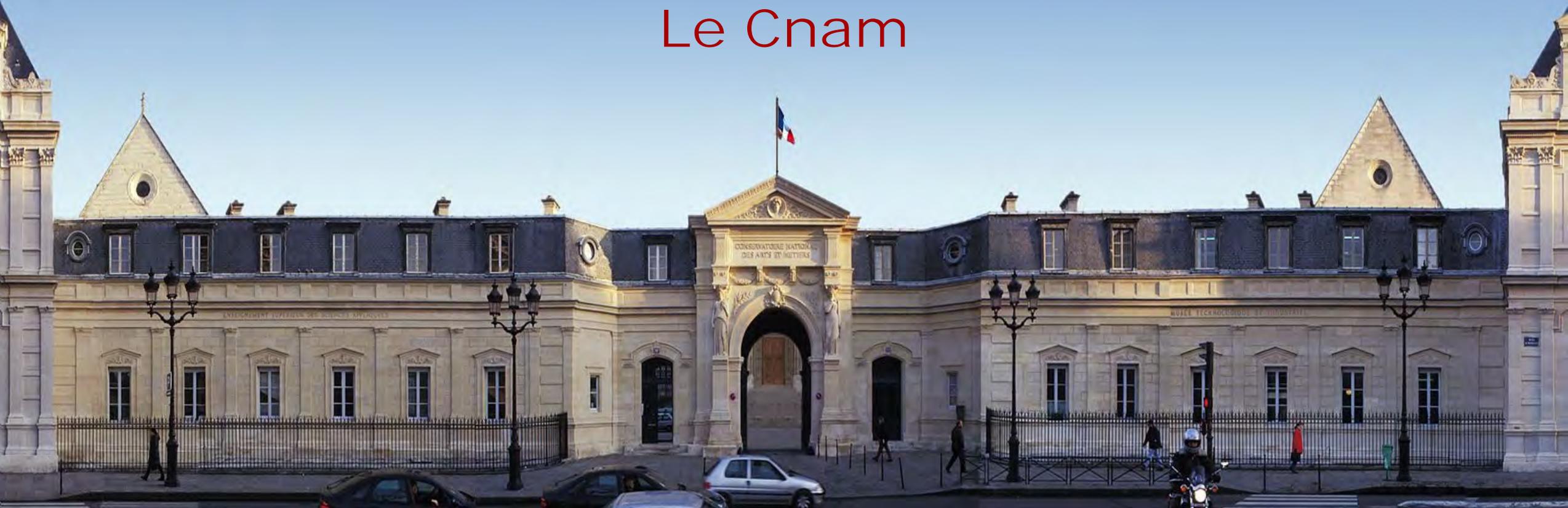


# Emmanuelle Galichet

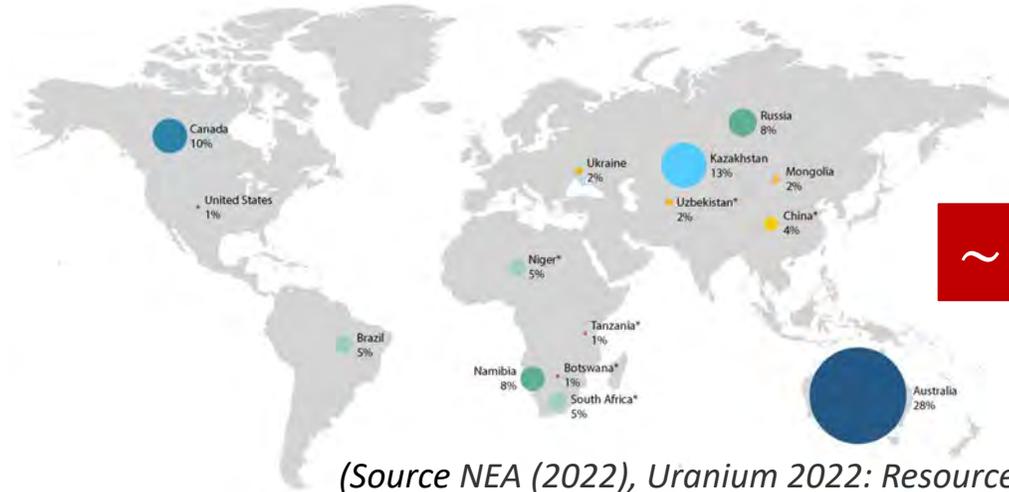
## Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

### Le Cnam

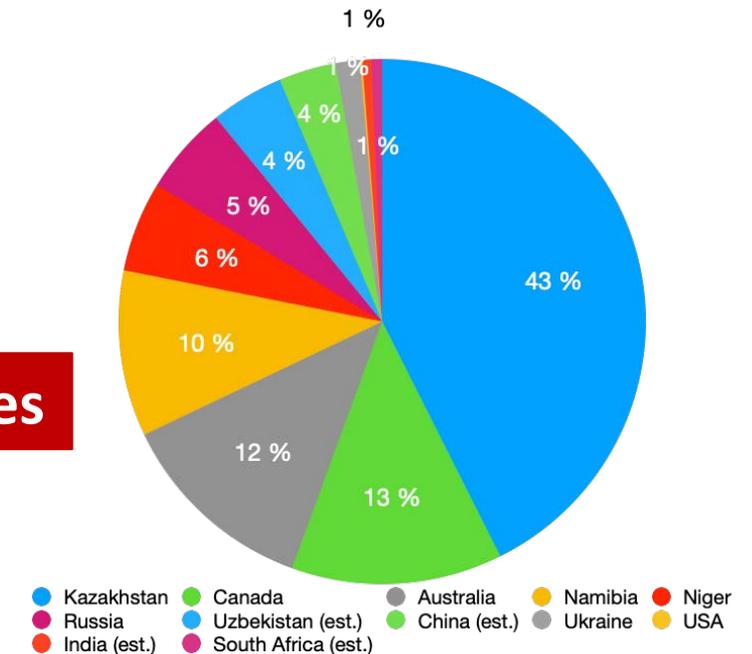


# Ressources en uranium

Distribution des ressources conventionnelles d'uranium au 1<sup>er</sup> janvier 2021, dont le prix < 130 \$ US/kg U



~ 12 millions de tonnes



- Consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 tonnes par an)
- Bonne répartition des ressources conventionnelles -> permet facilement la diversification des fournisseurs
- Abondance dans l'écorce terrestre : 3 g/t en moyenne
- Possibilité de stocks importants : environ 10 ans pour la production française.

**Consommation actuelle : ~100 ans de ressources**

# Les stocks d'uranium en France

Ressources mondiales (~ 130 \$/kgU) :  
~12 millions de tonnes

- Conventionnelles : ~ 6 millions de tonnes
- raisonnablement assurées : ~ 4 millions de tonnes
- Présumées : ~ 2 millions de tonnes

uranium  
naturel issu de  
la mine  
39800 tonnes  
5 ans

Consommation  
actuelle  
Indépendance  
15 ans

uranium  
enrichi  
3390 tonnes  
3 ans

uranium  
appauvri  
324 000 tonnes  
7-8 ans

Monde: 2 millions de  
tonnes  
Teneur : U235 : 0,25%

(Source Andra et NEA)

# Le nucléaire durable

Noyaux fissiles

$^{235}_{92}\text{U}$

$^{233}_{92}\text{U}$

$^{239}_{94}\text{Pu}$

Noyaux naturels

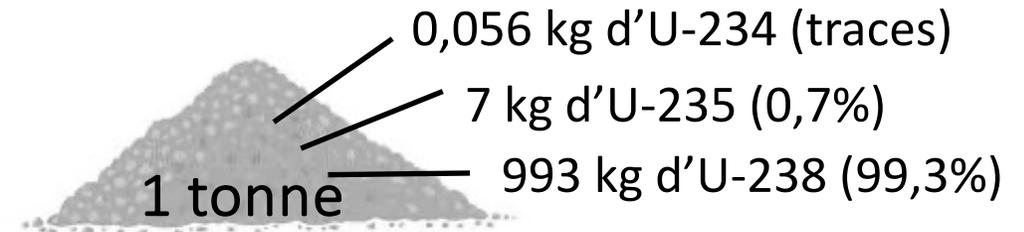
Noyaux artificiels

$^{238}_{92}\text{U}$

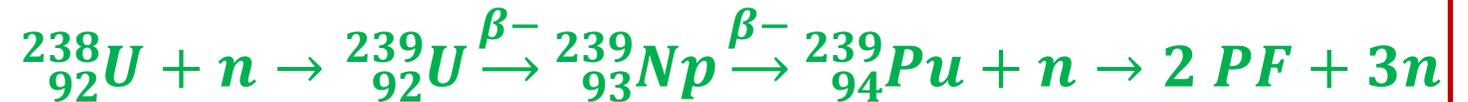
$^{232}_{90}\text{Th}$

Noyaux fertiles

Composition uranium naturel : 3 isotopes



réaction de fission des REL

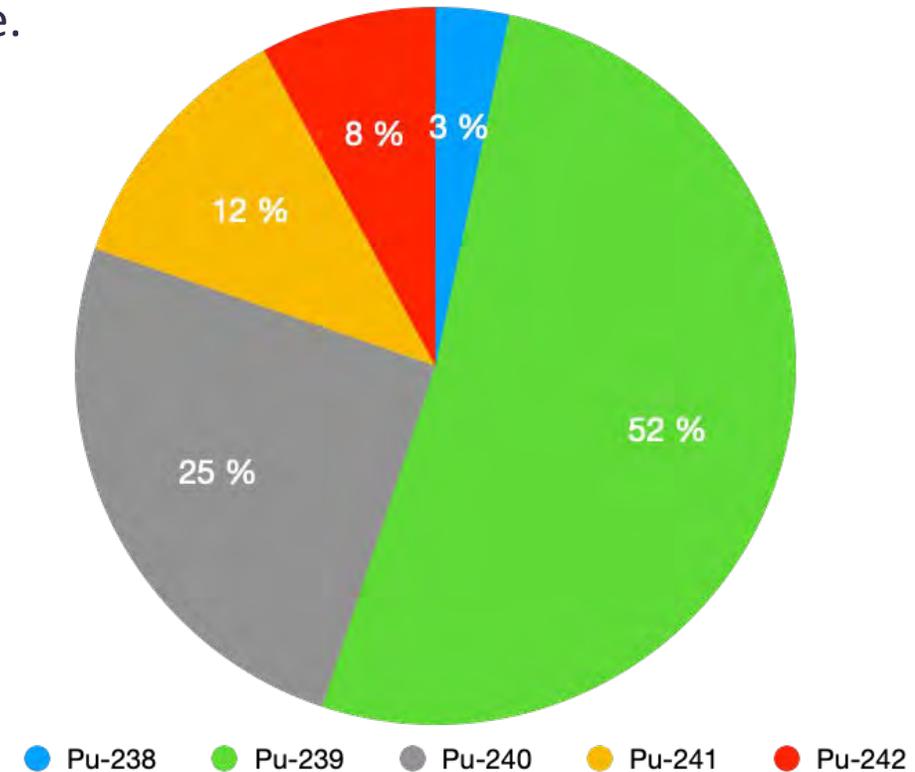


réaction de fission des RNR

# Le cas du plutonium

- ❑ Environ 10 kg de plutonium dans 1t de combustible utilisé.
- ❑ France: stock Pu séparé : ~ 60 tonnes
- ❑ Sous-produit inévitable de la production d'électricité d'origine nucléaire.
- ❑ Dégradation de la qualité du plutonium sous irradiation en cœur.
- ❑ Fission favorisée que pour Pu-239 et Pu-241 en n thermiques.
- ❑ Les isotopes pairs du plutonium absorbent les neutrons.
  - **problème pour stabilité de la réaction en chaîne.**
- ❑ Environ 60% d'isotopes impairs et 40% de pairs.
  - **Le plutonium moins adapté après plusieurs cycles d'irradiation.**
- ❑ Le même résultat est visible sur le recyclage des combustible MOX.
- ❑ En n rapides, tous les isotopes du plutonium peuvent fissionner.
  - **vers des concepts de réacteurs à neutrons rapides.**

