

Les concepts de réacteurs du futur

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheuse Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam

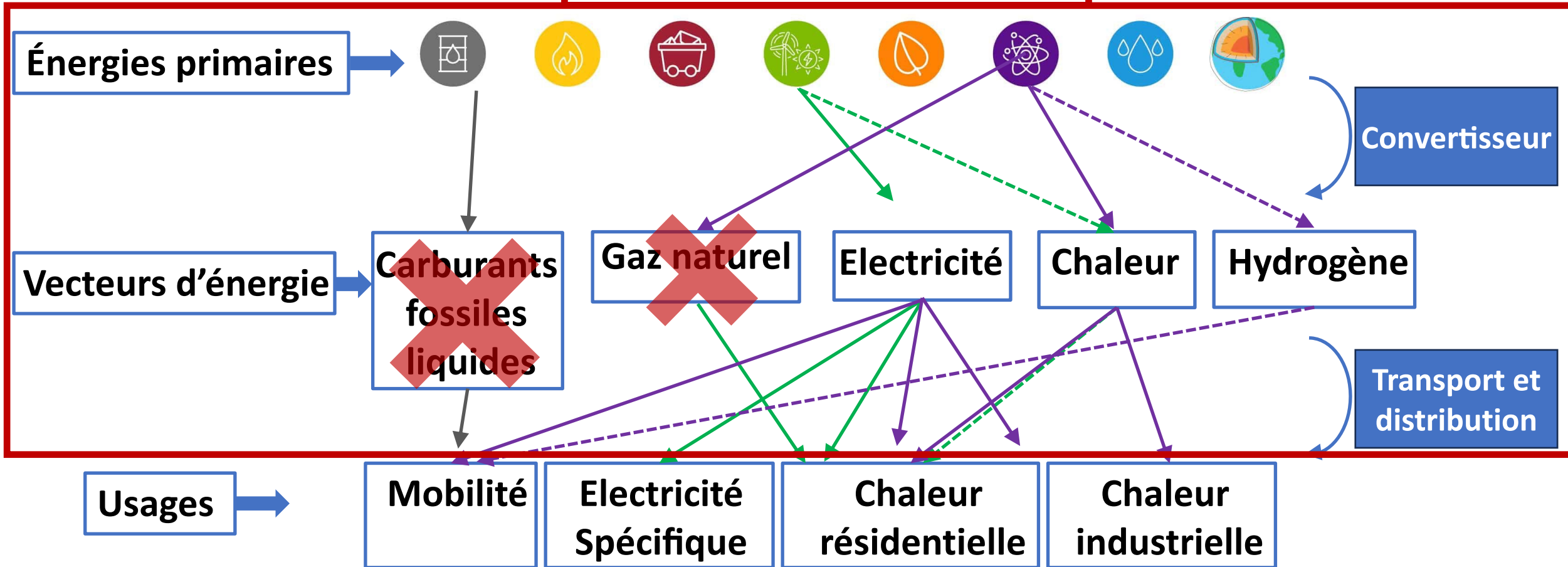


Nouveaux Types de Réacteurs

- ☐ Introduction
- ☐ La chaleur
- ☐ Généralités sur les petits réacteurs
- ☐ Les différents concepts de petits réacteurs
- ☐ Le nucléaire durable

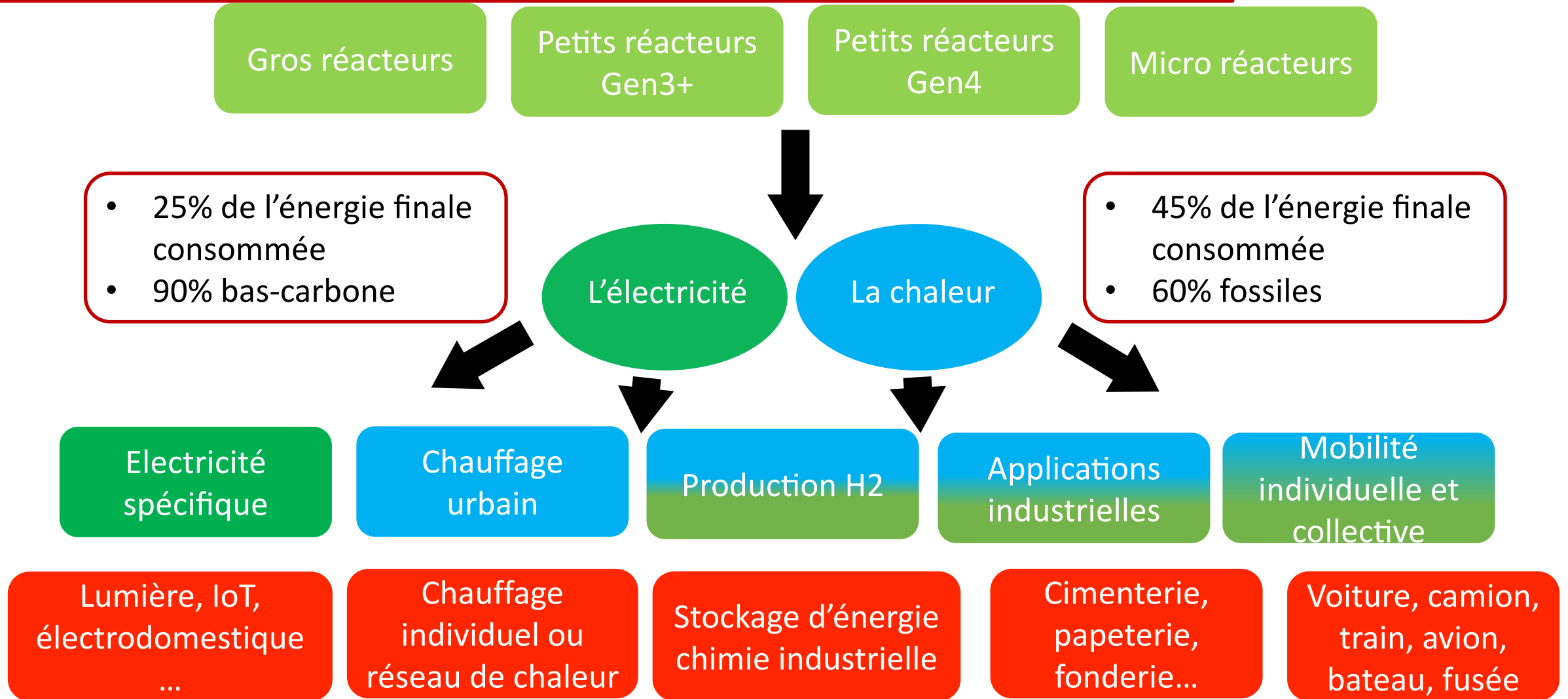
Vecteurs énergétiques et usages

Systeme énergétique complet



(D'après Académie des technologies)

Quels usages adressés par l'énergie nucléaire?



A quoi doit répondre un réacteur

Flexible et pilotable
(suivi de charges)

S'intégrer dans
un MIX
électrique

Electrifier les usages
(Électricité et chaleur)

Remplacer les
énergies fossiles



Accepter par les
populations

Construction en
grand nombre

Toujours sûrs
(attention au FOH)
Non proliférants

Réduire les déchets

Economie de combustible
Besoin de peu de matières
premières

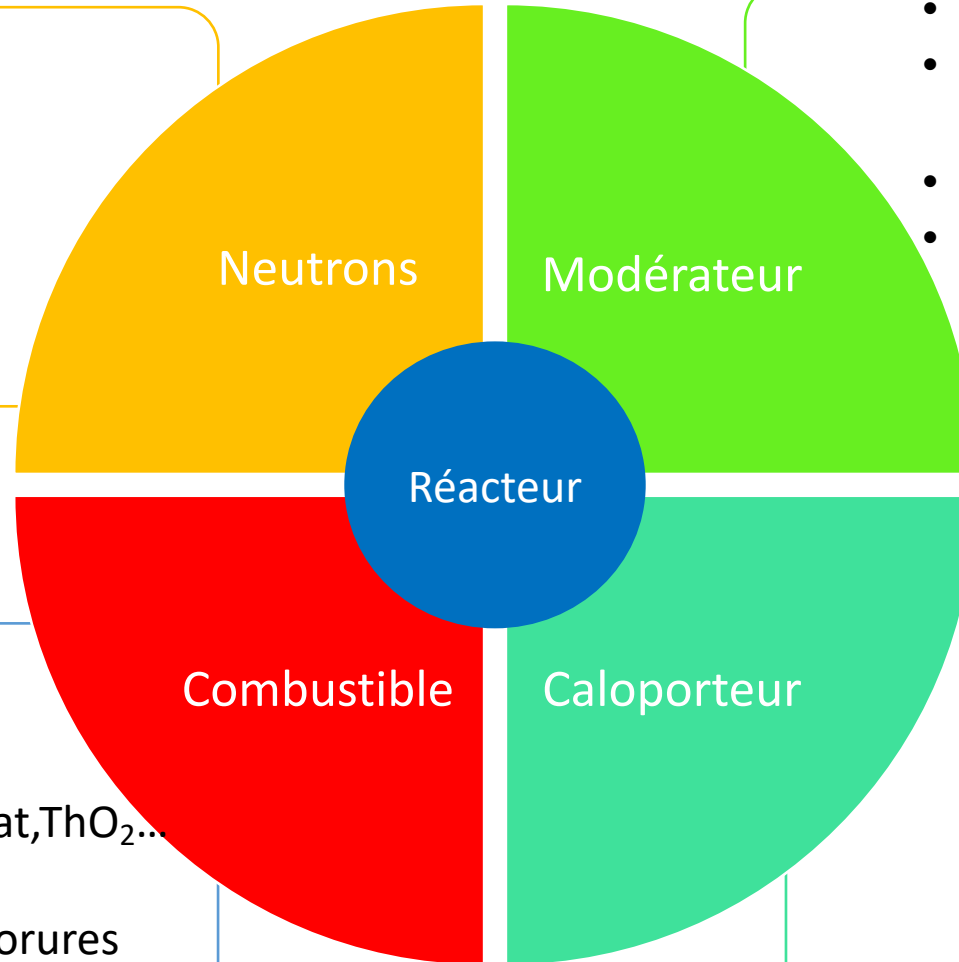
Cout abordable

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



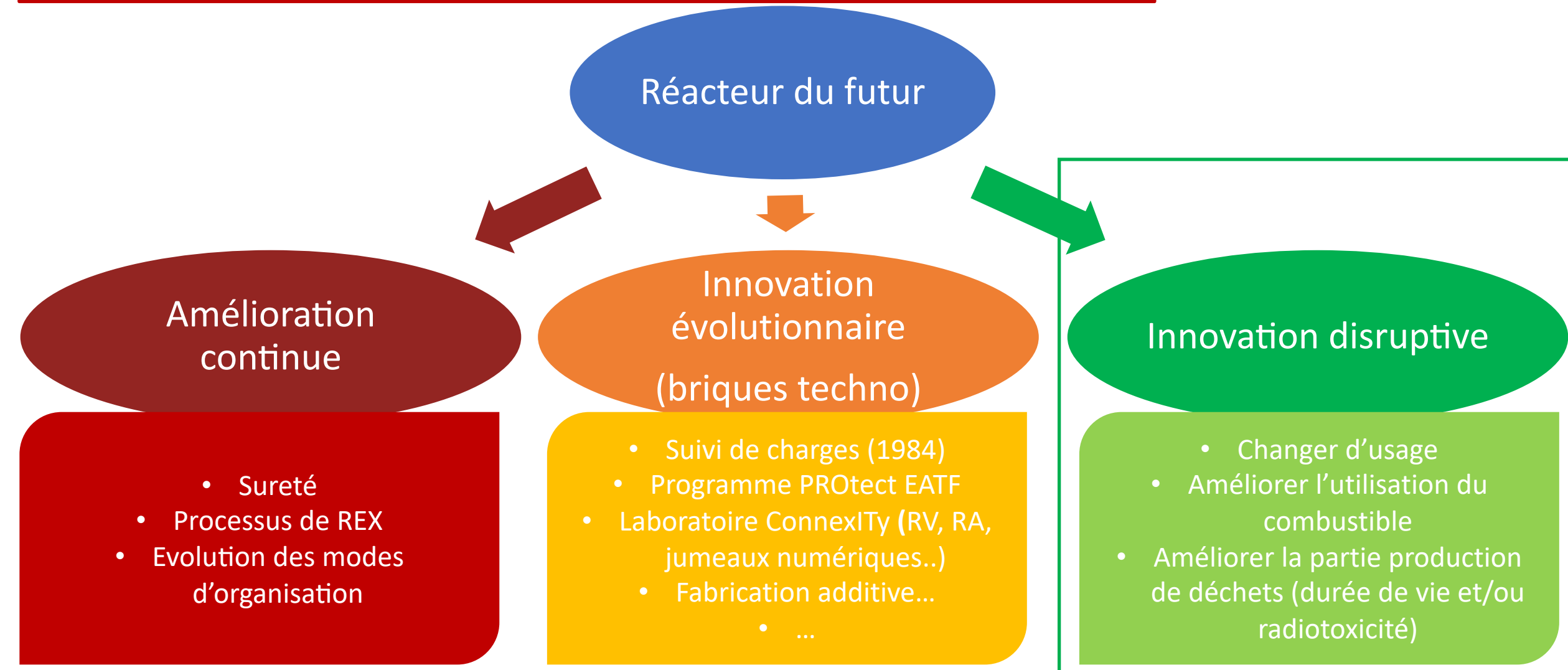
- σ_a petite
- Bon ralentissement : Noyaux légers (H, D, Be, C, H_2O , D_2O , graphite)
- Transparent
- Non dangereux

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

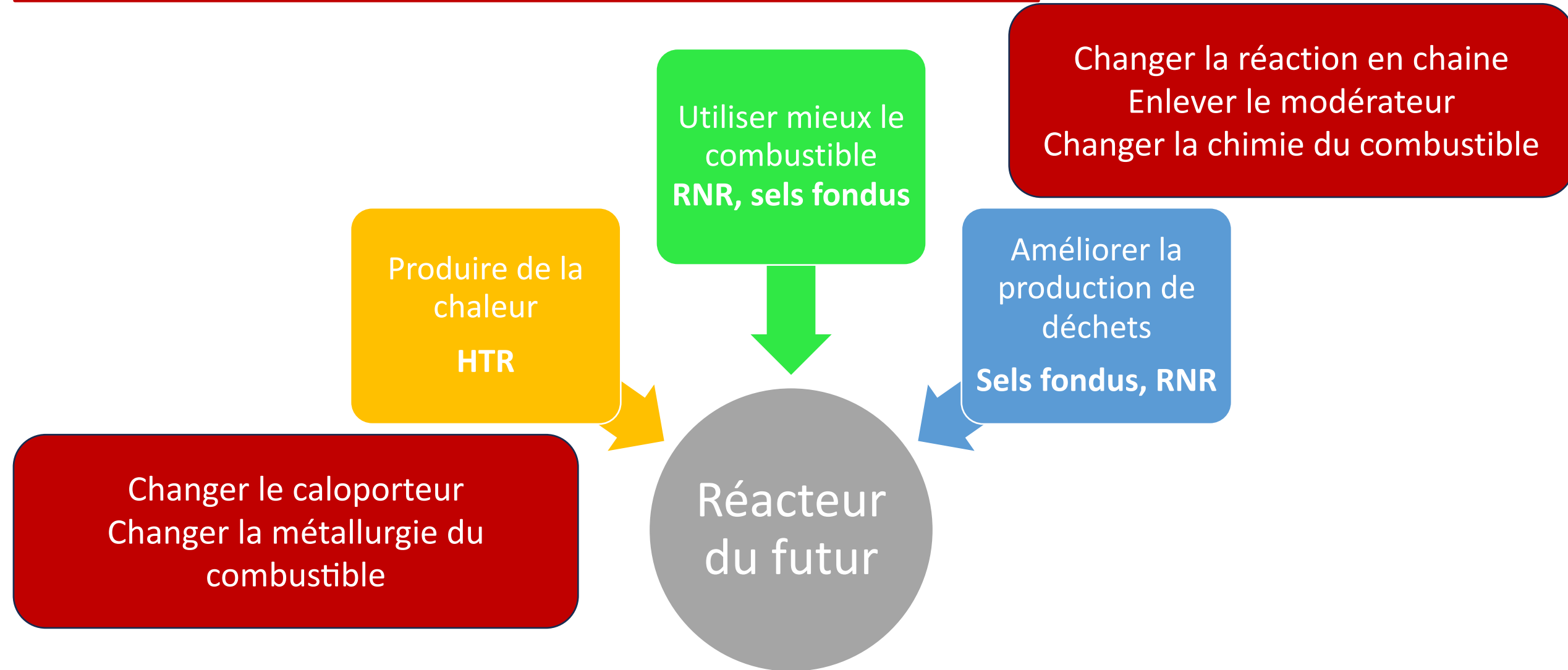
Revue schématique des filières

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/plomb
Sels fondus	U+Pu/U+Th + sels	aucun	sels

Les processus d'innovation dans le nucléaire



Innovation dans les réacteurs nucléaires



□ La chaleur: premier usage énergétique en France

Le marché de la chaleur

La chaleur en France

- 35% de l'énergie finale
- 60% produite par des énergies fossiles

France

- 75% des besoins en chaleur résidentiel et tertiaire
- 30% des besoins de l'industrie

Chaleur

Haute température
550-1000°C

Vaporeformage, Acier,
Électrolyse de l'eau (H₂),
désulfuration,
Gazéification charbon...

