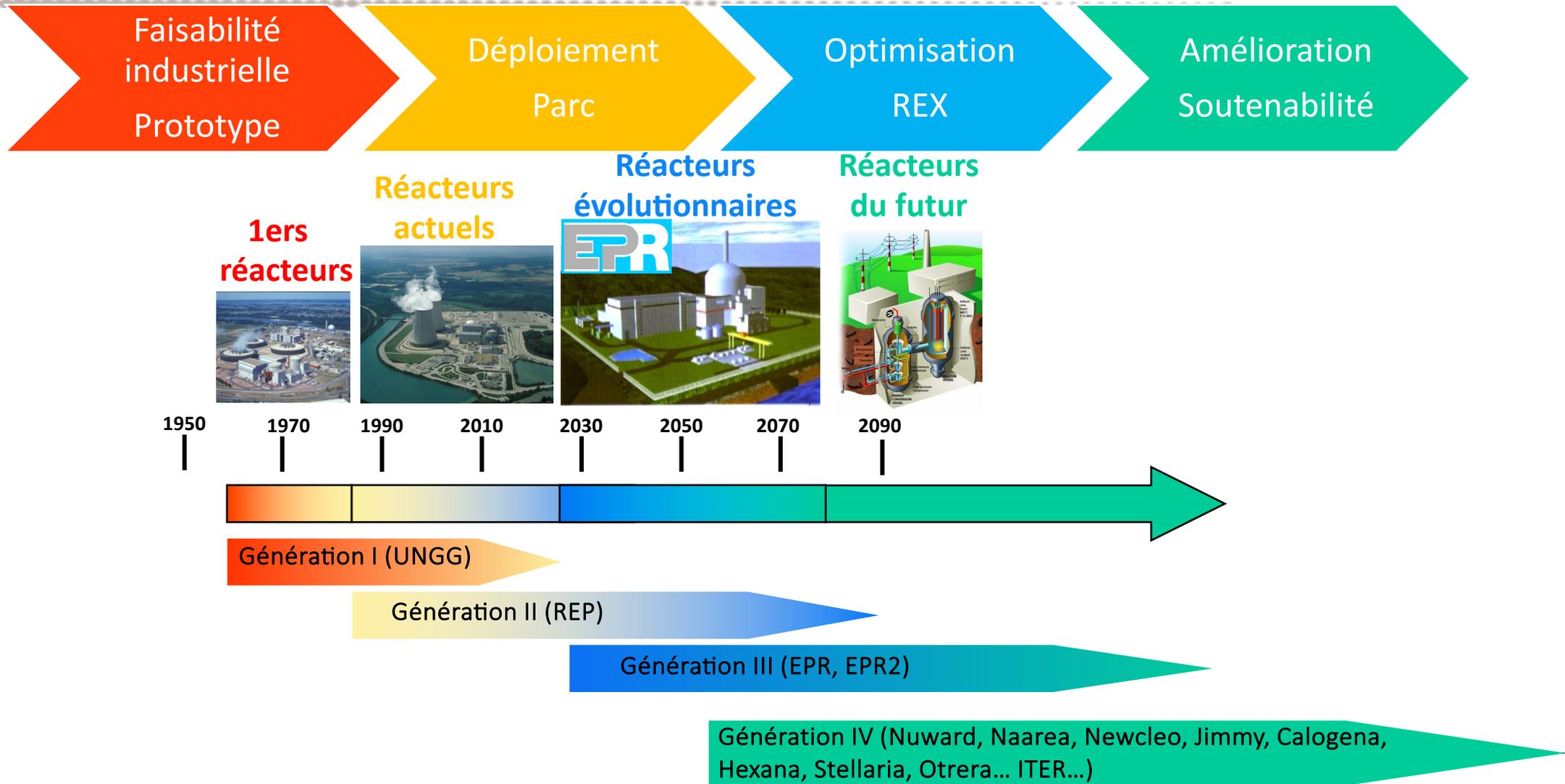
Plus le noyau est lourd, moins le ralentissement est efficace.

Sur l'hydrogène, le neutron peut perdre toute son énergie en un choc.

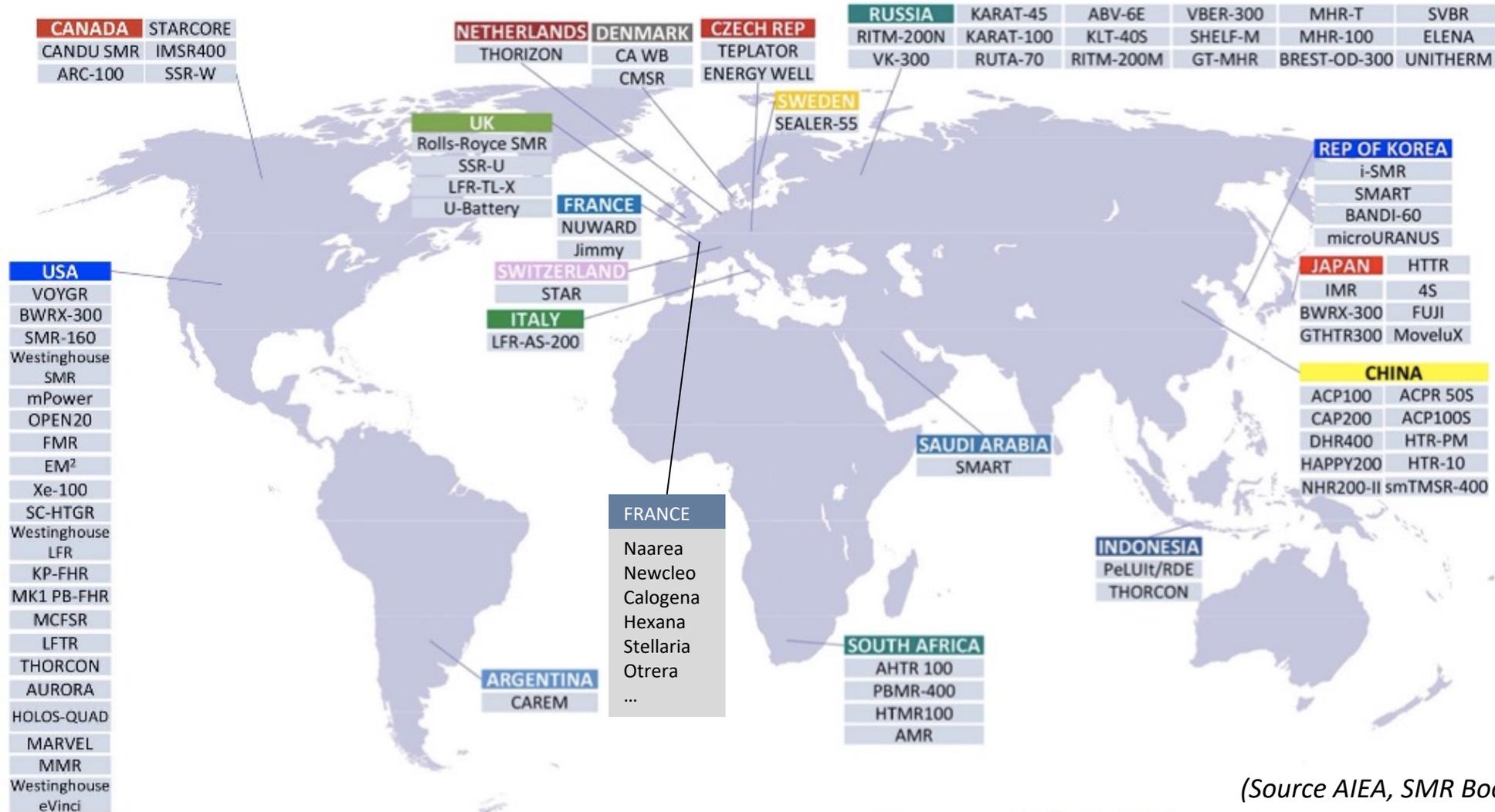
Cycle du combustible pour le futur



Les différentes générations de réacteurs

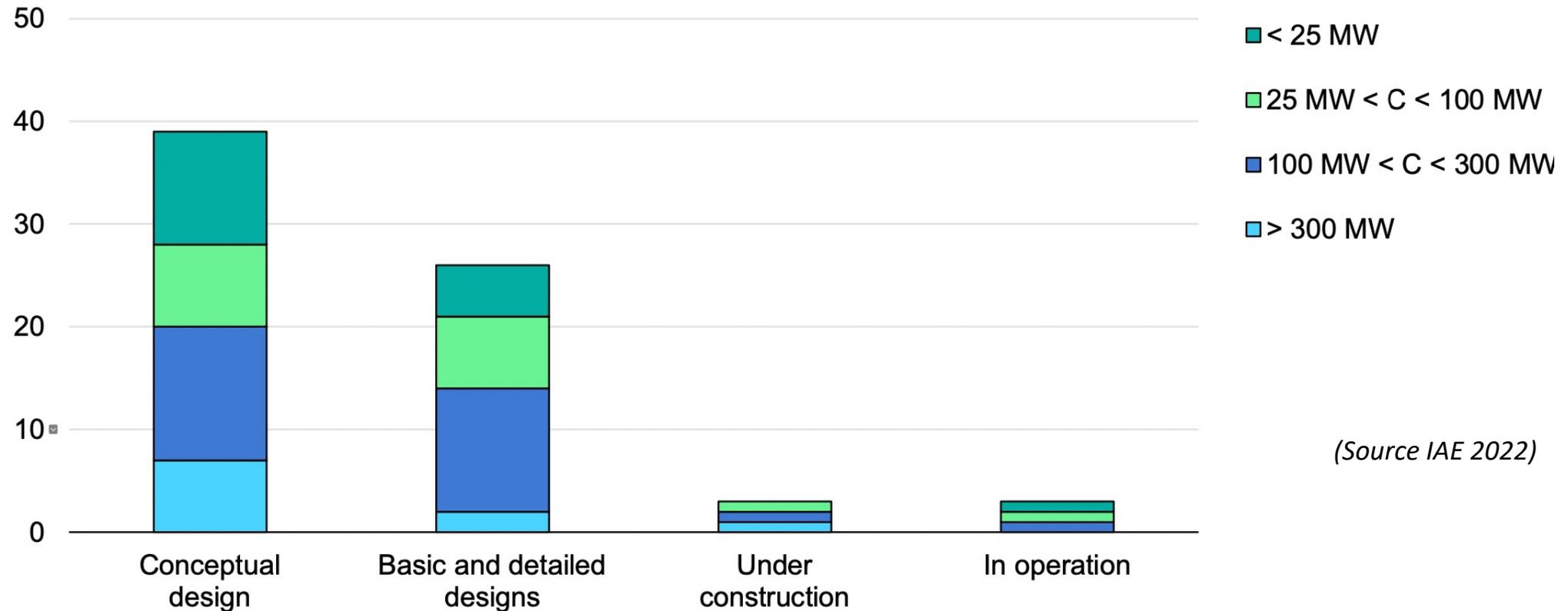


Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

Les SMR/AMR dans le monde : où en sont-ils?

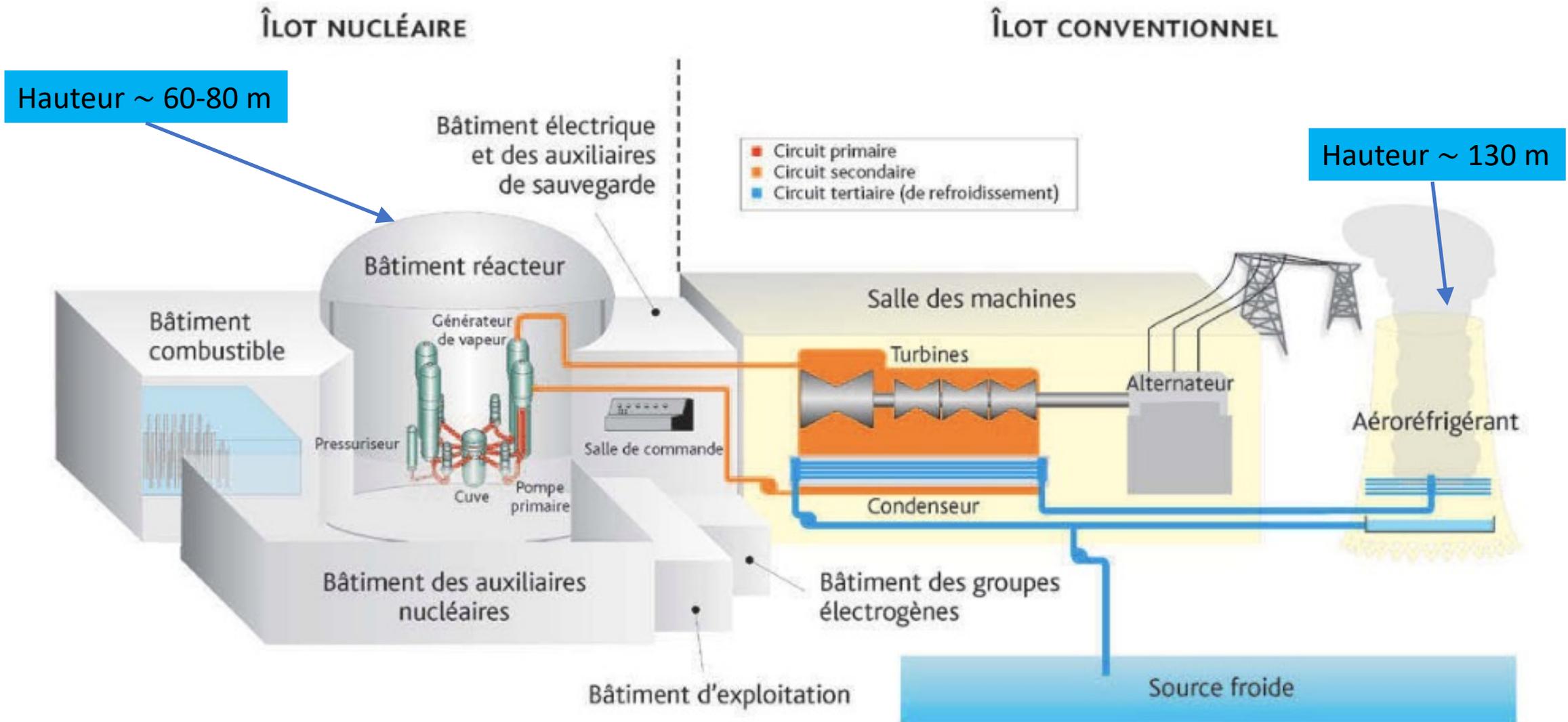


(Source IAE 2022)

Notes: C = electrical capacity.