Pourcentage isotopes du plutonium combustible déchargé à 50 000 MWj/t



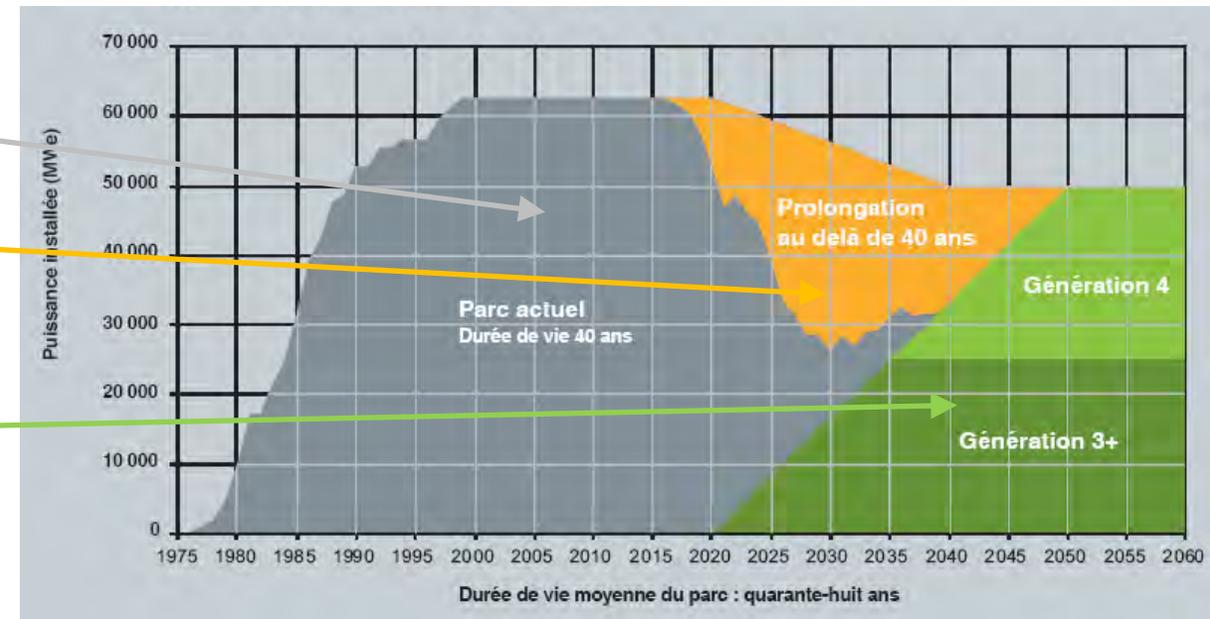
(Source Rapport L'aval du cycle nucléaire, Sénat)

# Utilisation du plutonium: intérêt

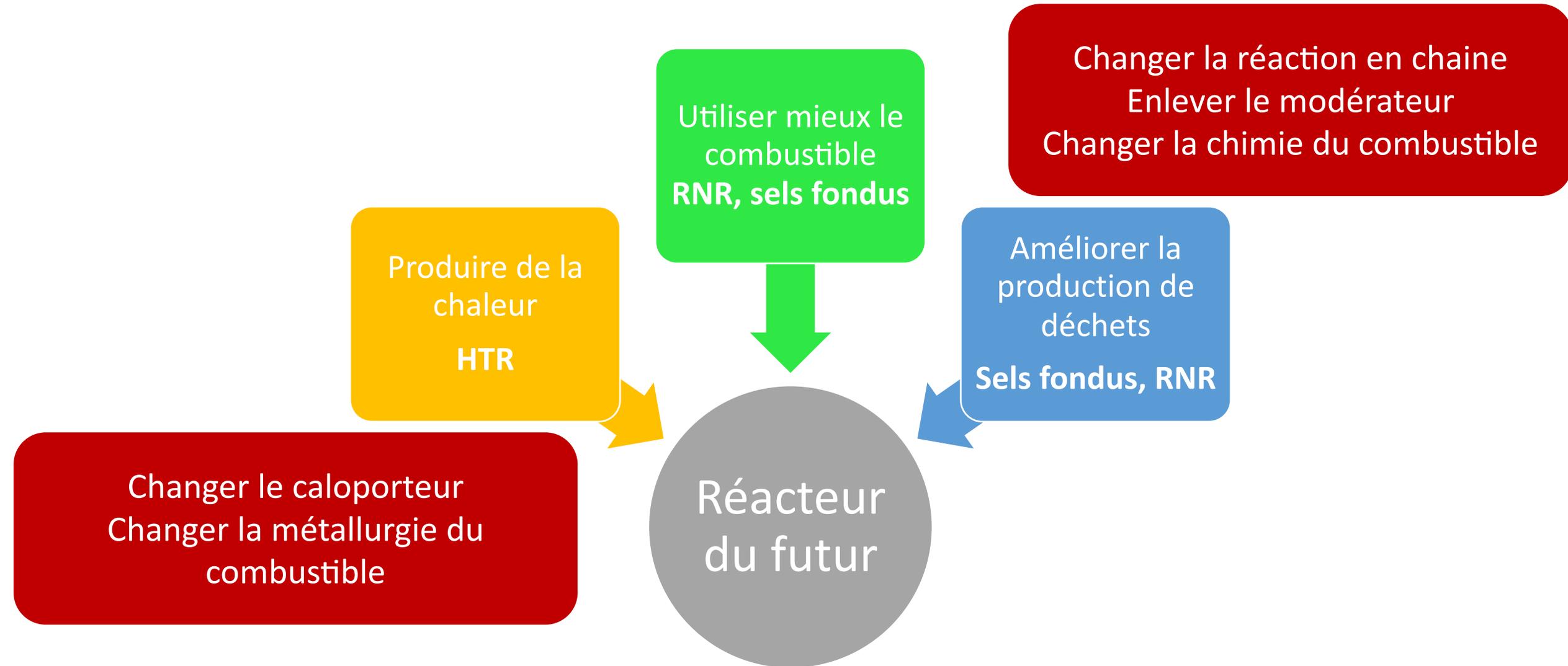
- ❑ 1g de Pu = 1 tonne de Pétrole
- ❑ 90% de la radiotoxicité des déchets à vie longue est le Pu.
- ❑ Scénario idéal français non réalisé :
  - 1<sup>ère</sup> étape: réacteurs à neutrons thermiques et U-235 avec recyclage pour constituer un stock de Pu.
  - 2<sup>ème</sup> étape: réacteurs à neutrons rapides utilisant le Pu recyclé et surgénération pour tenir le stock de Pu constant.
  - A terme: tout le parc constitué de RNR et ramener  $G=0$  (ou continuer à produire du Pu pour d'autres pays) et consommer l'intégralité de l'uranium naturel (U-235 directement et U-238 en le convertissant en Pu)



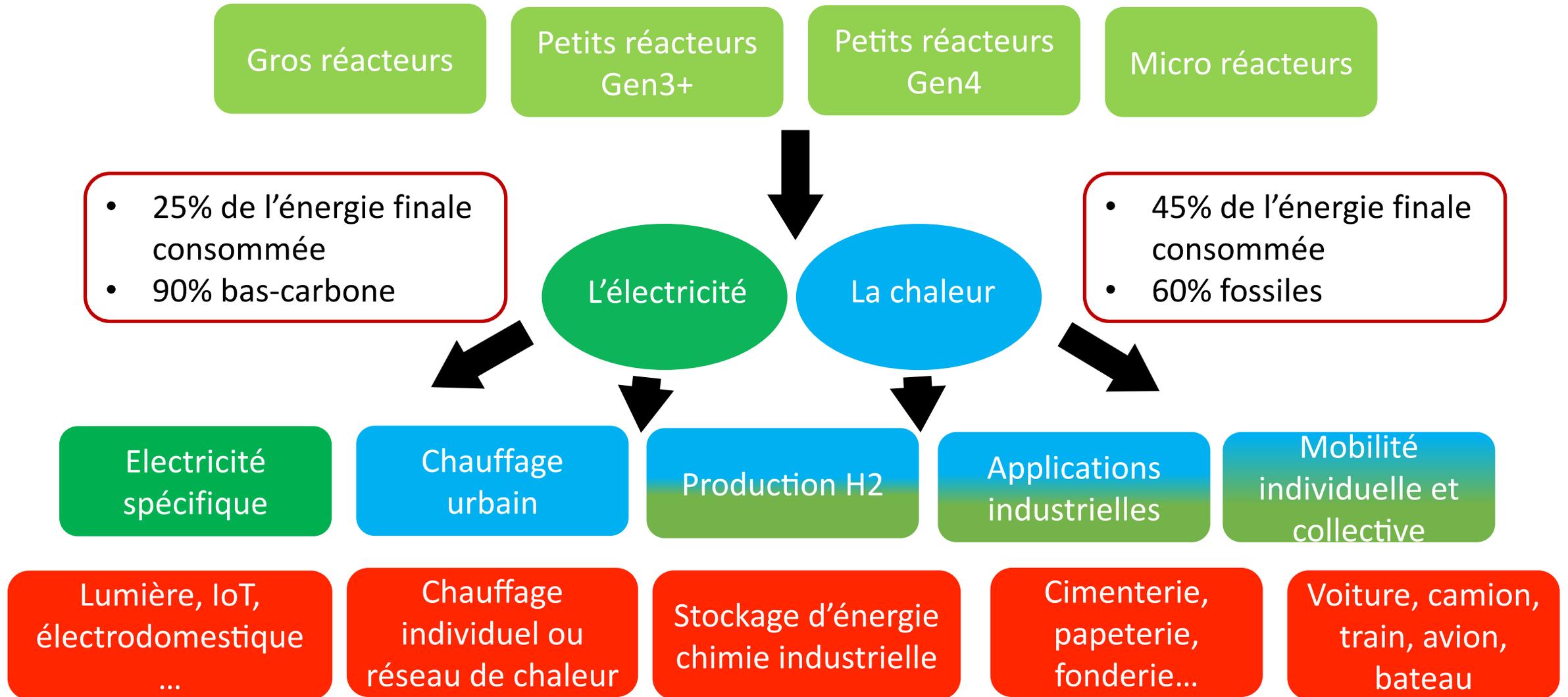
Energie extraite multipliée par 50 comparée à la filière actuelle  
Ressources énergétiques immenses



# Innovation dans les réacteurs nucléaires



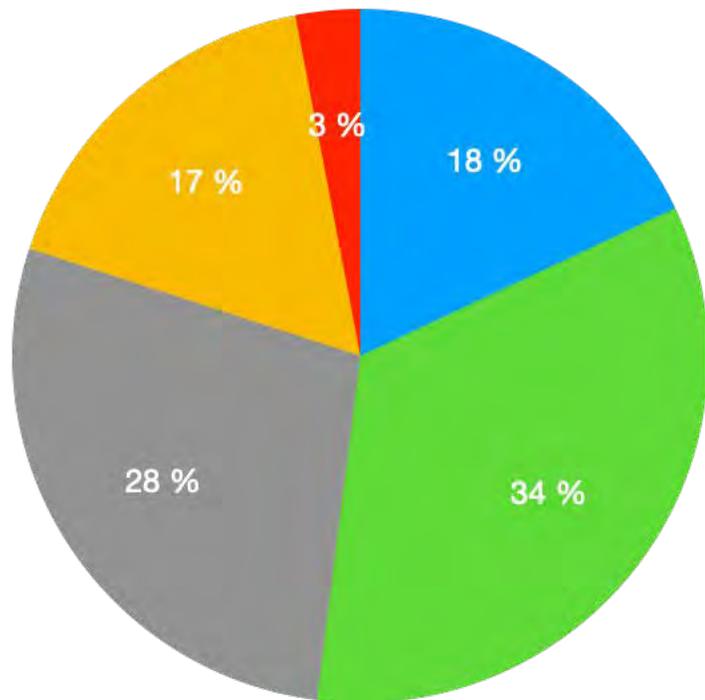
# A quoi peut répondre l'énergie nucléaire?