Moyenne
température
250-550 °C

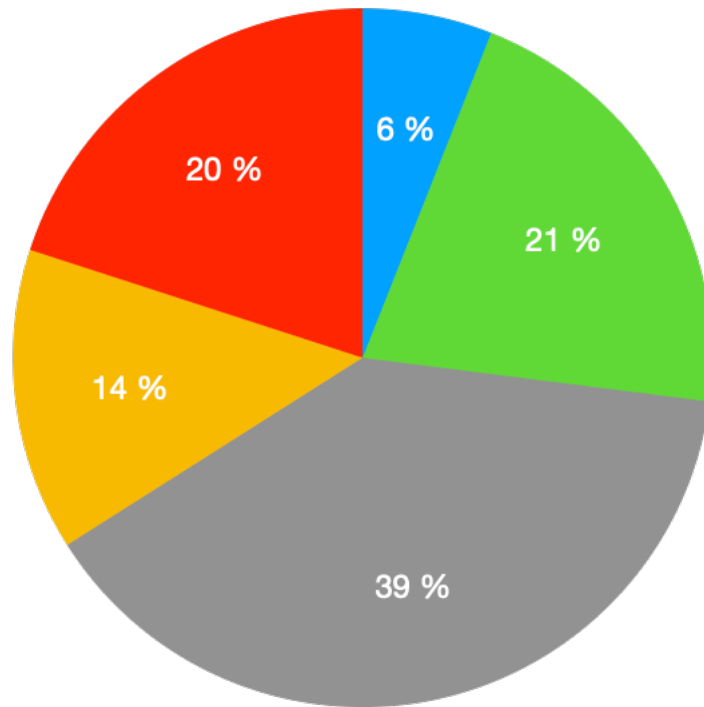
Chimie, pétrochimie,
agroalimentaire,
automobile, papier...

Basse température
30-250°C

Dessalement, Chauffage
résidentiel et tertiaire,
Textile, agroalimentaire ...

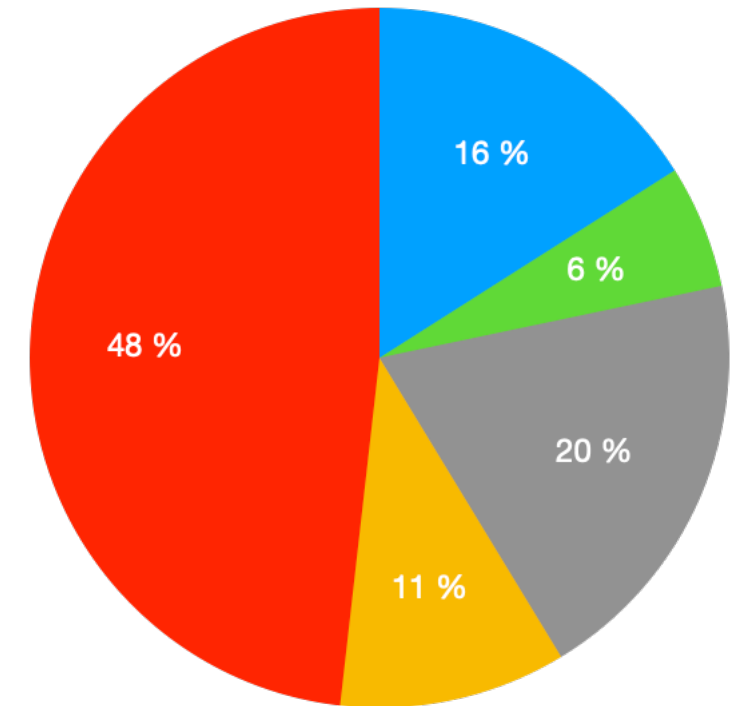
La chaleur dans l'industrie

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 ?



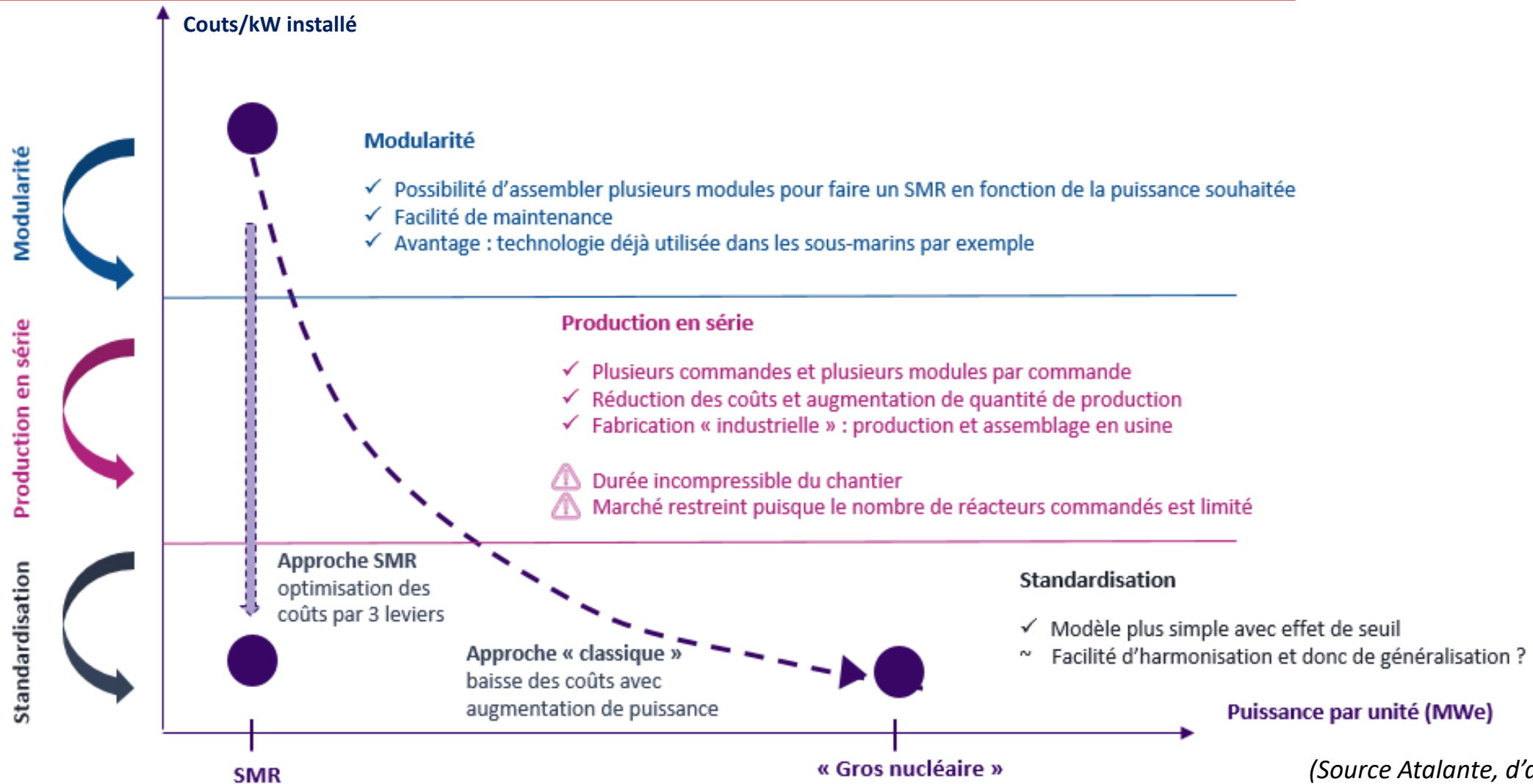
● Chauffage locaux ● Séchage ● Fours ● matières ● autres

● 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)

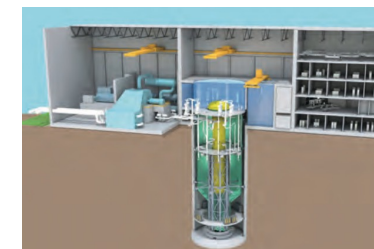
Généralités sur les petits réacteurs

Les trois leviers de développement des SMR/AMR



Concepts du futur (SMR/AMR)

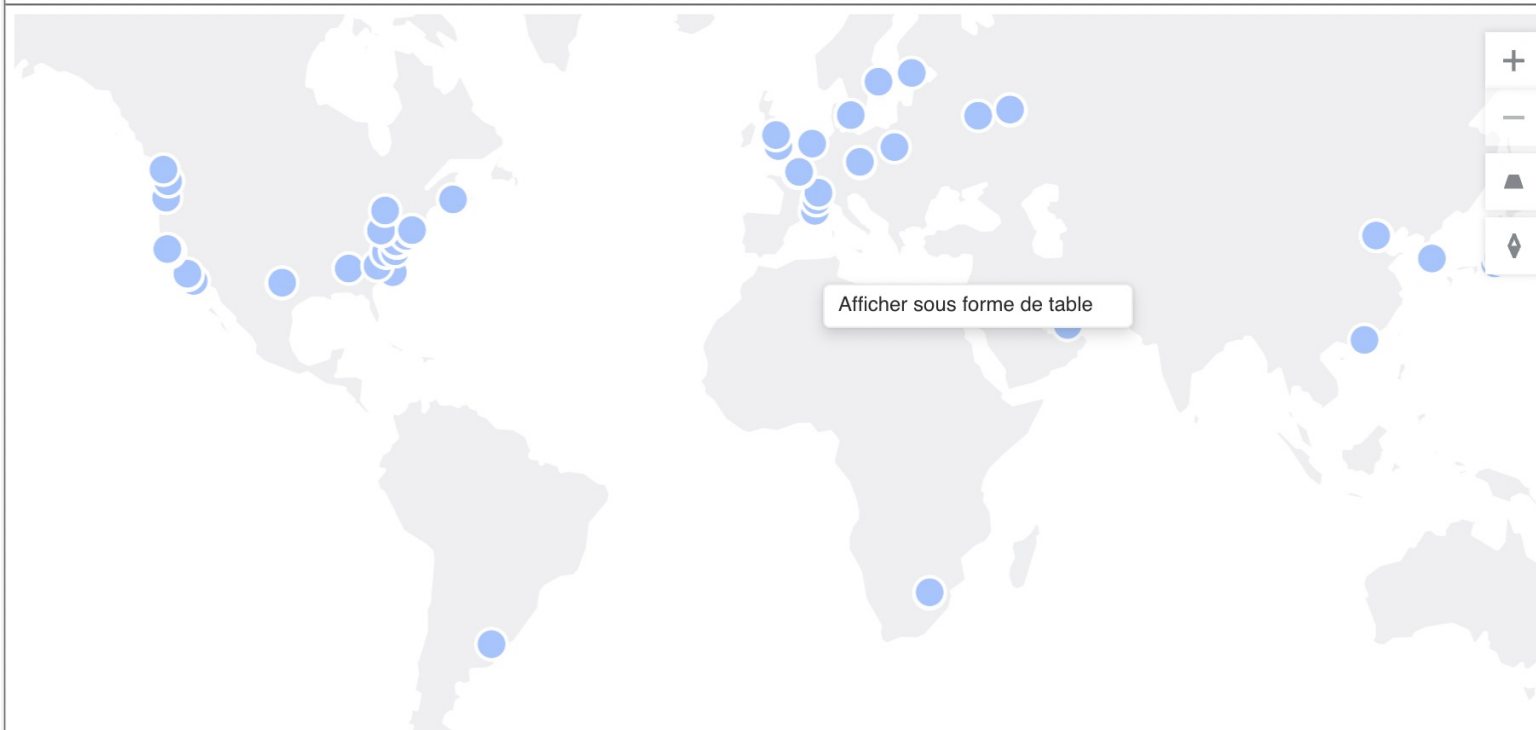
- ☐ Faible puissance (10-540 MWth) dont le coût < 1 milliard d'euros.
- ☐ Trois piliers : modularité, effet de série et simplification.
- ☐ Environ 130 concepts dans le monde.
- ☐ Faire plus petit (SMR/PRM) ou faire autrement (AMR).
- ☐ Programme AAP (1 milliard d'euros) :
 - 15 dossiers présentés
 - (8+1) sélectionnés.
 - 2 sélectionnés 2^{ème} phase.
- ☐ 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 : RSF, RNR
 - Brûleur des déchets: RSF, RNR



(Photos Source AIEA)

Etats des lieux en 2025

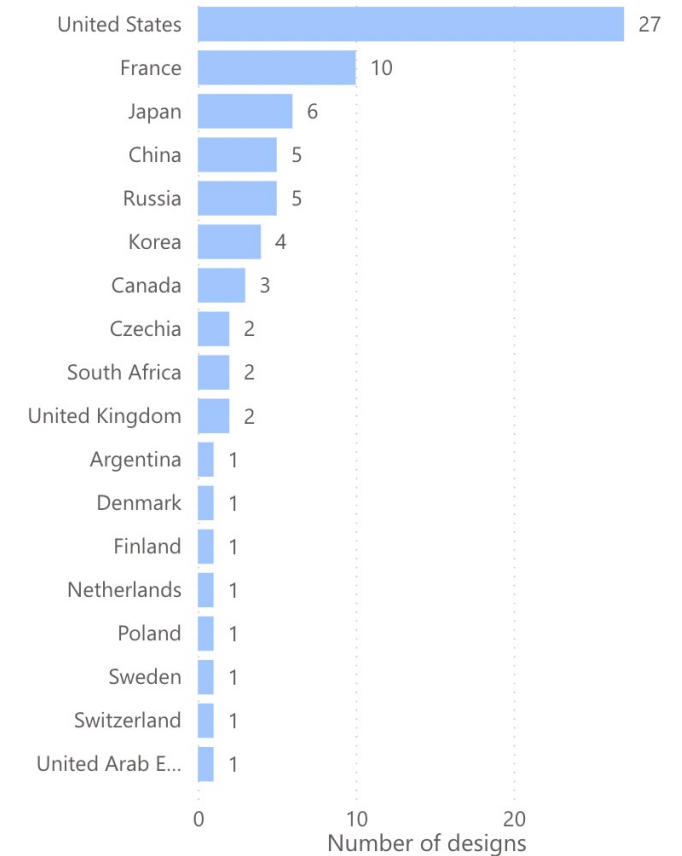
Global maps of SMR progress



Microsoft Azure

?