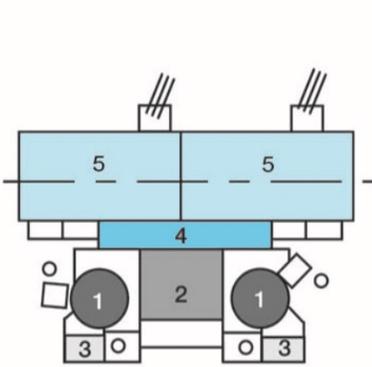
- Rappels sur le réacteur et la centrale

Vue d'ensemble

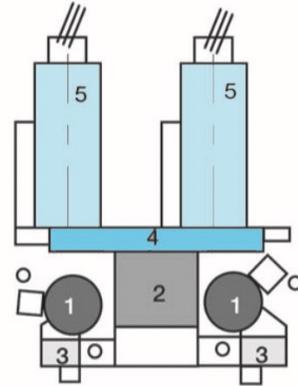


Amlioration continue sur le parc (GC)

900 MWe
Tranches jumelées



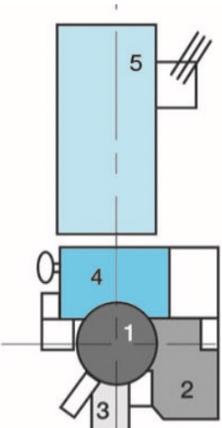
FESSENHEIM, BUGEY, CP 1



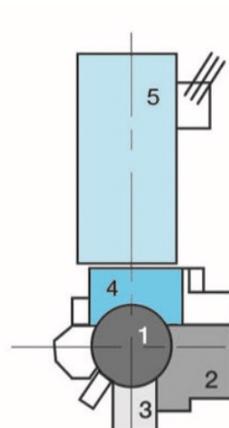
CP 2

- 1 - BÂTIMENT RÉACTEUR
- 2 - BÂTIMENT DES AUXILIAIRES NUCLÉAIRES
- 3 - BÂTIMENT COMBUSTIBLE
- 4 - BÂTIMENT ÉLECTRIQUE ET DE SAUVEGARDE (P4, P'4, N4)
- 5 - SALLE DES MACHINES
- 6 - BÂTIMENT DE SAUVEGARDE

Tranches uniques
1 300 MWe

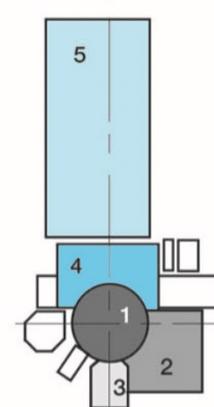


P 4



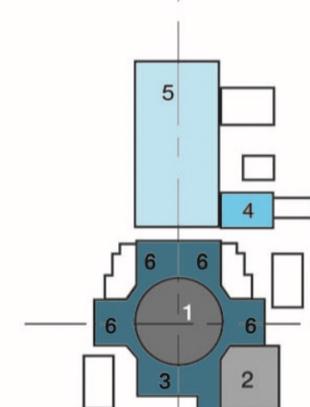
P' 4

Tranches uniques
1 450 MWe



N 4

Tranches EPR
1 600 MWe



EPR

(Source TI BN3100)

3. Le futur proche

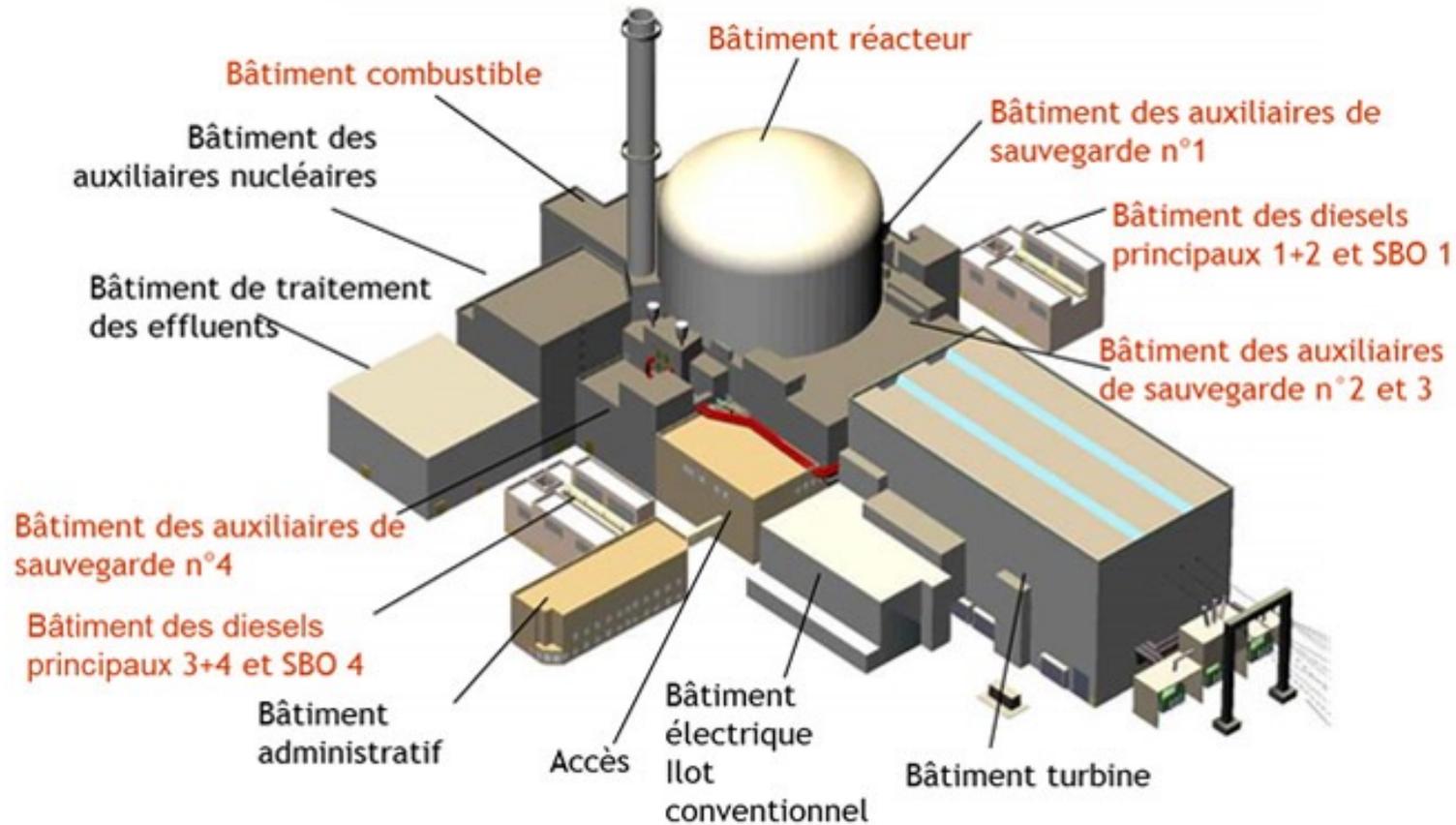
La génération 3: EPR

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



(Source EDF)

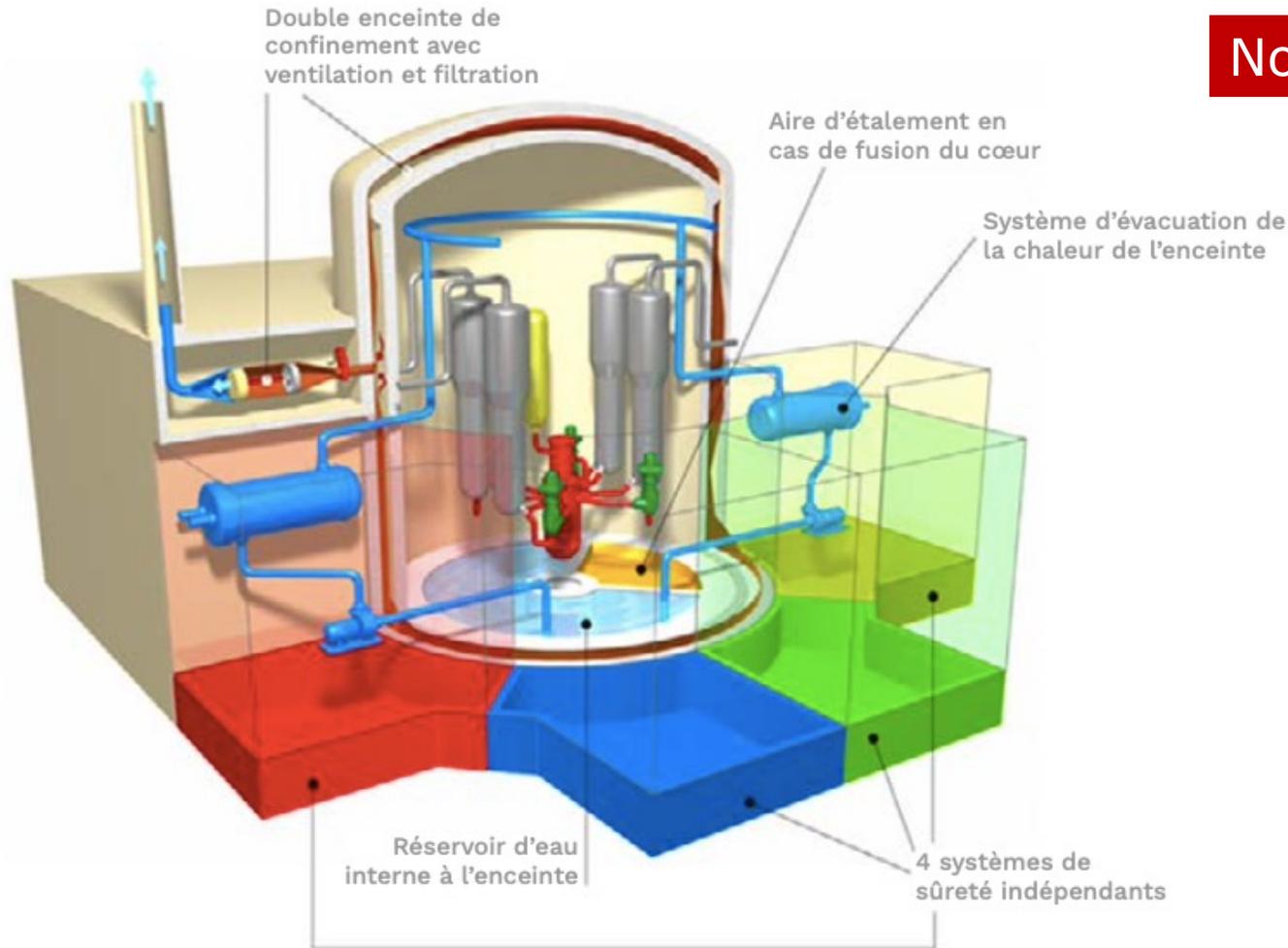
Objectifs de sûreté EPR



(Source IRSN)

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

Génération 3: EPR



(Source EDF)

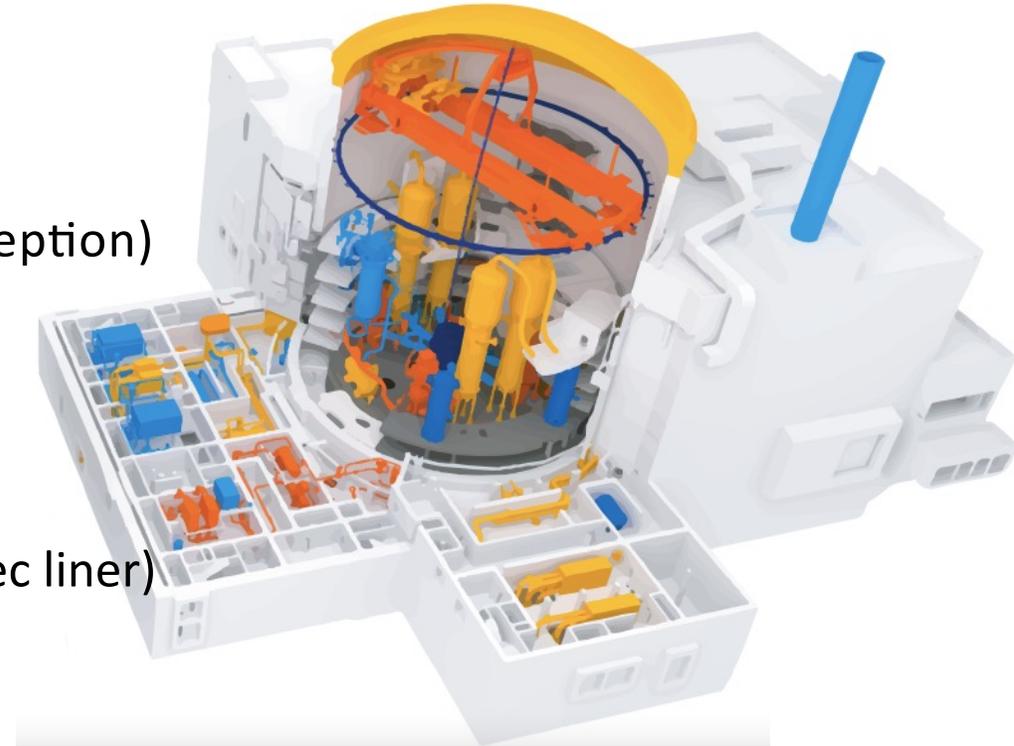
Nombreuses avancées en matière de sûreté

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

L'EPR2

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

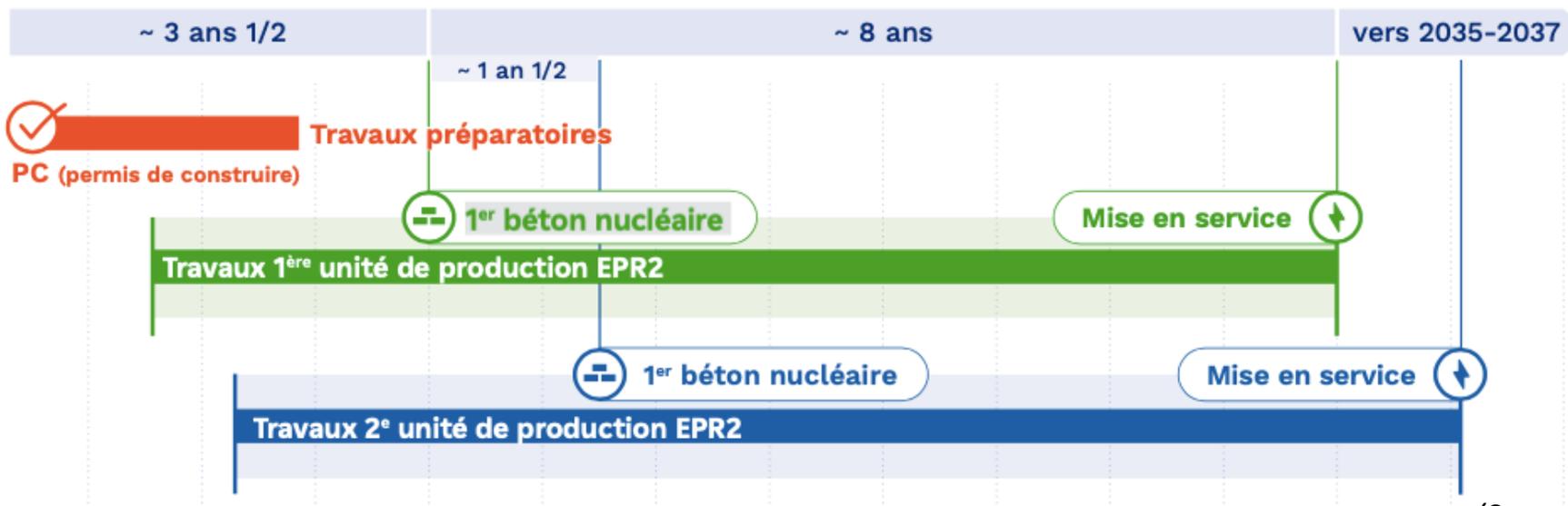
(Source Dossier EPR2, EDF CNDP)



Le planning

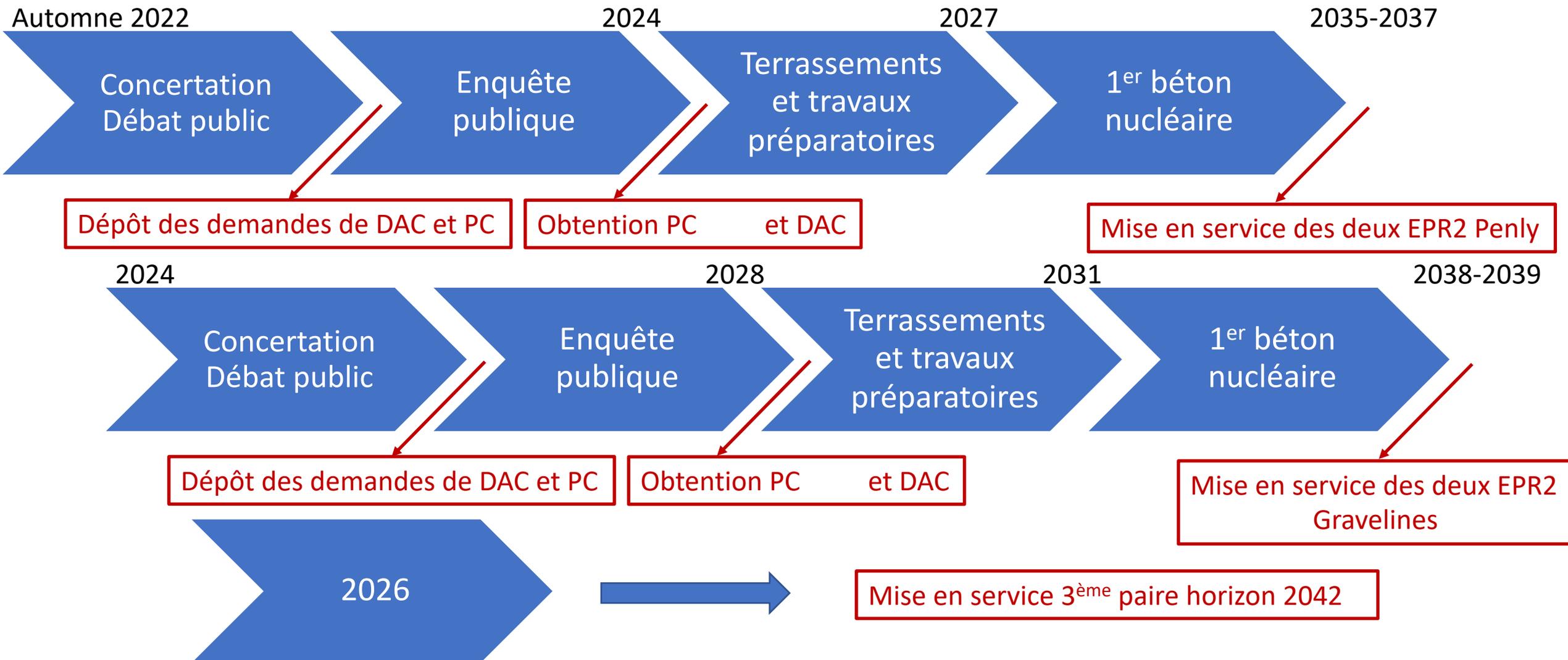
- ❑ Programme de 3 paires de réacteurs avec une option de 4 autres.
- ❑ Cout 6 paires = 51,7 milliards d'euros
- ❑ 18 mois entre deux réacteurs d'une même paire et 4 ans entre chaque paires.
- ❑ Construction 1 réacteur = 94 mois