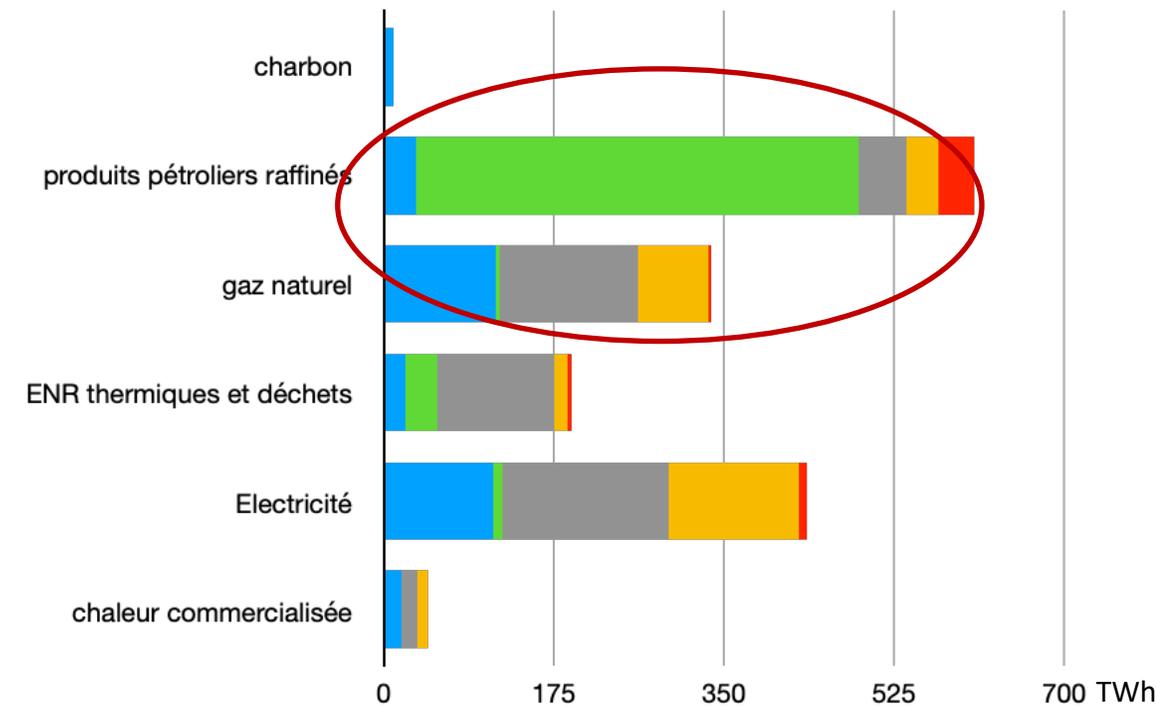
## □ Annexes

# Consommation d'énergie finale par secteur en 2022 en France

● Industrie ● Transport ● Résidentiel ● Tertiaire ● Agriculture



■ Industrie ■ Transports ■ Résidentiel ■ Tertiaire ■ Agriculture-pêche



**Objectif: diminuer les fossiles :**

1. Diminuer pétrole dans les transports
2. Diminuer le gaz dans l'industrie, chauffage bâtiments

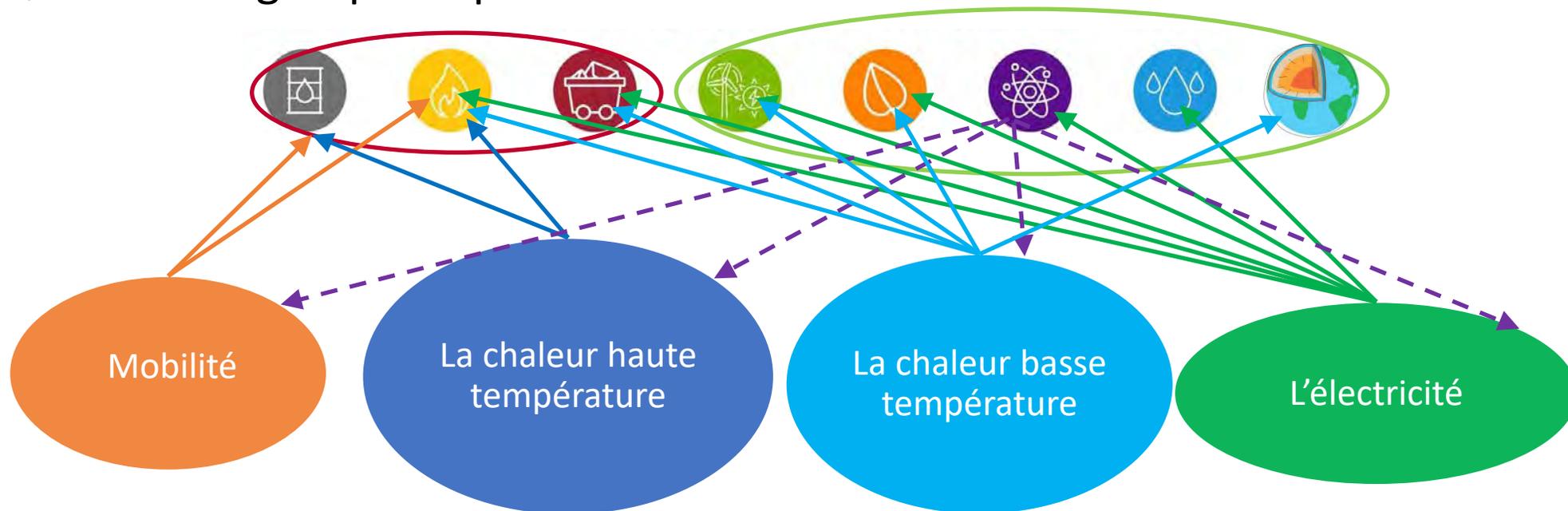
(Chiffres Clés de l'Énergie, Edition 2023)

# La transition énergétique

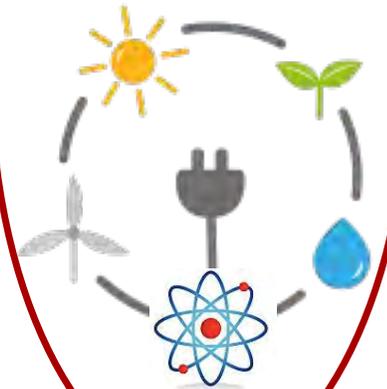
❑ Passer des sources d'énergies fossiles aux sources d'énergies bas carbone.



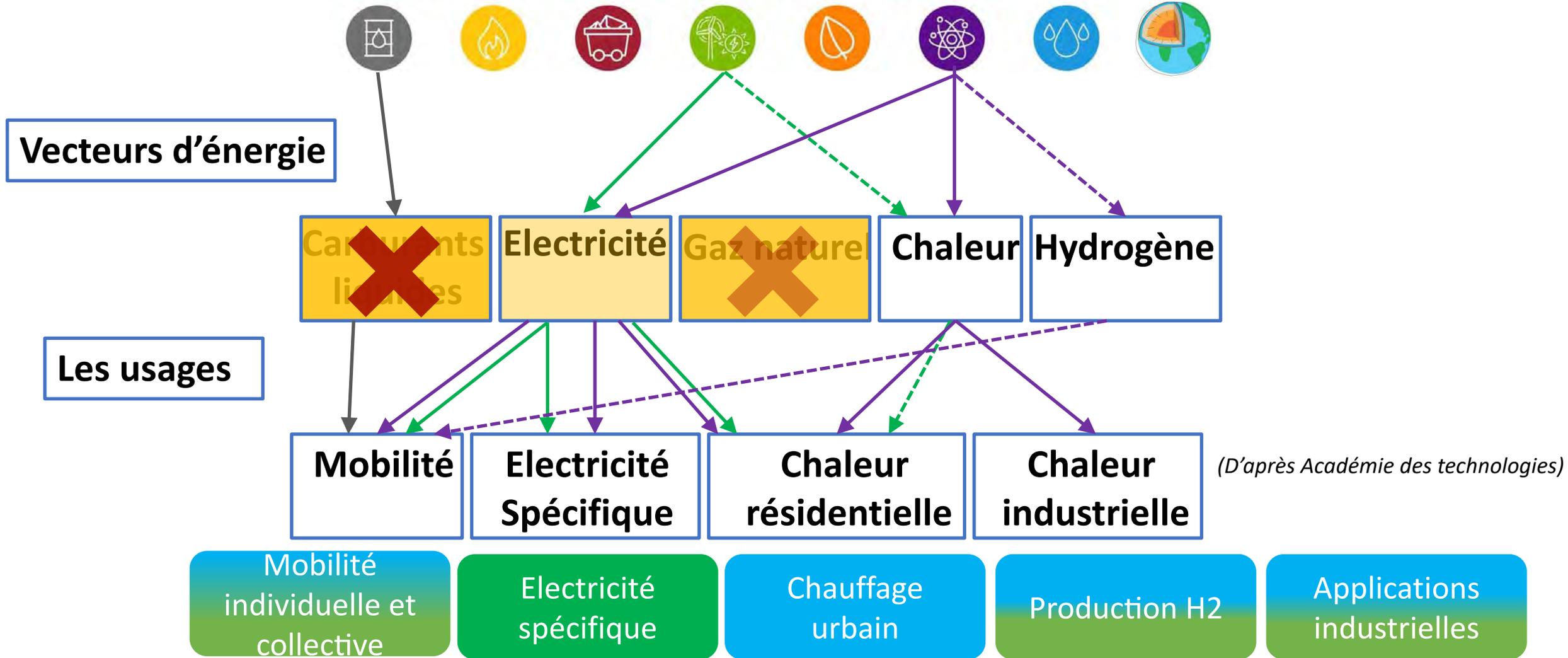
❑ Quelles énergies pour quels besoins?



