

# Un panorama complet sur l'énergie nucléaire

**Emmanuelle Galichet**

**Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires**

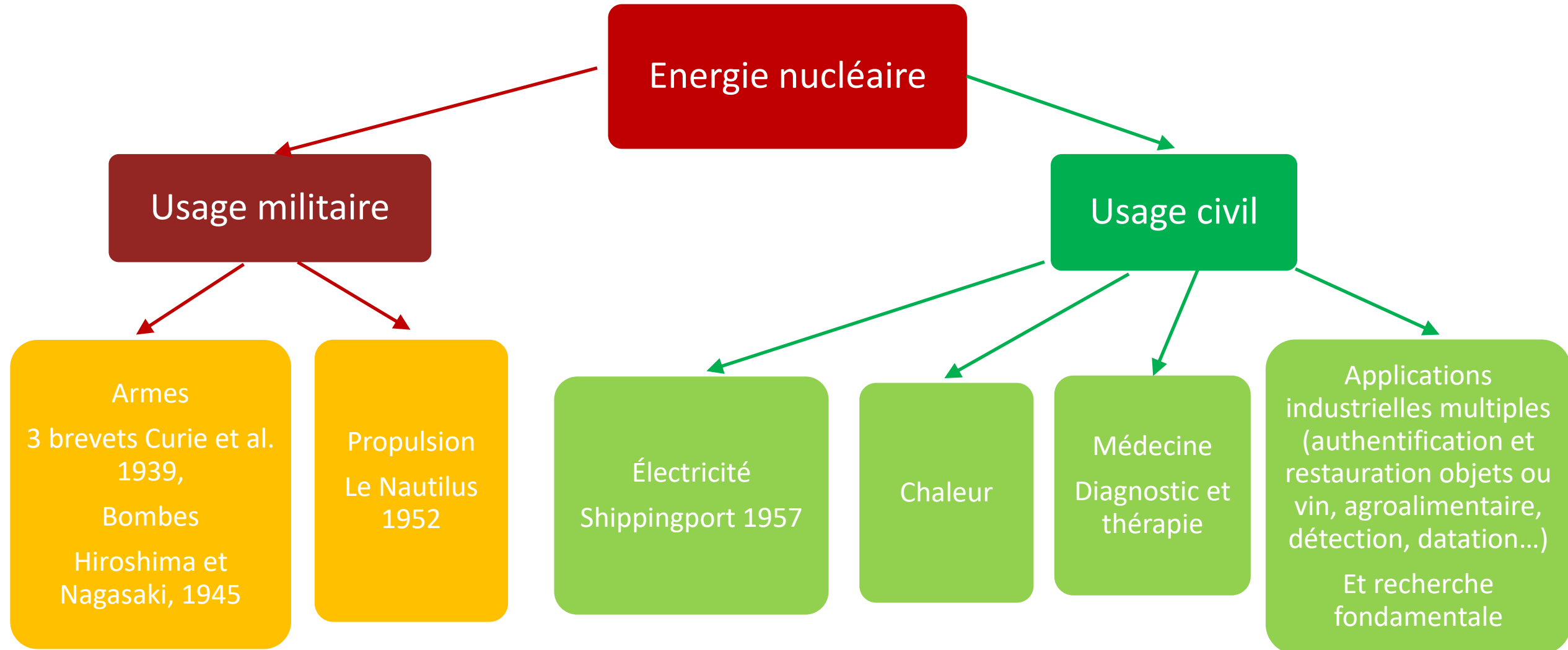
**Le Cnam**

**Présidente Win France**

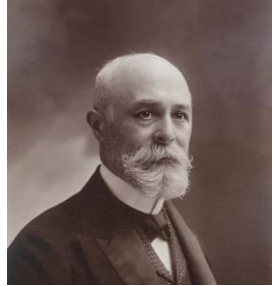


## 3. Histoire et état actuel de la filière

# Dualité d'usage



# Les grandes étapes d'une découverte fondamentale



Wilhelm Röntgen Henri Becquerel



Marie Curie

Pierre Curie

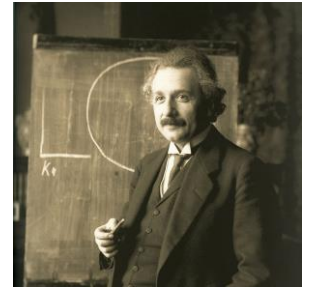


Lise Meitner et Otto Hahn

- ❑ 1895 : Wilhem Röntgen découvre les rayons X.
- ❑ 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité  $\alpha$ .
- ❑ 1897 : Marie Curie débute sa thèse de doctorat.
- ❑ 1898 : Pierre et Marie Curie découvrent l'existence de deux éléments radioactifs, le radium et le polonium.
- ❑ 1903 : Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie obtiennent le Prix Nobel de physique.
- ❑ 1905 : Albert Einstein énonce son équation  $E=mc^2$ .
- ❑ 1934 : Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle.
- ❑ 1938 : Lise Meitner, Otto Hahn et Fritz Strassmann découvrent la fission.
- ❑ 1939 : 3 brevets déposés par l'équipe de Joliot Curie.
- ❑ 1942 : Enrico Fermi construit la 1<sup>ère</sup> pile atomique.



Irène Curie et Frédéric Joliot

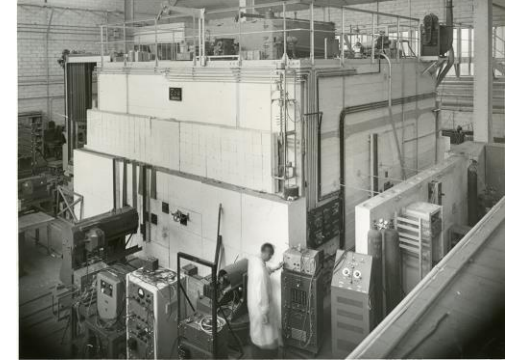


Albert Einstein



Enrico Fermi

# Histoire du programme nucléaire français

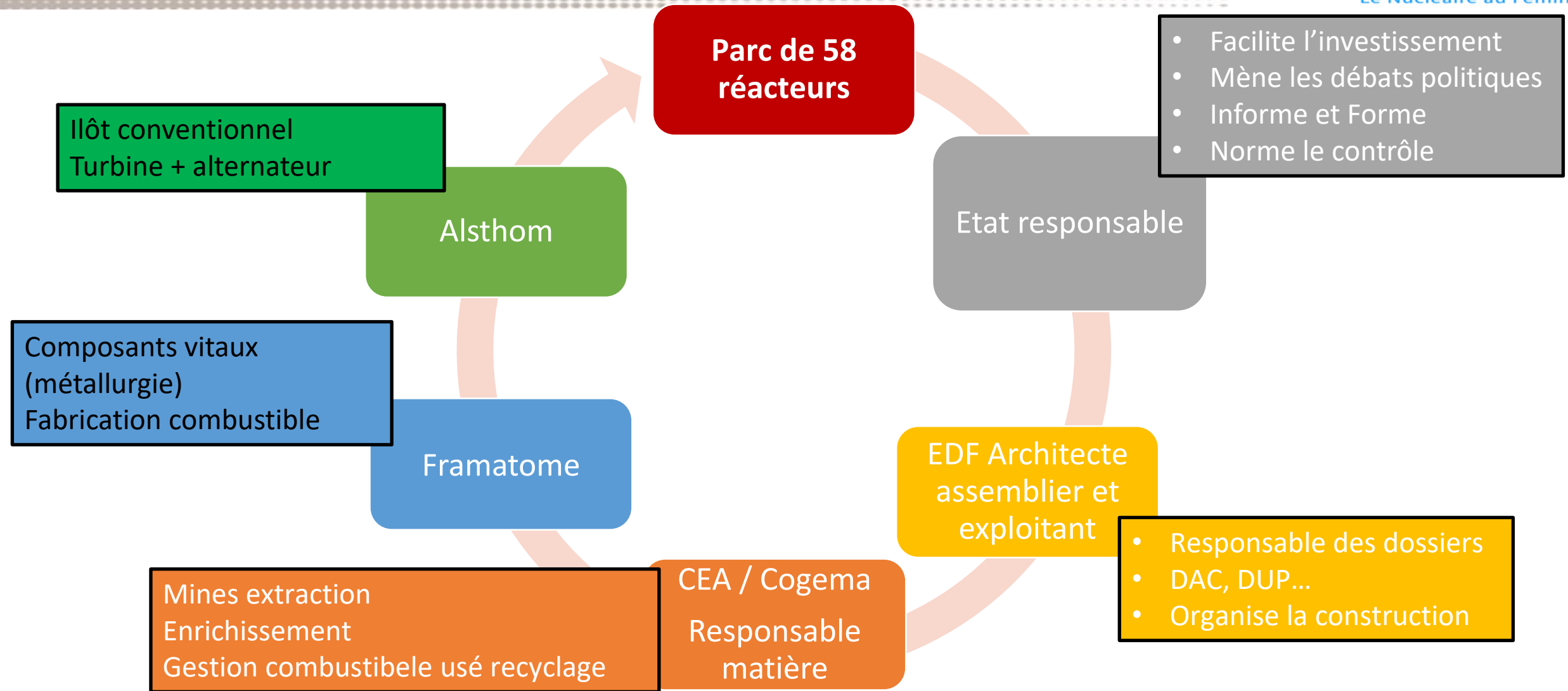


- ❑ 1945 : création du CEA, avec pour mission de conduire des recherches pour développer une capacité nucléaire civile comme militaire.
- ❑ 15/12/48: la pile Zoé diverge.
- ❑ 1954: le gouvernement de Pierre Mendès France décide de doter la France de l'arme nucléaire.
- ❑ 13/02/60 : 1<sup>er</sup> essai nucléaire français à Reggane, dans le désert du Sahara.
- ❑ 14/08/64 : le PAT (prototype à Terre) devient le premier réacteur à eau légère pressurisée d'Europe.
- ❑ 07/71 : le Redoutable, premier sous-marin nucléaire lanceur d'engin (SNLE) prêt pour le service actif.
- ❑ 1973-1974 : plan Messmer: le plus grand projet industriel au monde.
- ❑ 10/10/2018 : le RES (réacteur d'essais) diverge.
- ❑ 02/22 : discours de Belfort : Le Président E. Macron décide de construire 6(+8) EPR2.
- ❑ 03/23 : Le SNA Duguay-Trouin effectue sa première sortie en mer.
- ❑ 7/05/24 : MIS de l'EPR de Flamanville (autorisation de l'ASN).