PLANNING PRÉVISIONNEL DU CHANTIER



(Source Dossier EPR2/CNDP)

Le planning des trois paires EPR2



b. Le futur plus lointain

Concepts du futur (SMR/AMR)

- ❑ Les concepts de réacteurs du futur sont tous à des stades de réflexion.
- ❑ Faible puissance (50-300 MWe) dont le coût < 1 milliard d'euros.
- ❑ Environ 70 concepts dont la moitié sont des REP et 1/3 des HTR.
- ❑ Trois piliers : modularité, effet de série et simplification.
- ❑ La plupart des concepts ont été pensés dans les années 60-70.
- ❑ Faire plus petit (SMR/PRM) ou faire autrement (AMR).
- ❑ Grâce aux développements technologiques, ils pourraient revenir sur le devant de la scène.
- ❑ On peut les classer par leurs solutions aux usages industriels :
 - Électricité et chaleur basse et moyenne température : tous
 - Chaleur haute température : HTR
 - Meilleure utilisation des matières premières : MSR, RNR
 - Brûleur des déchets: MSR, RNR



(Source AIEA)

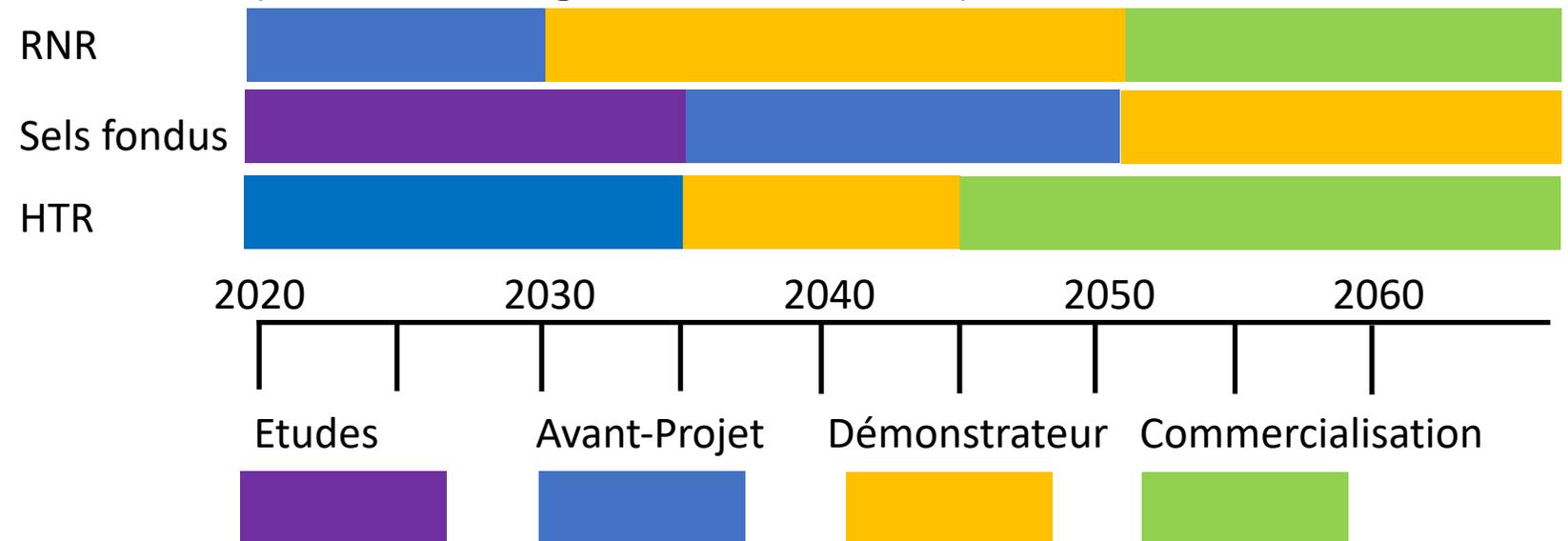
Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

❑ Pour les générations Gen3 : environ 10-15 ans

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

❑ Pour les générations Gen4 : bien plus long

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



Les principaux projets de SMR REP

Filière	Projet	Développeur	Pays	Puissance unitaire [MWe]	Commentaires
REP	NuScale	NuScale	États-Unis	77	Centrales à 4, 6 ou 12 unités
REP	SMR 160	Holtec	États-Unis	160	
REP	NUWARD	EDF + consortium	France	170	Centrale à 2 unités
REP	RITM 200	OKBM	Russie	60	+ variante pour centrale flottante RITM 200 M
REP	SMART	KAERI + KEPCO	Corée	100	En partenariat avec l'Arabie Saoudite
REP	ACP 100	CNNC	Chine	100	Première réalisation lancée en 2021
REP	CAP 200	SNERDI/SPIC	Chine	200	
REP	UK SMR	Rolls Royce + consortium	Royaume-Uni	470	
REP	CAREM	INVAP	Argentine	25	Prototype en construction (SMR de 120 MWe visé pour le marché)
REB	BWRX 300	GE Hitachi	États-Unis + Japon	300	
REP	ACPR 50 S	CGN PC	Chine	50	Pour centrale flottante

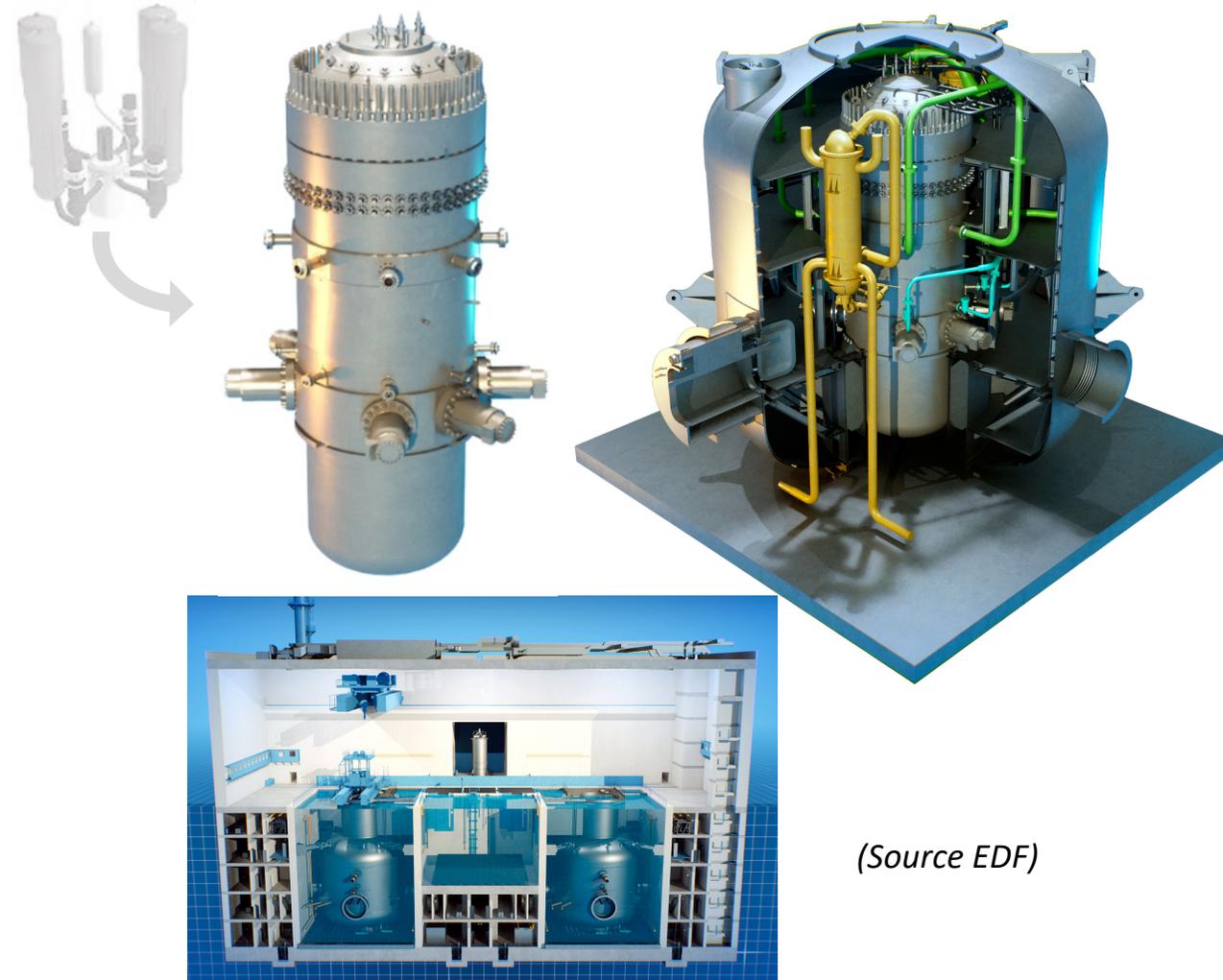
(Source TI BN3236)

Principaux projets AMR dans le monde (hors France)

Filière	Projet	Développeur	Pays	Puissance unitaire [MWe]	Commentaires
RNR	SVBR 100	JSC AKME	Russie	100	RNR au plomb bismuth
RNR	BREST-OD-300	NIKIET	Russie	300	RNR au plomb
RNR	NATRIUM	Terrapower + GE Hitachi	États-Unis + Japon	345	RNR au sodium + stockage sels fondus
MSR	IMSR	Terrestrial Energy	Canada	195	
MSR	SSR	Moltex	Canada + Royaume-Uni	300	<i>Stable Salt Reactor</i>
MSR	KP-FHR	Kairos Power	États-Unis	140	Lit de boulets refroidi par sel fondu
HTGR	Xe100	XEnergy	États-Unis	80	
HTGR	HTR PM	INET	Chine	105	Centrale à 2 unités en service depuis 2021
HTGR	GHTR 300	JAEA	Japon	300	

(Source TI BN3236)

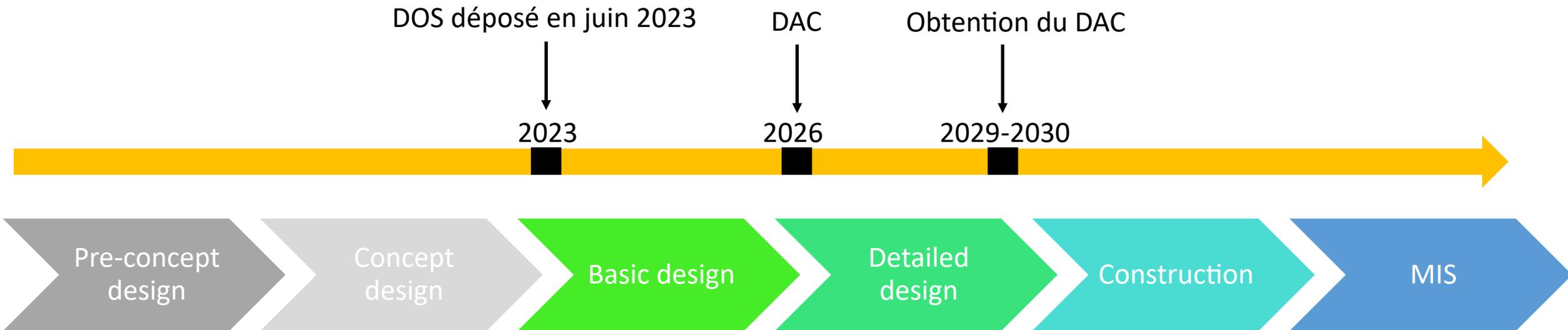
Projet Nuward



(Source EDF)

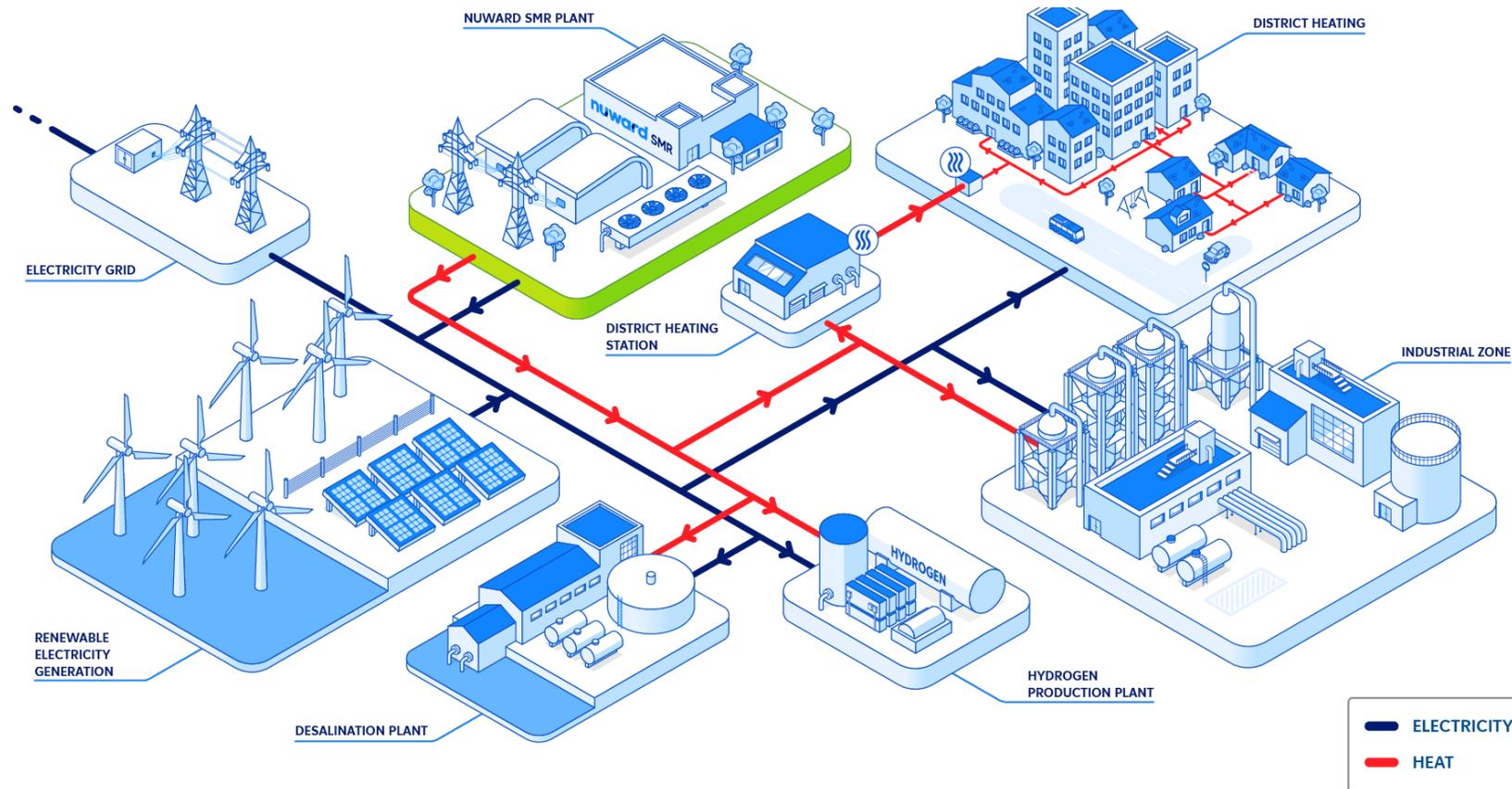
- ❑ Ilot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170 MWe + une piscine d'entreposage
- ❑ Cuve : H = 15 m, D = 4 m
- ❑ Enceinte métallique dans un bassin d'eau : (H = 18m, D = 15m)
- ❑ Générateurs de vapeur à plaques en titane. (1^{ère} fois)
- ❑ Mécanismes de commande de grappes immergés.
- ❑ Système de sûreté passive.
- ❑ Choix d'un contrôle du cœur sans bore soluble (pas d'accident de dilution).
- ❑ GV, pompe primaire et pressuriseur dans la cuve.
- ❑ 60% du bâtiment enterré.
- ❑ Cible : 1^{er} béton du prototype en France en 2030.
- ❑ Dossier d'Options de Sûreté (DOS) à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) déposé en juin 2023.
- ❑ Cible principale : remplacement des centrales à charbon (plus de 3000 centrales à remplacer dans les 30 ans.)
- ❑ Cogénération: production de chaleur (150-250°C).