Sources  
d'électricité  
bas-carbone



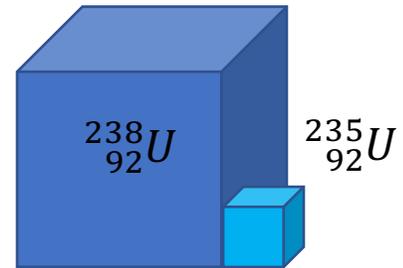
# Les énergies primaires, les vecteurs et les usages



(D'après Académie des technologies)

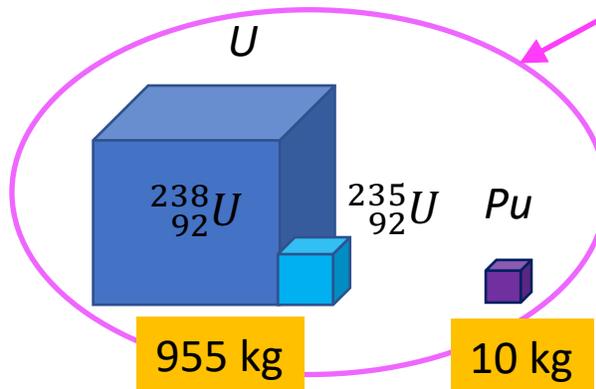
# Le combustible nucléaire

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

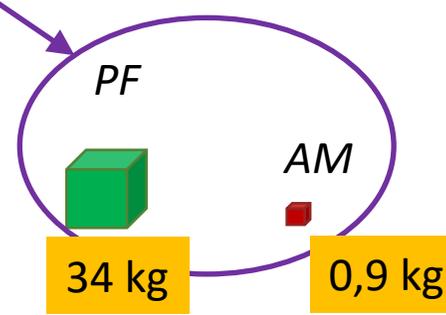


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes

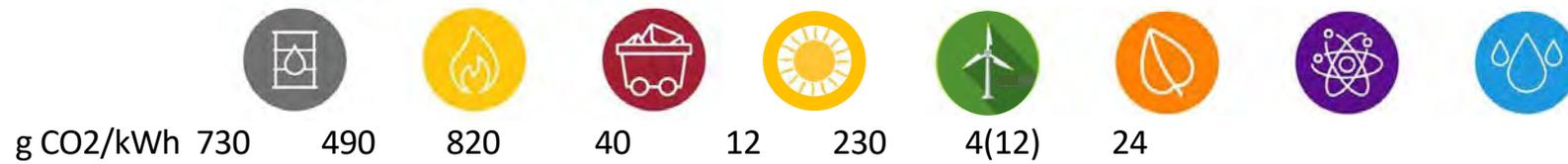


Après passage en cœur :

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

# Quels avantages pour la transition énergétique?

☐ L'énergie nucléaire est une énergie bas carbone.



(Source GIEC)

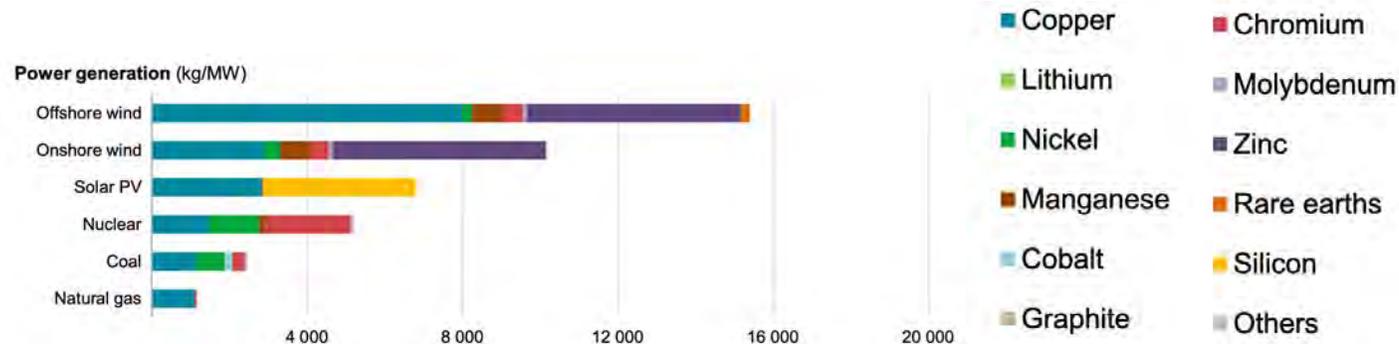
☐ L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée.



100 g d'uranium    600 kg de GNL    1 t de pétrole    1,5 t de charbon    2,5 t de bois

(Source Sfen)

☐ L'énergie nucléaire a une empreinte matériaux faible.



(Source IAE, 2021)

# Quels inconvénients à l'énergie nucléaire?

## ❑ Freins dus aux peurs de l'opinion publique :

- Accidents nucléaires,
- Production de déchets radioactifs.

Tchernobyl



Fukushima Dai-ichi

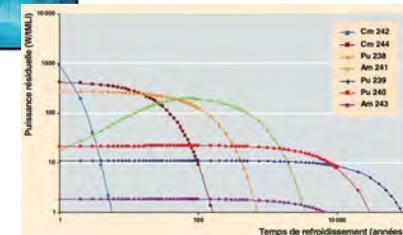


## ❑ Freins intrinsèques à l'utilisation de l'énergie nucléaire :

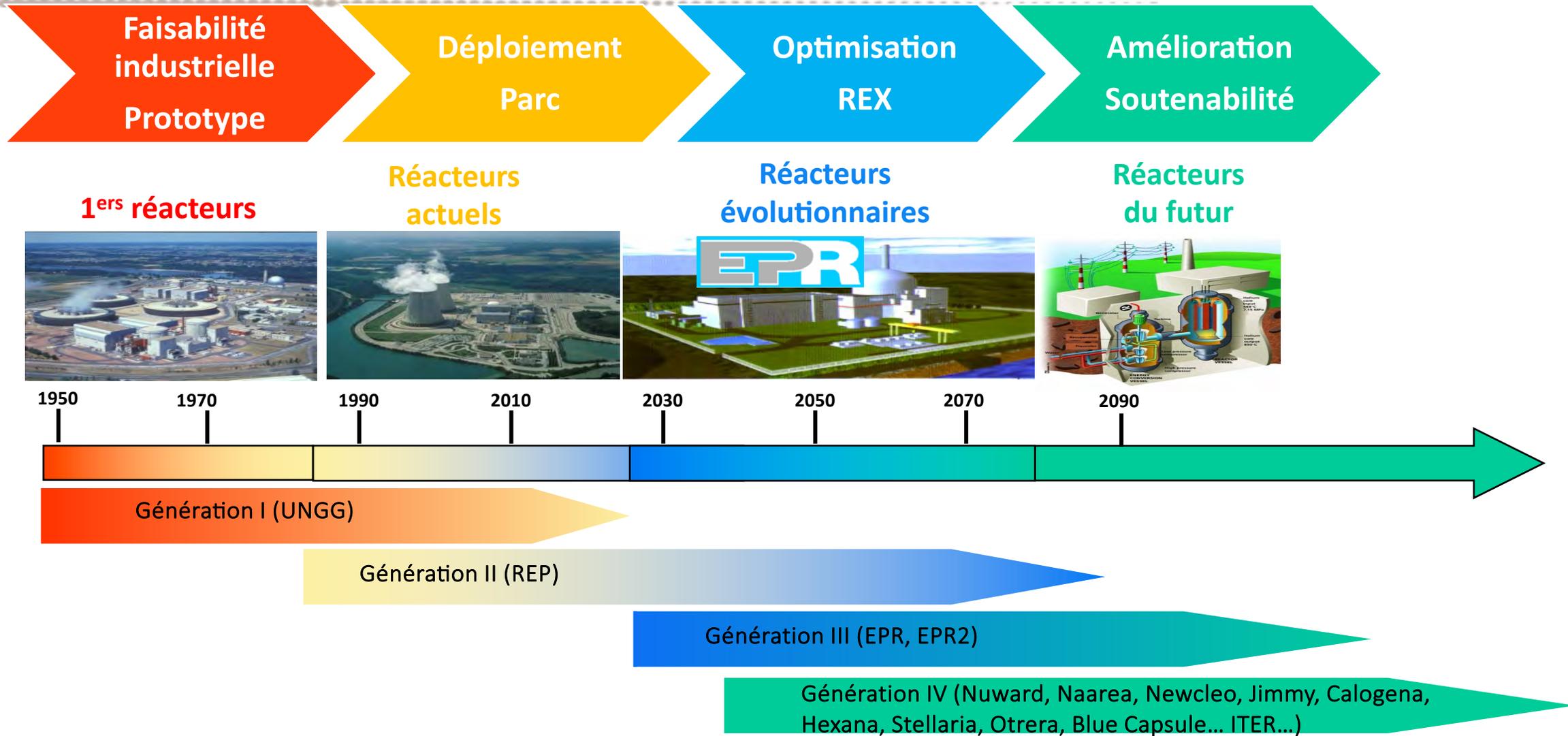
- Coût d'investissement élevé (toutes filières),
- Arrêts pour rechargement : perte de disponibilité,
- Mauvaise utilisation de l'uranium,
- Contraintes d'exploitation résultant de l'enceinte de confinement,
- Puissance résiduelle à évacuer (toutes filières).



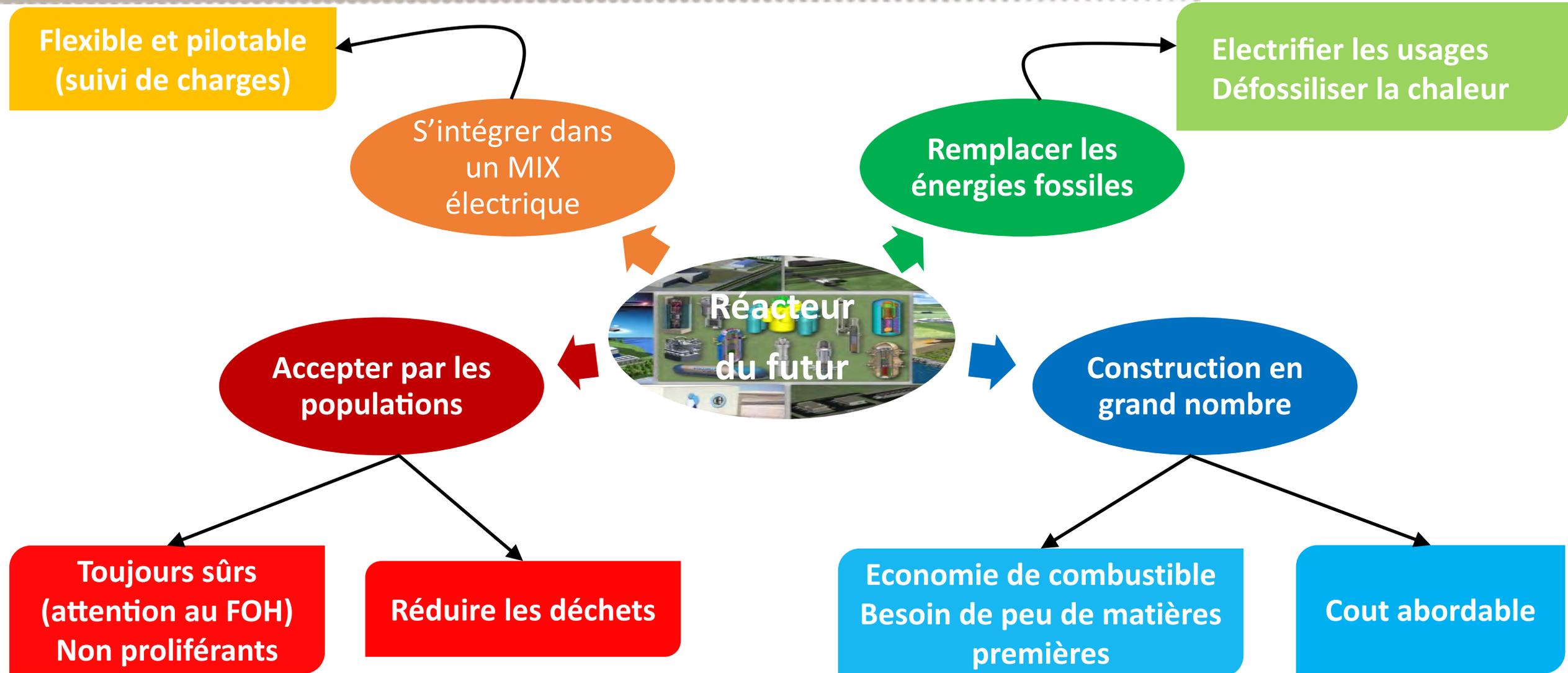
(source Wikipédia, IRSN, TI BN3296, CEA)