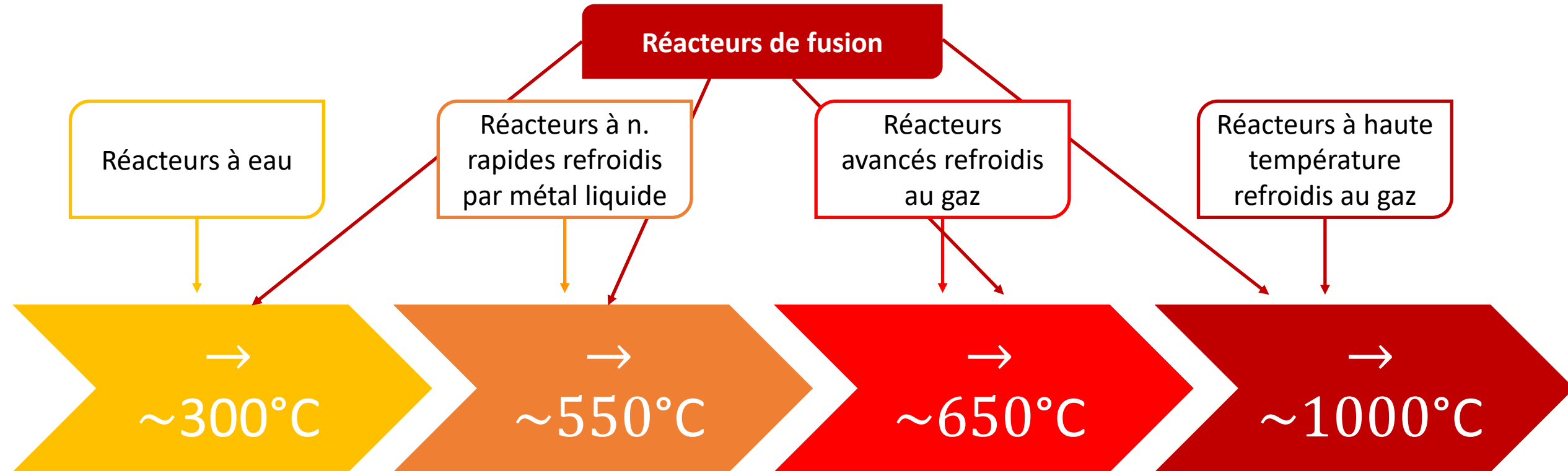
Headquarters worldwide, by country



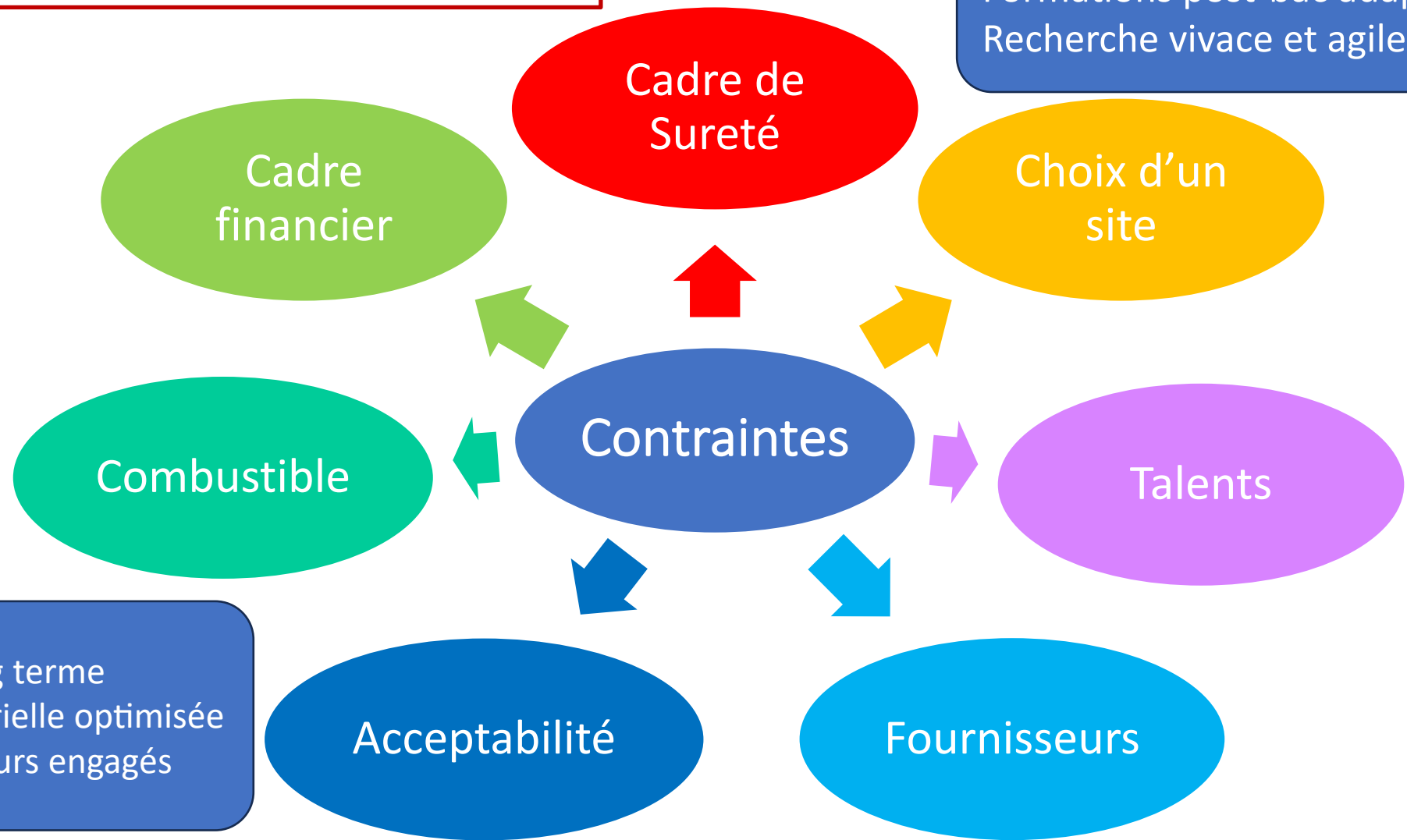
- ❑ **Évolution des conceptions et financements**
 - **127 conceptions** recensées en 2024
 - **+81 %** de projets bénéficiant d'au moins un financement ou engagement

(source : [OCDE, 2025](#))

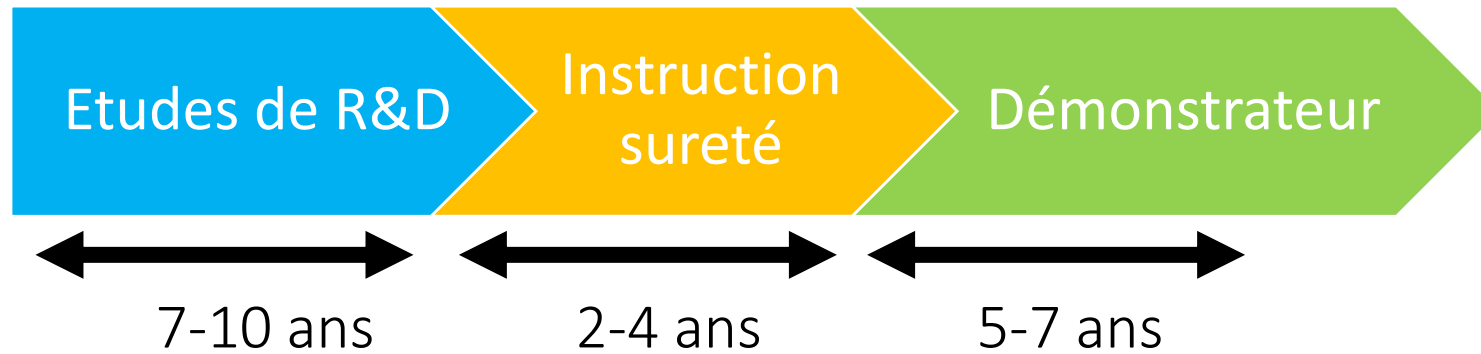
Quelle température pour quel réacteur?



Conditions de succès



Quel planning?



RMA (AMR) ~ 20 ans

PRM (SMR) ~ 10 ans

❑ Génération 3 :

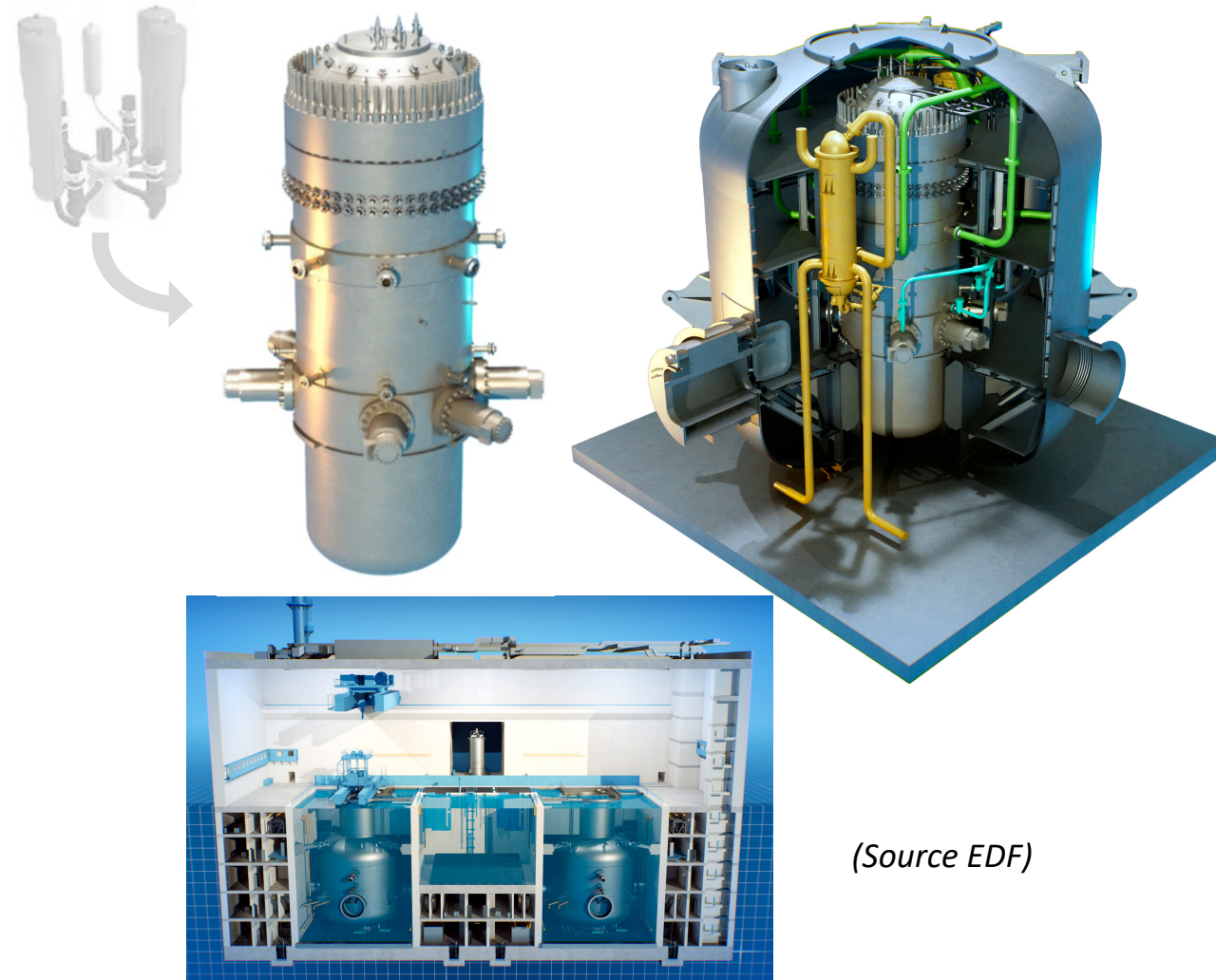
- Procédures administratives
- Construction + Essais + MIS

❑ Génération 4 :

- Verrous technologiques sur le réacteur
- Concevoir le cycle du combustible associé
- Licensing nouveau à instruire

Les différents concepts de petits réacteurs

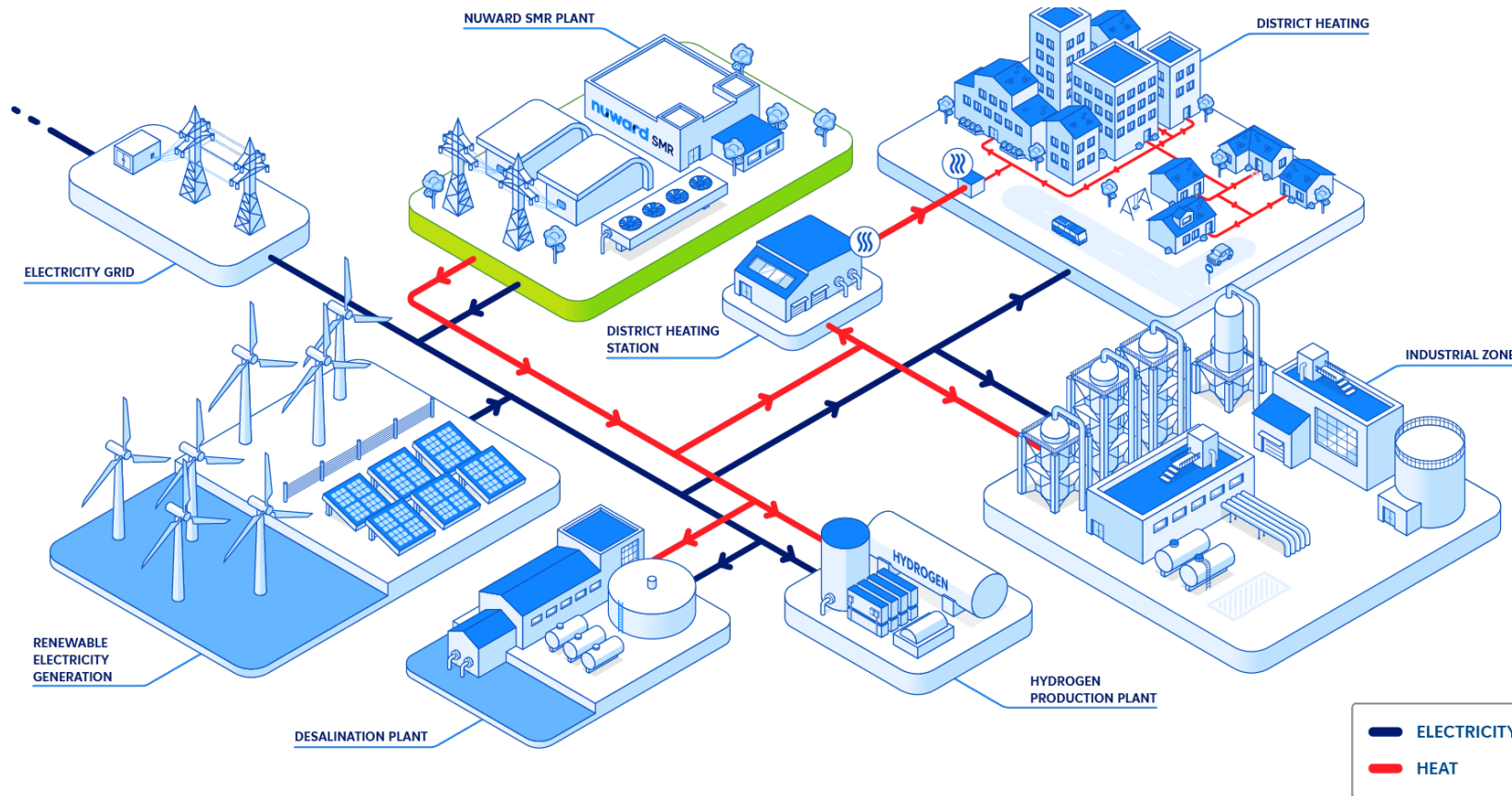
Projet Nuward



(Source EDF)

- ❑ Ilot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170 MWe + une piscine d'entreposage
- ❑ Cuve : $H = 15 \text{ m}$, $D = 4 \text{ m}$
- ❑ Enceinte métallique dans un bassin d'eau :
($H = 18 \text{ m}$, $D = 15 \text{ m}$)
- ❑ 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 ($150\text{-}250^{\circ}\text{C}$).