Le planning de Nuward



(Source d'après EDF)

Les usages de NUWARD SMR



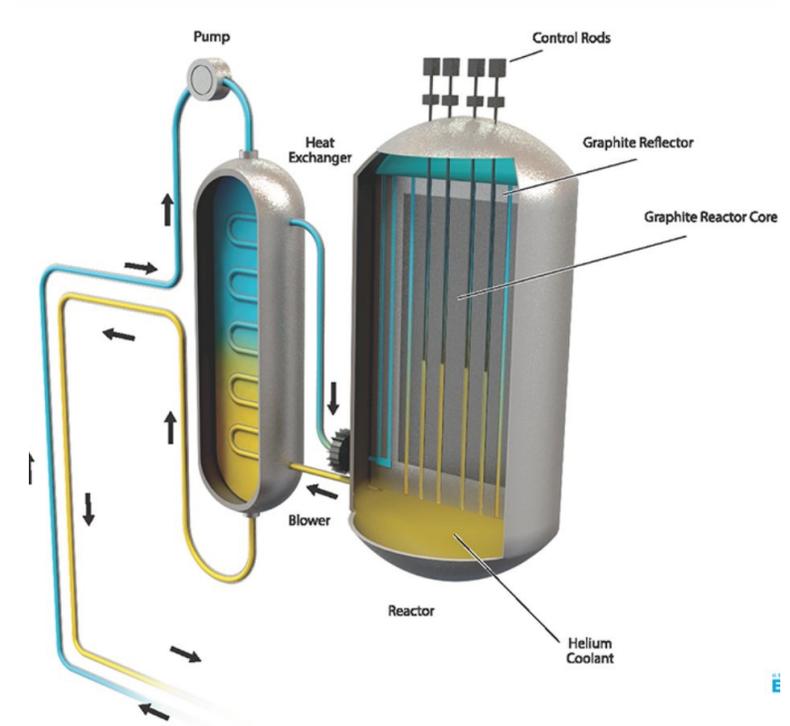
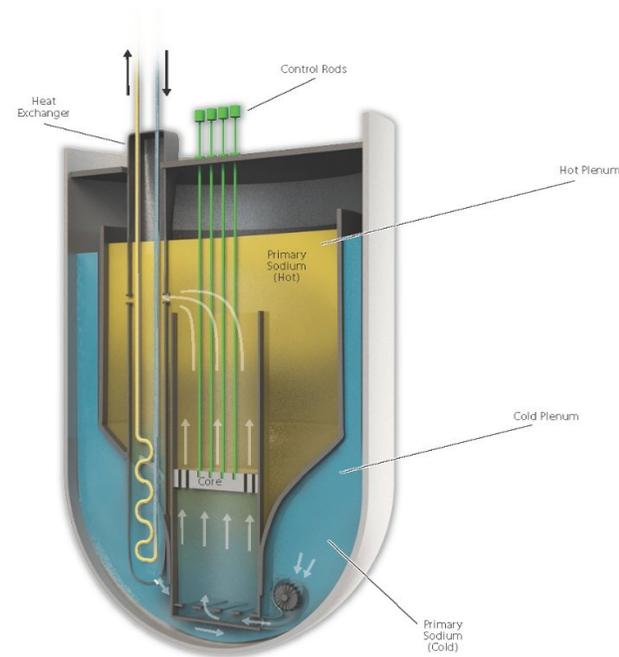
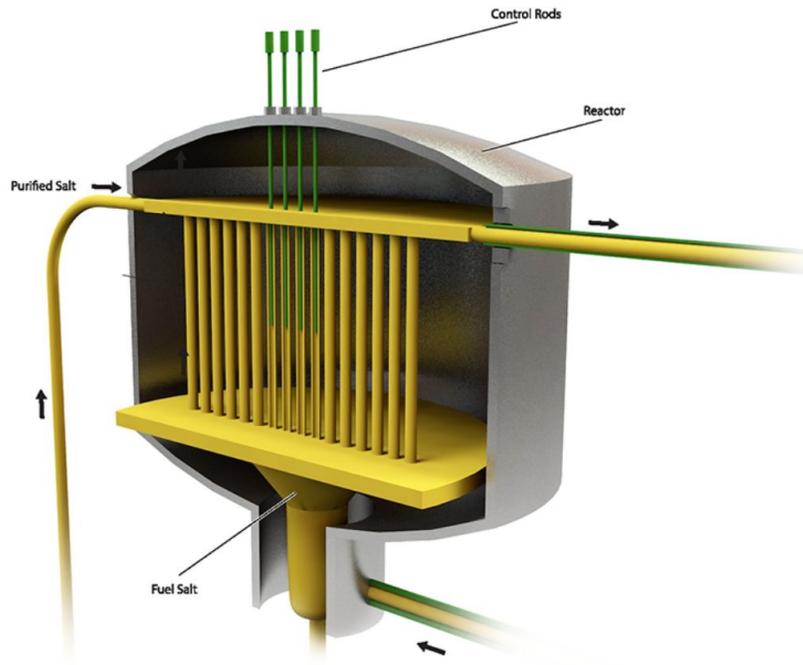
(Source EDF)

❑ Il délivrera électricité et chaleur.

❑ 3 innovations principales :

- Construction modulaire en usine : 70% du réacteur construit en usine.
- Compacité du design: le GV (à plaques en titane) et les pompes sont dans la cuve.
- Capacité de cogénération : soit 100% d'électricité (340 MWe) soit 100 MW de chaleur et 310 MW d'électricité. (410 MW de puissance)

Les concepts disruptifs

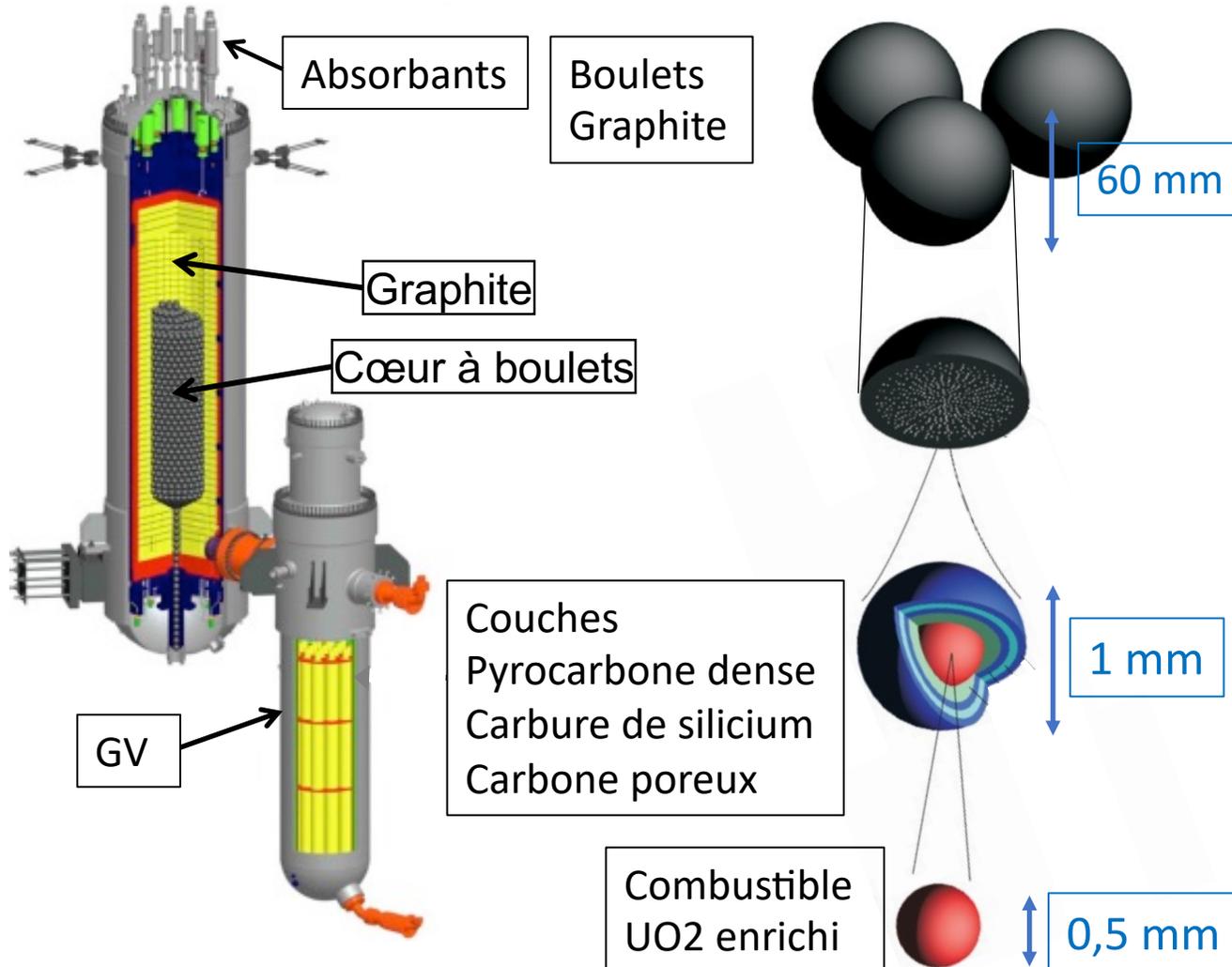


Réacteurs à sels fondus

Réacteurs à neutrons rapides

Réacteurs à haute température

Réacteur à haute température



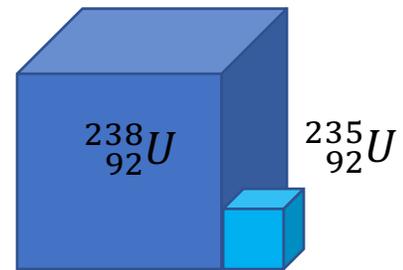
- ❑ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ❑ 1^{er} réacteur DRAGON en UK (1964-1977).
- ❑ Caloporteur : gaz inerte (hélium) (pas de problème de chimie et de radioactivité) à haute température.
- ❑ Modérateur : graphite (supporte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

(Source Z. Zhang et al. / Engineering 2 (2016))

(Source <http://www.pbmr.co.za/>)

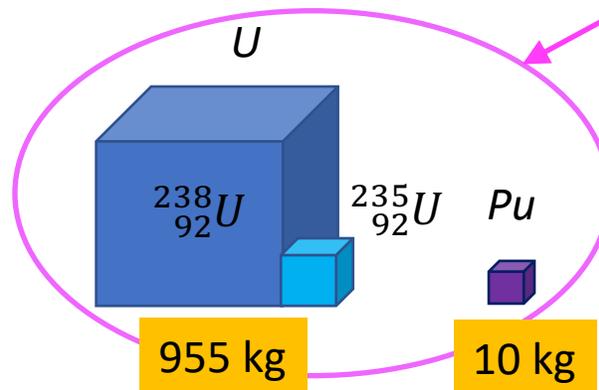
Le combustible

1 tonne d'uranium enrichi à 3,5%
965 kg $^{238}_{92}\text{U}$ et 35 kg $^{235}_{92}\text{U}$

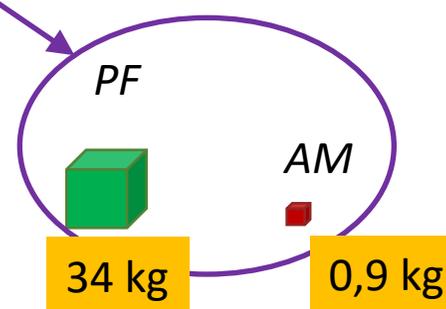


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes

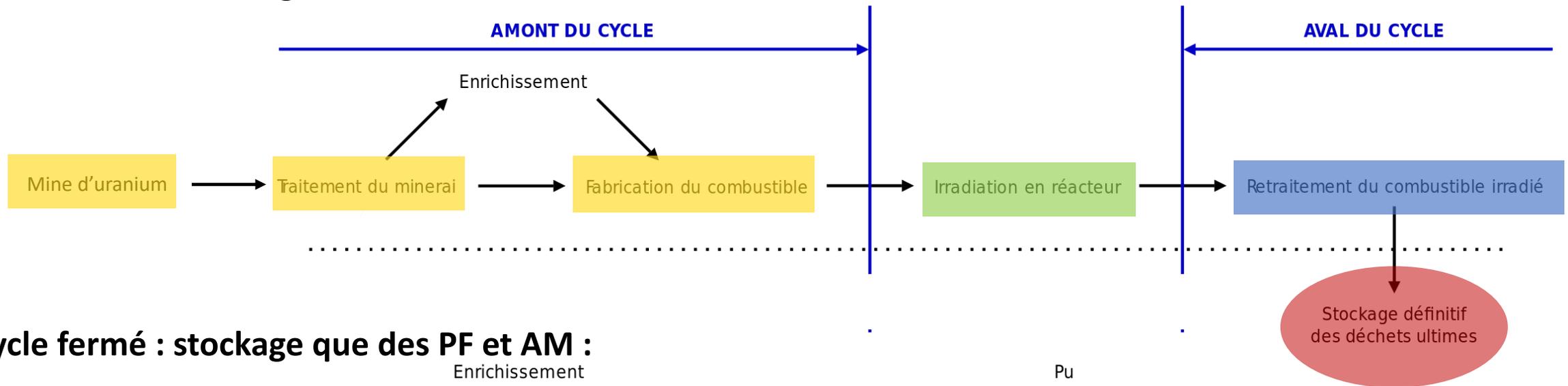


Après passage en cœur :

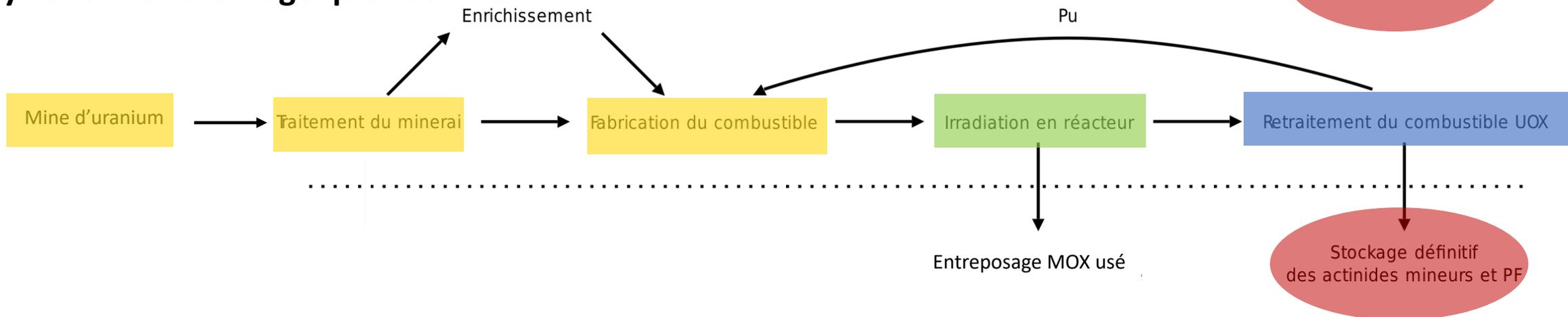
- 95% de l'uranium
- 1% de plutonium
- 4% PF+AM