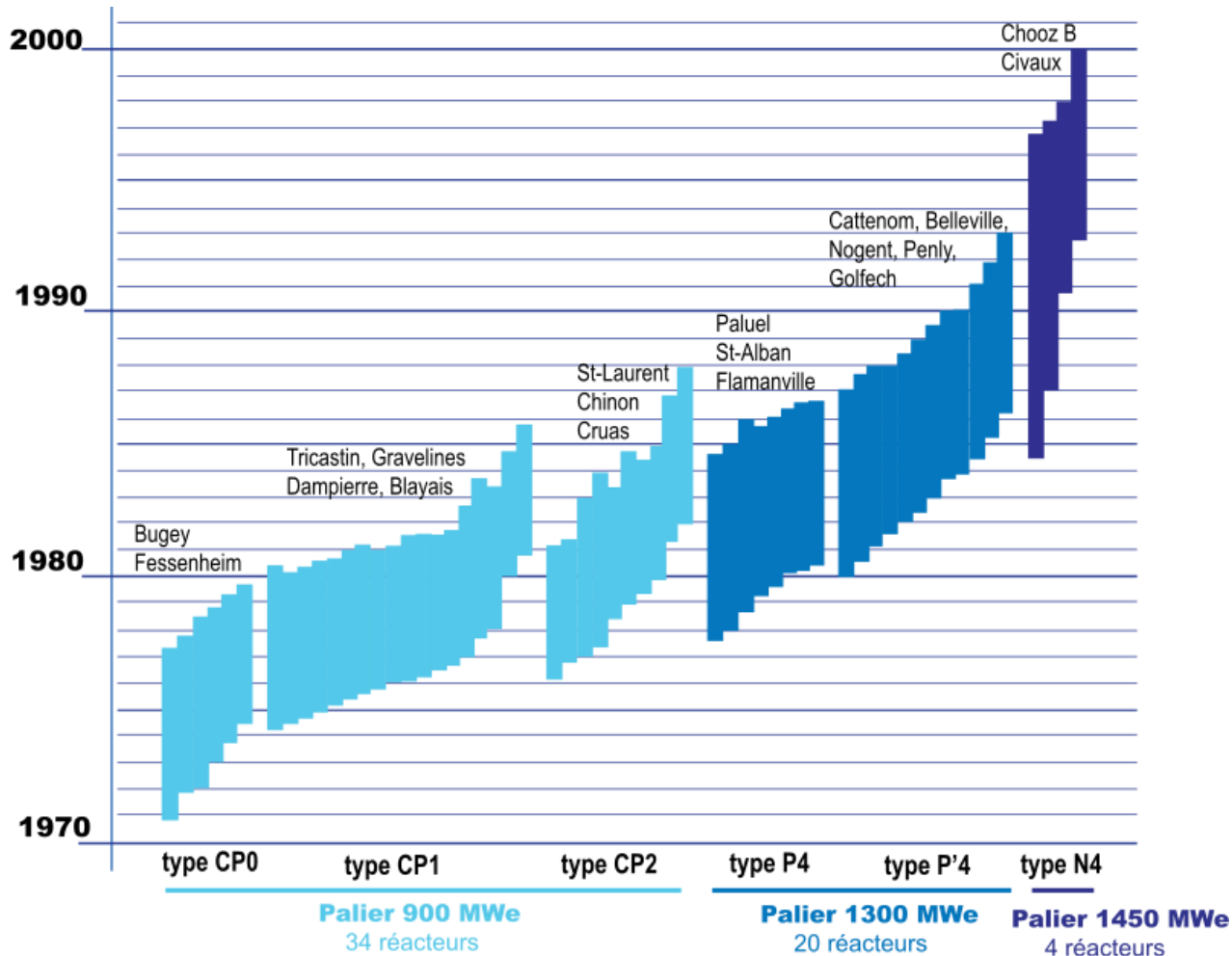
(source EDF)



# Le plan Messmer

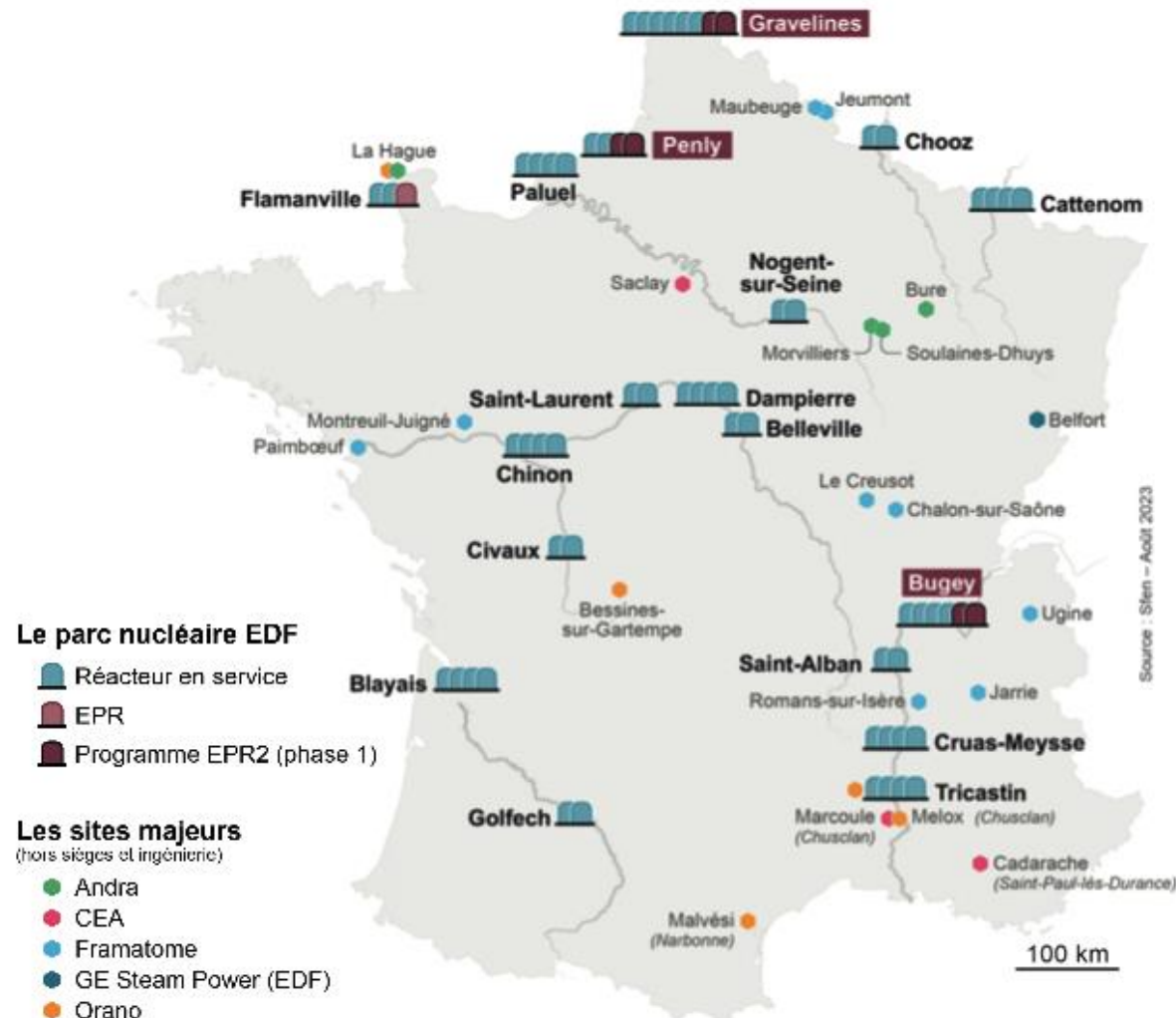


# Planning de construction plan Messmer



- 58 réacteurs construits en 20 ans.
- Couplage réseau:
  - Fessenheim : avril 1977
  - Civaux (1450 MWe) : Décembre 1999
- Age moyen parc = 35 ans
- En 2021, il a produit 360,7 TWh, soit 69% de la production d'électricité en France métropolitaine.

# Le parc français

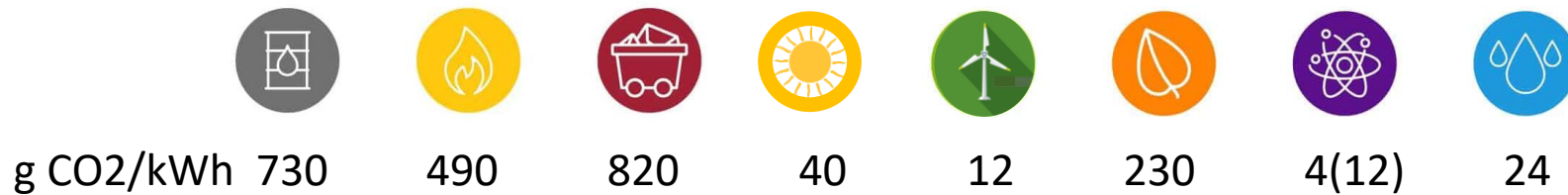


- ❑ Parc actuel : 61,4 GWe installé.
  - 18 sites ; 56 réacteurs REP
  - 32 REP900; 20 REP1300; 4 REP1450.
- ❑ EPR de Flamanville :
  - 1,65 GWe
  - MIS le 8 mai 2024.
- ❑ Projets futurs:
  - 3 paires EPR2 (Penly, Gravelines, Bugey)
  - 4 paires possibles en préparation
- ❑ En démantèlement: Au 1<sup>er</sup> juillet 2022,
  - 14 réacteurs nucléaires ont été arrêtés.



# Quels avantages pour la transition énergétique?

☐ L'énergie nucléaire est une énergie bas carbone.