Les usages de NUWARD SMR

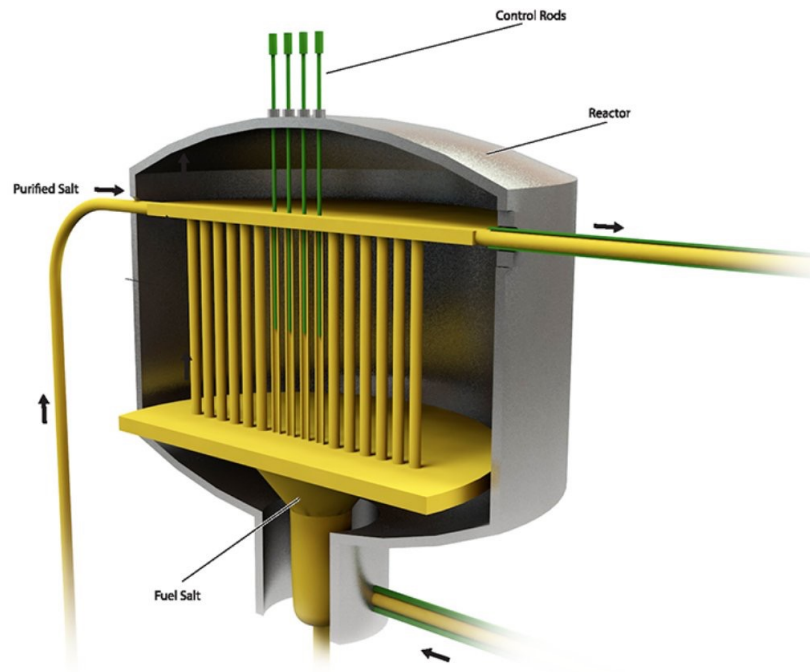


(Source EDF)

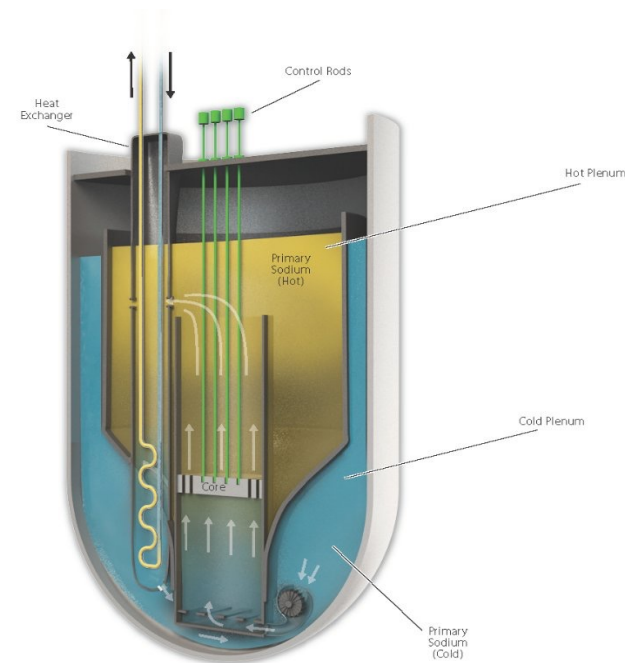
3 innovations principales :

- Construction modulaire en usine : 70% du réacteur construit en usine.
- Compacité du design
- Capacité de cogénération : soit 100% d'électricité (340 MWe) soit 100 MW de chaleur et 310 MW d'électricité. (410 MW de puissance)

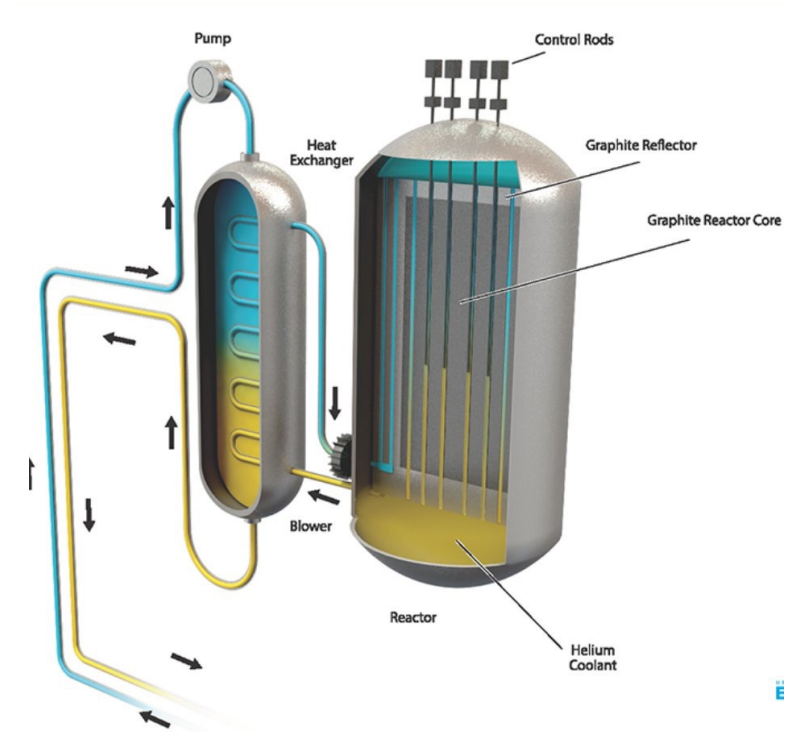
AMR: Les concepts disruptifs



Réacteurs à sels fondus

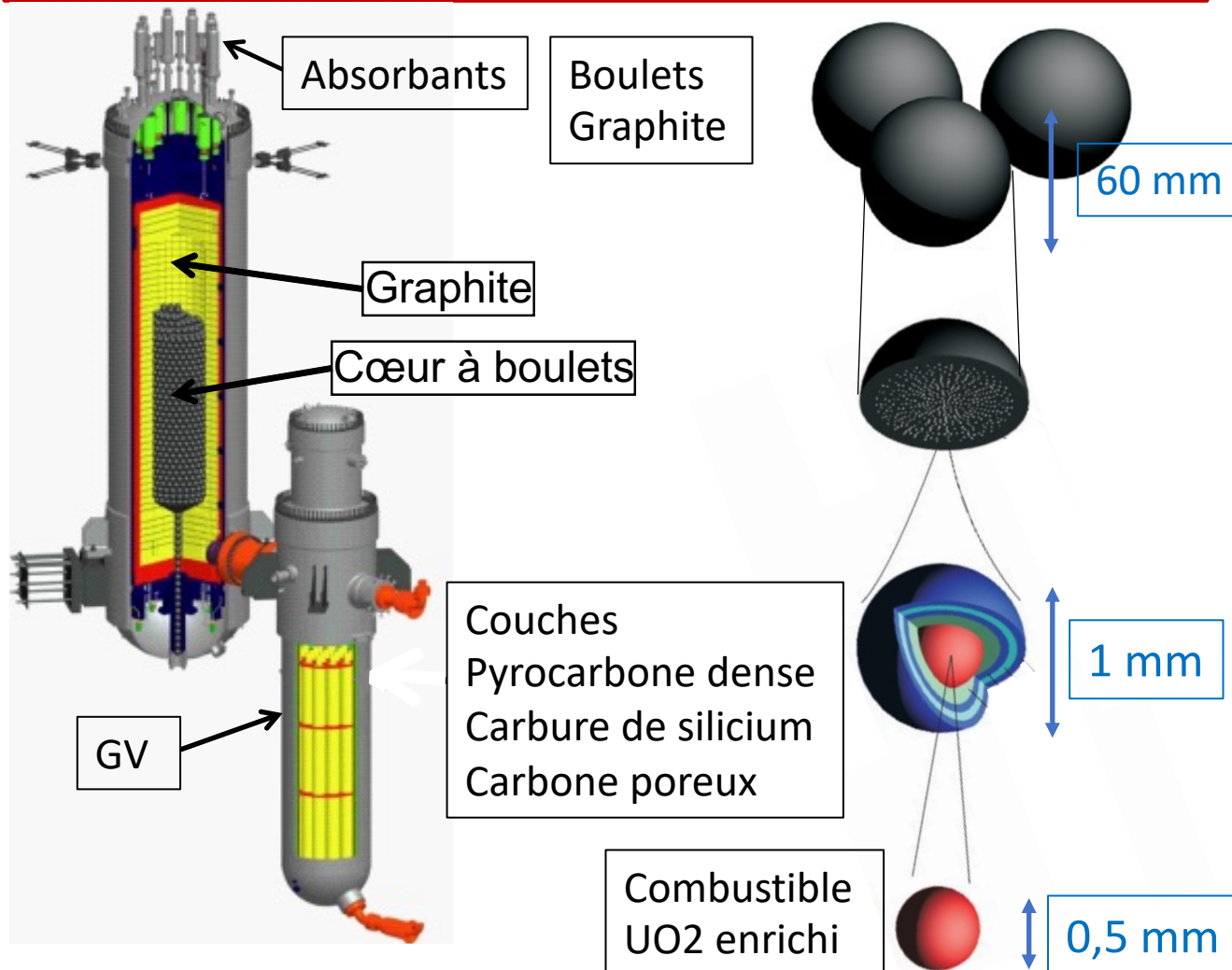


Réacteurs à neutrons rapides



Réacteurs à haute température

Réacteur à haute température



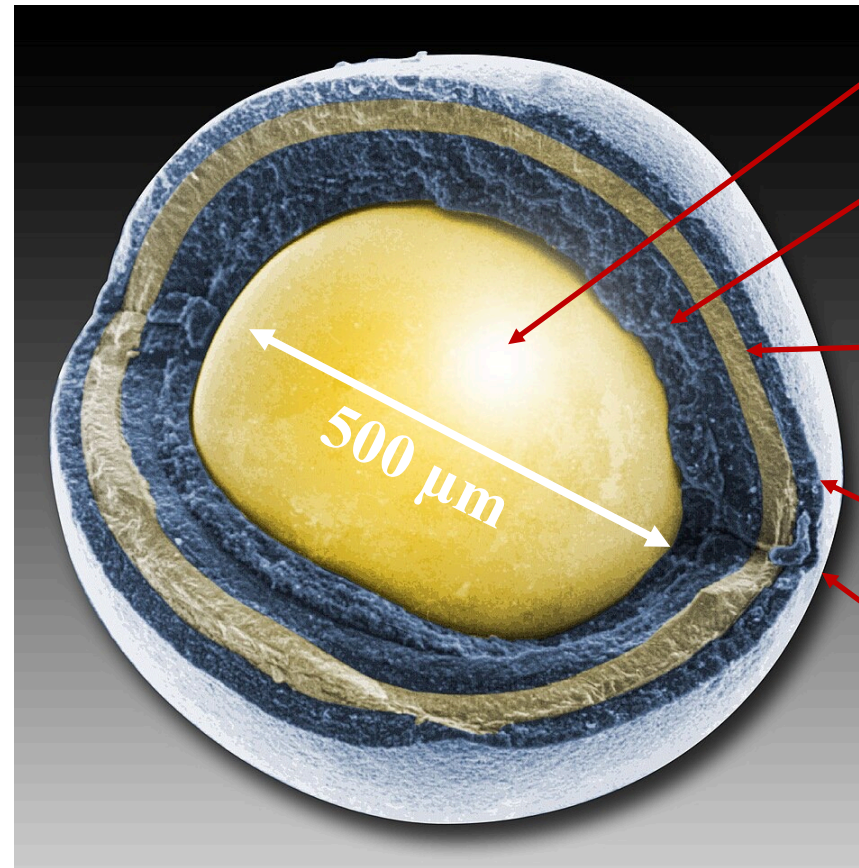
- ❑ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ❑ 1^{er} réacteur DRAGON en UK (1964-1977).
- ❑ Caloporteur : gaz inerte (hélium) (pas de problème de chimie et de radioactivité) à haute température.
- ❑ Gaz monophasique, neutre, transparent, capacité calorifique et conductivité thermique élevée.
- ❑ 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) (sécurité).
- ❑ 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, Blue Capsule.

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

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

Le combustible TRISO

- ❑ Combustible céramique réfractaire et divisé, étanche à haute température
- ❑ Modérateur en graphite: stabilité mécanique, inertie thermique, qualité neutronique mais grand rapport de modération



Noyau de comb. nucléaire

Buffer en carbone poreux

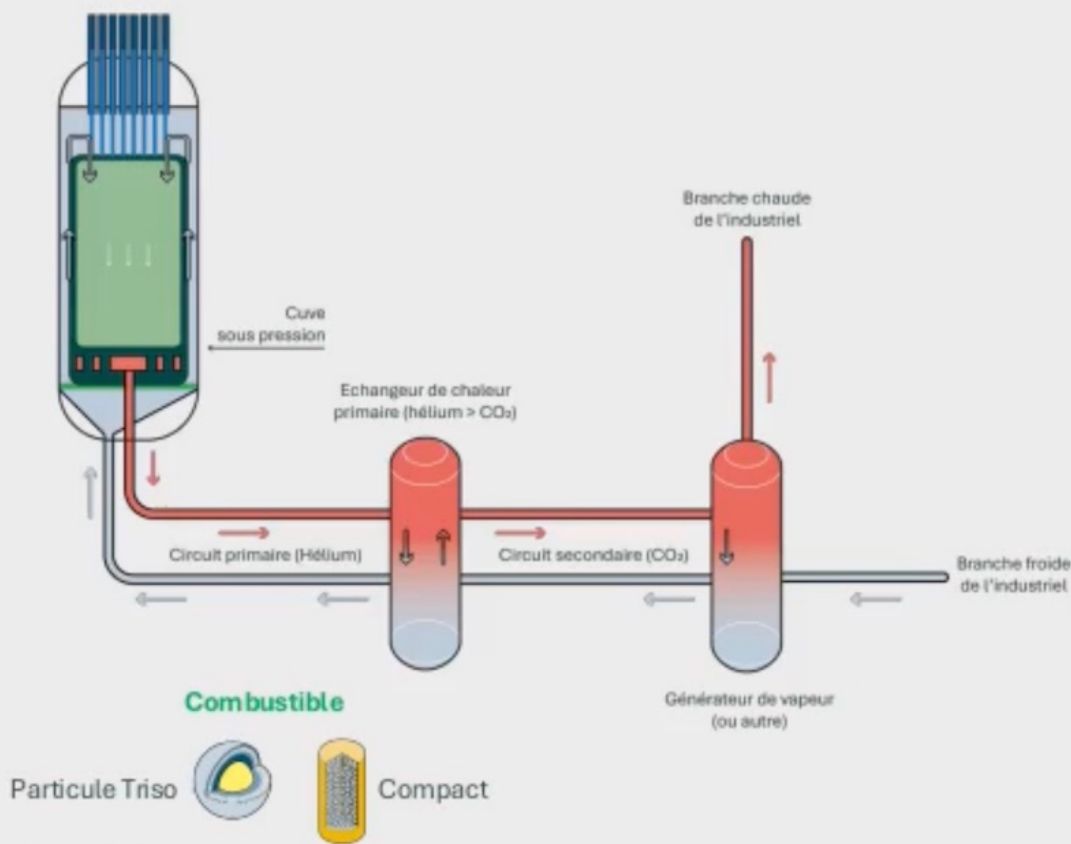
Carbone dense pyrolytique interne PyC

Carbure de silicium – SiC

Carbone dense pyrolytique externe

Le réacteur Jimmy: généralités

Un design de HTR prismatique standard



La technologie HTR est connue depuis les années 1960

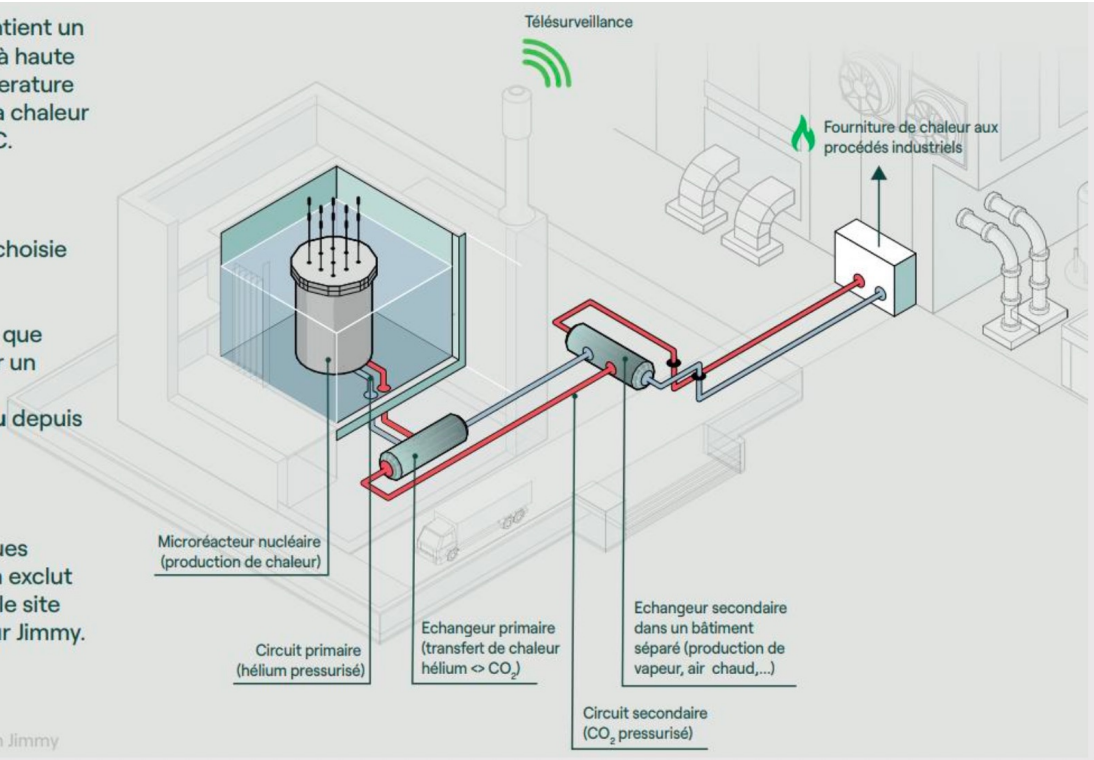
Réacteur	Pays	Puissance	Type de réacteur	Date de construction
Dragon		20 MWth	Recherche	1964
Peach-Bottom		115 MWth	Commercial	1966
AVR		46 MWth	Recherche	1966
Fort St-Vrain		842 MWth	Commercial	1974
THTR-300		750 MWth	Commercial	1983
HTTR		30 MWth	Recherche	1998, encore en service, réacteur de recherche
HTR 10		10 MWth	Recherche	2001, encore en service, réacteur de recherche
HTR-PM		250 MWth	Commercial	2021, utilisé pour électricité et chaleur urbaine

Données techniques

Le générateur Jimmy contient un microréacteur nucléaire à haute température (High Temperature Reactor) qui produit de la chaleur industrielle jusqu'à 450°C.