Amont/Aval et cycle ouvert/fermé

❑ Cycle ouvert : stockage de tout le combustible utilisé :



❑ Cycle fermé : stockage que des PF et AM :



Le taux de conversion

- ❑ Le taux de conversion peut être calculé grâce à la résolution des équations de Bateman.
- ❑ C'est le rapport du nombre de noyaux fissiles formés au nombre de noyaux fissiles détruits.

$$C = \frac{\text{nbre de noyaux fissiles produits}}{\text{nbre de noyaux fissiles détruits}}$$

- ❑ Ce facteur de conversion peut être calculé soit pour un temps donné (début d'irradiation par exemple), soit intégrés sur une certaine période (par exemple toute la durée de combustion).
- ❑ Il est appelé taux de régénération dans les RNR.
- ❑ Le facteur de conversion C pour différentes filières de réacteurs:

filière	UNGG	CANDU	REP	RNR	RNR+CA	RNR+CA+CR
C	0,8	0,9	0,6	0,8	1	1,2

RNR+CA : avec couvertures axiales

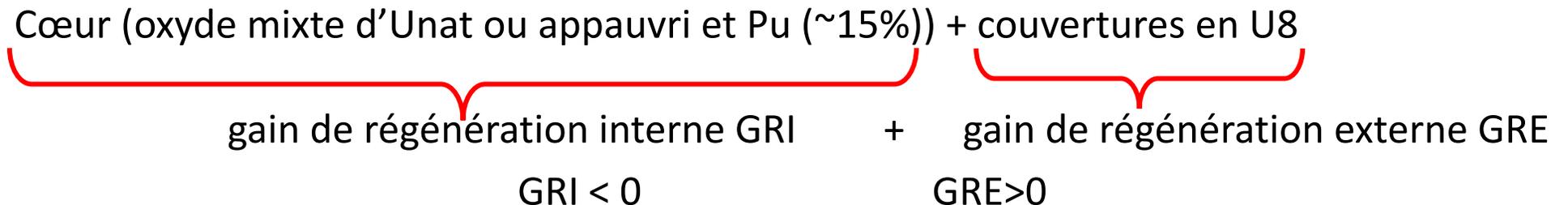
RNR+CA+CR : avec couvertures axiales et radiales

Gain de régénération

- ❑ Le gain de régénération G est la production nette de noyaux fissiles par fission.
- ❑ C'est le nombre net de noyaux fissiles produits (production-consommation) rapporté au nombre de fissions.

$$G = \frac{\text{production} - \text{absorption}}{\text{fission}} = (C - 1) \frac{\text{absorption}}{\text{fission}} \approx 1 \rightarrow G \approx C - 1$$

- ❑ De la même manière que C , G peut être calculé à un instant donné ou intégré sur un intervalle de temps.
- ❑ Cas particulier du surgénérateur : Il faut : $C > 1$ et $G > 0$ → produit plus de matière fissile qu'il n'en consomme.
- ❑ Un RNR n'est surgénérateur seulement si on lui adjoint des couvertures (couches de matière fertile disposée autour du cœur) (voir tableau slide précédent)



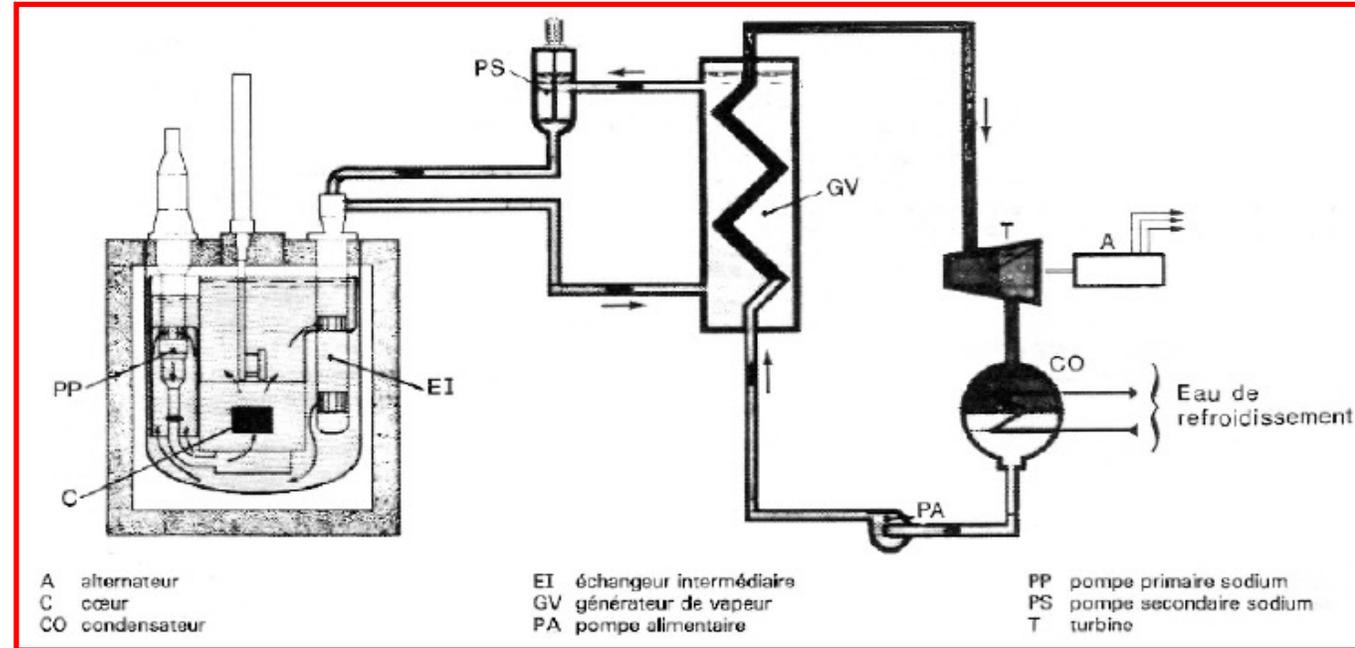
Le caloporteur

Avantages:

- Large plage liquide du caloporteur : point d'ébullition à atmosphère ambiante de 900 °C
- bon coefficient de transmission de chaleur, donc cœur compact
- Propriétés hydrauliques comparables à celles de l'eau
- Non corrosif pour la plupart des sortes d'acier si la teneur en oxygène reste faible (~ 1 ppm)

Inconvénients:

- Réactivité chimique du sodium (feux, réaction sodium-eau, risques corrosion)
- Opaque (inspections difficiles)
- Section efficace d'absorption de Sodium assez élevée entraîne un coefficient de vide positif.



(d'après documents CEA)

Fonctionnement du cœur

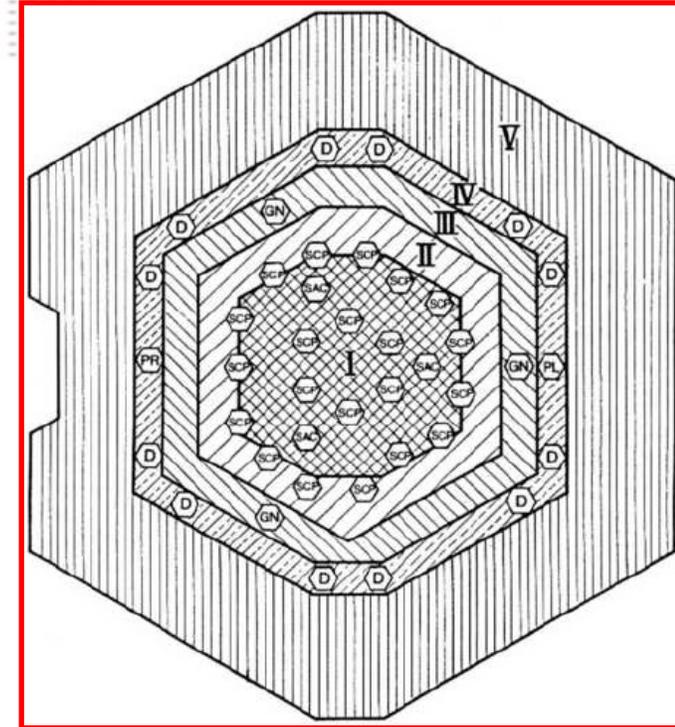
(d'après documents CEA)

Neutronique :

- cinétique similaire aux réacteurs à neutrons thermiques
- usure du combustible très faible du fait de la surgénération
- pilotage du réacteur par action sur les barres de contrôle (carbure de bore enrichi)

Thermique :

- densité de puissance élevée
- nécessité d'un refroidissement sur : possible grâce à la haute température d'ébullition du sodium



I	193 assemblages combustibles zone 1
II	171 assemblages combustibles zone 2
III	234 assemblages fertiles
IV	197 assemblages en acier
V	1076 assemblages PNL (<i>Protection Neutronique Latérale</i>)
D	12 assemblages combustibles pour déverminage
GN	3 guides-neutrons
PL	1 poste libre
PR	1 poste de recalage
SAC	3 assemblages SAC (<i>Système d'Arrêt Complémentaire</i>)
SCP	21 assemblages SCP (<i>Système de Commande Principal</i>)
Pas du réseau: 179 mm.	

Les RNR dans le monde (2005)

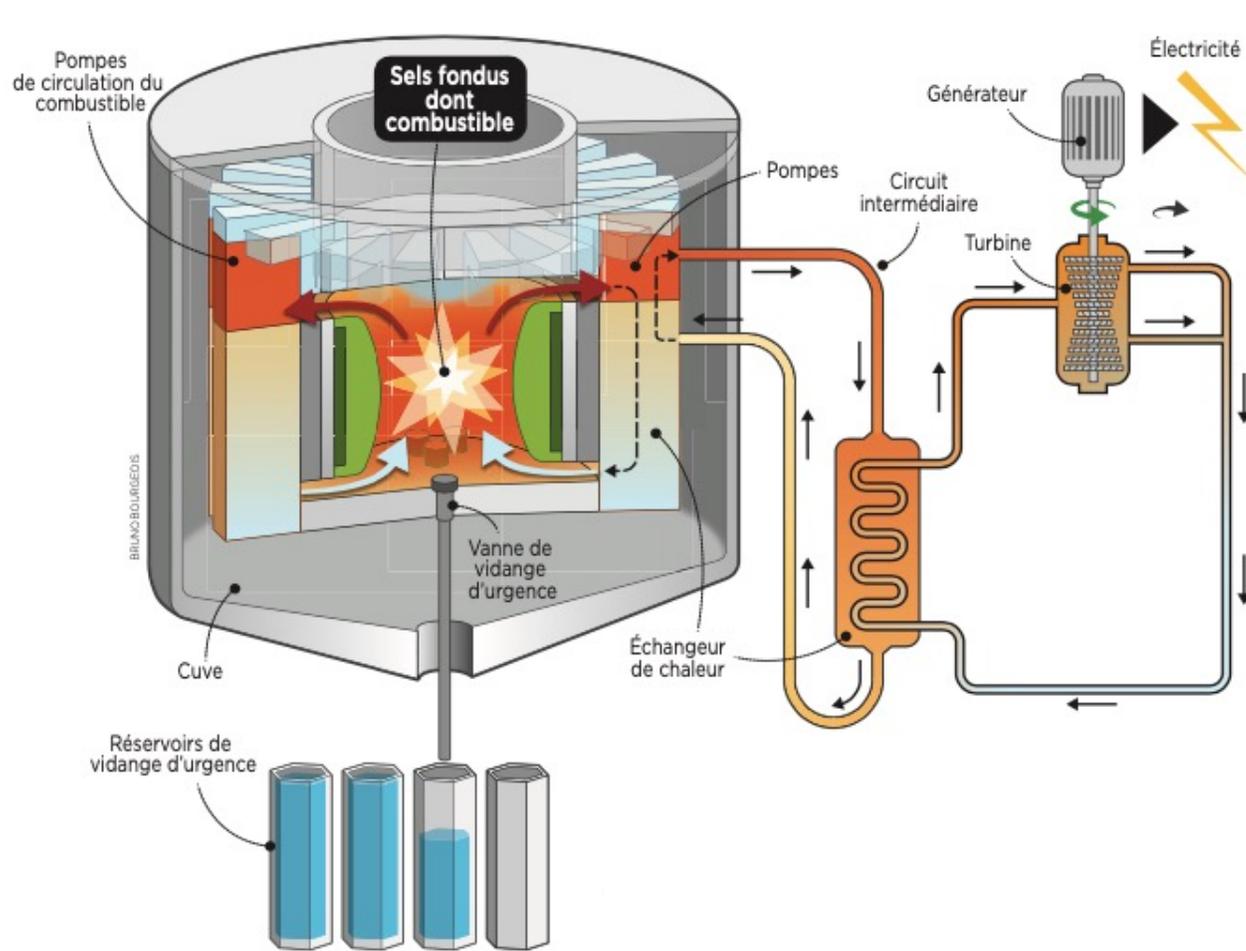
Pays	Réacteurs expérimentaux			Centrales de démonstration			Centrales prototypes		
	Désignation (1)	Puissance thermique (2) (MW)	Divergence (Année)	Désignation (1)	Puissance électrique (MW)	Mise en service industriel	Désignation (1)	Puissance électrique (MW)	Mise en service industriel
États-Unis	EBR 1	1 (0,2)	1951 (arrêté)	CRBRP	350	abandonné			
	EBR 2	60 (20)	1965						
	Enrico Fermi	300 (60)	1965 (arrêté)						
	SEFOR	20	1969 (arrêté)						
	FFTF	400	1978 (arrêté)						
France	Rapsodie	24 puis 38	1967 (arrêté)	Phénix	250	1974	SPX 1 (3)	1 200	1987
Royaume-Uni	DRF	60 (15)	1959 (arrêté)	PFR	250	1976 (arrêté en 94)			
Inde	FBTR	40	1985	PFBR	500				
Italie	PEC	140	abandonné						
Japon	Joyo	50	1977	Monju	300	1994	DFBR	600	
République fédérale d'Allemagne	KNK	60 (20)	1971 (arrêté)	SNR 300	300	abandonné			
CEI	BR2	0,1	1956	BN 350	≈ 350	1973	BN 800	800	
	BR5	5	1959	BN 600	600	1980			
	BOR 60	60 (10)	1969						
(1) Signification des sigles connus :				CRBRP		Clinch River Breeder Reactor Plant			
EBR				SPX		Superphénix			
SEFOR				CDFR		Commercial Demonstration Fast Reactor			
FFTF				PFR		Prototype Fast Reactor			
DFR				PFBR		Plutonium Fast Breeder Reactor			
FBTR				DFBR		Demonstration Fast Breeder Reactor			
PEC				SNR		Schneller Natriumbrüter Reaktor			
KNK				BN, BOR et BR		sigles russes			
(2) La valeur indiquée entre parenthèses correspond à la puissance électrique, exprimée également en mégawatts.									
(3) Superphénix, construit en France par la NERSA (EDF 51 %, ENEL 33 % et SBK 16 %), a été arrêté en 1997.									

(Source TI BN3170)

Conclusion sur RNR

- Un réacteur à neutrons rapides permet:
 - d'utiliser le plutonium retraité lors du recyclage du combustible usé des REP.
 - d'utiliser l'uranium-238 (donc la totalité de l'uranium naturel).
-  Possibilité d'accroître d'un facteur 100 environ le taux d'utilisation de la ressource en uranium.
 - de limiter, dès le début la quantité d'actinides mineurs contenus dans les déchets finaux : par 1 kWh, 4 fois moins d'actinides mineurs sont produits, si on utilise le plutonium dans un RNR, que dans un REP.
- Le RNR permet donc la soutenabilité de la filière électronucléaire :
 - Préservation des ressources naturelles
 - Limitation de la quantité de déchets ultimes et diminution de leur radiotoxicité.
- La France possède une expérience importante dans l'exploitation des RNR.
- Son industrie de cycle avec l'usine de la Hague pour le recyclage et de Melox pour la fabrication du MOX a été pensé pour l'évolution vers un parc RNR. et son
- Le choix du caloporteur Na ou Plomb est à concrétiser. Tous deux ont des inconvénients et des avantages.
- Mais encore beaucoup de progrès restent à faire et d'autres choix de réacteurs pourraient être envisagés.