# Les différentes générations de réacteurs



# A quoi doit répondre un réacteur du futur?



# 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 70 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.
- ❑ 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

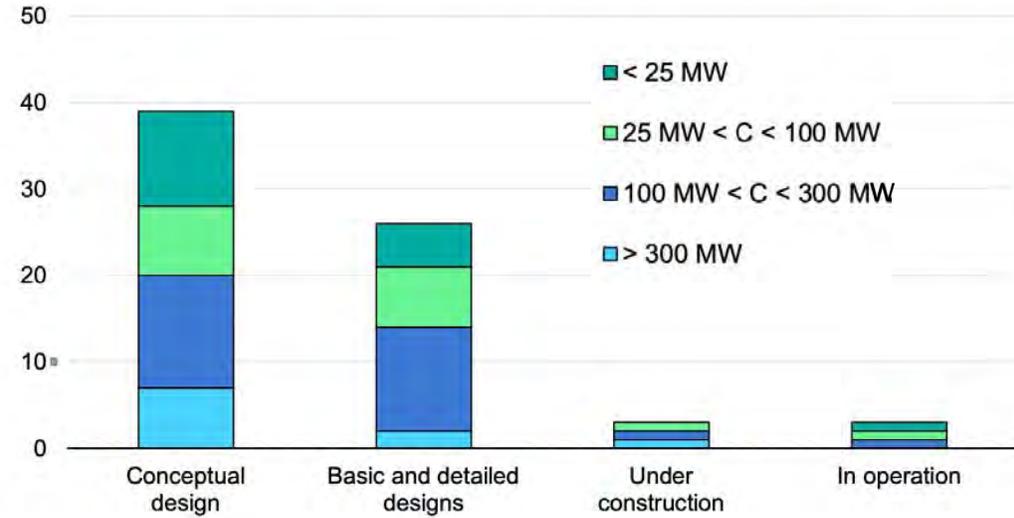


(Photos Source AIEA)

# Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



Où en sont-ils?



(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

- Urgence climatique
- Souhait de souveraineté nationale
- Dynamisation de l'innovation et progrès technologiques
- Nouveau éco-système économique

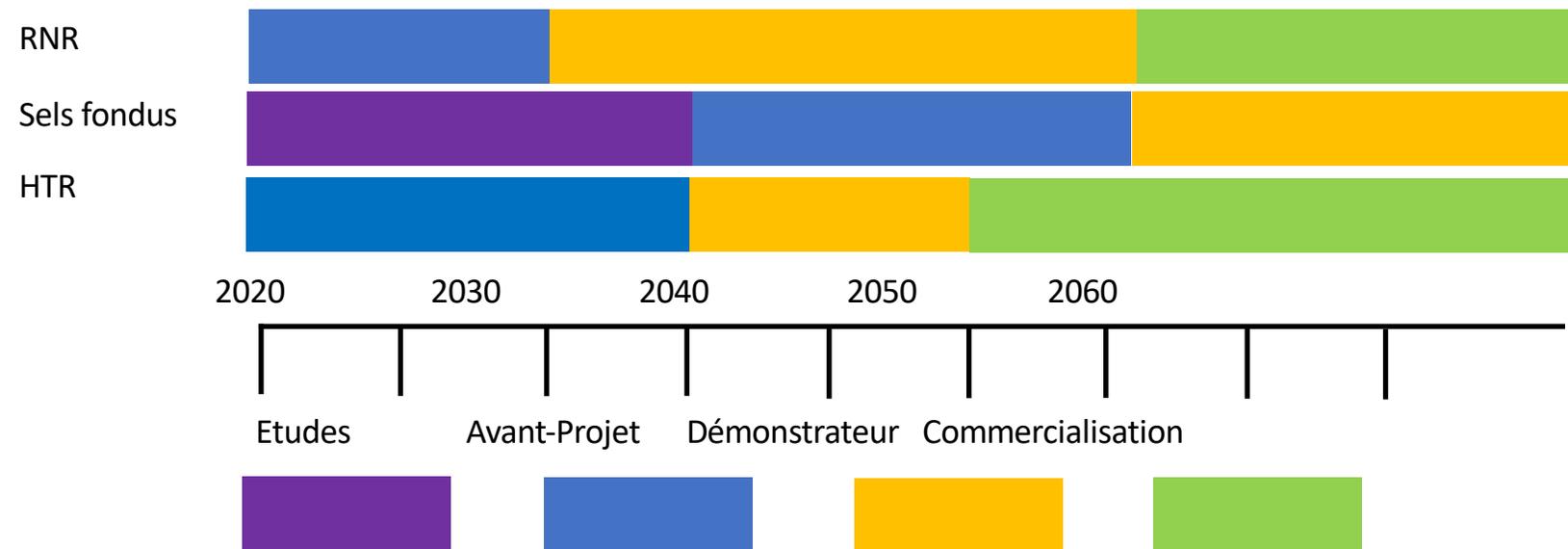
# Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

## ❑ 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

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



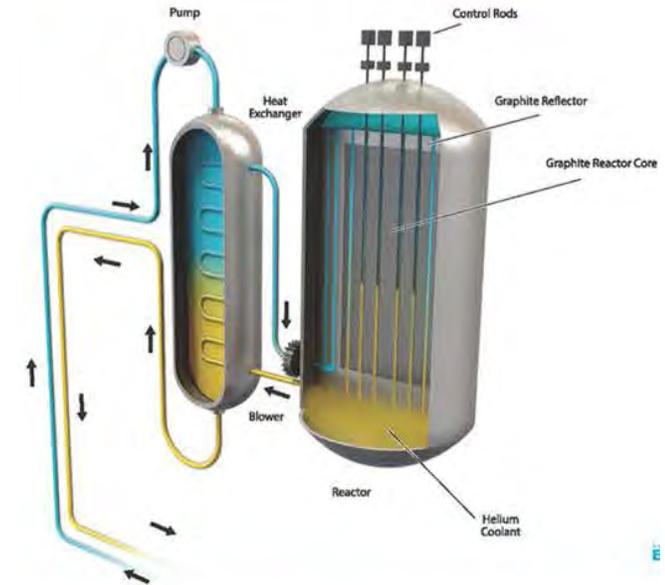
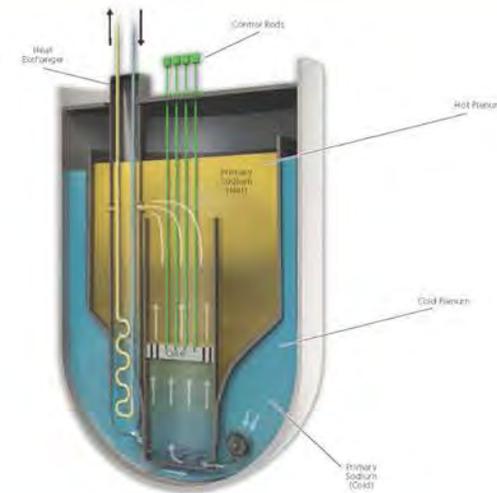
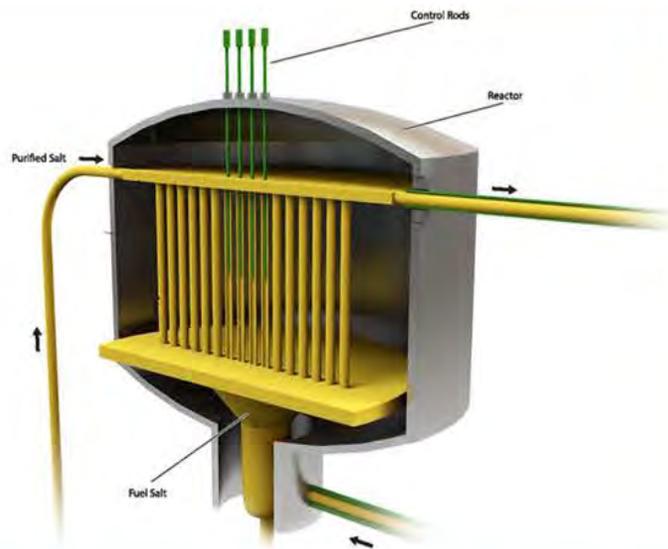
# Les concepts disruptifs en France