Cette technologie a été choisie pour ses propriétés intrinsèques de sûreté exceptionnelles et parce que Jimmy peut s'appuyer sur un retour d'expérience d'industrialisation étendu depuis les années 1960.

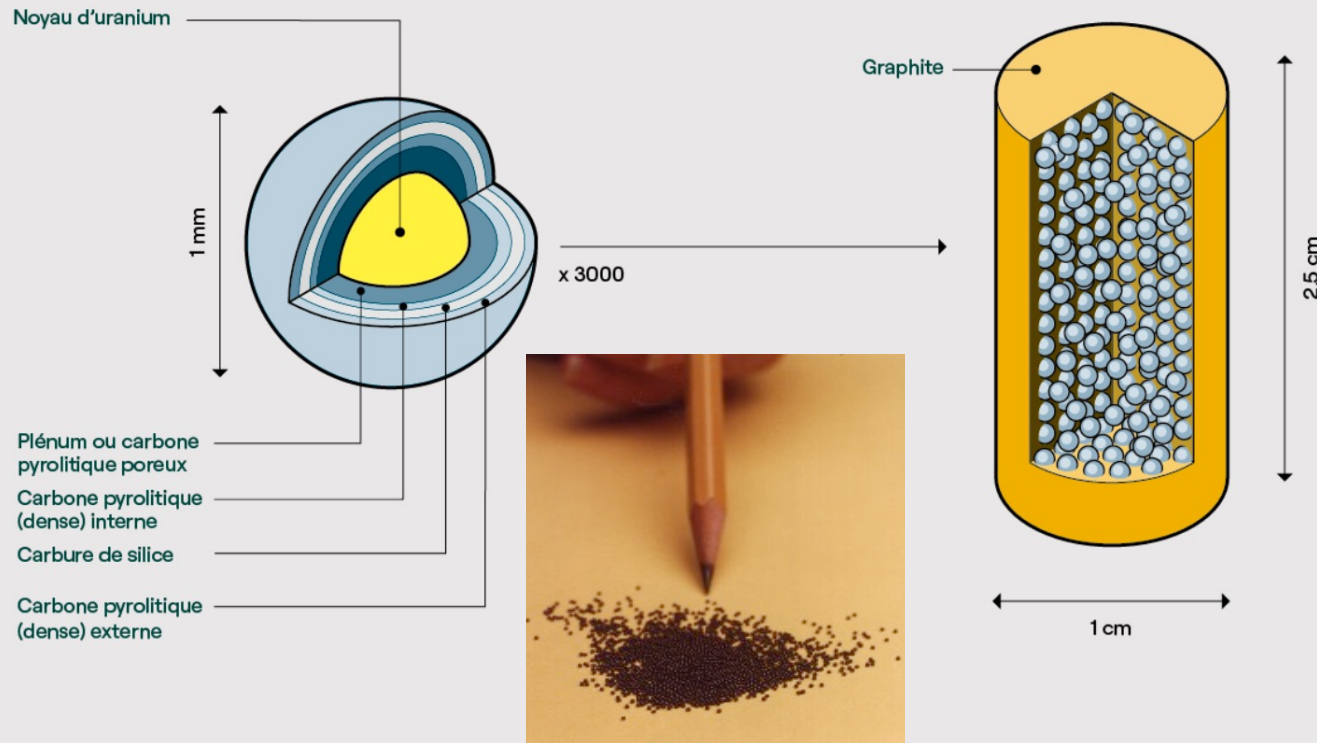
Du point de vue des risques industriels, la conception exclut les effets dominos entre le site industriel et le générateur Jimmy.



Bâtiment 25mx25mx25m

Paramètre	Valeur typique
Pth	~60 MWth
T sortie	450 °C
Caloporteur primaire	hélium
Fluide thermique	Vapeur, air chaud, huile thermique
Modérateur	graphite
Combustible	particules TRISO (UO ₂ / UCO)
Enrichissement	≤ ~19.5 % (HALEU)
Durée de vie	~20 ans
Rechargement	~10 ans
Application	chaleur industrielle
Terrain requis	6000 m ² (zone INB)
Opérateur	Jimmy + télésurveillance+ opé. par intervalles sur site

Le combustible de Jimmy



Particules TRISO

- Le combustible est fabriqué à base d'uranium enrichi, conditionné sous forme de particules dites « Triso » : un noyau d'uranium enrobé dans des gaines en carbone et céramique. Ces particules sont considérées comme étant le « combustible le plus sûr au monde » (par le DOE américain)

Compacts de combustible

- Ces particules Triso sont contenues dans des compacts : un mélange entre une matrice en graphite et les particules Triso. Il s'agit de cylindres d'environ 2,5 cm de hauteur et 1 cm de diamètre.

(Source site Jimmy Energy)

Le réacteur Calogena



- ❑ **Type de réacteur** : concept dérivé des **réacteurs de recherche à piscine**.
- ❑ **Caractéristiques** : technologies utilisées dans les réacteurs de recherche.
 - cœur immergé dans un grand volume d'eau
 - convection naturelle
 - forte inertie thermique
- ❑ **Combustible**
 - combustible uranium standard de type **crayons** (semblable aux REP)
 - compatible avec la filière française du cycle du combustible.
- ❑ **Fonctionnement**
 - chaleur directement transférée vers un échangeur
 - alimentation de réseau de chaleur.

224 réacteurs de recherche en opération dans plus de 50 pays

Le réacteur Calogena

❑ La sûreté repose sur plusieurs choix de conception :

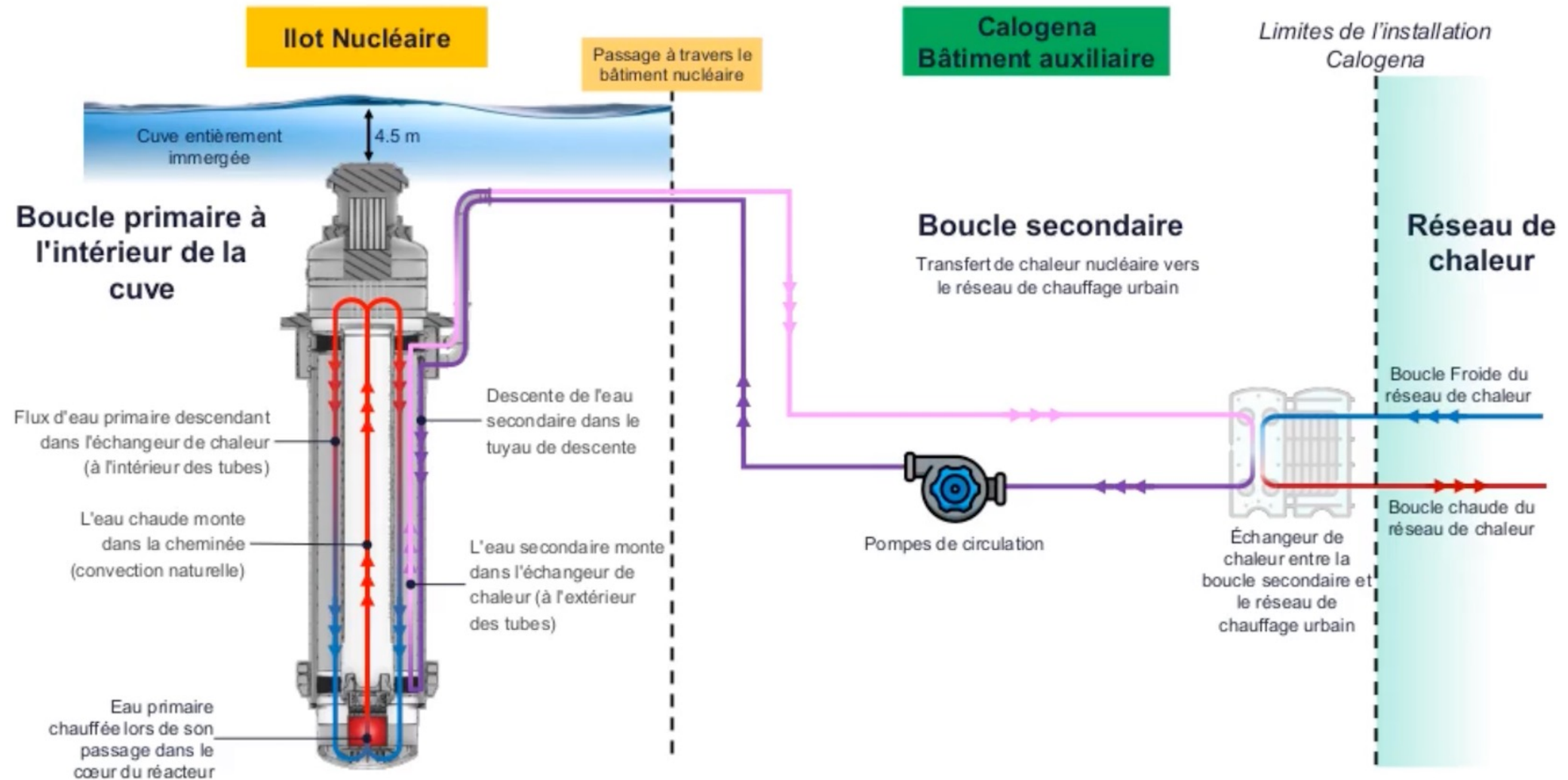
- **Faible pression et faible température**
- **Puissance faible : ~ 150 fois moins puissant qu'un REP.**
- **Refroidissement passif** : convection naturelle et inertie thermique.
- **Risque de fusion fortement réduit exclusion des scénarios** de fusion du cœur dès la conception.

❑ **Déploiement et calendrier** : Principales étapes :

- 2024 : dépôt du **dossier d'option de sûreté** auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection.
- projet de **premier démonstrateur à Cadarache**.
- mise en service industrielle visée **vers 2030**.

Paramètre	Valeur
Puissance	~30 MW thermiques
Usage	chaleur pour réseaux urbains
Température de fonctionnement	70-110 °C
Pression	~5–6 bars
Type de réacteur	réacteur à eau légère « type piscine »
Taille du cœur	< 1 m ³
Surface du site	~3000 m ²
Besoin en eau	5 m ³ /jour

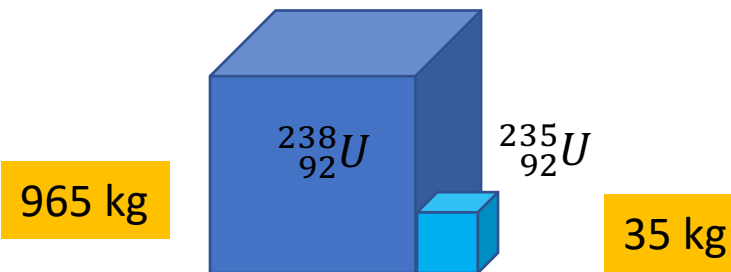
Procédé de chauffage



❑ Le nucléaire durable

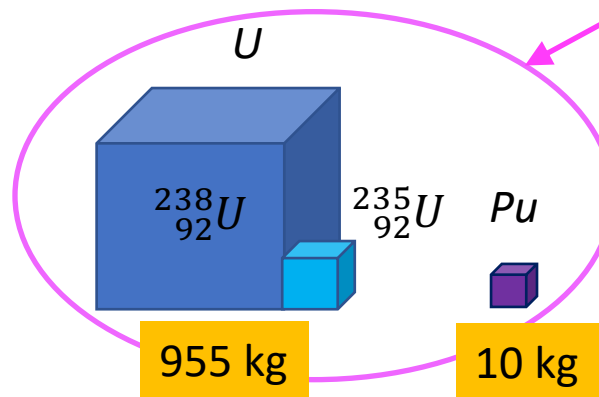
Le combustible

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

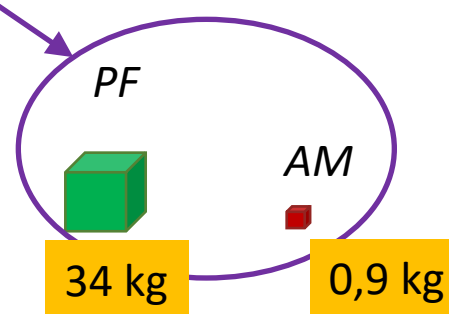


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes



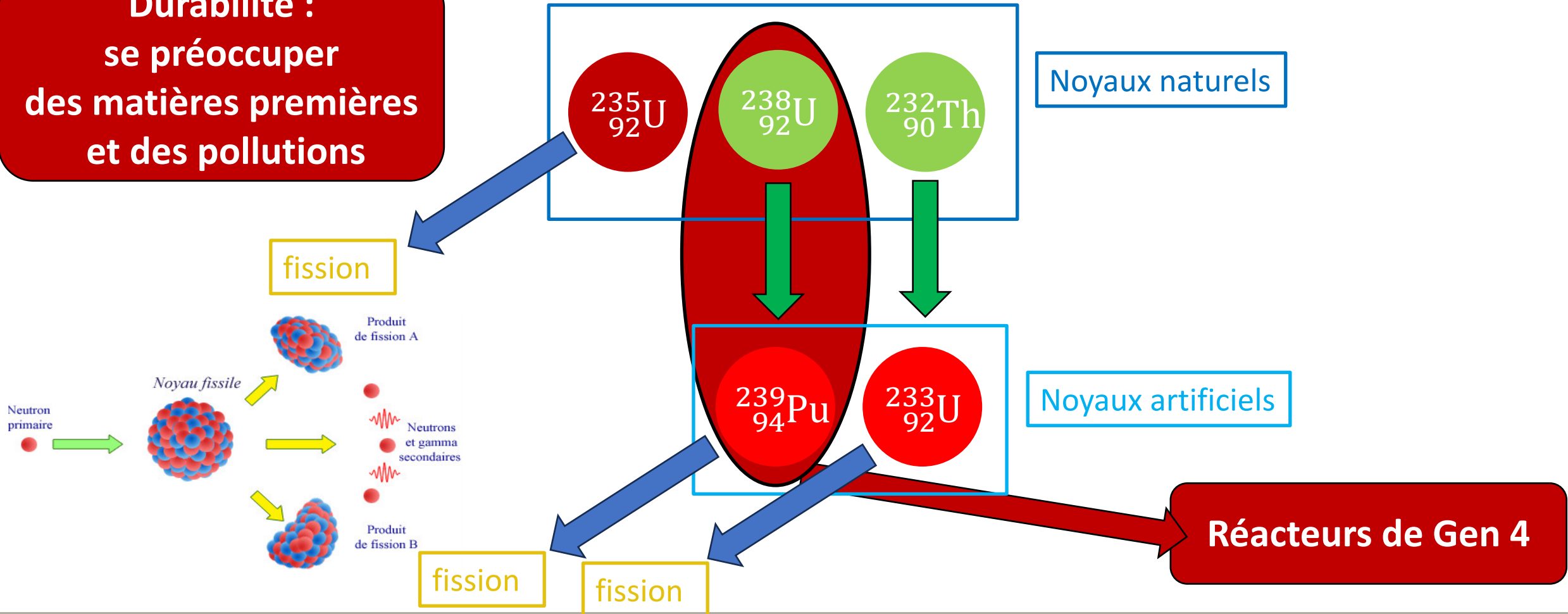
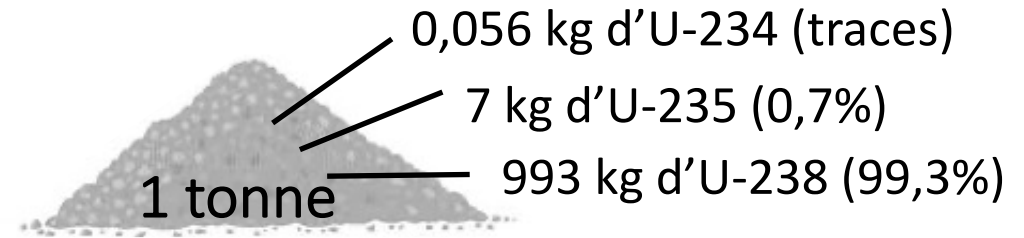
Après passage en cœur :