Réacteurs à Sels fondus



(Source sciences et avenir la Recherche mars 2022)

- Le combustible est liquide dissous dans un sel.
- Sel fluorure ou chlorure.
- Le sel est le caloporteur et joue le rôle de barrière de confinement.
- Plus de gaine, ni assemblage.
- Possibilité neutrons thermiques ou rapides.
- Avantages théoriques:
 - Retraitement en ligne possible
 - Utilisation de U/Pu; Th/U
 - Incinération Pu et transmutation Am
 - Sûreté passive (évacuation Pres)
- Il faut un prototype construit.
- Deux start-up en France avec sel chlorure et n rapides : Naarea (40 MWe) et Stellaria (CEA).
- Chine: 1^{er} prototype au thorium mis en service: TMSR-LF1

Avantages et Verrous de la filière sels fondus

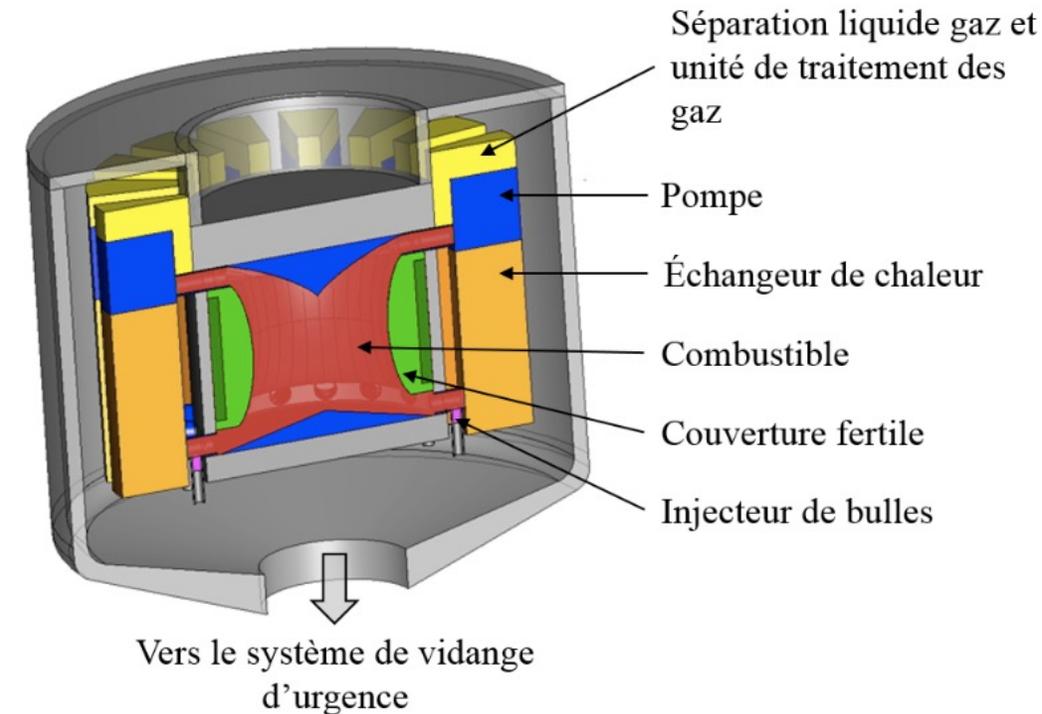
□ Avantages : Répond à une préoccupation de l'opinion sur la gestion des déchets et de matières radioactives:

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

□ Verrous technologiques :

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

circuit combustible du MSFR



(Source Thèse de Doctorat, Delphine Gerardin, 2018)

Conclusion sur le MSFR dans le cadre français

- ❑ Utilisation du plutonium, des AM et de l'uranium comme combustible :
 - Evite l'extractibilité de l'uranium naturel
 - Diminue la quantité de déchets HA-VL produits
- ❑ Flexibilité
 - Suivi de réseau très rapide et très souple
 - Intégration dans un MIX avec ENRi
- ❑ Sécurité intrinsèque : cout moins important
 - pas d'accident énergétique
 - Contre-réactions fortement négatives
 - Pas de pression
 - Solidification du sel en cas de fuite



Répond à beaucoup de préoccupations de l'opinion publique en France.

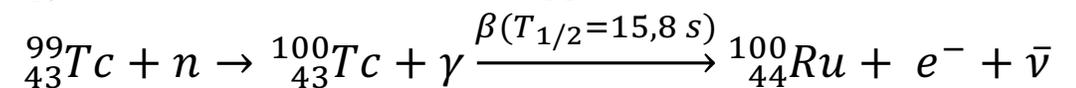
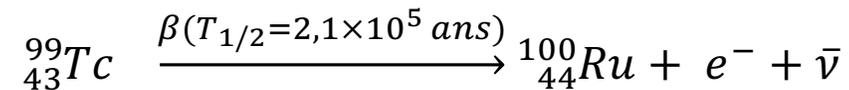
- ❑ Mais aujourd'hui le réacteur à sels fondus est non mature industriellement.
 - Référentiel de sureté à définir
 - Vieillessement des matériaux
 - Procédé de purification/retraitement à mettre au point...

La transmutation

- ❑ Transformer par réaction nucléaire, des radionucléides à vie longue en des noyaux stables ou dont la durée de vie ou la radiotoxicité est diminuée.
- ❑ Trois voies ont été explorées: réactions induites par photons, par protons et par neutrons.
 - Réaction (γ, xn) : rendement trop faible.
 - Réaction de spallation : transmutation indirecte grâce aux neutrons de haute énergie produits : Voie ADS.
 - Réaction (n, noyau) : la meilleure solution aujourd'hui.
- ❑ **Les transuraniens (au-delà de l'uranium)** : Formés par capture neutronique et décroissance radioactive:
 - élimination par réaction de fission
- ❑ **Les produits de fission à vie longue (PF-VL)** : Formés par fission, (décroissance (β) et/ou capture neutronique)
 - élimination par capture vers un isotope stable
- ❑ Rappel: loi de 2006 : la transmutation ne se positionne qu'en option complémentaire d'un stockage.

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

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

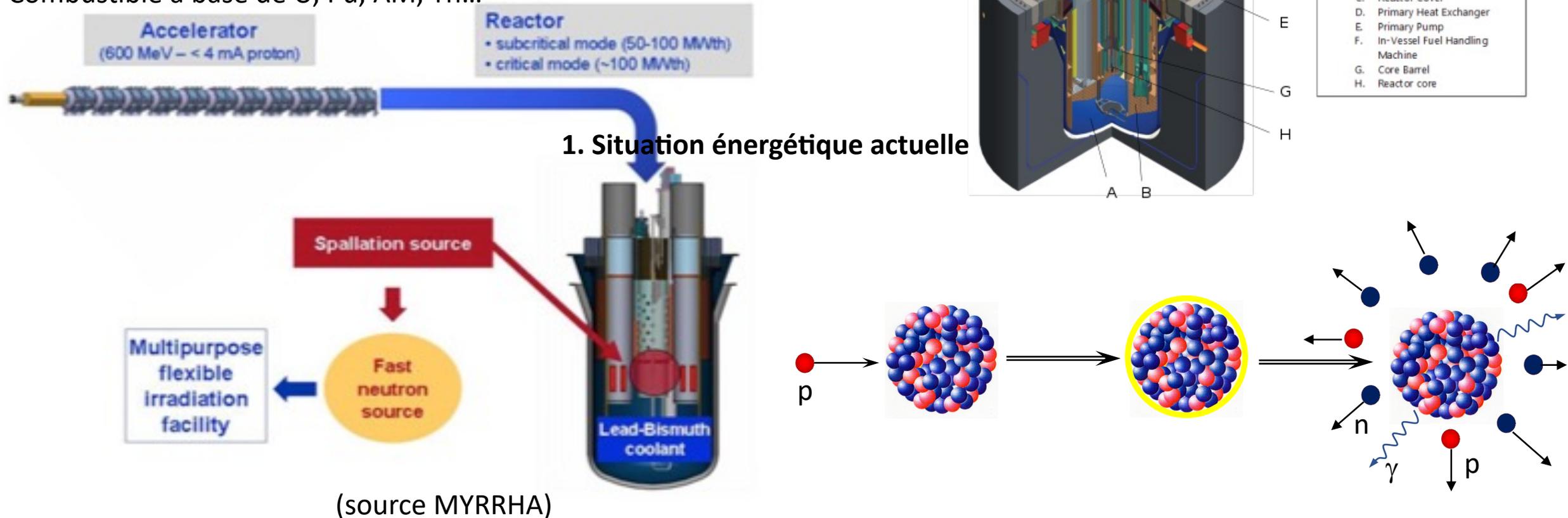


Conclusions des études menées

- ❑ Transmutation des actinides mineurs : Am, Cm et Np
 - Impact de la 1^{ère} réaction : Meilleur résultat en spectre rapide (moins de captures et plus de fissions).
 - Mais nécessité de multirecyclage des AM pour leur disparition totale.
 - Vigilance sur le taux de formation d'isotopes supérieurs.
 - Expériences dans Phénix de cibles d'Am dans des assemblages à spectre neutronique localement modéré: permet d'obtenir des taux de fission importants avec seulement un monorecyclage.
- ❑ Transmutation des produits de fission : iode, césium et technétium :
 - Beaucoup plus problématique.
 - Les PF consomment des neutrons et sont un point d'attention pour la réaction en chaîne.
 - Semble réalisable pour le technétium et l'iode.
 - Pour le césium, nécessité de faire une séparation isotopique poussée.

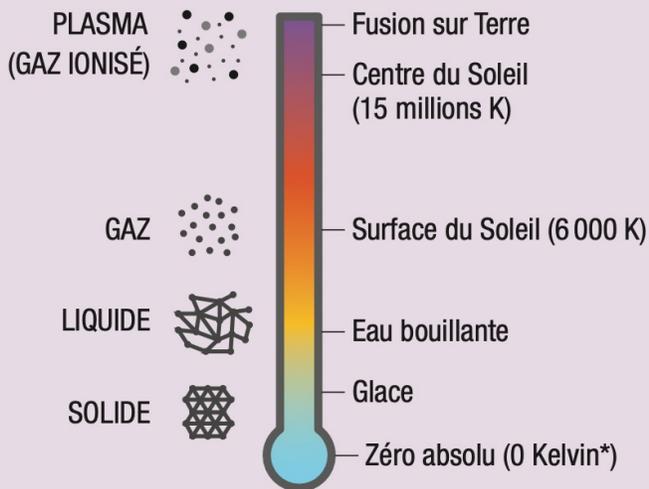
Myrrha

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



Des connaissances de physique pour la fusion

Le plasma est le quatrième état de la matière, extrêmement chaud



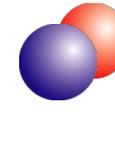
* 1 Kelvin (K) = - 273,15 °C

(Source CEA)

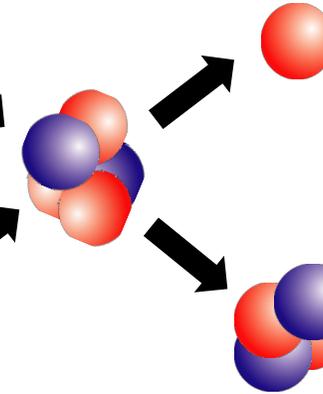
croûte terrestre
et dans les
océans

Réaction n+Li

deutérium



tritium

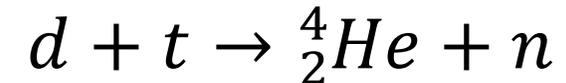


neutron

$E_c = 14 \text{ MeV}$

hélium-4

$E_c = 3,5 \text{ MeV}$



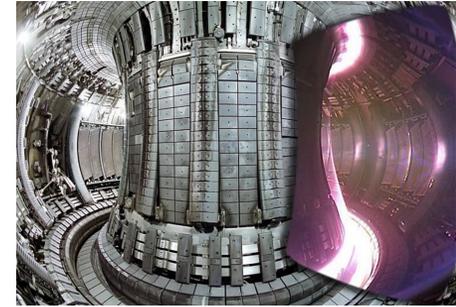
$$\sum M_i < \sum M_f$$



Equivalence entre fission et fusion :

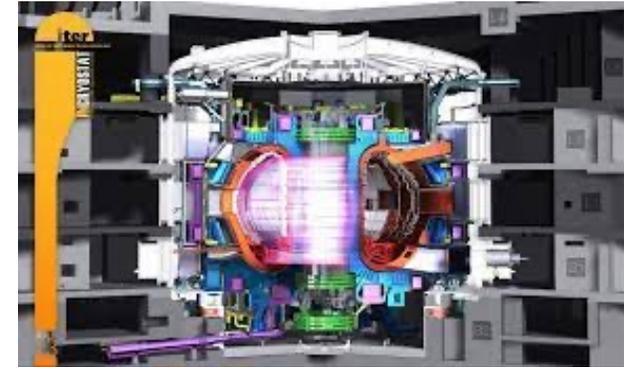
- 200 MeV par fission d'U235
- 18 MeV par fusion de deutérium - tritium

La fusion : ses avantages



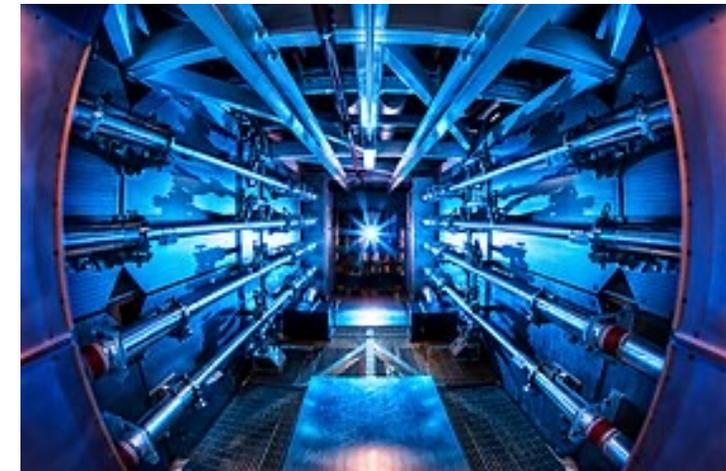
Production d'énergie : ses avantages

- Elle produit 4 fois plus d'énergie qu'une réaction de fission et 4 millions de plus que la combustion des énergies fossiles,
- Elle ne produit pas de CO₂,
- Elle ne produit pas de déchets hautement radioactifs (l'hélium-4 est un gaz inerte non toxique)
- Elle s'arrête toute seule dès que les conditions de température et de pression ne sont pas réunies.
- Elle dispose de ressources importantes,
- Elle ne permet pas la prolifération.



Deux technologies :

- La fusion par confinement magnétique. C'est le principe d'ITER.
- La fusion par confinement inertielle qui utilise des lasers très puissants. C'est le principe du National Ignition Facility et du laser Mégajoule.