Jimmy



**BLUE**  
CAPSULE



Réacteurs à sels fondus

Réacteurs à neutrons rapides

Réacteurs à haute température

# Evolution des technologies de fission

Parc REP



Amélioration  
continue

Technologie  
maîtrisée

Verrous  
scientifiques,  
technologiques  
ou industriels

EPR, EPR2

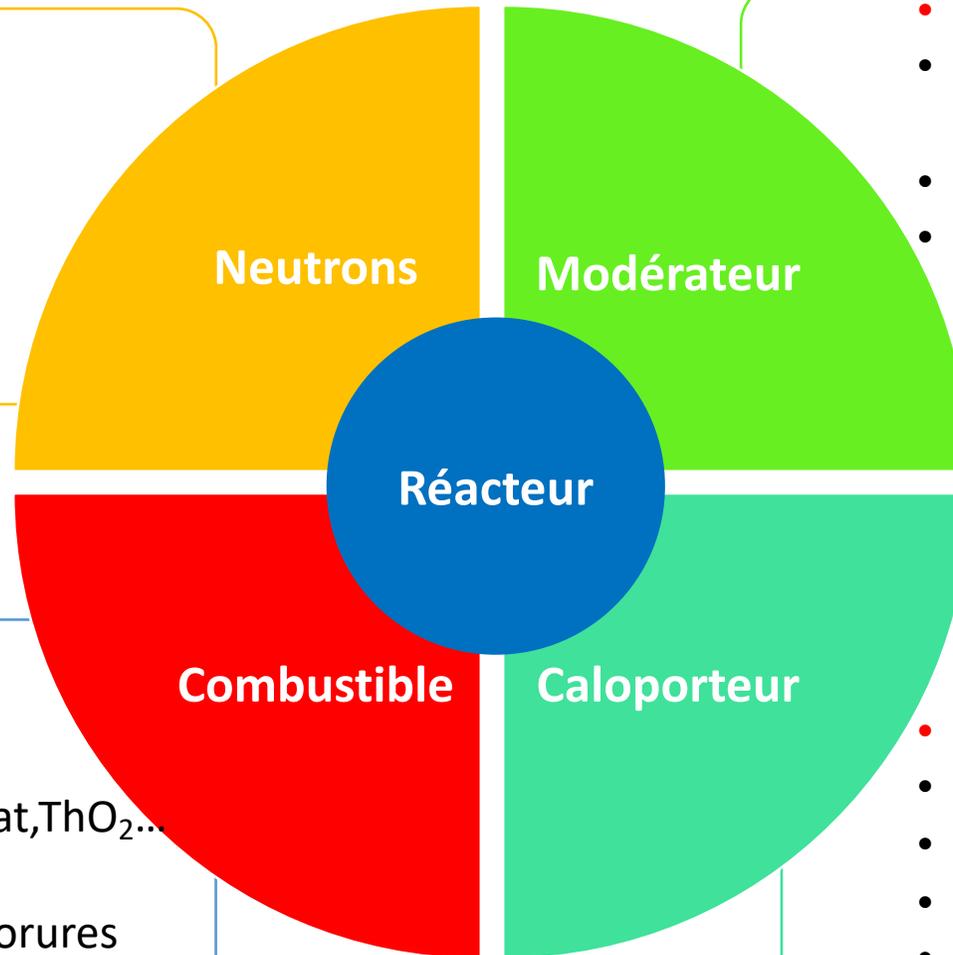


# Les multiples filières de réacteurs

- **Nombre suffisant**
- Neutrons thermiques ou rapides

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

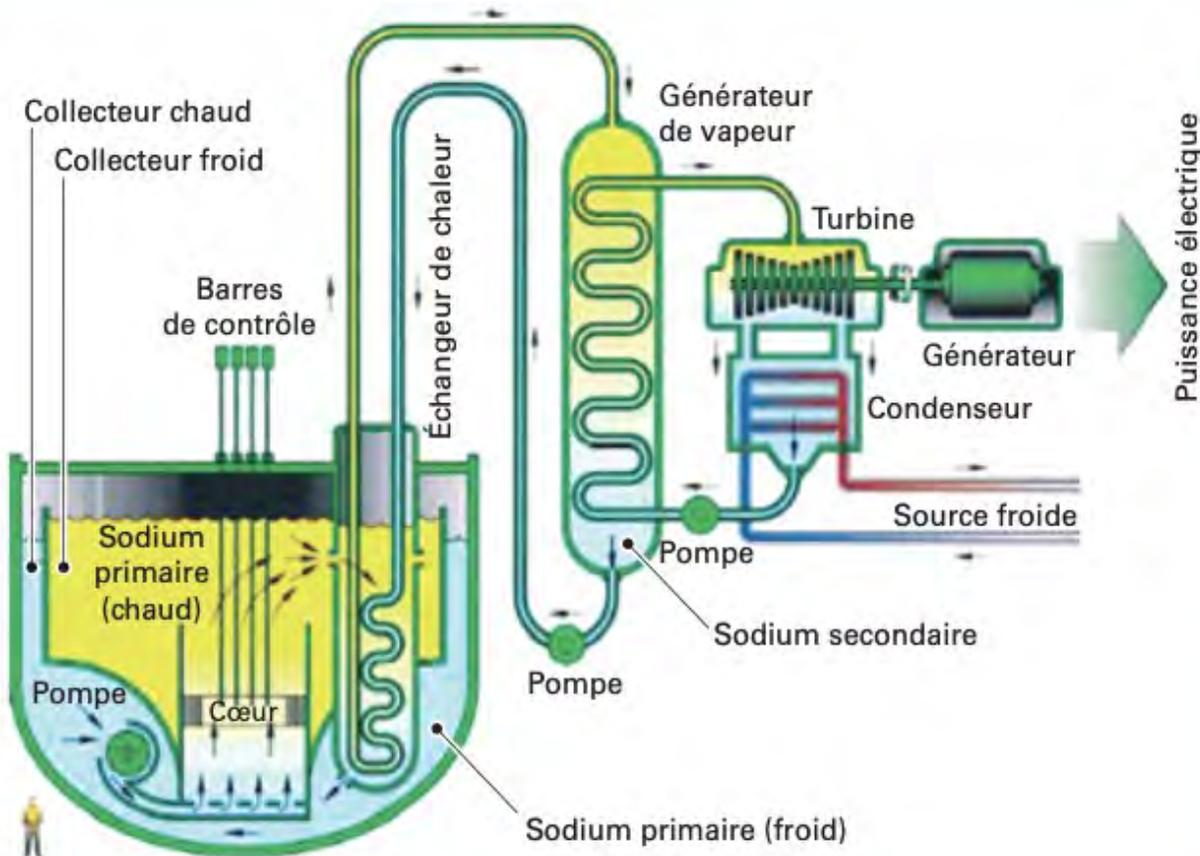
- **Noyaux fissiles et/ou fertiles**
- Combustible solide:  $\text{UO}_2$ , MOX, Unat,  $\text{ThO}_2$ ...
- Combustible liquide:  
 (U/Pu ou Th/U) + sels fluorures ou chlorures



- **Peu d'absorptions des neutrons**
- Bon ralentissement des neutrons:  
 Noyaux légers (H, D, Be, C,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,...)
- Transparent
- Non dangereux

- **Bonne capacité à transporter la chaleur**
- Liquide (Eau, eau lourde)
- Gaz (hélium,  $\text{CO}_2$ )
- Sels liquide fluorure
- Métal liquide (sodium, plomb...)

# Réacteur à neutrons rapides



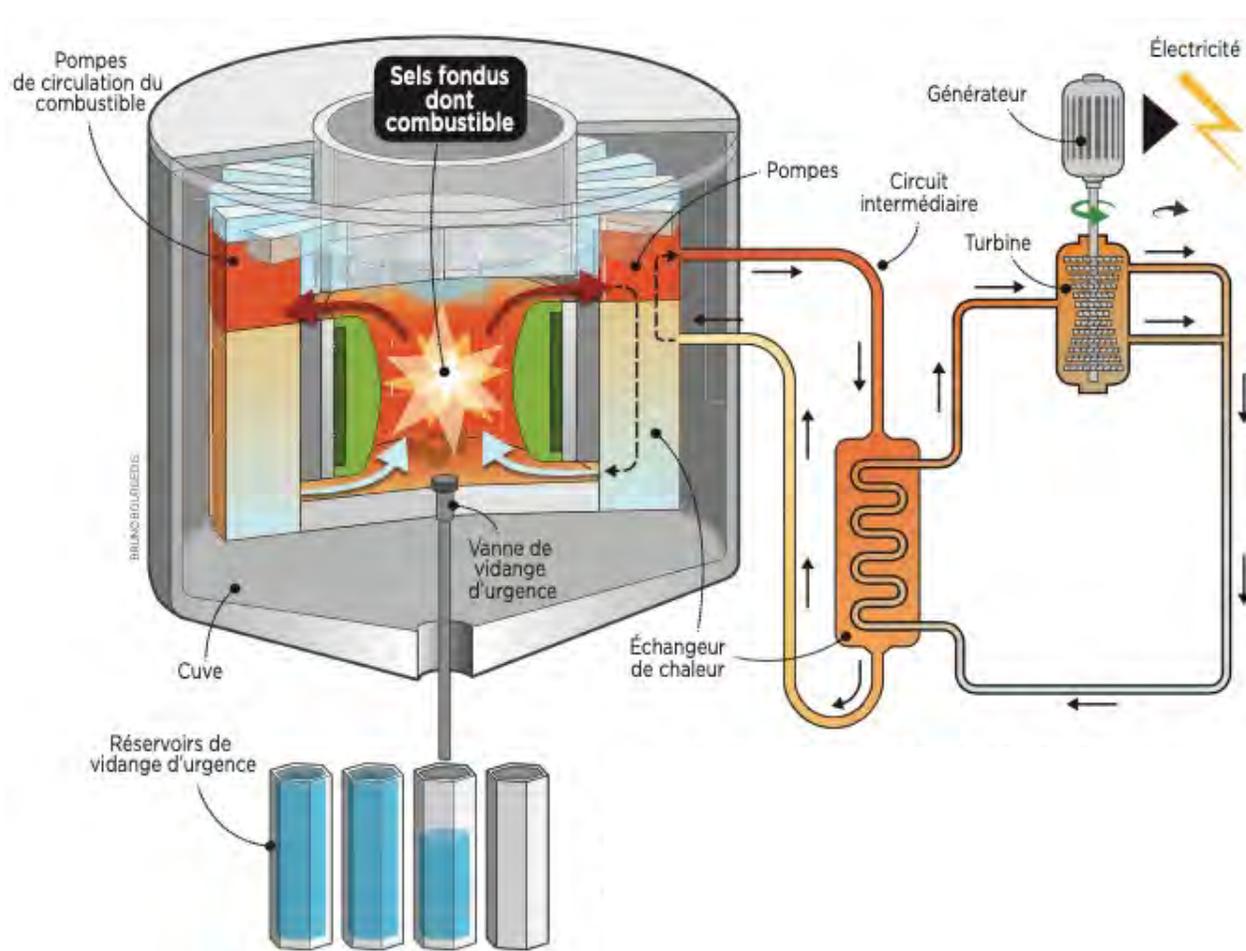
(Source Techniques de l'ingénieur, dossier BN3230)

- ❑ Combustible : mélange  $UO_2$ - $PuO_2$  (15-20% de Pu)
- ❑ Pas de modérateur (neutrons rapides)
- ❑ Caloporteur: sodium liquide (autres options comme Pb)
- ❑ Capables de fabriquer autant de matière fissile qu'ils n'en consomment : utilisation U-238.
- ❑ Augmentation d'un facteur entre 50-100 environ l'énergie que l'on peut tirer de l'uranium par rapport aux réacteurs actuels.
- ❑ 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: cout élevé+ sûreté liée au sodium
- ❑ Start-up en France : Newcleo (avec du plomb liquide), Hexana et Otrero (avec du Na liquide).

## 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 pensée 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<sup>er</sup> prototype au thorium mis en service: TMSR-LF1

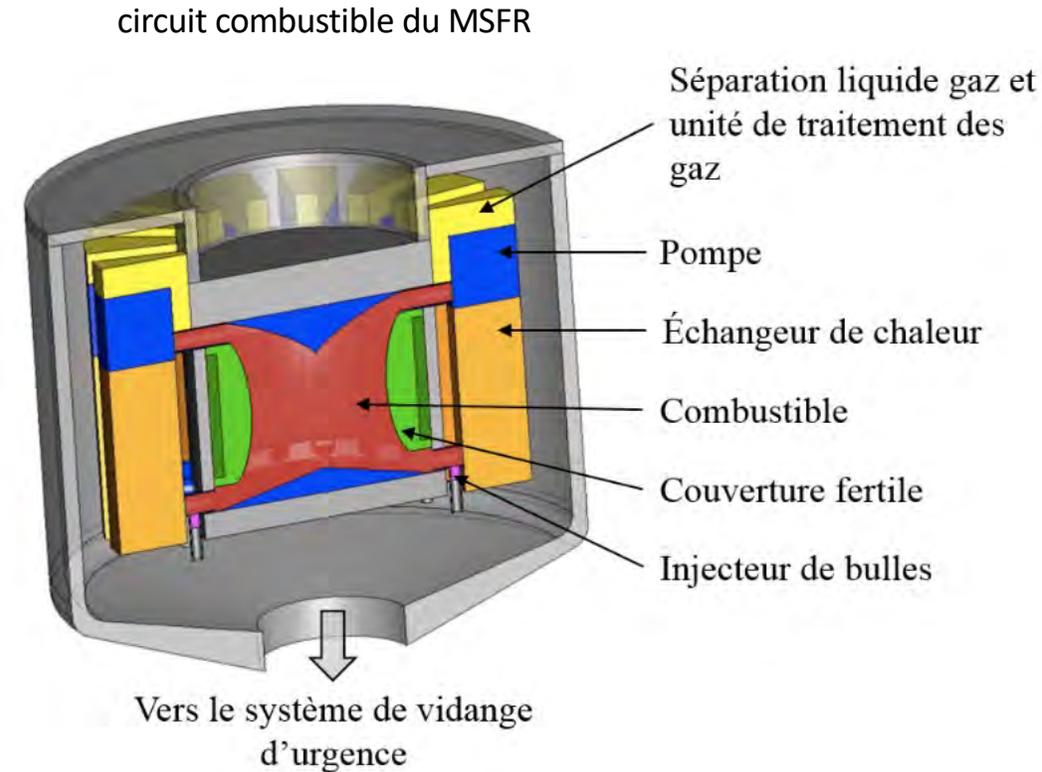
# Avantages et Verrous de la filière sels fondus

□ 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.