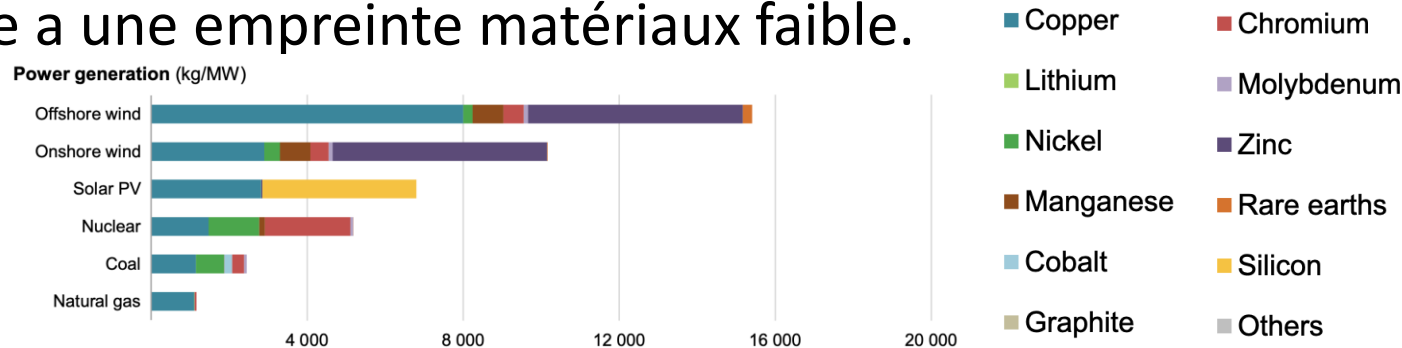
(Source GIEC)

☐ L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée.



(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

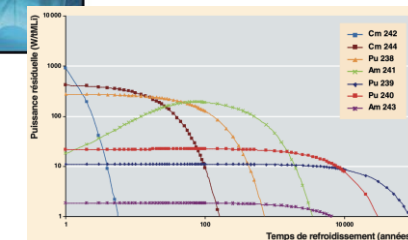


## Freins intrinsèques à l'utilisation de l'énergie nucléaire :

- 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).

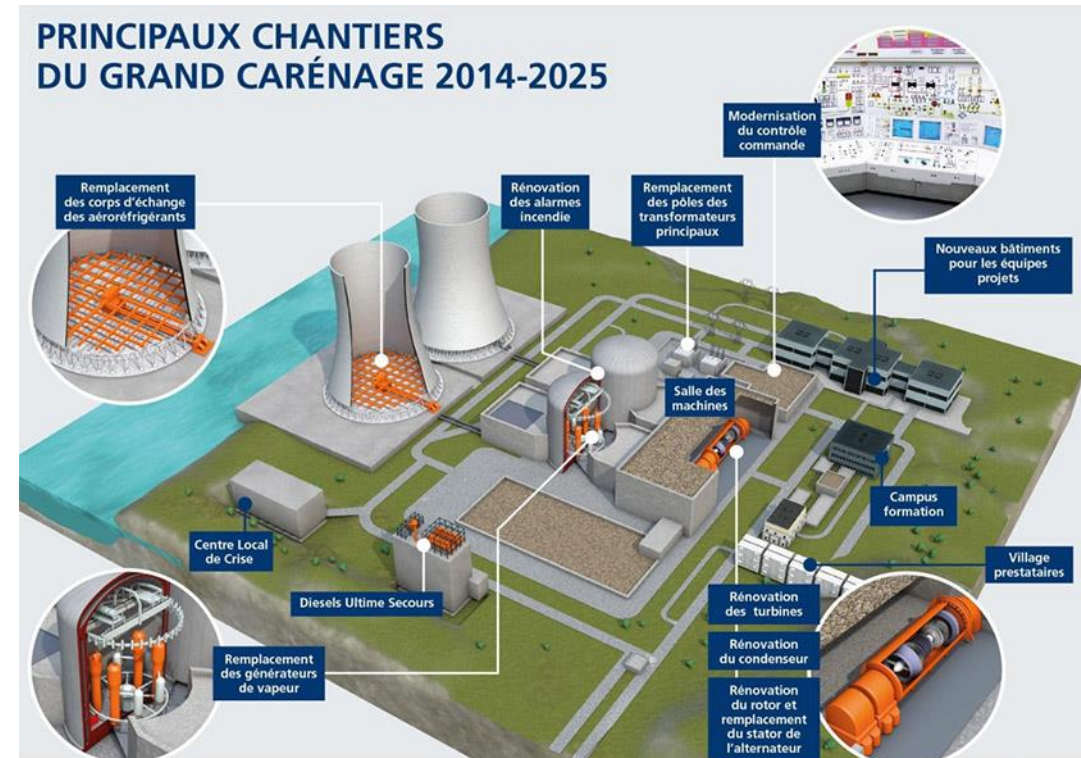


(source Wikipédia, IRSN, TI BN3296, CEA)



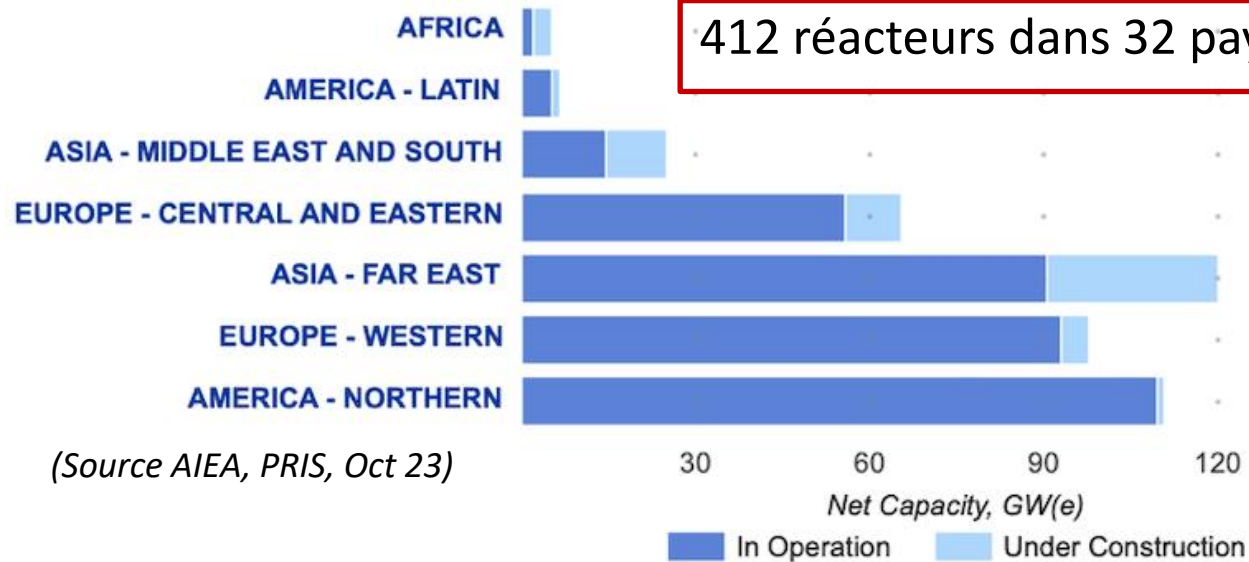
# Exploitation à long terme des parcs existants

- ❑ Les avis convergent sur l'intérêt d'exploiter au-delà de 40 ans un réacteur nucléaire :
  - Avis de l'Académie des sciences juillet 2021,
  - Avis de l'OCDE-AEN 2021,
  - Scénario IEA, NZE 2023,
  - Avis de l'ASN en 2021 sur la phase générique du 4<sup>ème</sup> réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe.
- ❑ Arrêt sur le grand carénage: programme industriel de renforcement et des installations initié en 2008.
  - **Réexamen périodique** = exigé par le code de l'environnement, tous les 10 ans, validé par l'ASN.
  - **Remplacement** de matériels, intégration des mesures post-Fukushima et amélioration du niveau de sûreté.
  - **Résultat final** : les centrales du parc seront au même niveau de sûreté que l'EPR.



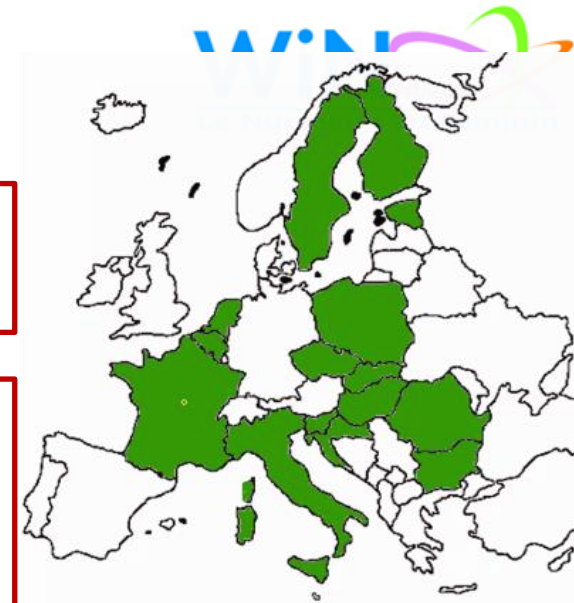
(Source EDF)

# Nouveaux programmes de construction



Alliance du Nucléaire  
(16 pays européens)

**Pays intéressés :** France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie Suède.



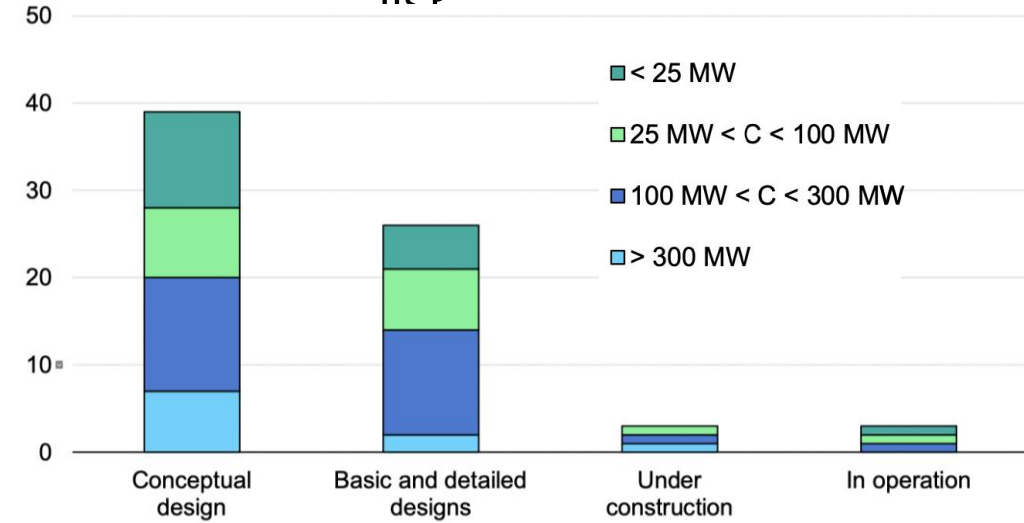
Puissance installée = 370,17 GWe  
Production électrique = 2486,8 TWh en 2022

- Fournir 150 GWe en 2050.
- Prolongement des installations existantes
- Construction de 30 à 45 nouveaux grands réacteurs.
- Développement de petits réacteurs modulaires.

# Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



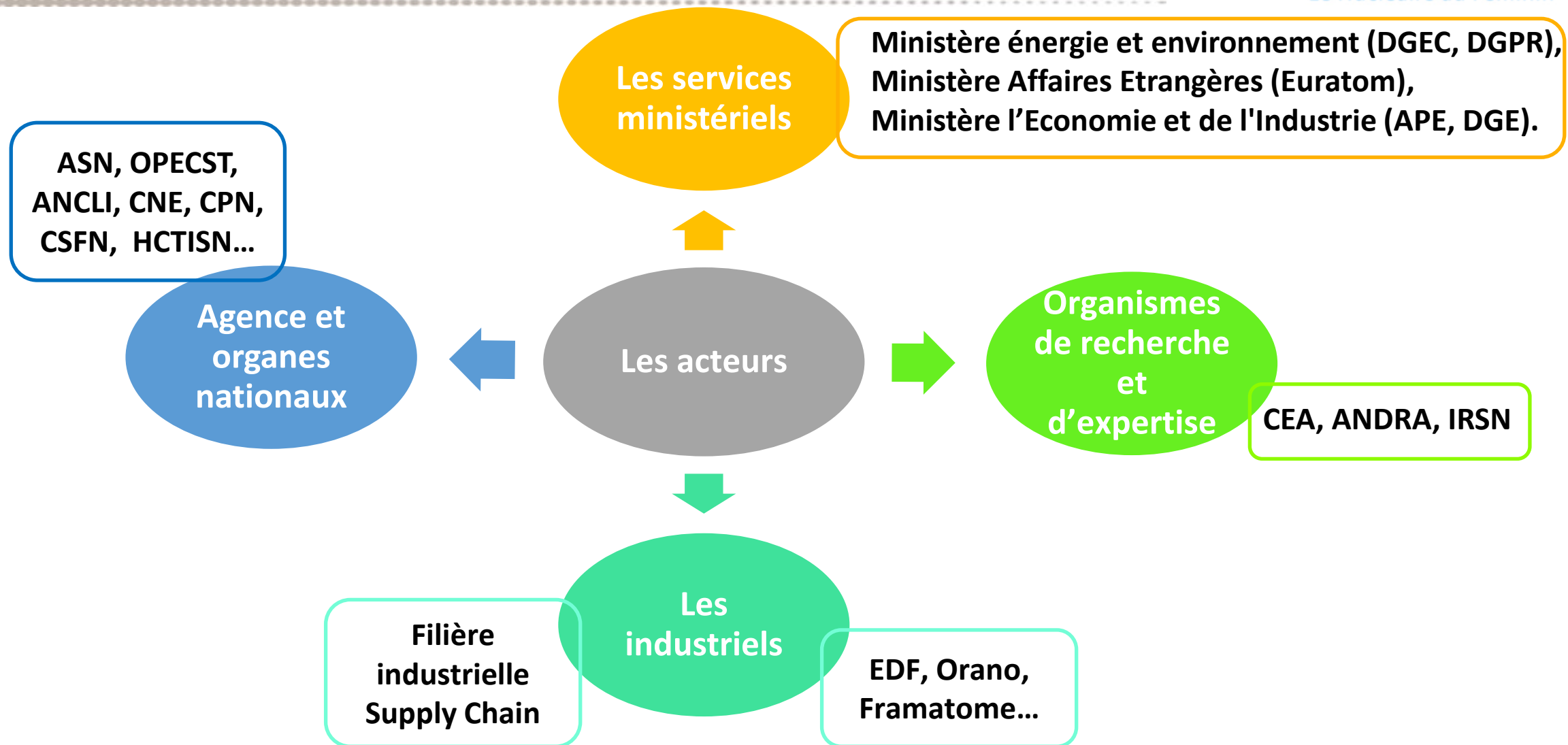
Où en sont-ils ?



(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

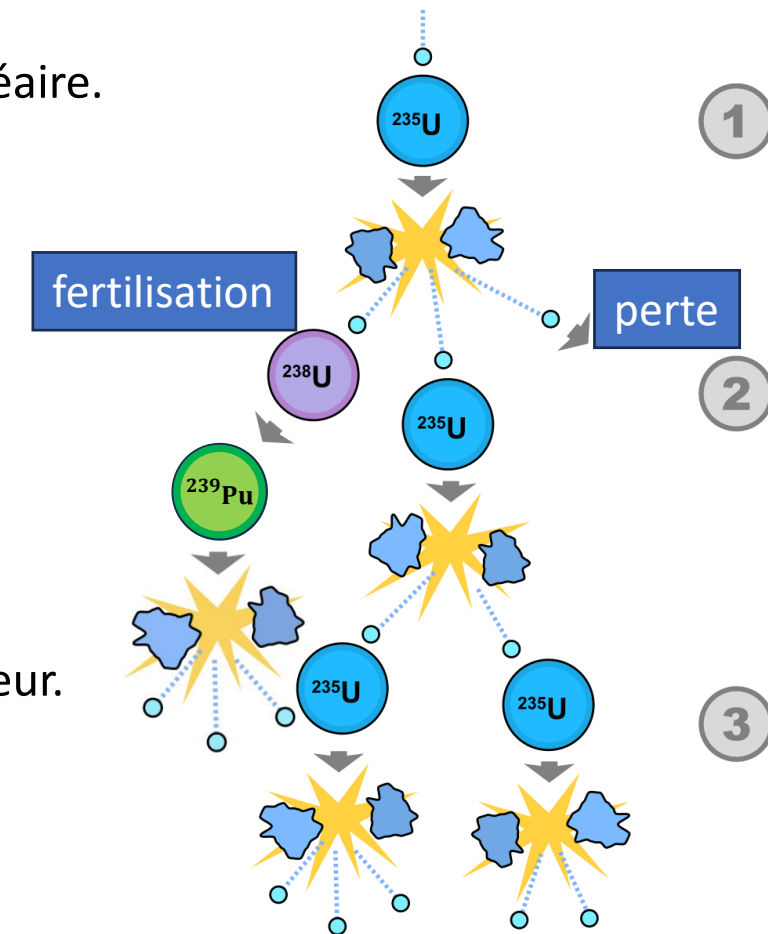
- Urgence climatique
- Souhait de souveraineté nationale
- Dynamisation de l'innovation et progrès technologiques
- Nouveau éco-système économique

# Gouvernance et organisation



# Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire?

- C'est une cocotte-minute!
- De la vapeur d'eau est créée par la chaleur produite par la réaction de fission nucléaire.
- Cette vapeur d'eau :
  - entraîne un groupe turbo-alternateur qui produit de l'électricité.
  - Envoyée telle quelle pour utilisation directe ou indirecte.
- Dans le cœur d'un réacteur nucléaire : une réaction en chaîne de fission est entretenue.
- Une filière de réacteur est définie par le triptyque combustible-modérateur-caloporteur caractérisant un choix scientifique et technique de production de chaleur.
- Filière des réacteurs « à eau pressurisée » :
  - le combustible = oxyde d'uranium enrichi (~ 3,5 % en uranium-235)
  - le modérateur = eau ordinaire.
  - le caloporteur = eau ordinaire.



(Source d'après Wikipédia)