Le confinement magnétique

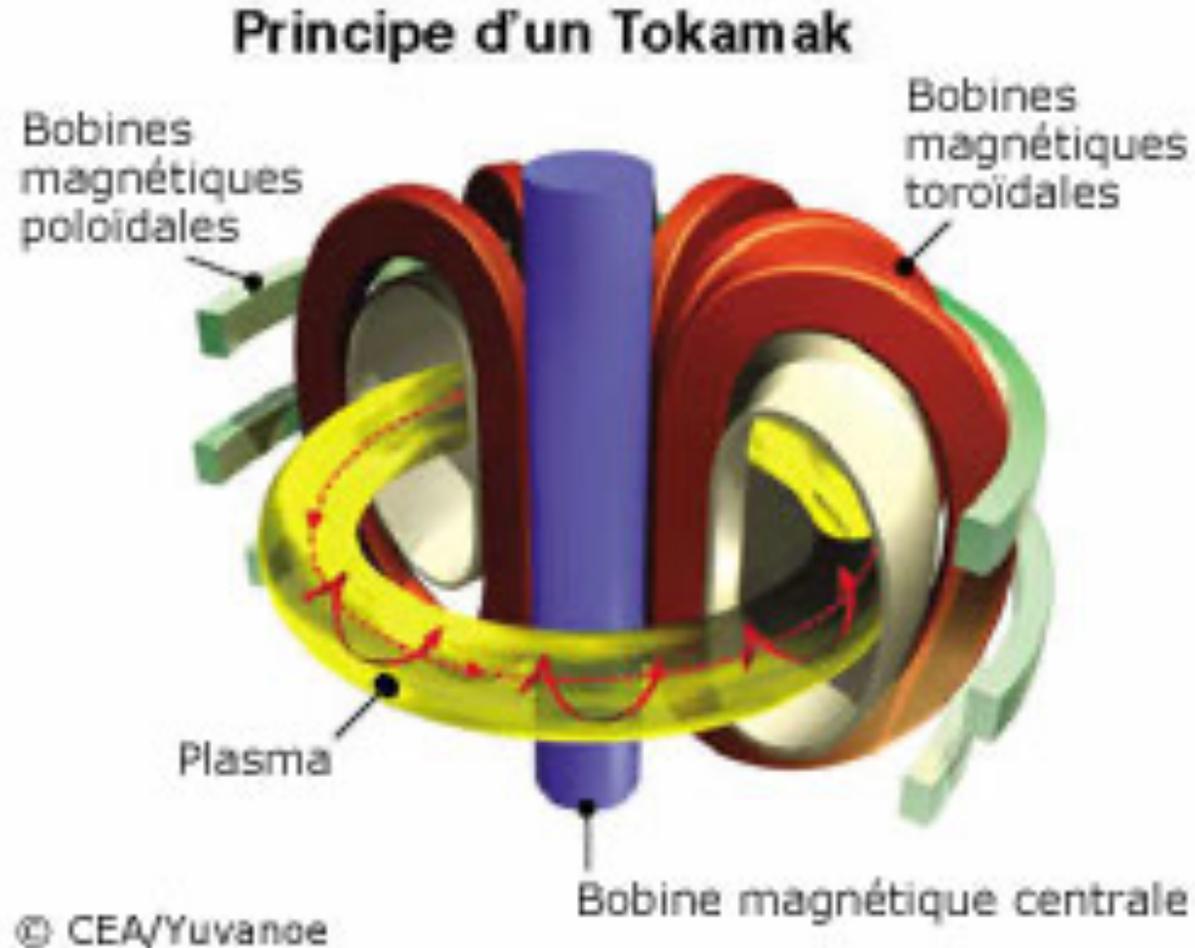
(Source : CEA)

- ❑ Un gaz soumis à des températures extrêmes : de l'ordre de 150 à 300 millions de degrés (Soleil elle atteint 15 millions de degrés).

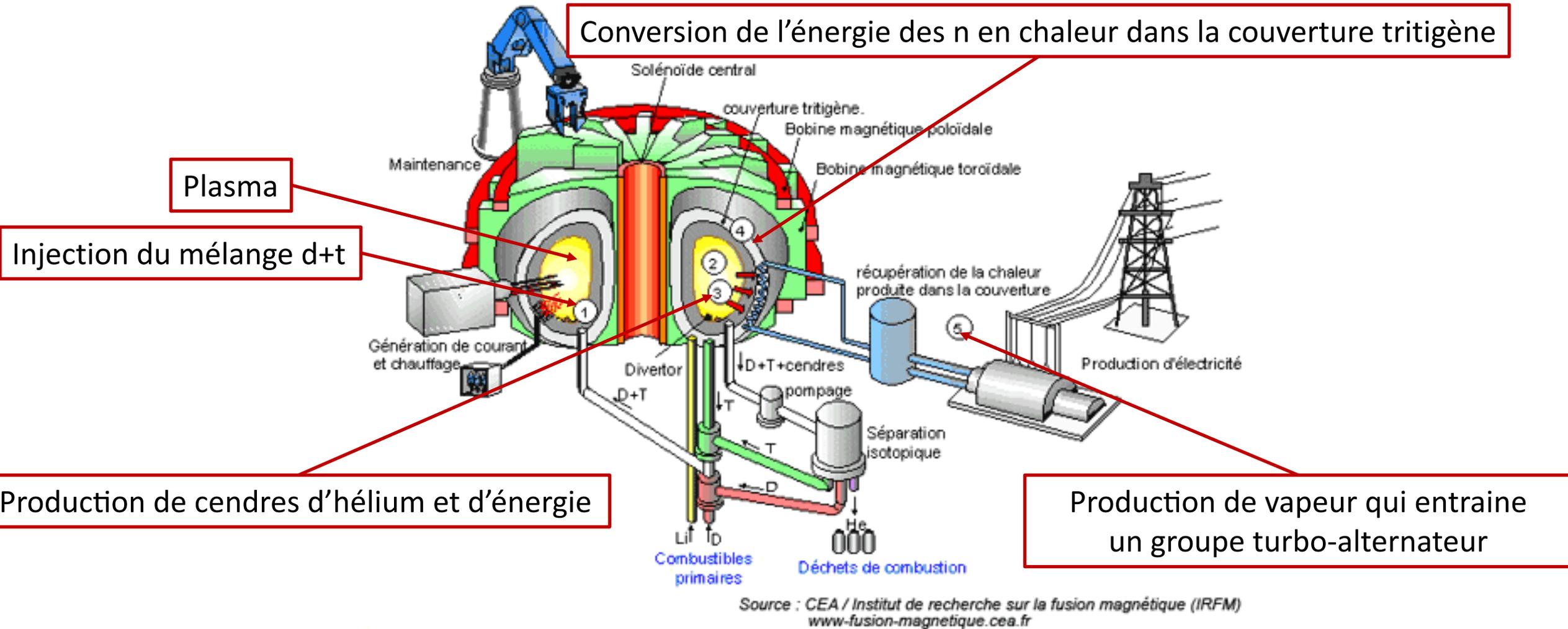


Transformation en plasma =
Gaz « chargé » (séparation e- et noyaux)

- ❑ Des champs magnétiques puissants pour le confinement.
- ❑ La densité du plasma est très faible :
 $\sim 10^{20}/\text{m}^3$ (densité proche du vide)
- ❑ Le temps de confinement doit être assez long.



Production de l'électricité

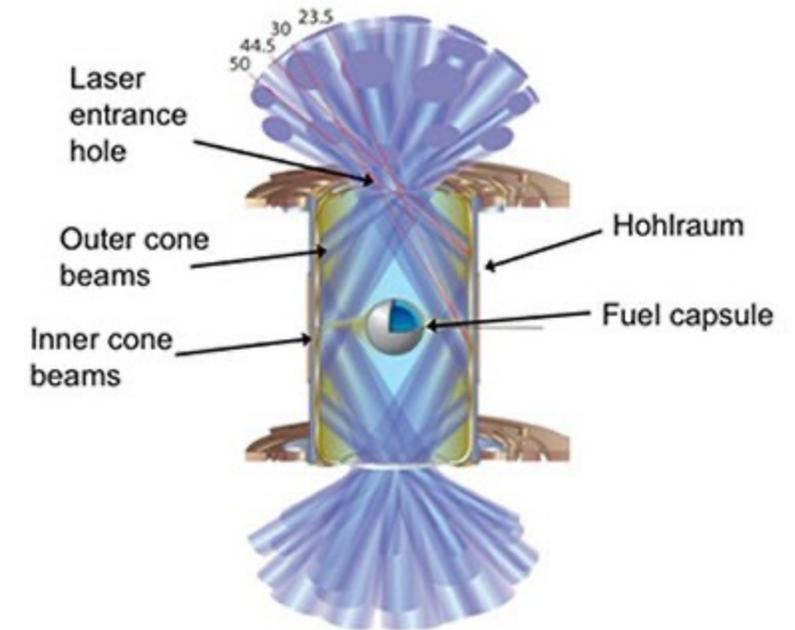
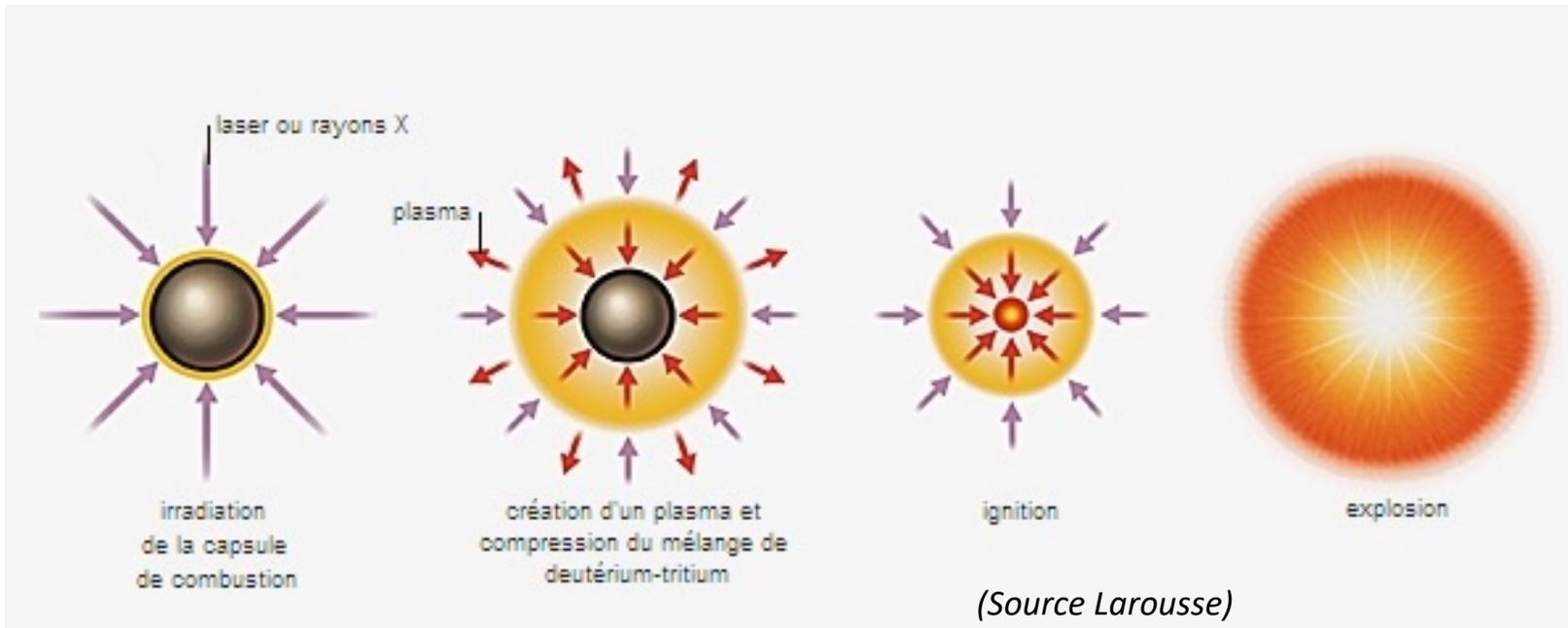


Les grandes étapes d'ITER

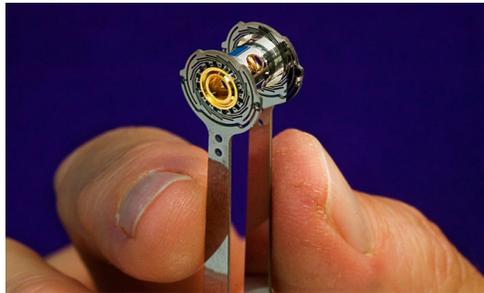
- ❑ 2005 : Choix du site de Saint-Paul-lez-Durance (Cadarache, Bouches-du-Rhône)
- ❑ 2006 : Signature de l'Accord ITER
- ❑ 2007 : Création d'ITER Organization
- ❑ 2007-2007 : Préparation de la plateforme (déboisement, nivellement)
- ❑ 2010-2014 : Fondations du Complexe tokamak
- ❑ 2012 : Un décret officiel autorise ITER Organization à créer l'INB ITER
- ❑ 2014-2023 : Construction du Bâtiment tokamak
- ❑ 2010-2023 : Construction de l'installation ITER et des bâtiments auxiliaires nécessaires au Premier Plasma
- ❑ 2008-2025 : Fabrication des principaux éléments et systèmes pour le Premier Plasma
- ❑ 2015-2025 : Transport (via l'Itinéraire ITER) et livraison sur site des éléments



La fusion par confinement inertiel

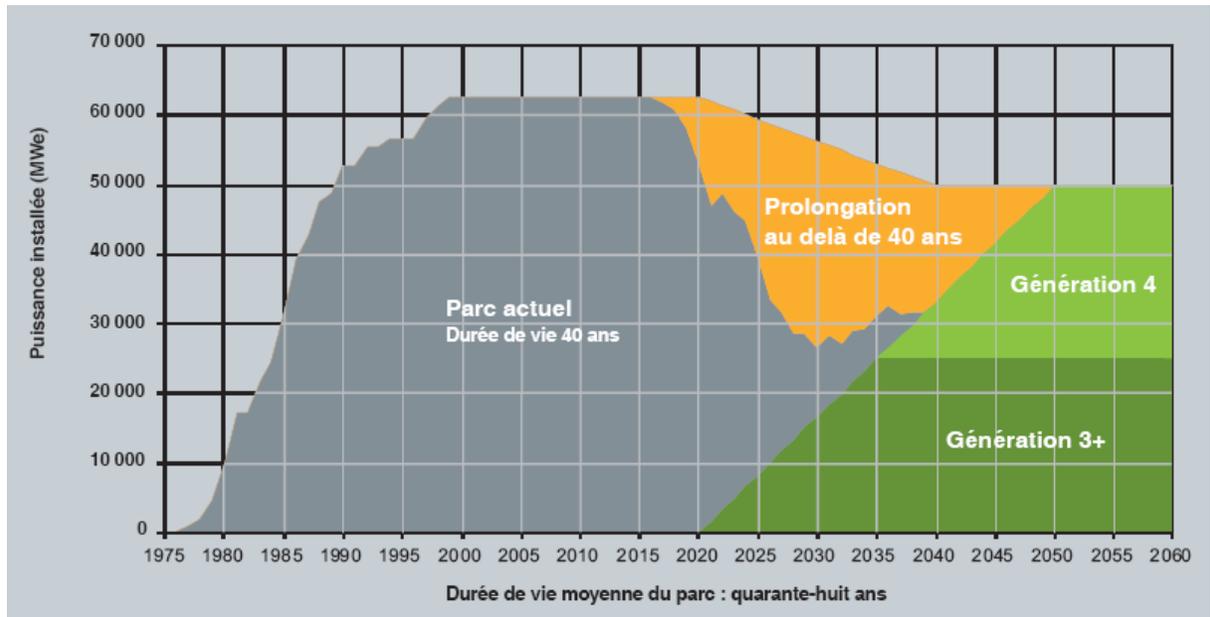


(Source NIF)



Calendrier de renouvellement du parc nucléaire français

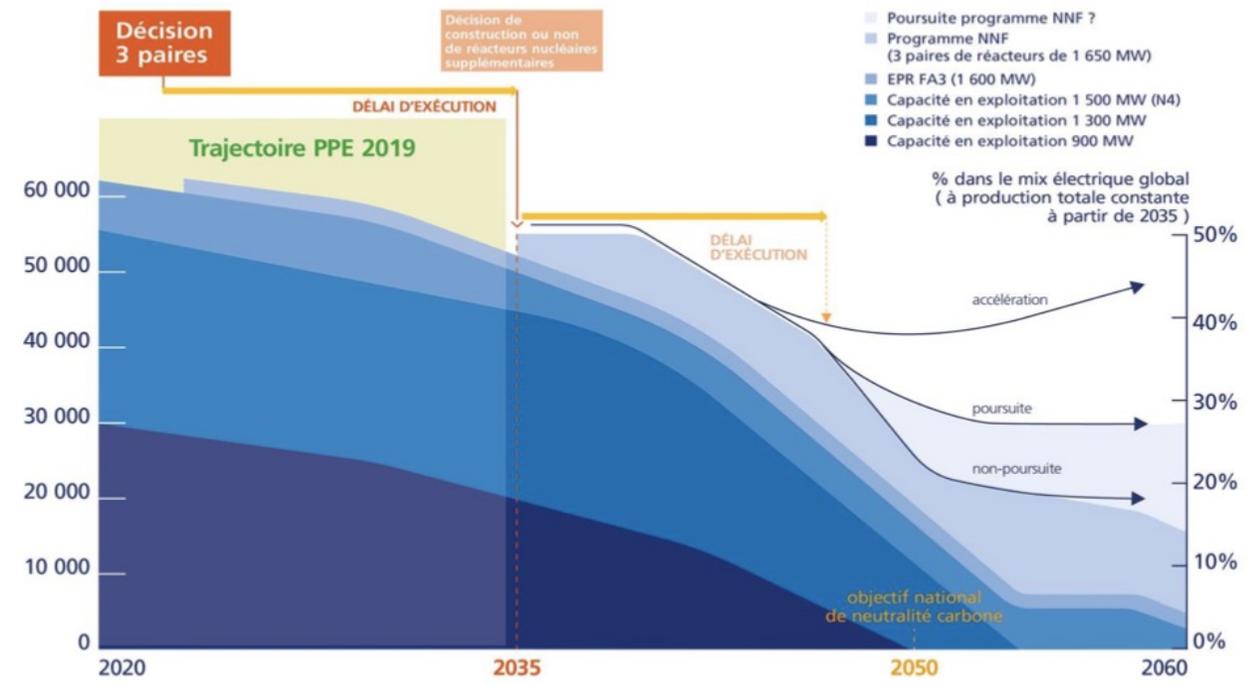
Stratégie initiale



Hypothèse:
renouvellement de 500 000 MW sur 30 ans, rythme de 1600 MW/an.