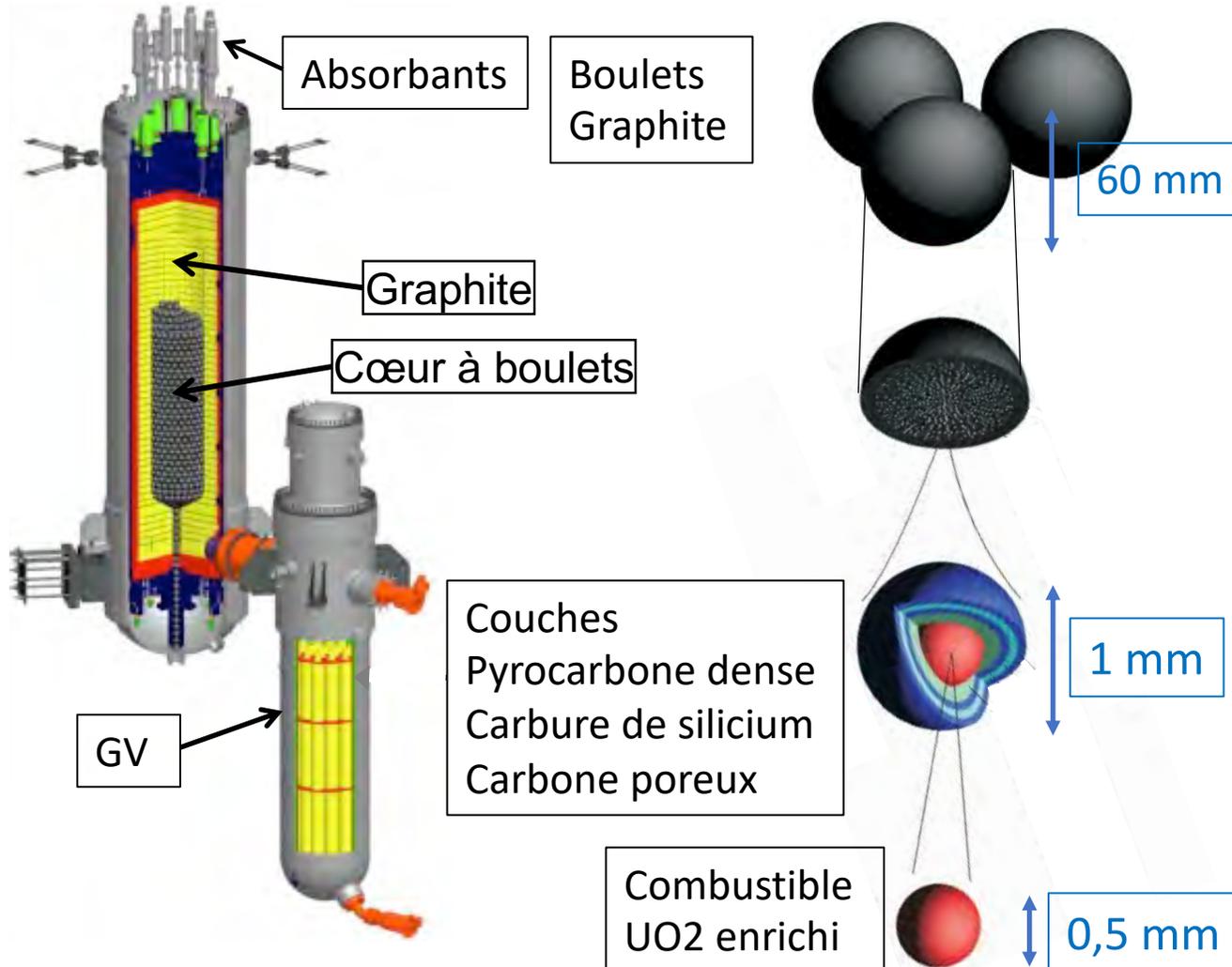
□ Verrous technologiques :

- 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.



(Source Thèse de Doctorat, Delphine Gerardin, 2018)

# Réacteur à haute température



- ❑ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ❑ 1<sup>er</sup> 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  $T^{\circ}$ .
- ❑ Combustible céramique sphérique de  $D < 1\text{mm}$  (TRISO) (sûreté).
- ❑ Haute température produite autour de  $600^{\circ}\text{C}$  (voire plus).
- ❑ 1/3 des concepts des start-up sont des HTR.
- ❑ La Chine a mis en service un HTR (2 réacteurs,  $P=200$  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/>)

# Les différents combustibles

## RÉACTEUR À EAU PRESSURISÉE (PARC ACTUEL ET EPR)



## RÉACTEUR DE GEN IV (RNR)



À BASE DE



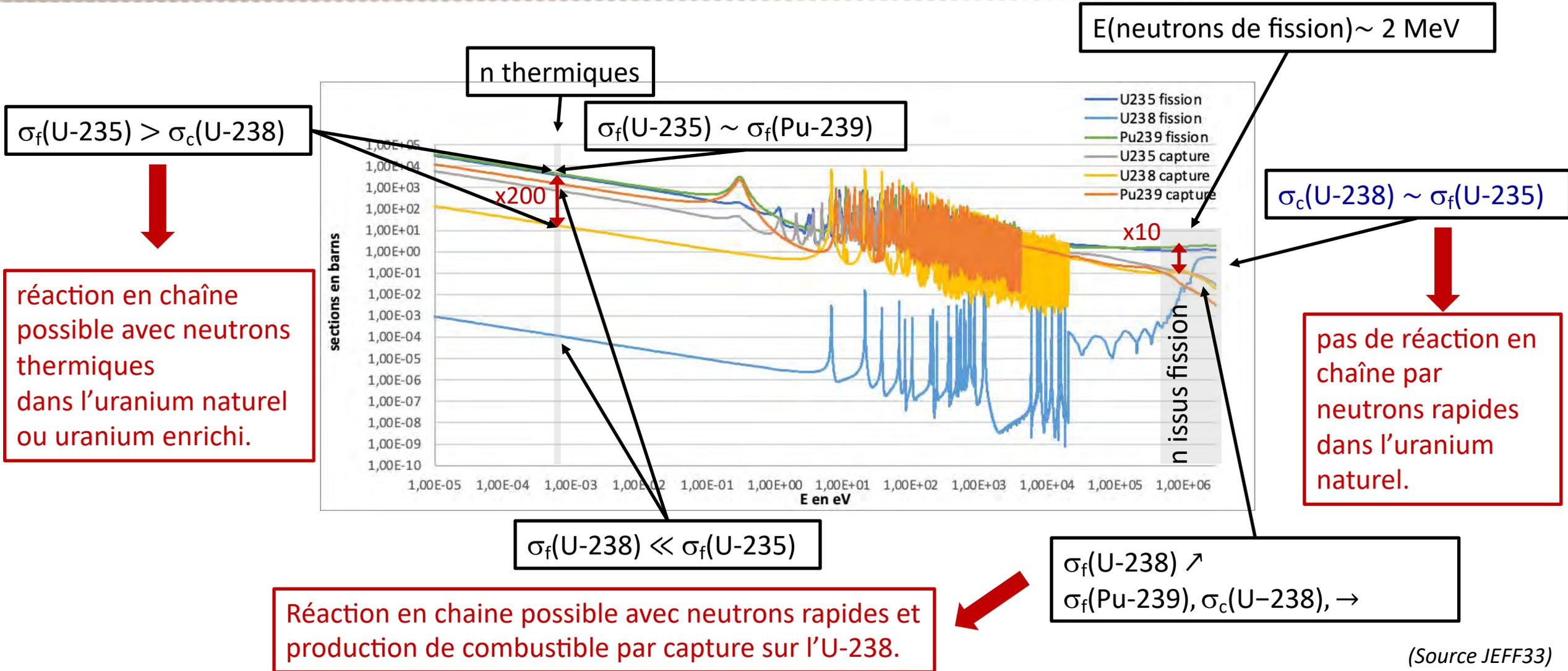
UTILISATION  
EN COURS

UTILISATION  
INTERROMPUE  
(Projet de reprise  
à l'horizon 2023)

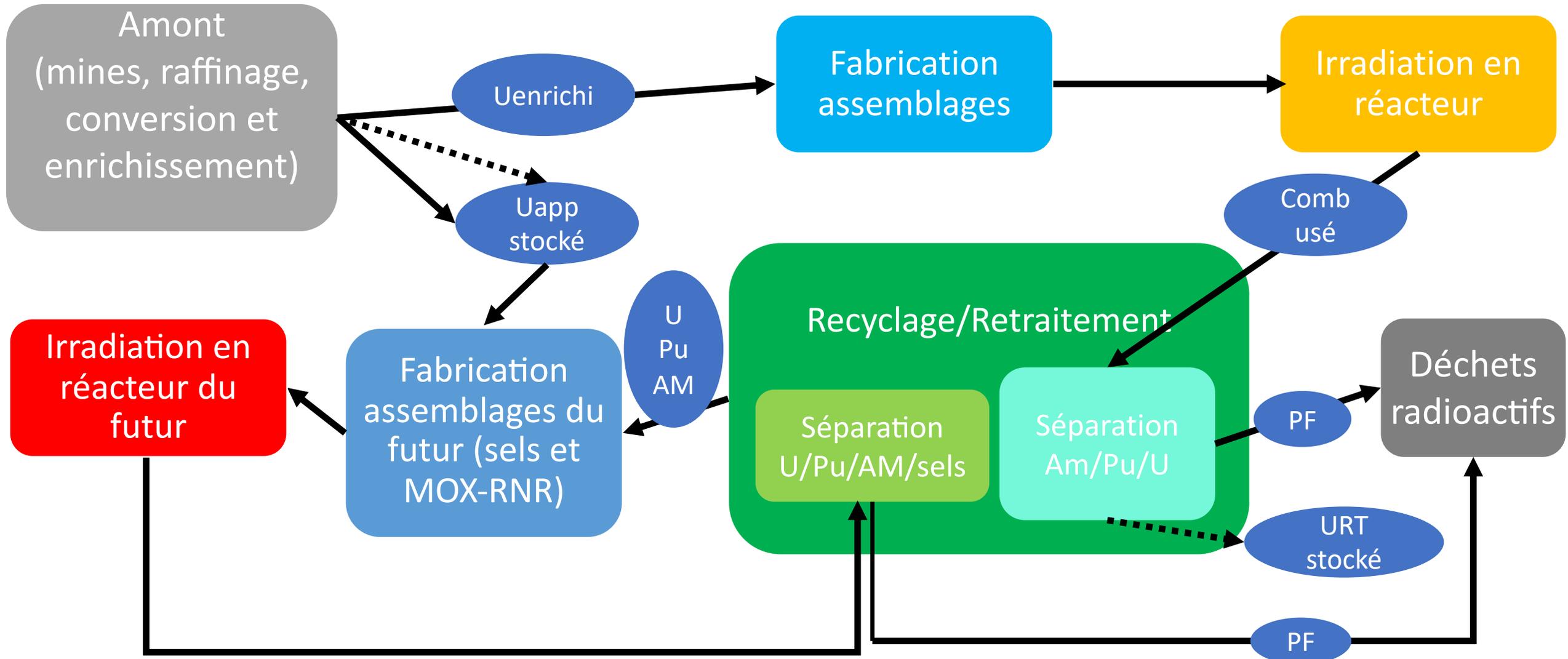
UTILISATION  
FUTURE

(Source PPNGMDR 2022)