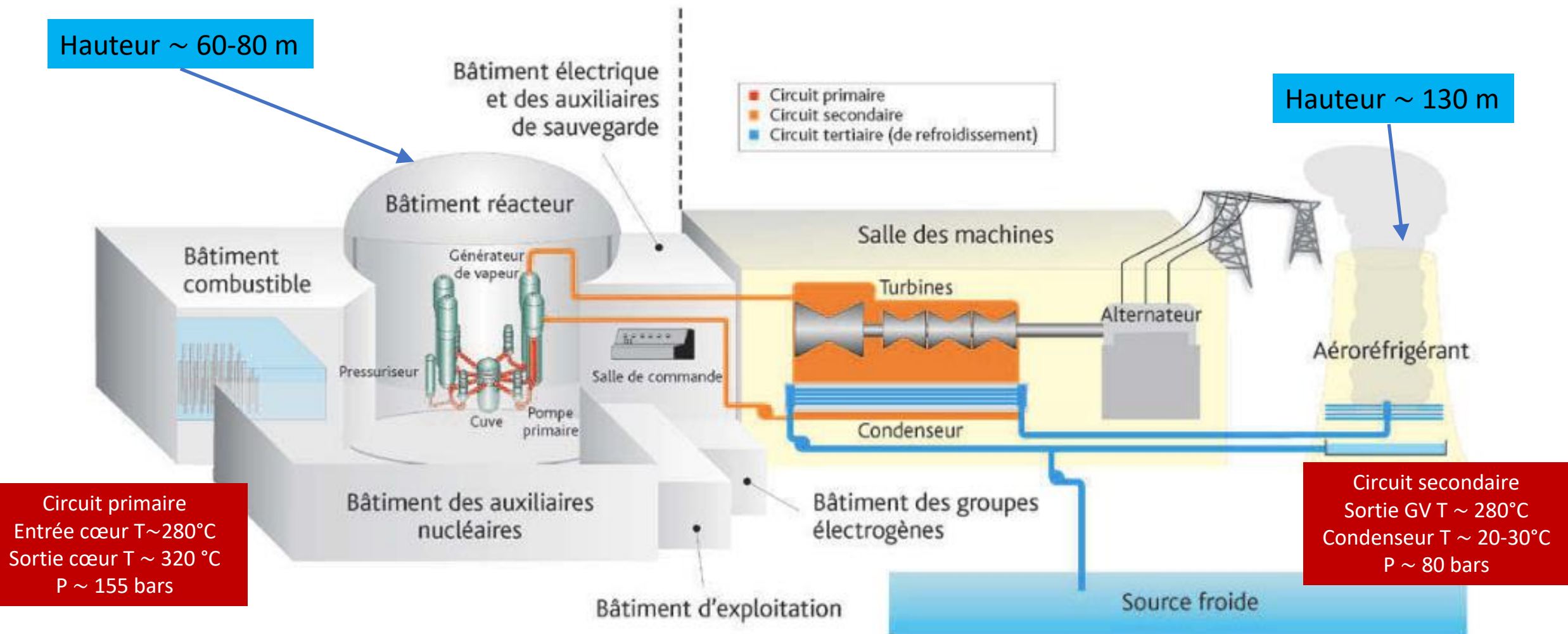
# Vue d'ensemble

ÎLOT NUCLÉAIRE

ÎLOT CONVENTIONNEL

Hauteur ~ 60-80 m

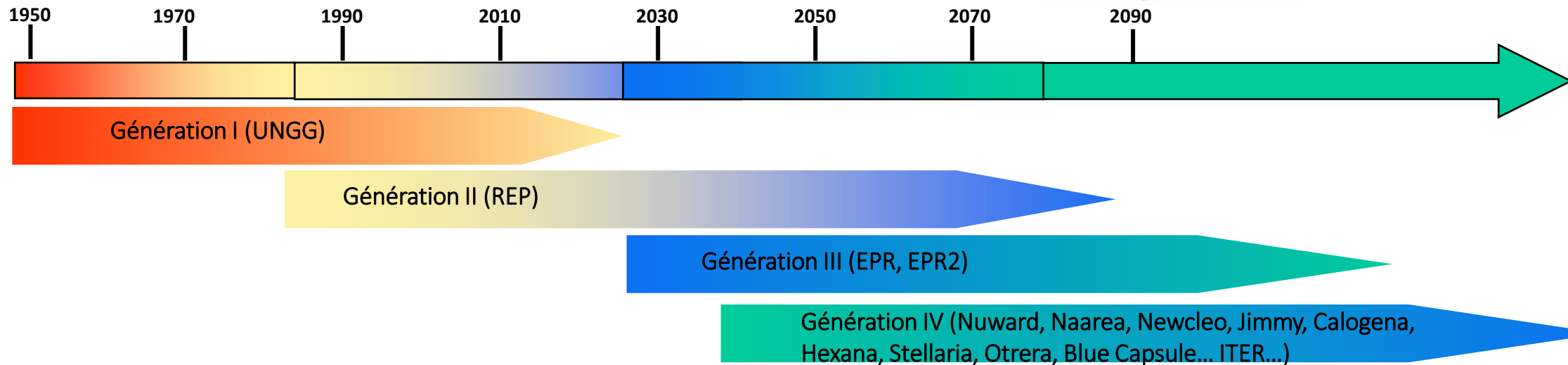
Hauteur ~ 130 m



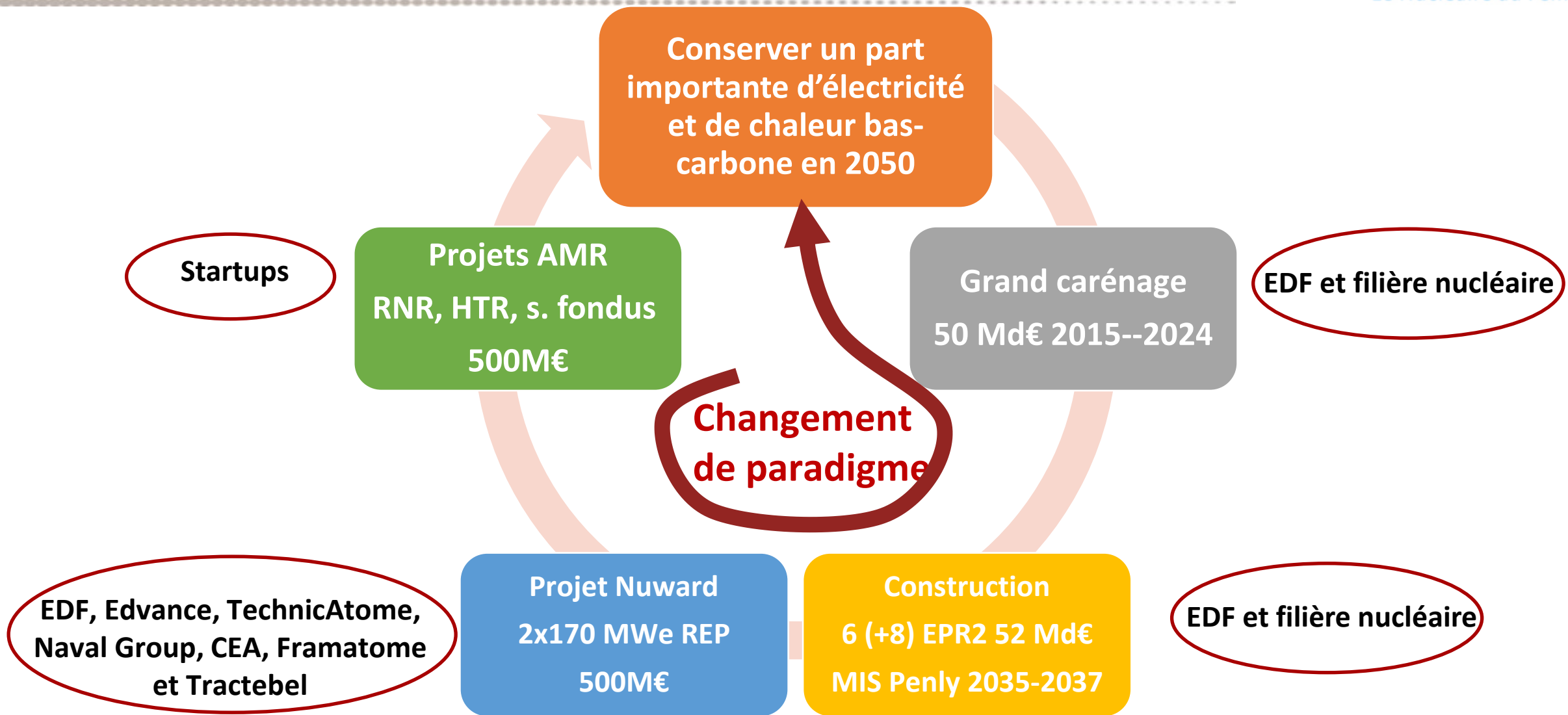


- 4. L'énergie nucléaire dans le futur :**
- a) Quels défis pour l'énergie nucléaire?**
  - b) Quelles technologies pour quels besoins?**

# Les différentes générations de réacteurs

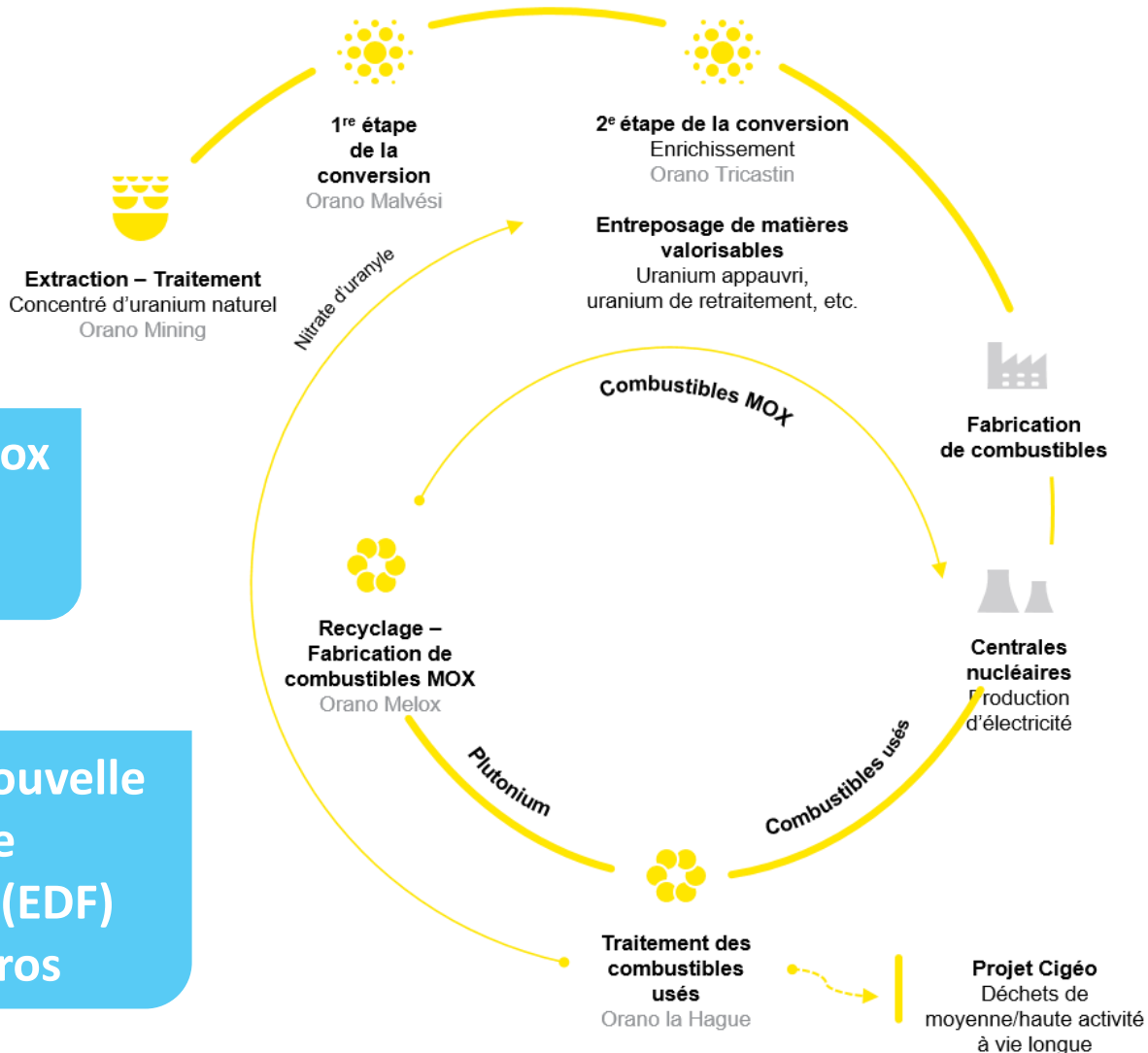


# Les 4 grands projets de réacteurs en France



# Les grands projets du cycle

Jouvence Malvesi  
300 millions d'euros



Projet Relançons Melox  
mi-2021  
84 Millions d'euros

Projet construction nouvelle piscine la Hague  
Dépôt DAC fin 2023 (EDF)  
1,25 milliard d'euros