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

Vers le nucléaire durable:
Utiliser mieux le
combustible

Le nucléaire durable

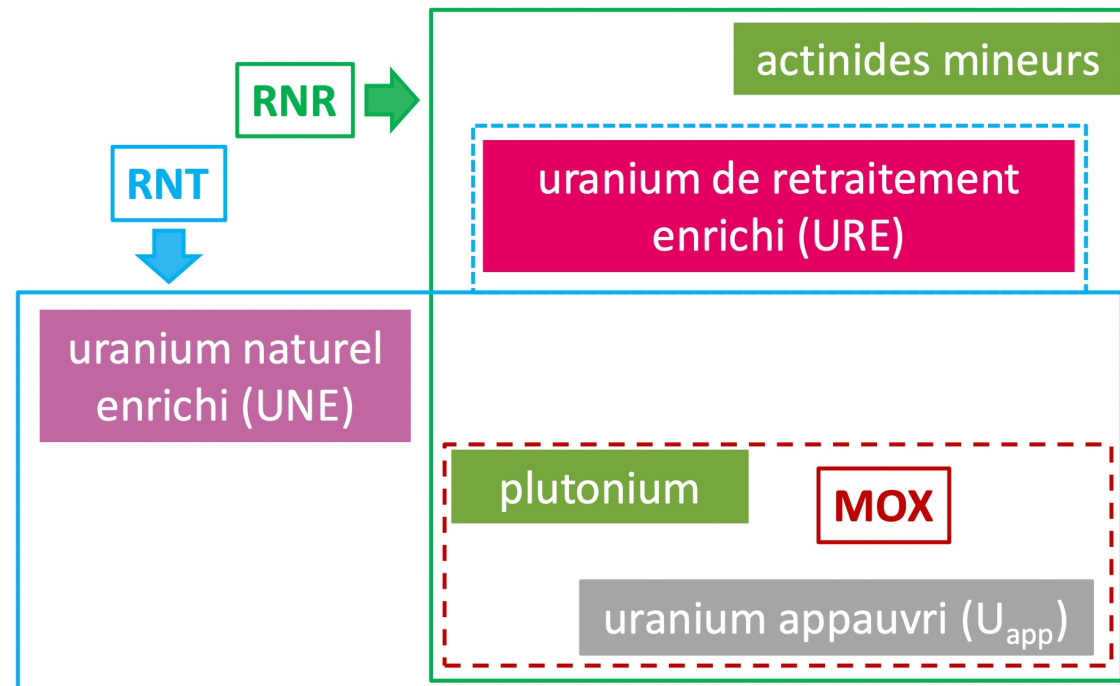
Durabilité :
se préoccuper
des matières premières
et des pollutions



Quel combustible pour quel réacteur?

☐ Combustible possible:

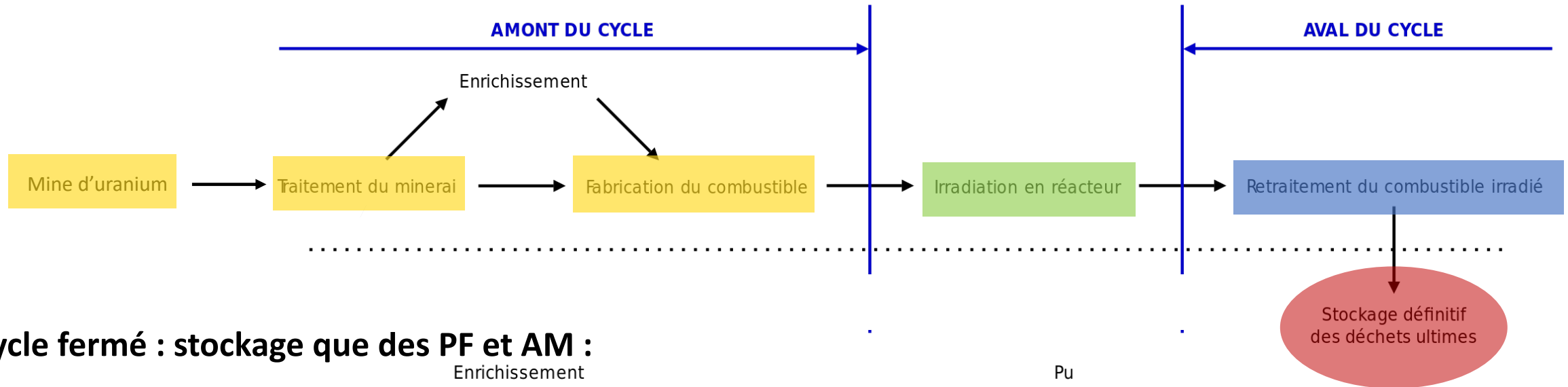
- UNE : uranium naturel enrichi UO_2
- MOX : mélange oxydes UO_2 et PuO_2
- URE : uranium de retraitement enrichi UO_2



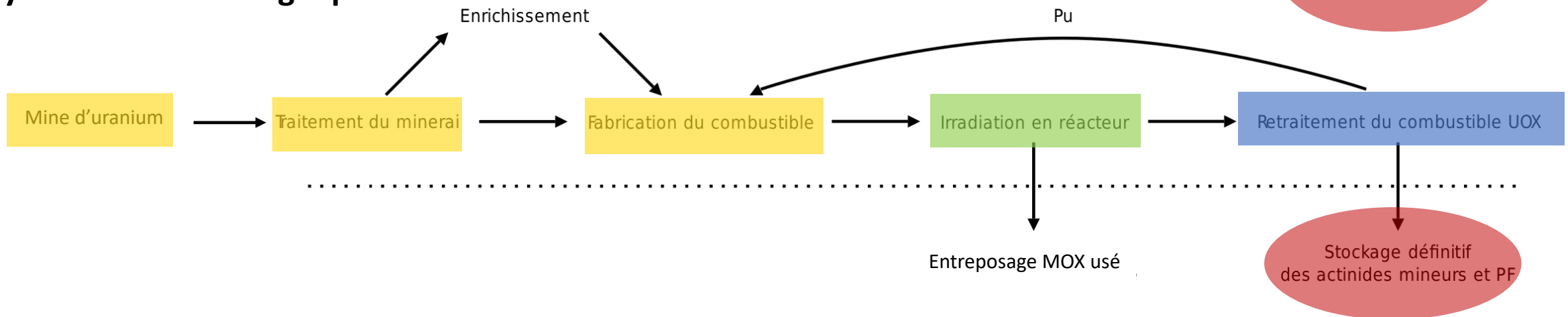
- Issu du recyclage
- Deux fois recyclé
- Issu de la mine
- Issu du traitement

Amont/Aval et cycle ouvert/fermé

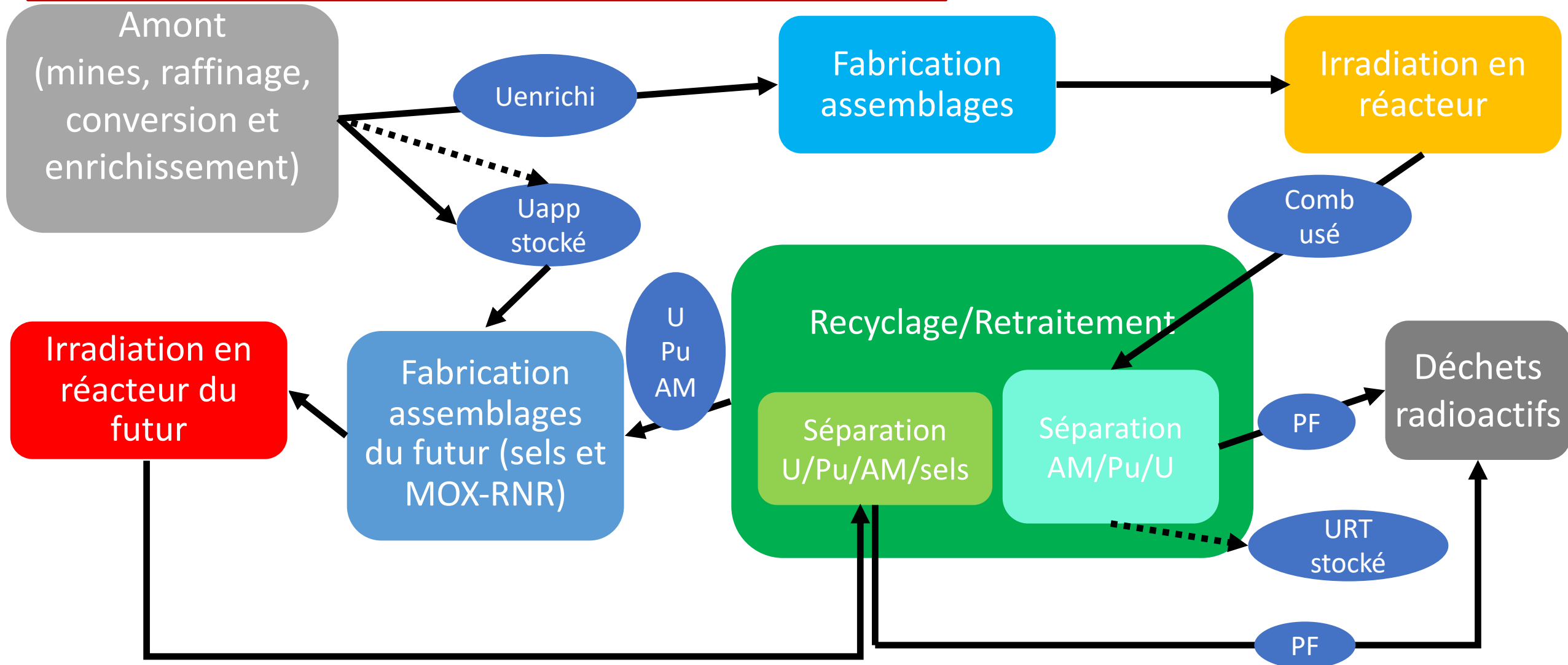
❑ Cycle ouvert : stockage de tout le combustible utilisé :



❑ Cycle fermé : stockage que des PF et AM :



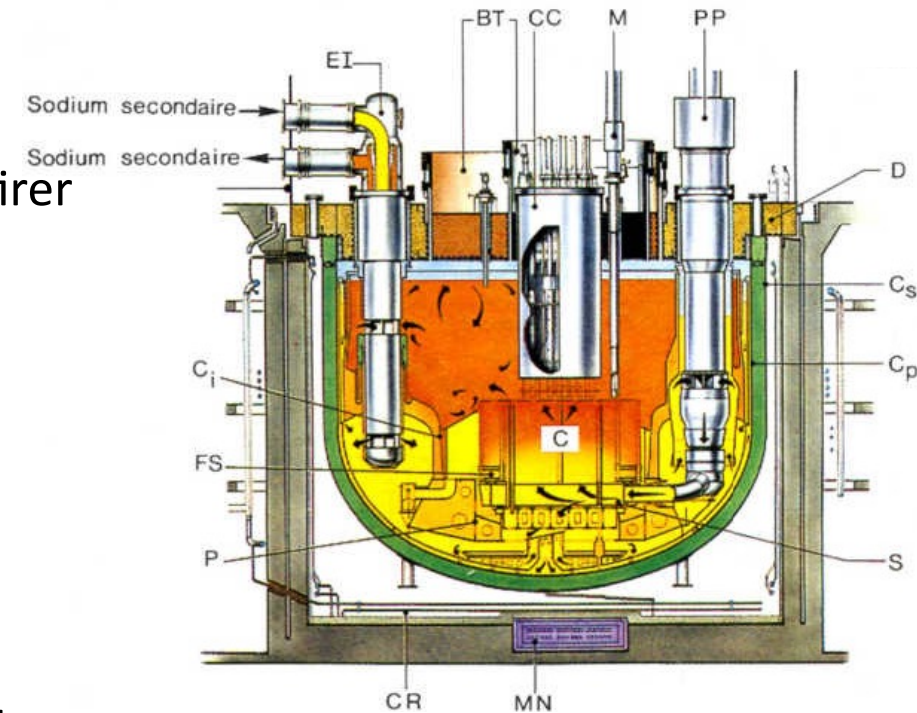
Cycle du combustible pour le futur



Le réacteur à neutrons rapides

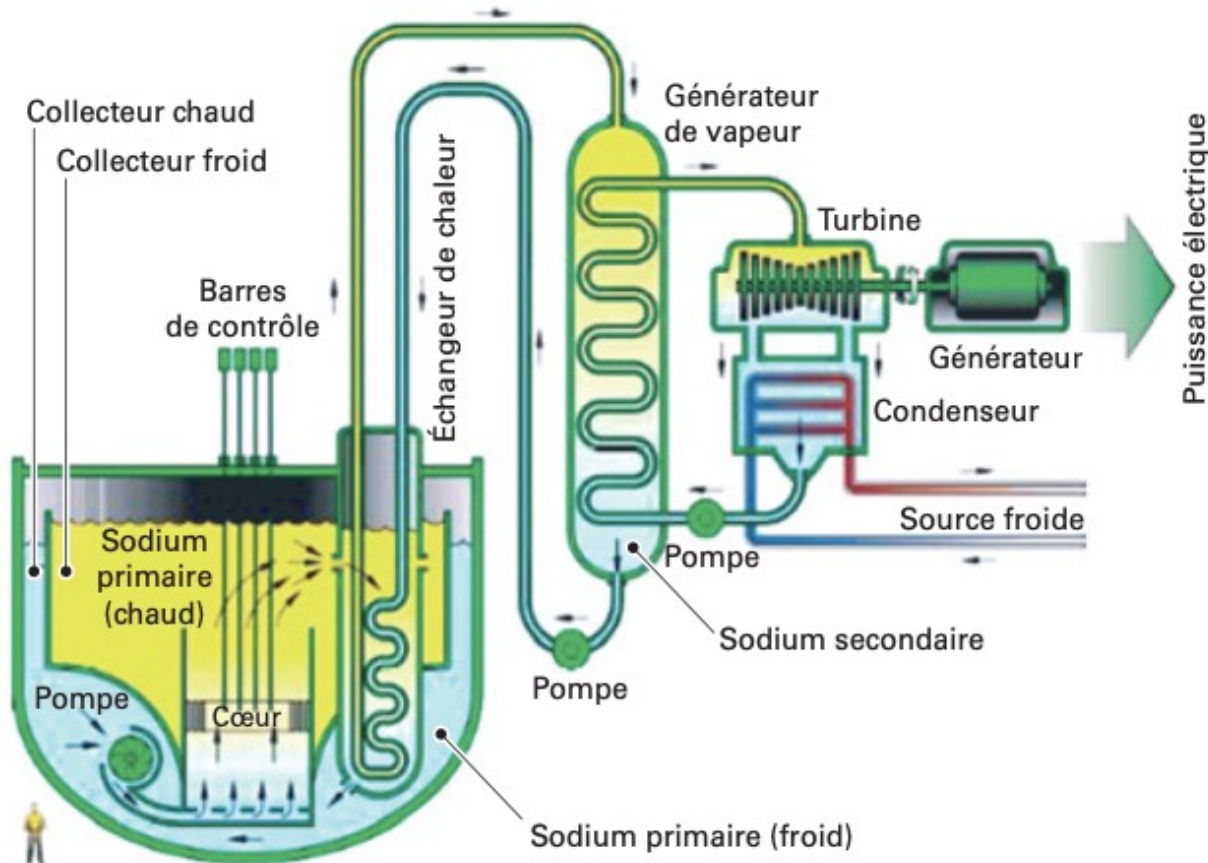
- ❑ Combustible : mélange $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$: donc disposer de Pu
- ❑ Utilisation totale du combustible ($\sim 2\%$ pour les réacteurs à eau) :
 - Augmentation d'un facteur entre 50-100 de l'énergie que l'on peut tirer de l'uranium par rapport aux réacteurs à eau.
- ❑ Compacité du cœur: possibilité de construire des cœurs de très grande puissance
- ❑ Utilisation de réflecteurs
- ❑ Coût de l'uranium naturel = > de 1 % du coût du kWh (5-7% pour les réacteurs à eau)
- ❑ Utilisation des stocks d'uranium appauvri
- ❑ Rendement important (Superphénix = 40 %) = > moins de pertes de chaleur
- ❑ Très faible irradiation du personnel d'entretien de la centrale
(10 fois moins que sur un REP)
- ❑ Possibilité d'incinération des déchets nucléaires à vie très longue (AM)
- ❑ Grande facilité de conduite de la centrale.