# Sections efficaces microscopiques

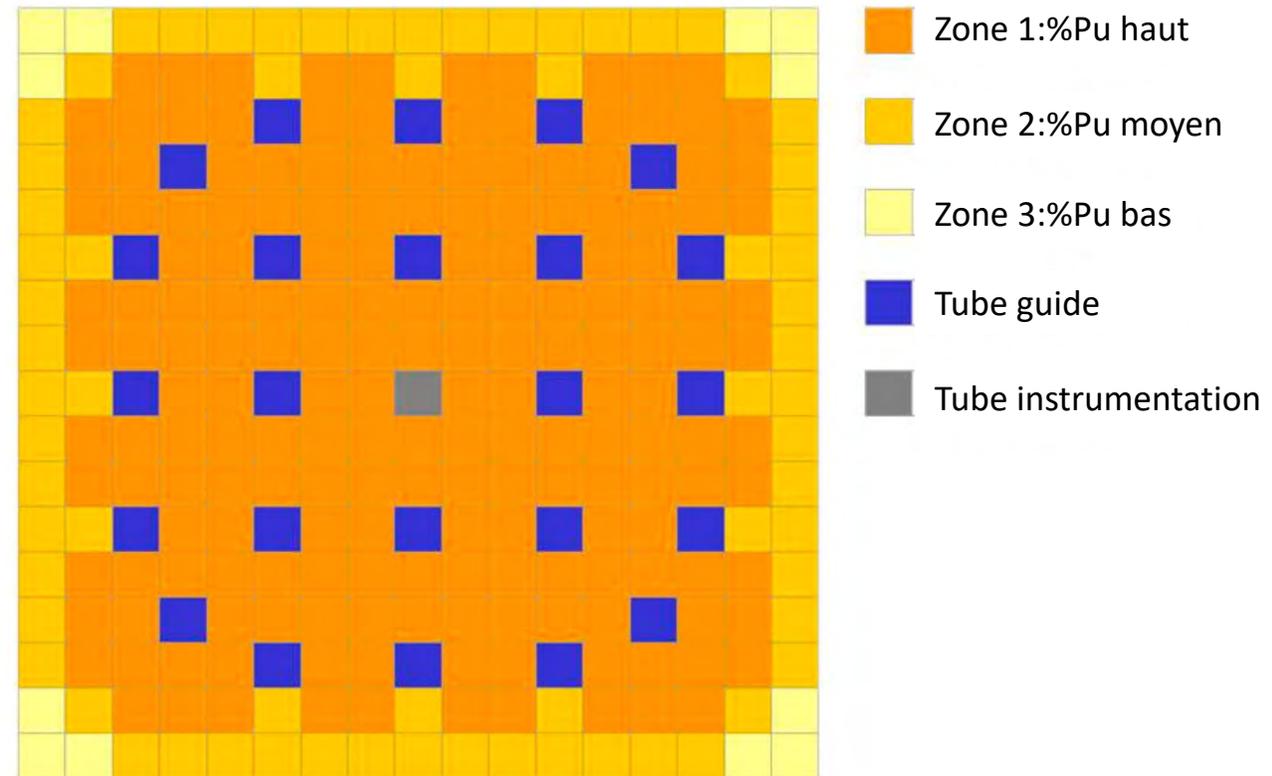


# Cycle du combustible pour le futur



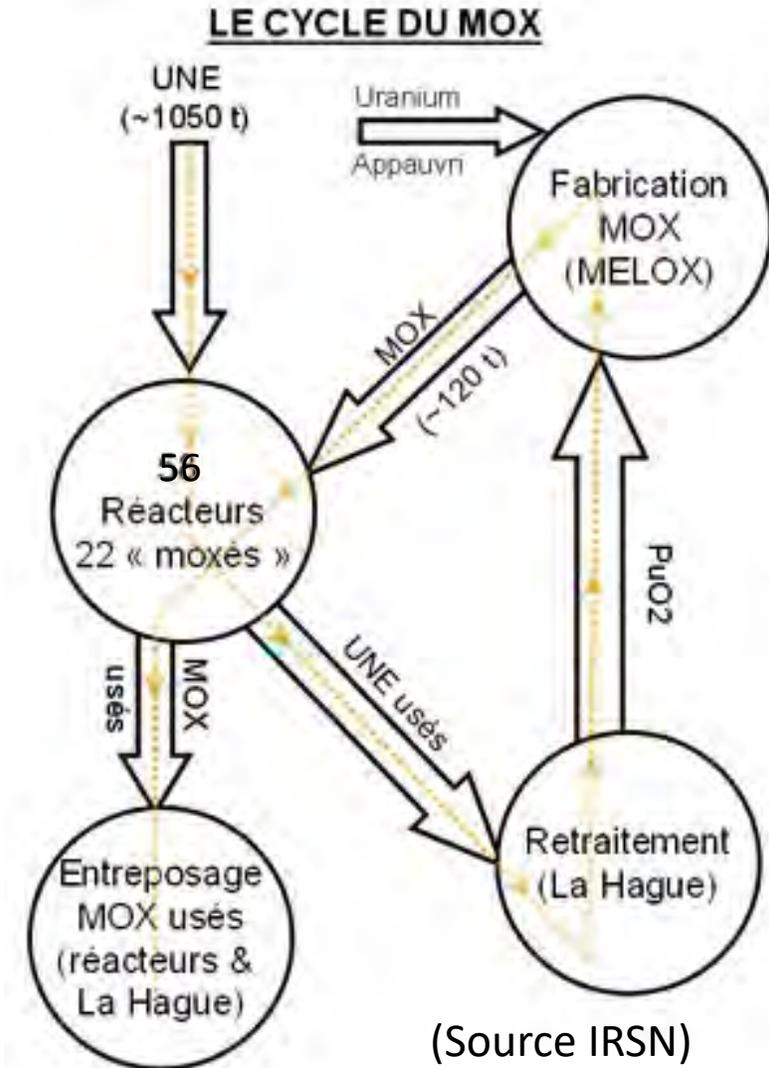
# Recyclage du plutonium problèmes

- ❑ Combustible MOX =  $\text{UO}_2$  appauvri + Pu
- ❑ 20 réacteurs en France (900 MWe)
- ❑ L'absorption des neutrons thermiques pour le Pu est 2 fois plus importante que pour l'U :
  - Efficacité des barres de contrôle et du bore soluble diminuée de moitié
  - Teneur Pu limitée (8% autorisé)
- ❑ La remontée du flux aux limites de l'assemblage provoque d'éventuels pics de puissance locaux qui seront compensés par le zonage des assemblages MOX: 1/3 de MOX dans les REP.
- ❑ Dégradation vecteur isotopique
  - Retraitement MOX ?
  - REP Multi-recyclage ?

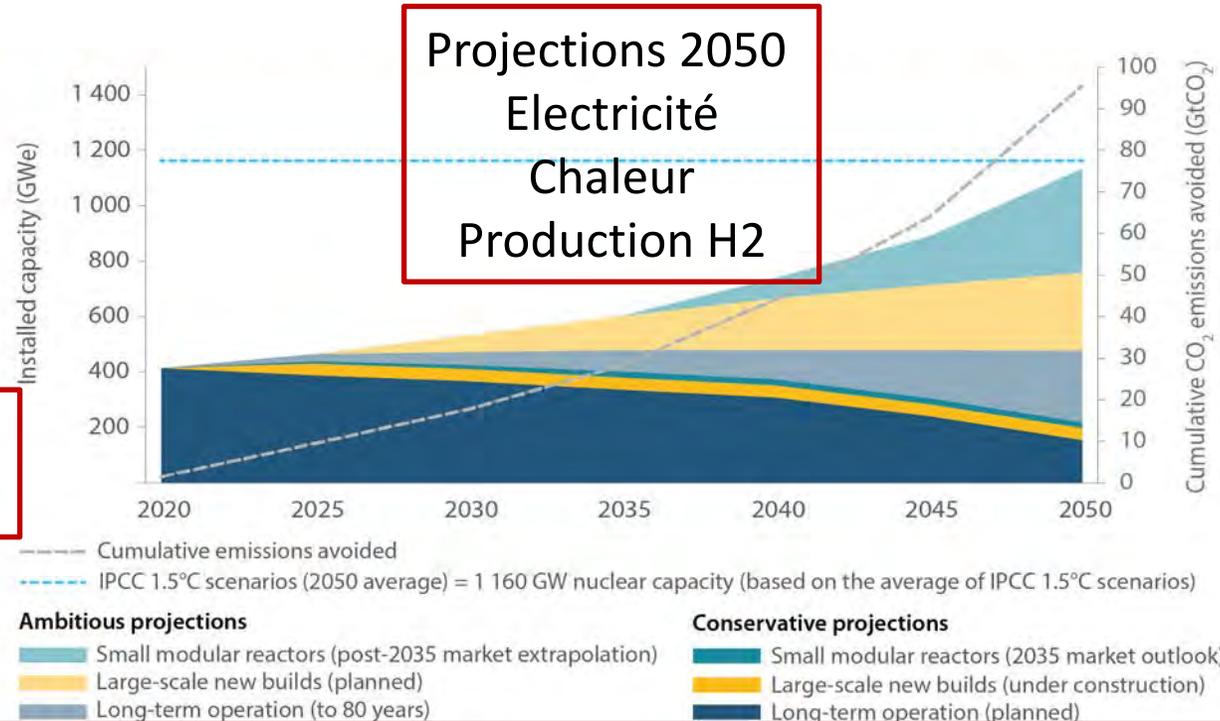


# Combustible Mixed OXides

- ❑ **Mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium provenant du recyclage du combustible utilisé des centrales nucléaires. (usine de la Hague)**
- ❑ Le recours aux combustibles MOX a débuté en 1987
- ❑ Pour les réacteurs d'EDF, la consommation annuelle d'uranium naturel est de l'ordre de 8 400 tonnes et celle de combustibles MOX de 120 tonnes, soit une économie annuelle d'environ 900 t d'uranium naturel.
- ❑ **Constitué d'un mélange d'environ 92 % d'uranium « appauvri » (sous-produit des usines d'enrichissement de l'uranium) et de 8 % de plutonium.**
- ❑ Le MOX contribue à la production de 10% de la production électrique nationale
- ❑ Le MOX est utilisé dans 22 réacteurs de 900 MW. (Tricastin, Dampierre, Gravelines, St Laurent, Blayais et Chinon). 24 réacteurs sont autorisés à l'utiliser.
- ❑ Après utilisation en réacteur, le MOX utilisé sont entreposés dans les piscines de La Hague, en attente d'un traitement ultérieur.



# Potentiel de l'énergie nucléaire



## 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.