Projet d'extension de l'usine d'enrichissement d'uranium Georges-Besse (Tricastin) octobre 2023  
1,7 milliard d'euros

Dépôt du DAC de Cigéo par l'Andra  
Janvier 2023  
25 milliards d'euros

Etudes lancées pour Melox 2 + nouvelle usine de retraitement (annonce mars 2024)

# A quoi doit répondre un réacteur du futur?

Flexible et pilotable  
(suivi de charges)

Electrifier les usages  
Défossiliser la chaleur

S'intégrer dans  
un MIX  
électrique

Remplacer les  
énergies fossiles

Accepter par les  
populations

Réacteur  
du futur



Construction en  
grand nombre

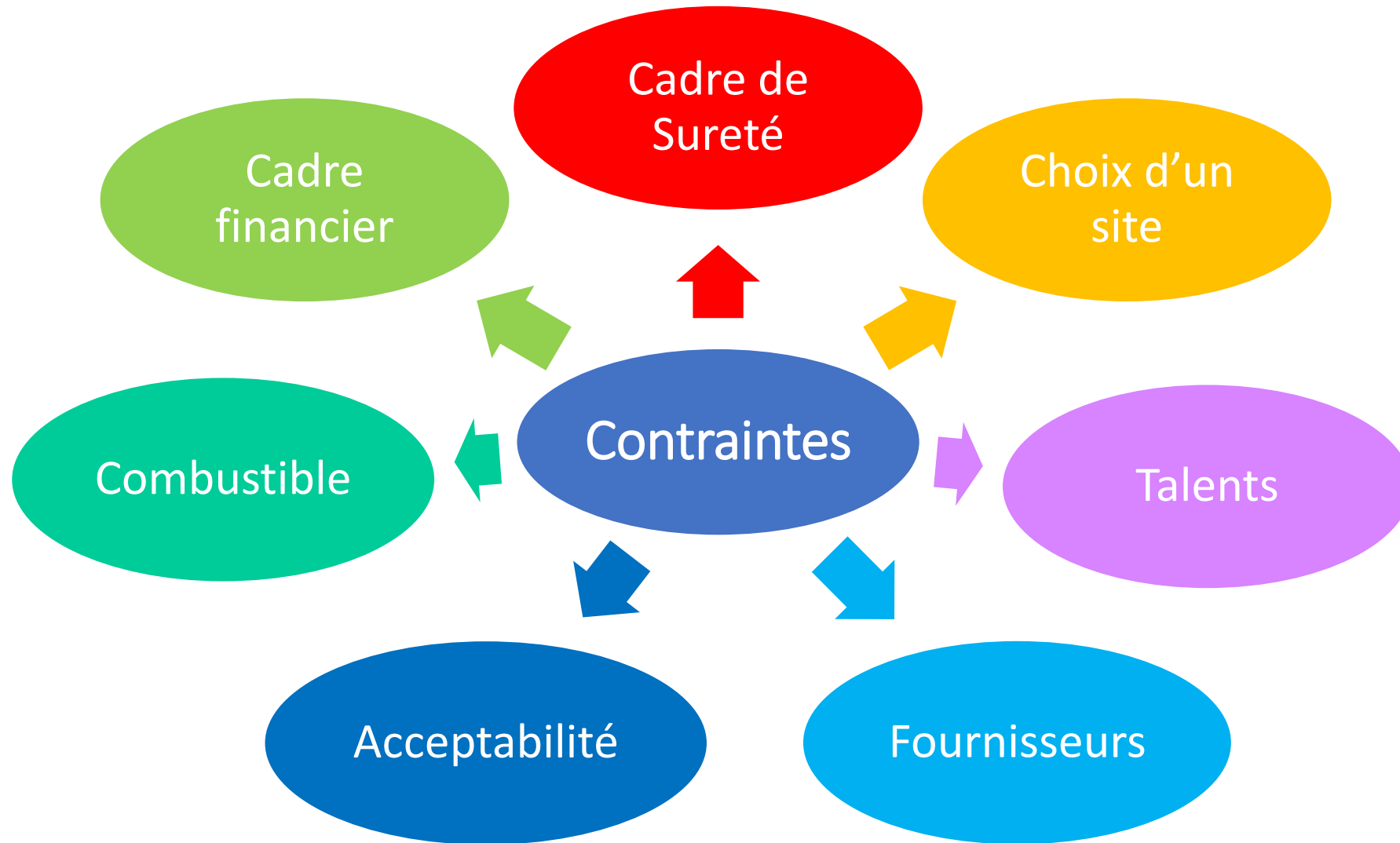
Toujours sûrs  
(attention au FOH)  
Non proliférants

Réduire les déchets

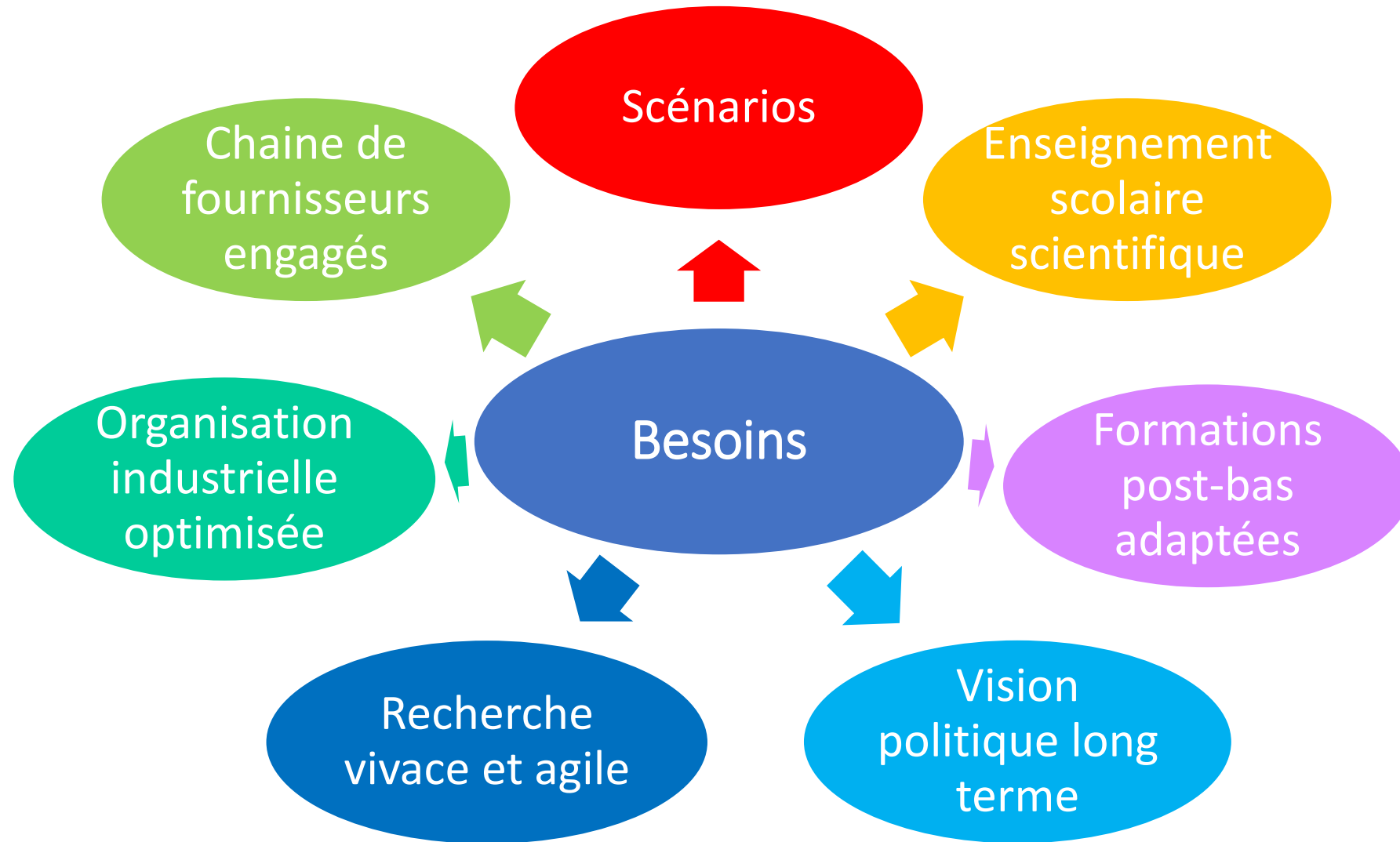
Economie de combustible  
Besoin de peu de matières  
premières