(d'après documents Novatome)



BT	bouchons tournants
C	cœur
C _i	cuve interne
C _p	cuve principale
C _s	cuve de sécurité
CC	bouchon couvercle-cœur
CR	circuit de refroidissement de secours
D	dalle
EI	échangeur intermédiaire
FS	faux sommier
M	machine de transfert
MN	chambres de mesures neutroniques
P	platelage
PP	pompe primaire
S	sommier

Réacteur à neutrons rapides à caloporteur métal fondu



- ❑ Combustible : mélange $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ (15-20% de Pu)
- ❑ Pas de modérateur (neutrons rapides)
- ❑ Caloporteur: sodium liquide (autres options : Pb, Pb-Bi)
- ❑ Deux RNR construits en France : Superphenix et Phenix.
- ❑ En 2020, trois réacteurs à neutrons rapides en exploitation : les réacteurs russes [Beloyarsk-3 \(BN-600\)](#) et [Beloyarsk-4 \(BN-800\)](#) et le [CEFR](#) chinois.
- ❑ Inconvénients: coût élevé+ sûreté liée au sodium et Pb
- ❑ Start-up en France : Newcleo (avec du plomb liquide) (30 et 200 MWe), Hexana (avec du Na liquide) (300 MWe), Otrera.

(Source Techniques de l'ingénieur, dossier BN3230)

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

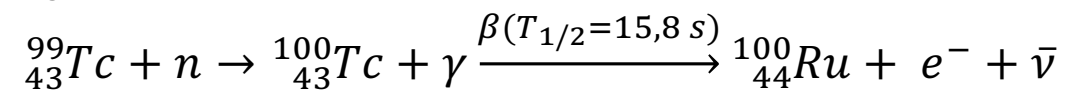
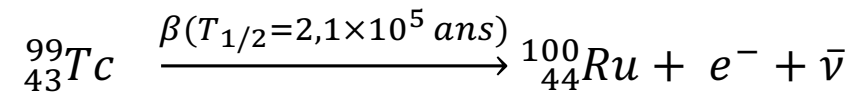
noyaux lourds

produits de fission

radionucléides à vie longue

produits d'activation

produits de fission et d'activation

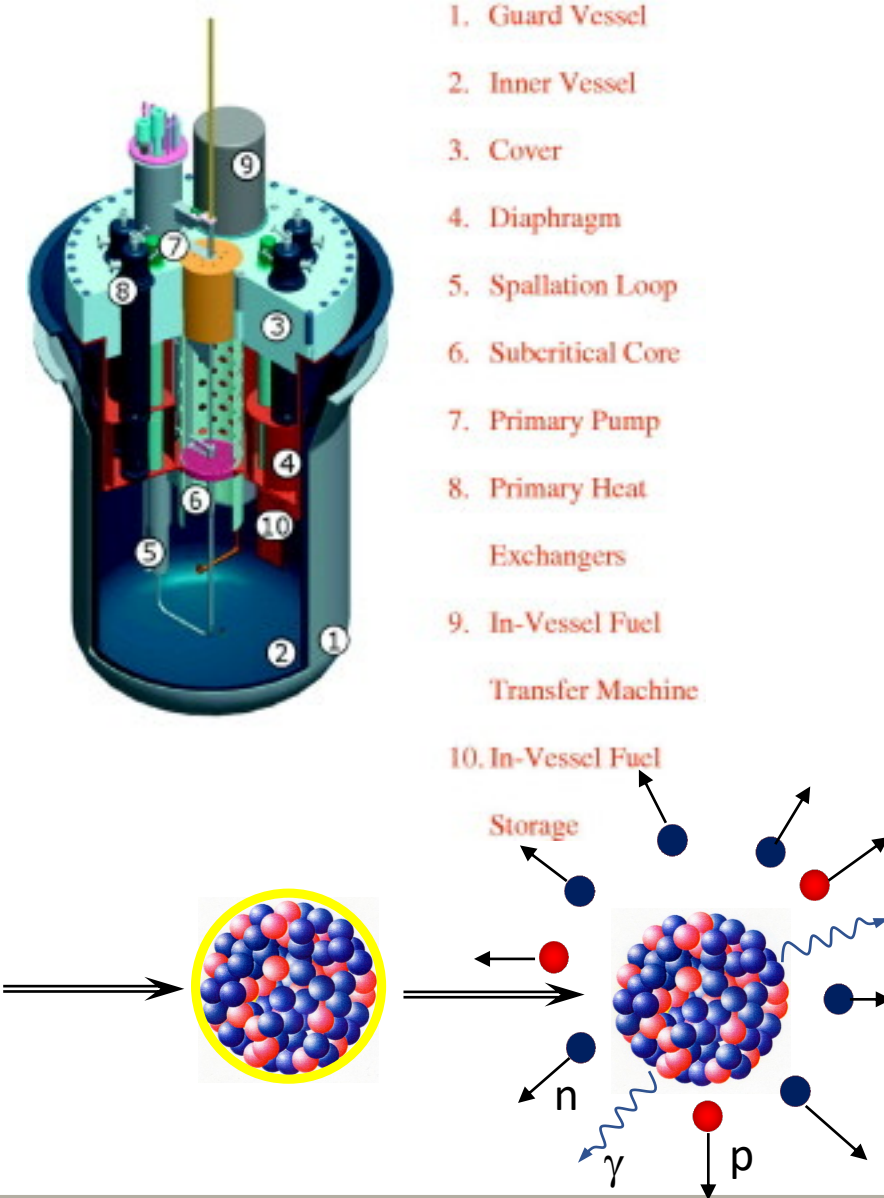
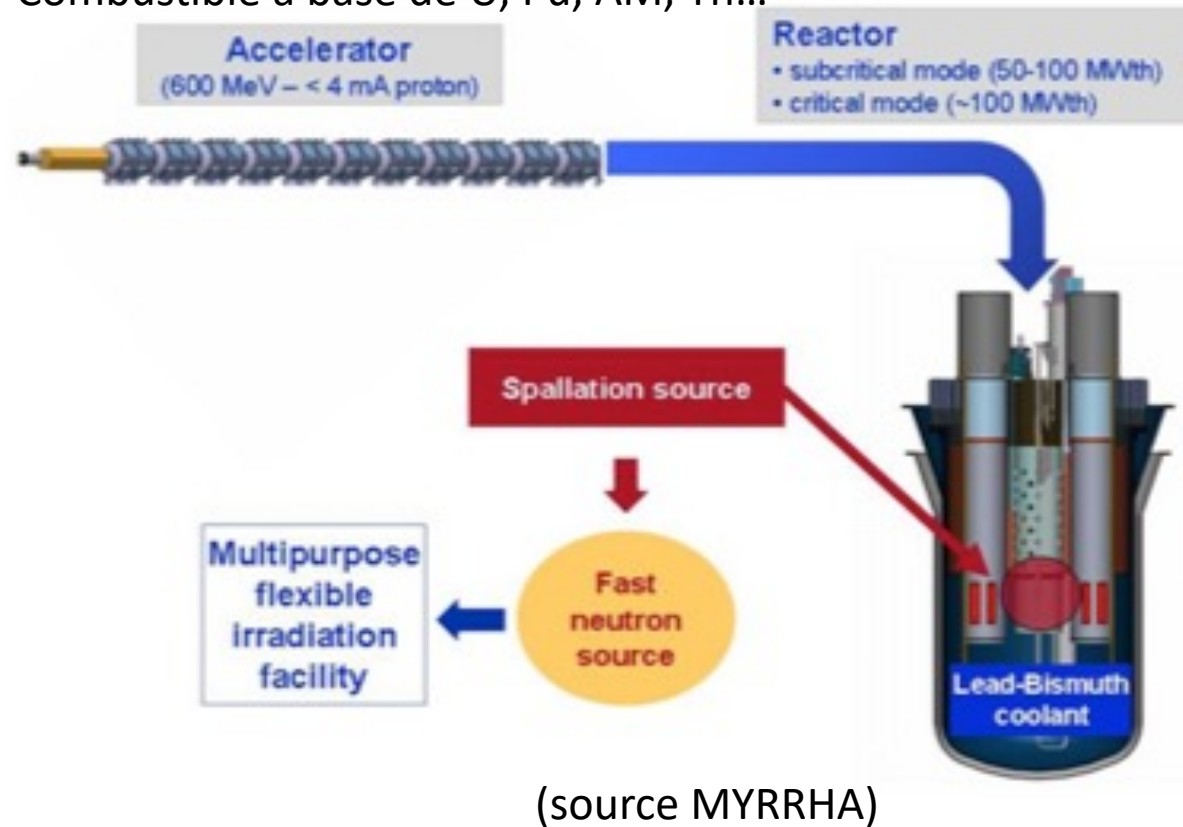


Conclusions intermédiaires des études menées

- ❑ Transmutation des actinides mineurs : Am, Cu 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 consomme 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.

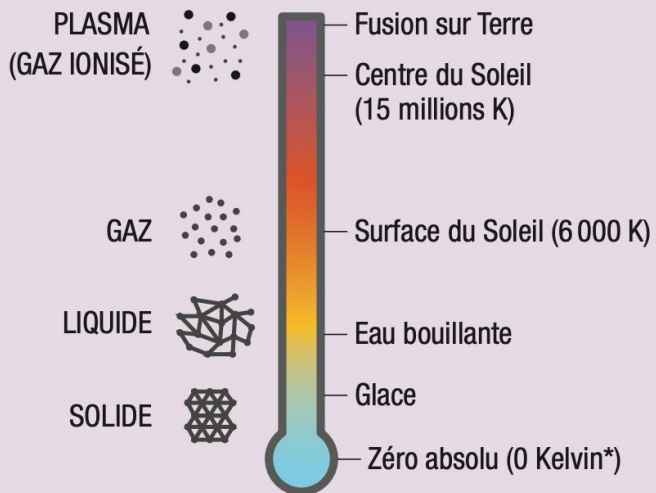
Myrrha

- ❑ 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

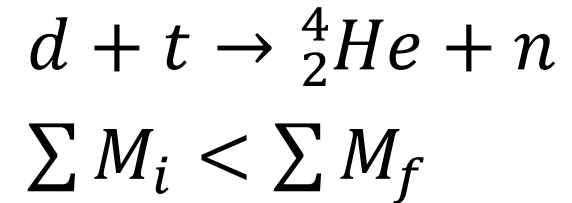
Réaction n+Li

deutérium

tritium

neutron
 $E_c = 14 \text{ MeV}$

hélium-4
 $E_c = 3,5 \text{ MeV}$



Equivalence entre fission et fusion :

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

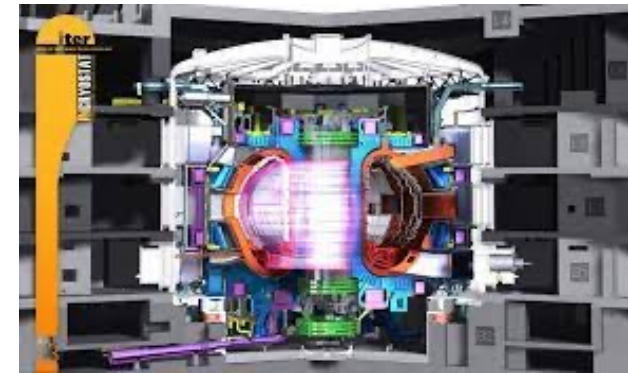
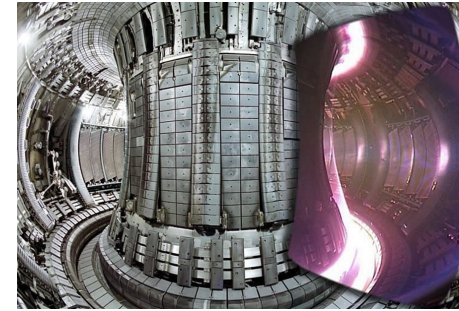
La fusion : ses avantages

❑ 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 CO_2 ,
- 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

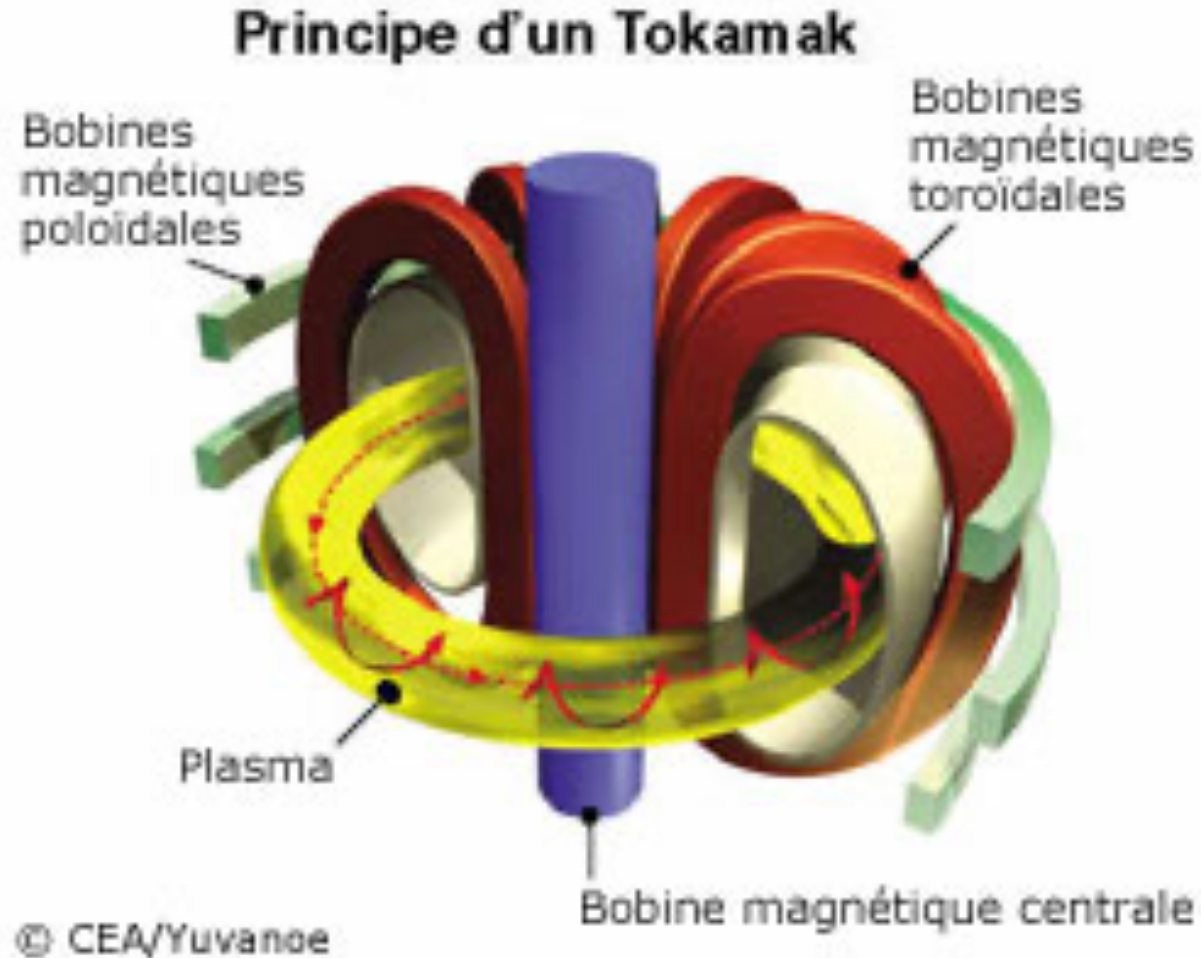
(Source : CEA)