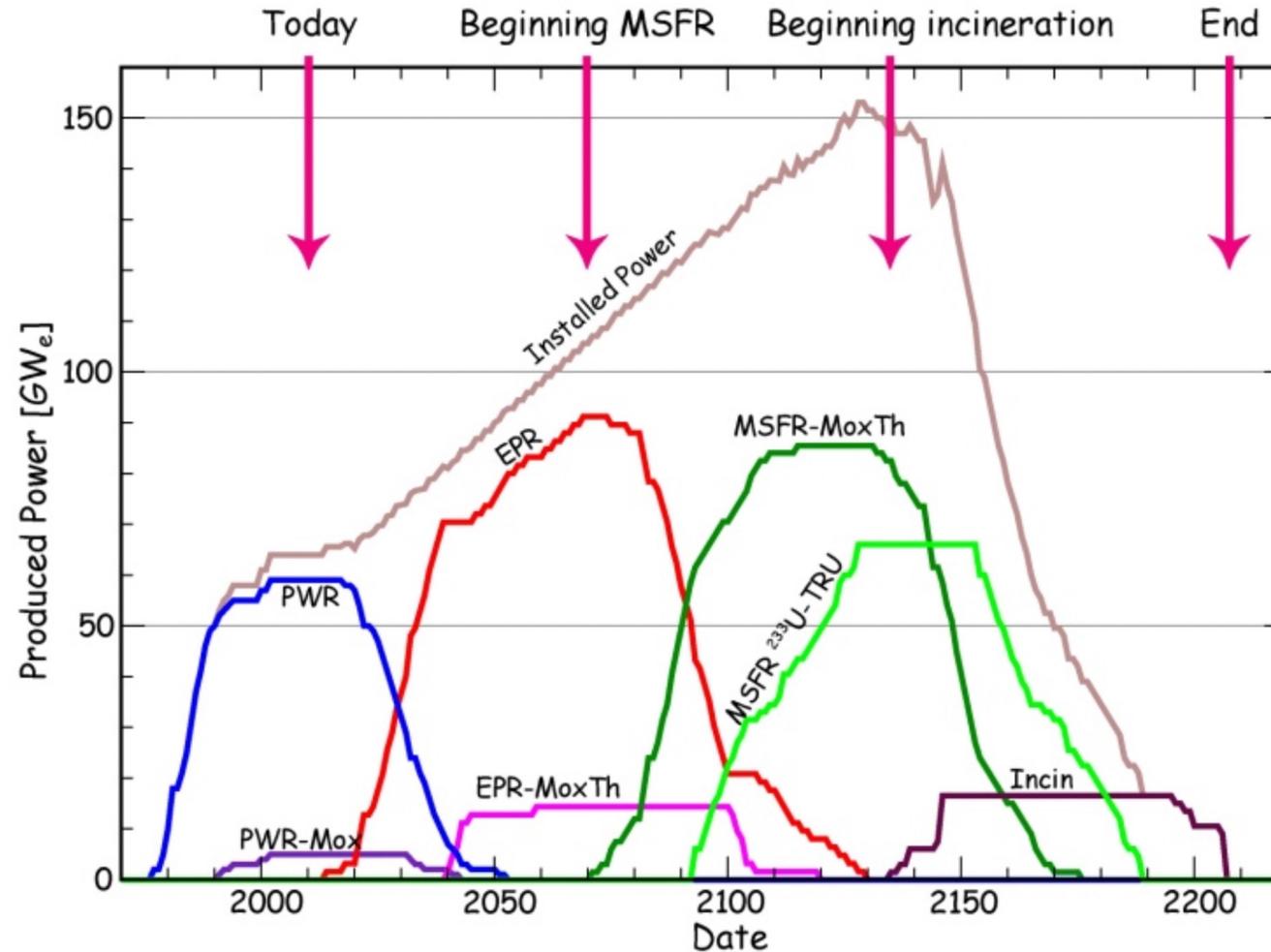
Stratégie aujourd'hui?

Capacités de production nucléaire : simulation 2020-2060



(Source RTE)

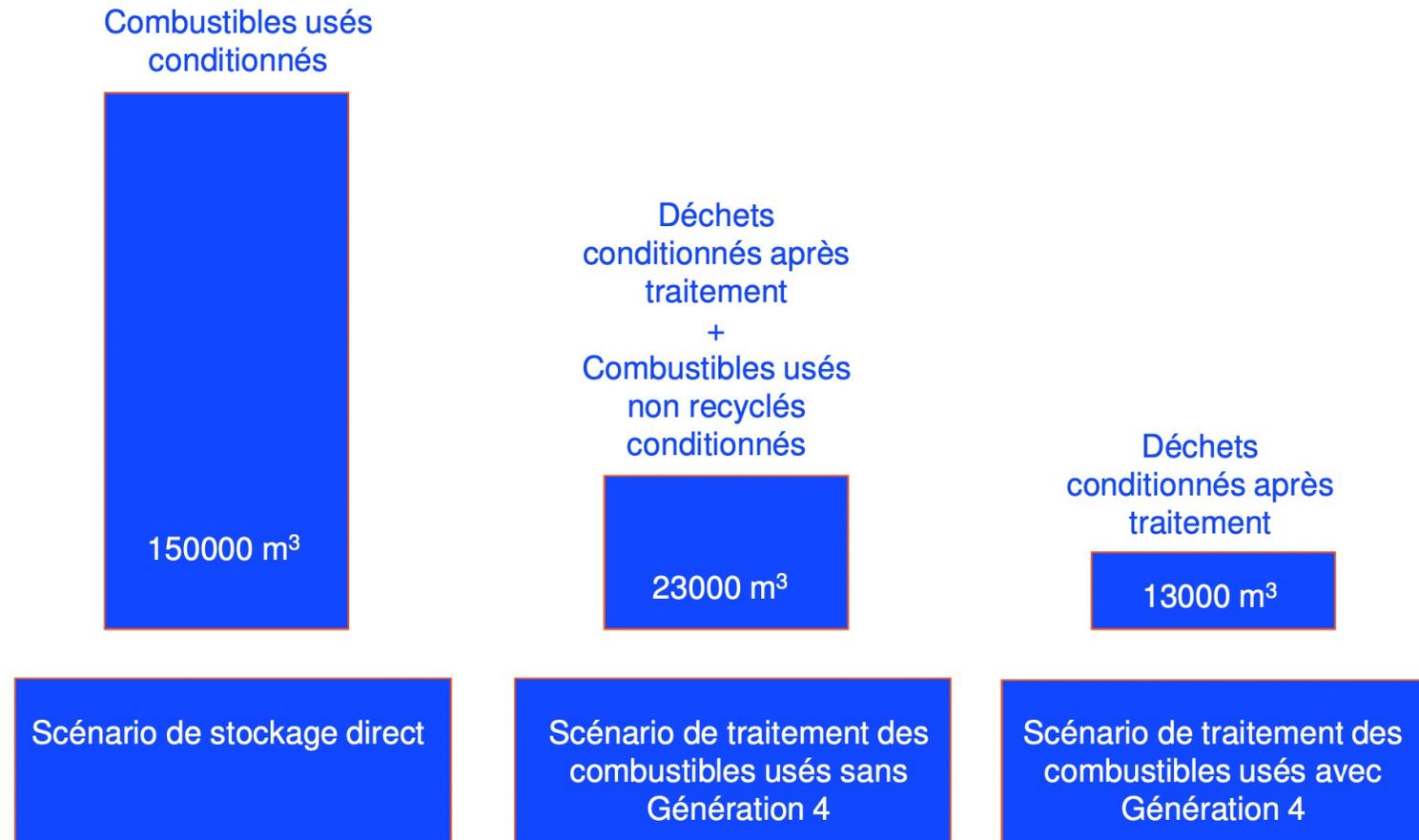
Scénario avec MSFR



(Source Chapter 7 - Molten Salt Fast Reactors”, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, Woodhead Publishing Series in Energy (2015))

Scénarios sur les déchets produits

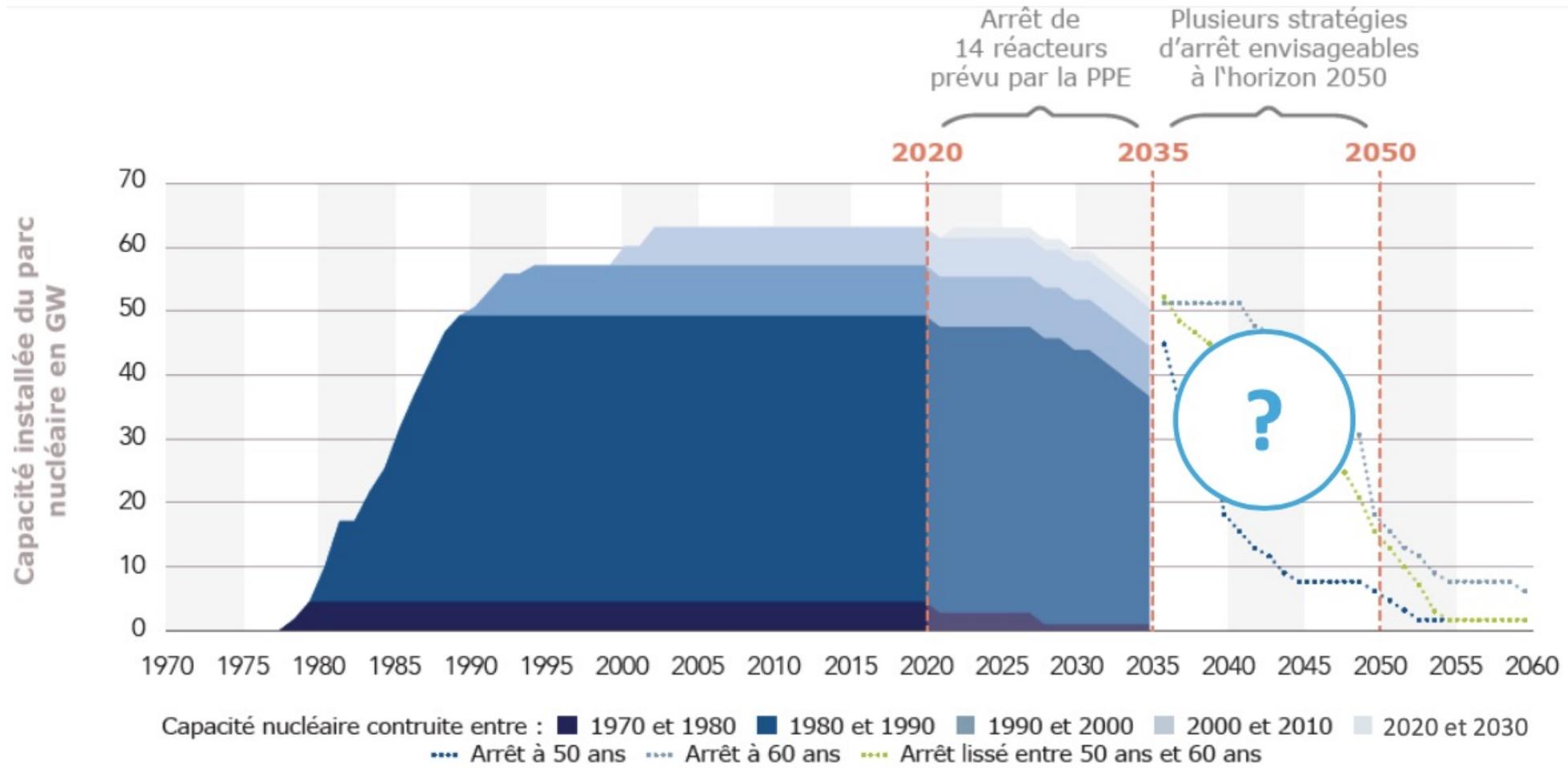
Ordre de grandeur des volumes de colis de déchets ultimes MAVL et HAVL pour le stockage



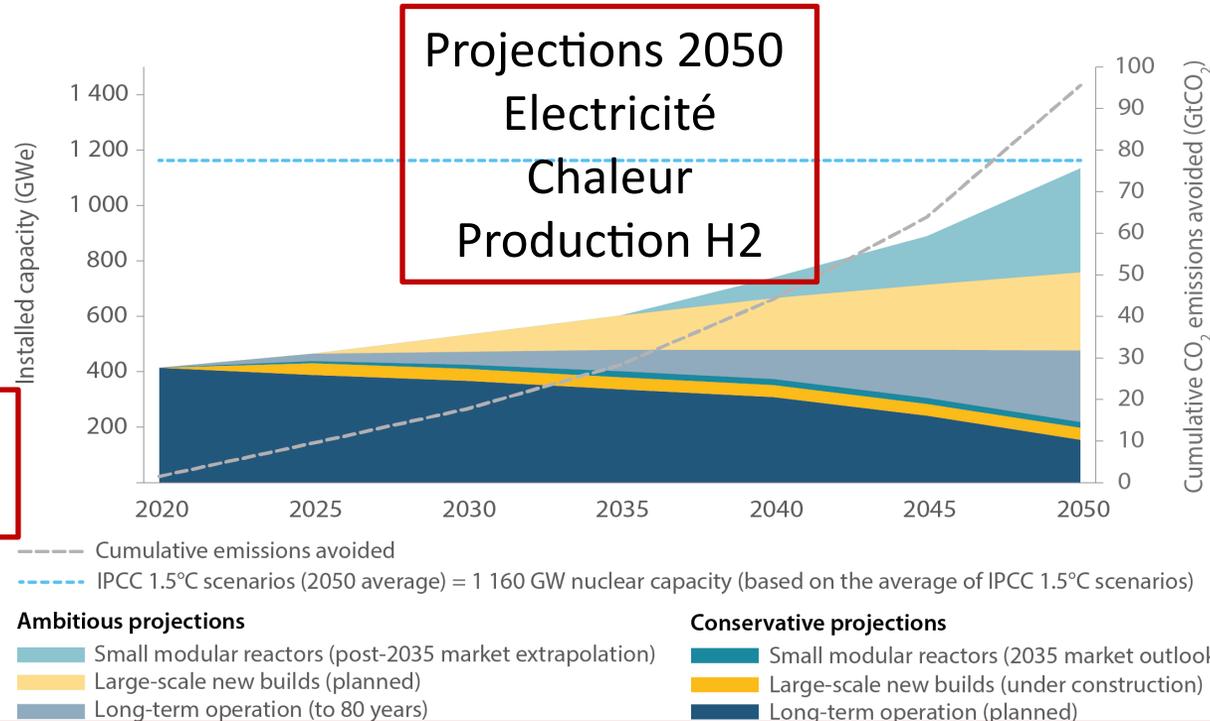
D'après données ANDRA, inventaire relatif au parc existant avec une hypothèse de durée de vie des réacteurs de 40 ans

(Source EDF, Orano d'après données ANDRA)

Et si on arrêtait le nucléaire de fission ?



Potentiel de l'énergie nucléaire dans le monde



(Source OCDE/NEA 2021)

Points de vigilance :

- Vision politique de long terme et décisions pérennes pour le système industriel complet,
- Transparence et responsabilité des exploitants,
- Démontrer la capacité à construire et déployer les innovations rapidement,
- Rôle fort de l'Etat dans la formation, l'information et la financement.

Merci de votre attention.