Cout abordable

# Conditions de succès



# Conditions de succès

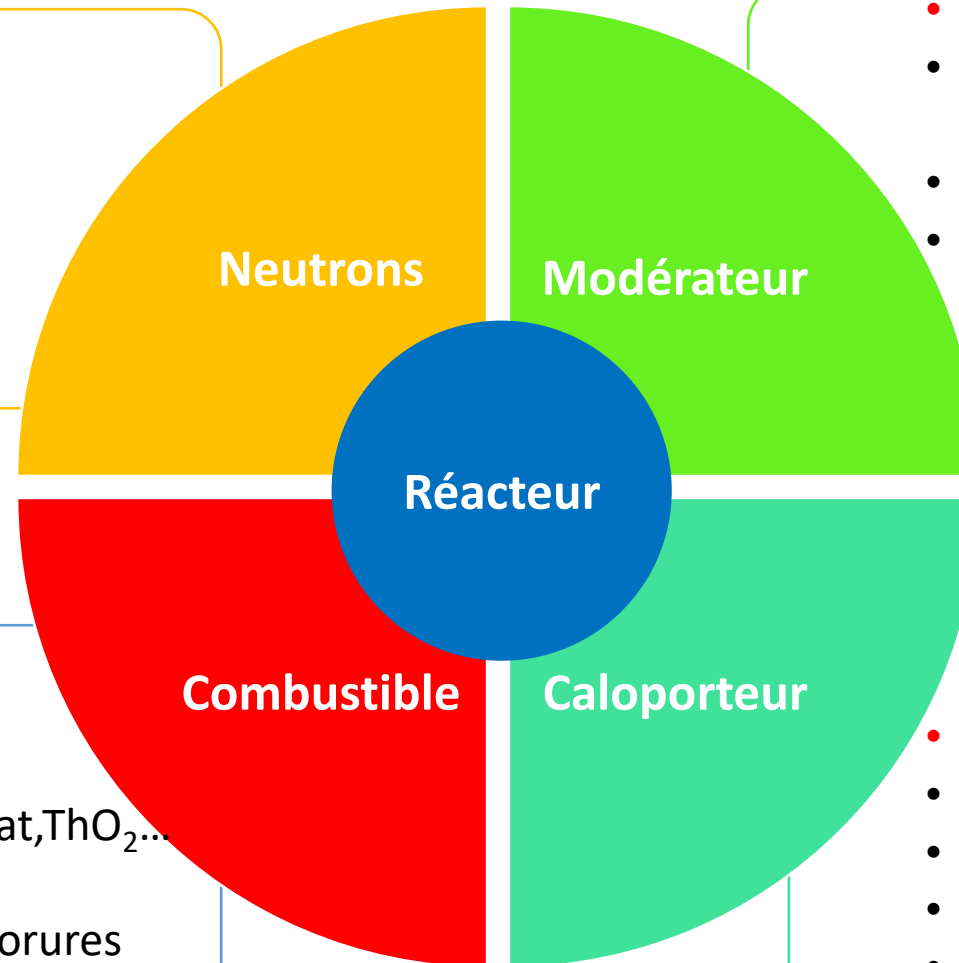


# Les multiples filières de réacteurs

- **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:  $UO_2$ , MOX, Unat,  $ThO_2$ ...
- Combustible liquide:  
(U/Pu ou Th/U) + sels fluorures ou chlorures

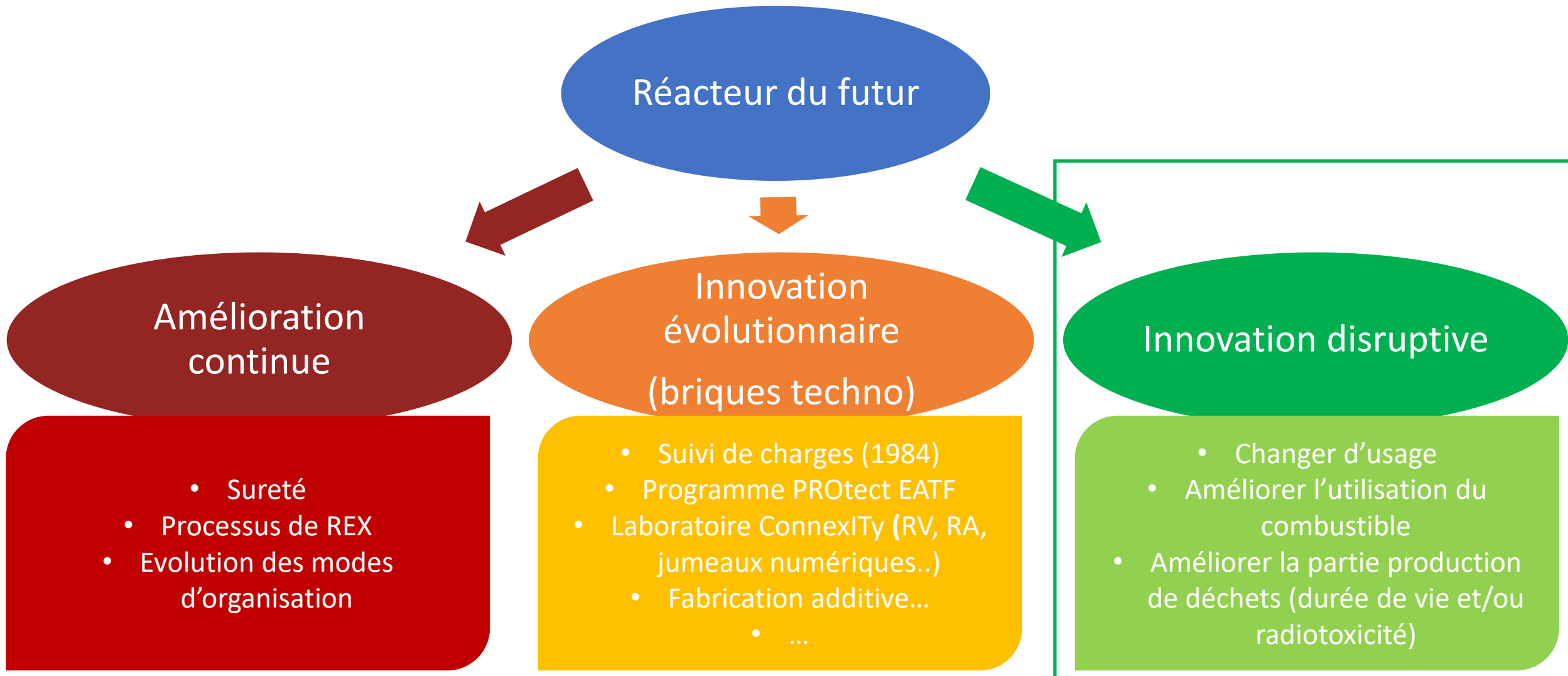


- **Peu d'absorptions des neutrons**
- Bon ralentissement des neutrons:  
Noyaux légers (H, D, Be, C,  $H_2O$ ,  $D_2O$ ,...)
- Transparent
- Non dangereux

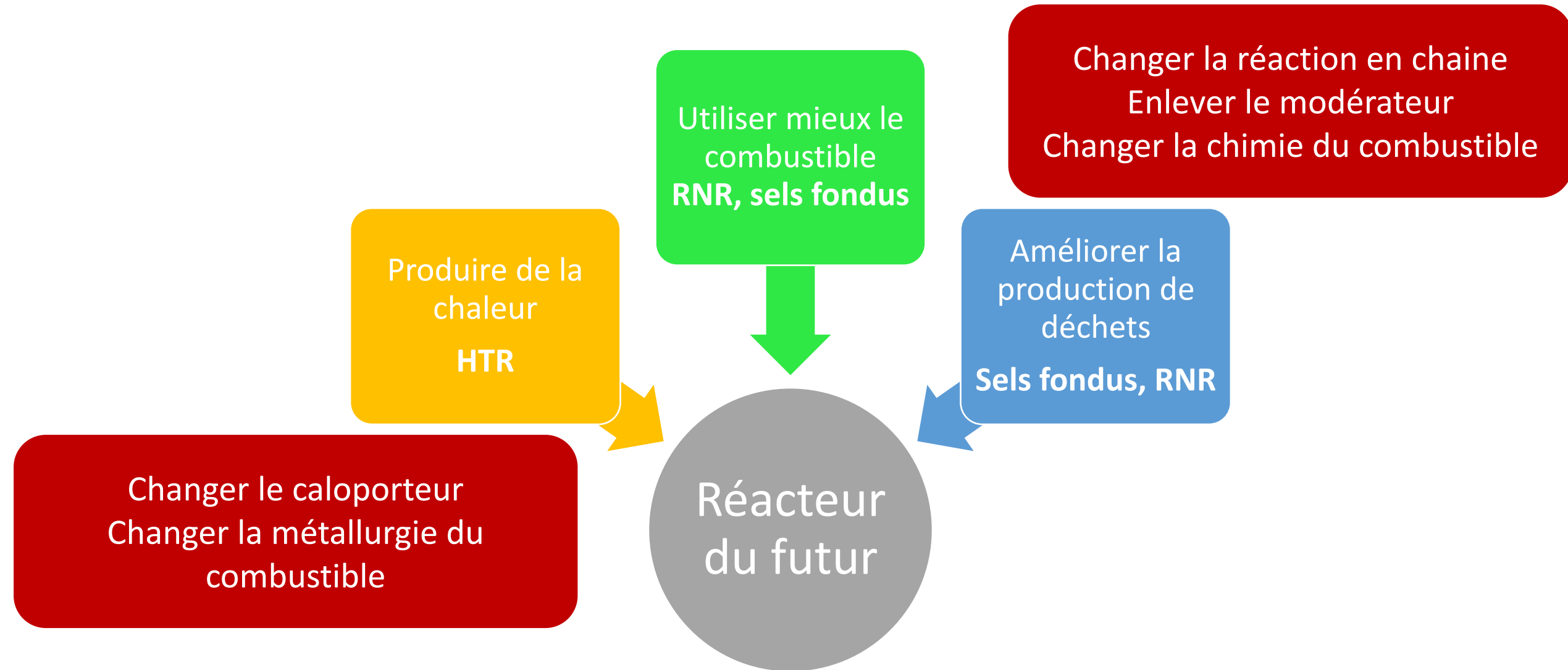
- **Bonne capacité à transporter la chaleur**
- Liquide (Eau, eau lourde)
- Gaz (hélium,  $CO_2$ )
- Sels liquide fluorure
- Métal liquide (sodium, plomb...)