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

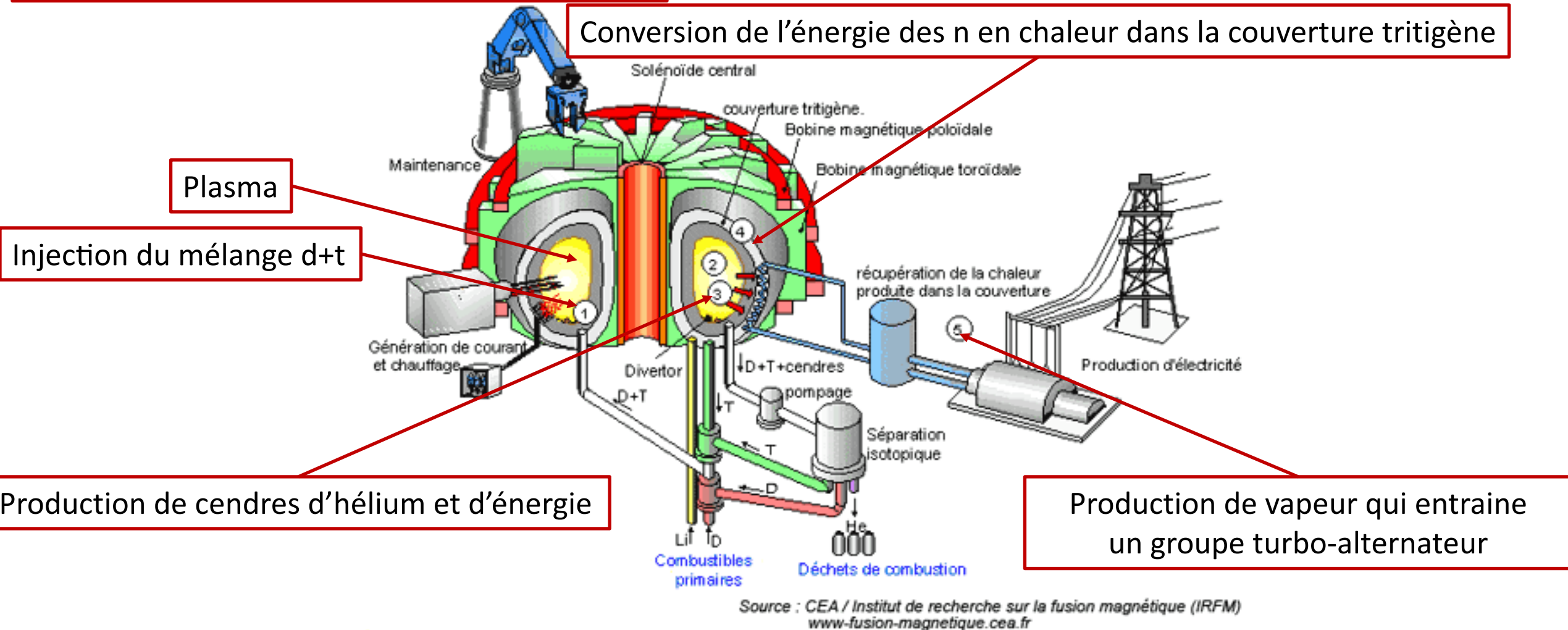


Transformation en plasma =
Gaz « chargé » (séparation e- et noyaux)

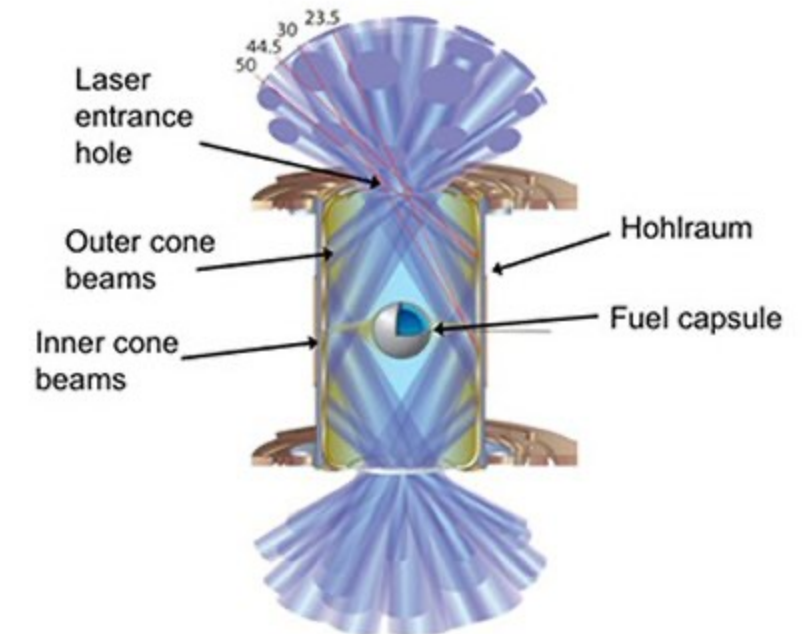
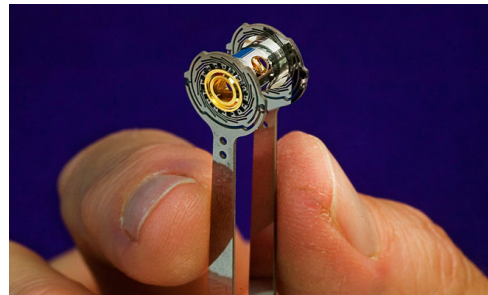
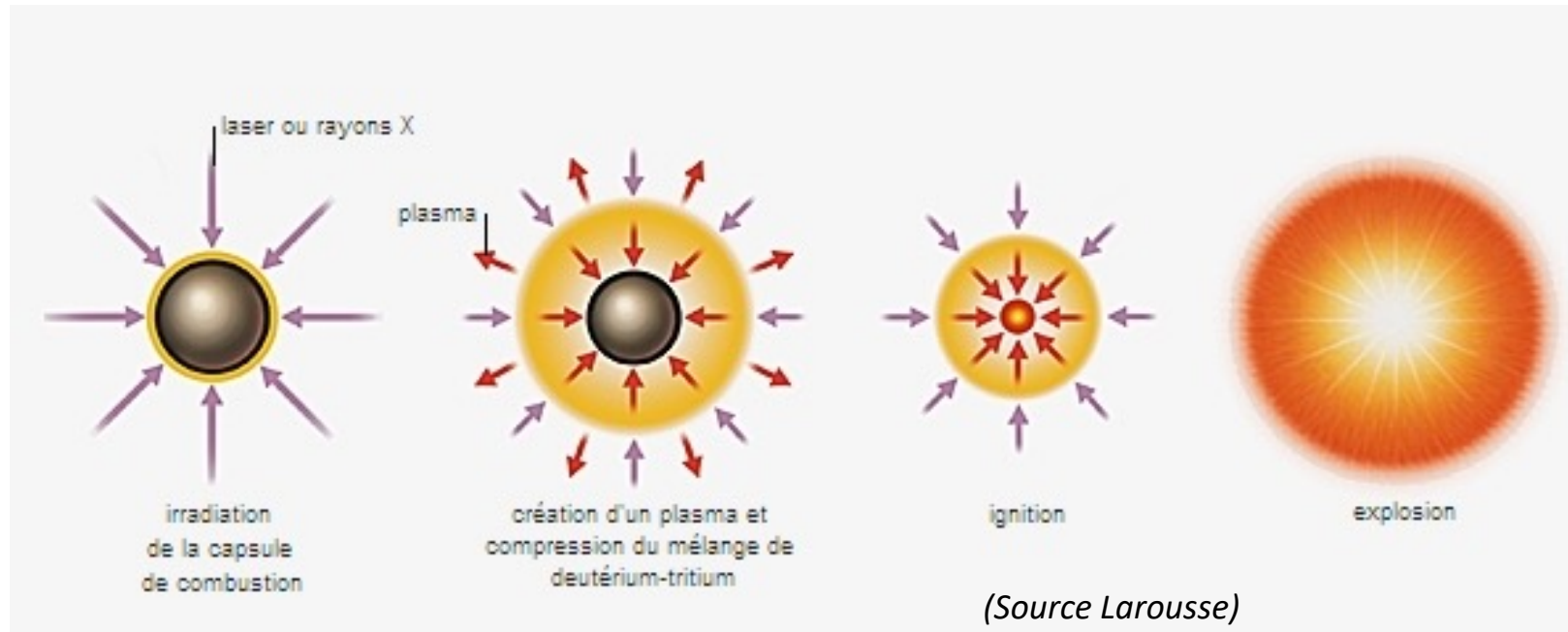
- ❑ Des champs magnétiques puissants pour le confinement.
- ❑ La densité du plasma est très faible :
 $\sim 10^{20}/\text{m}^3$ (densité proche du vide)
- ❑ Le temps de confinement doit être assez long.



Production de l'électricité

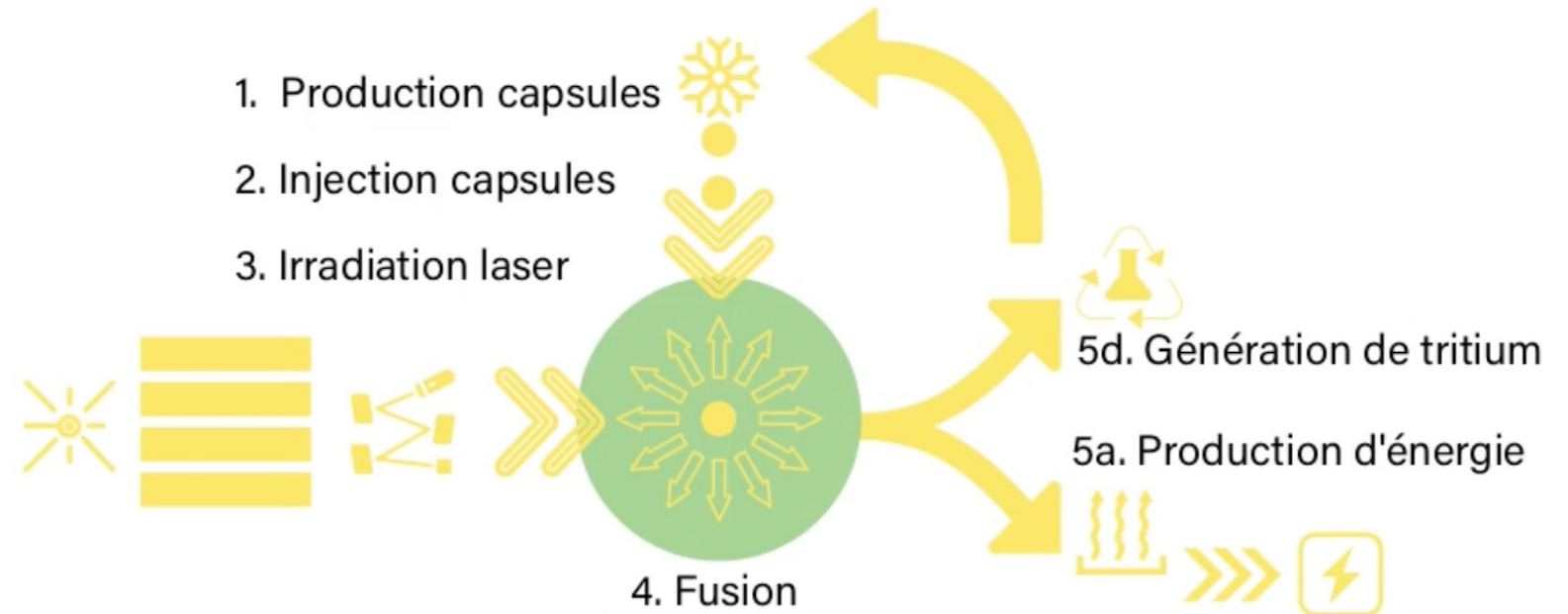
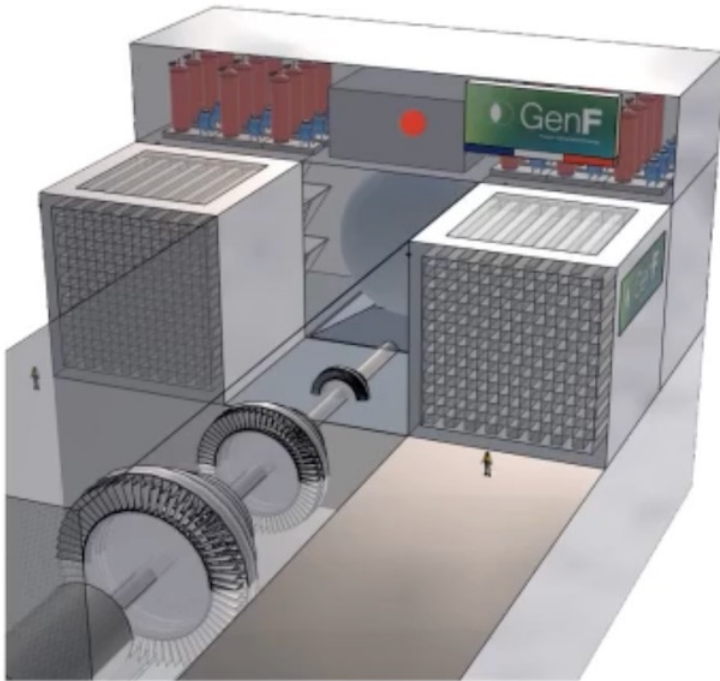


La fusion par confinement inertiel



(Source NIF)

GenF



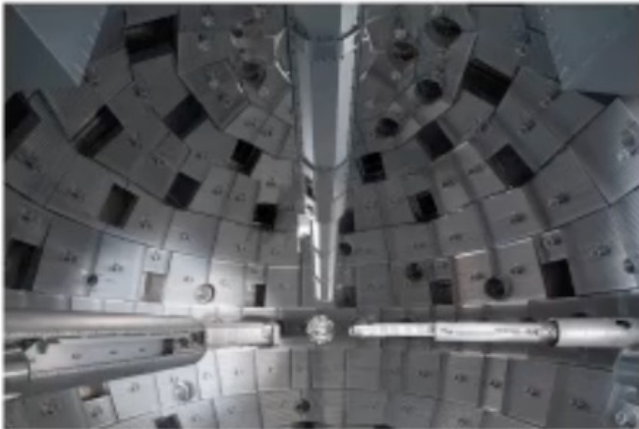
❑ **Projet:**

- $P = 1 \text{ GWe}$
- Partenariat : Thalès, CEA, Polytechnique, CELIA (CNRS)
- Prototype ~2035 → exploitation envisagée ~2050

Les challenges

- ❑ Maîtrise des lasers ultra-puissants avec synchronisation parfaite
- ❑ Fabrication de cibles cryogéniques reproductibles
- ❑ Matériaux résistants aux conditions extrêmes
- ❑ Boucle de tritium et gestion des neutrons

Haute Energie



Haute Cadence



Cycle du
Combustible



Merci de votre attention.