# Les processus d'innovation dans le nucléaire



# Innovation dans les réacteurs nucléaires



# Le marché de la chaleur

## La chaleur en France:

- 40% 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 (H<sub>2</sub>),  
désulfuration,  
Gazéification charbon...

Moyenne  
température  
250-550 °C

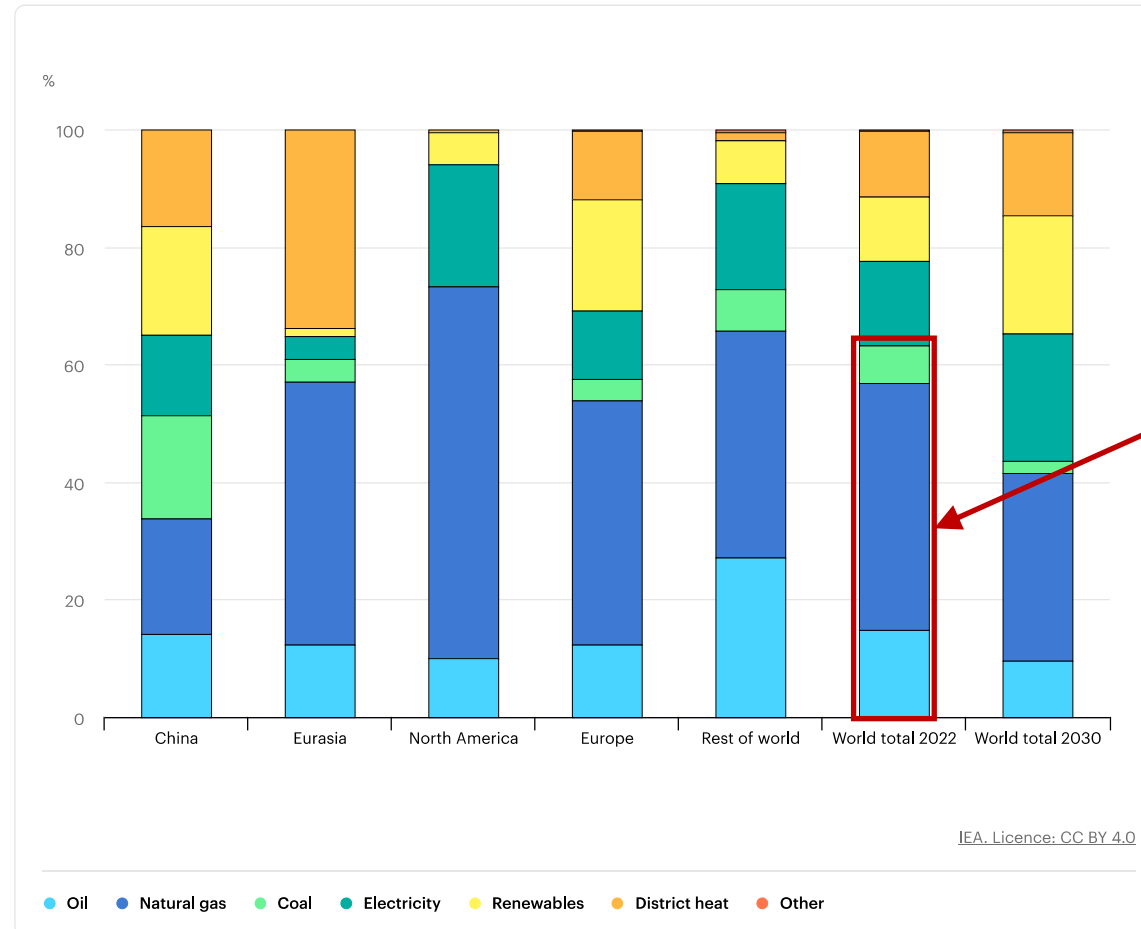
Chimie, pétrochimie,  
agroalimentaire,  
automobile, papier...

Basse température  
30-250°C

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

# La chaleur dans le monde

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



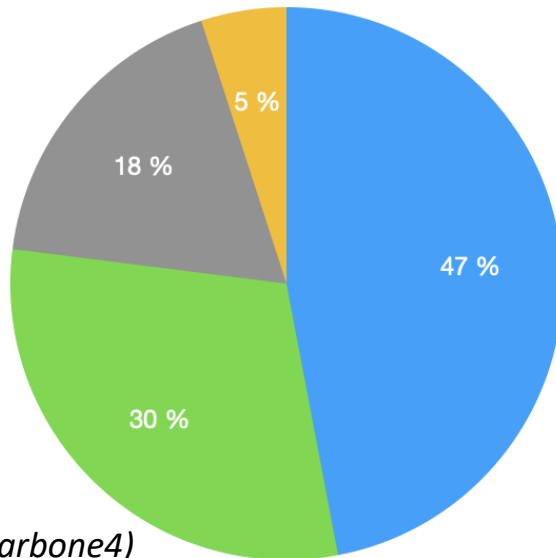
Fossiles + de 60%

(Source IEA 2022)

# La chaleur en France en 2020

## Part des usages dans la consommation finale d'énergie

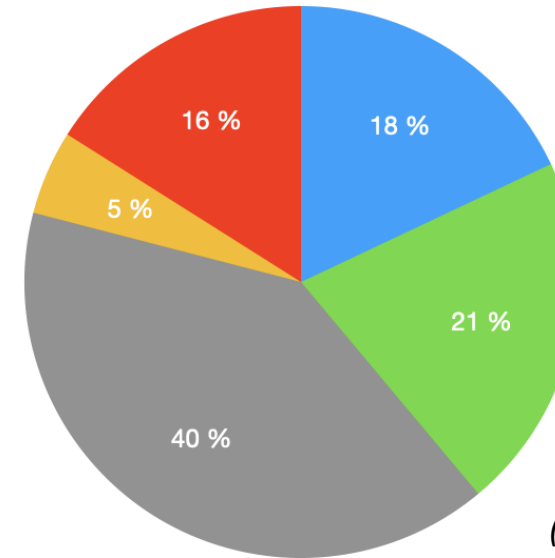
● Chaleur résidentielle ● Chaleur tertiaire ● Industrie ● Agriculture



(Source d'après Carbone4)

## Répartition des sources de chaleur

● Électricité ● Chaleur renouvelable ● gaz ● Charbon ● Fioul

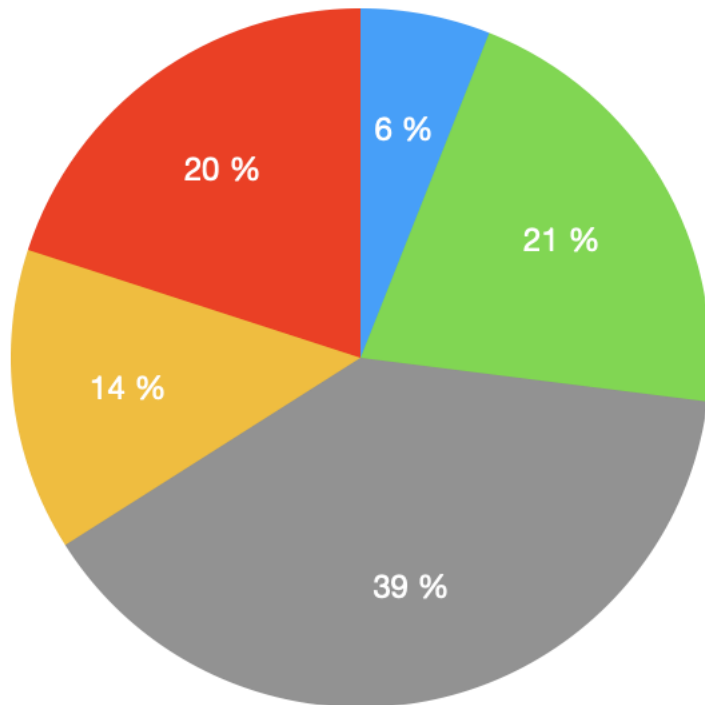


(Source d'après Carbone4)

Chaleur = 1<sup>er</sup> usage énergétique en France

# La chaleur dans l'industrie

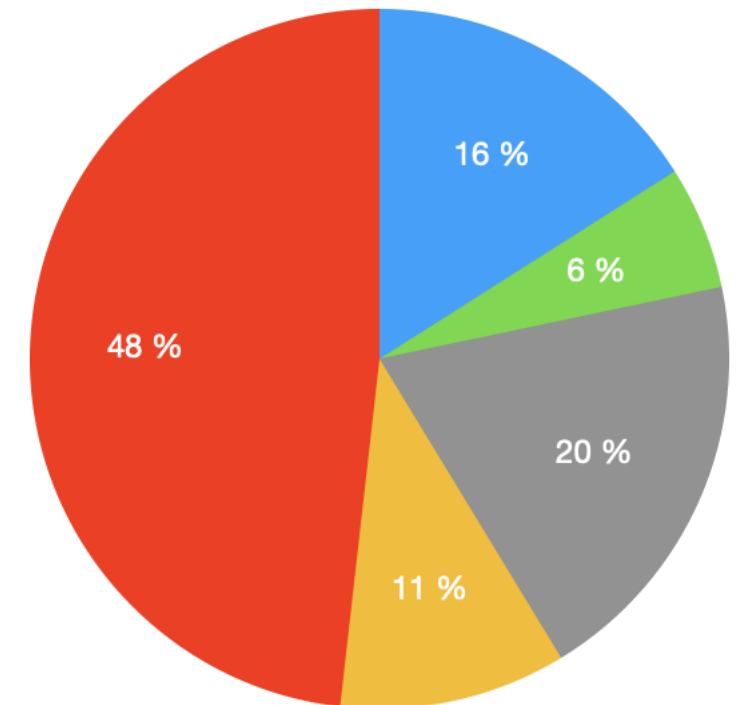
Usage de la chaleur dans l'industrie



- ☐ 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 ?

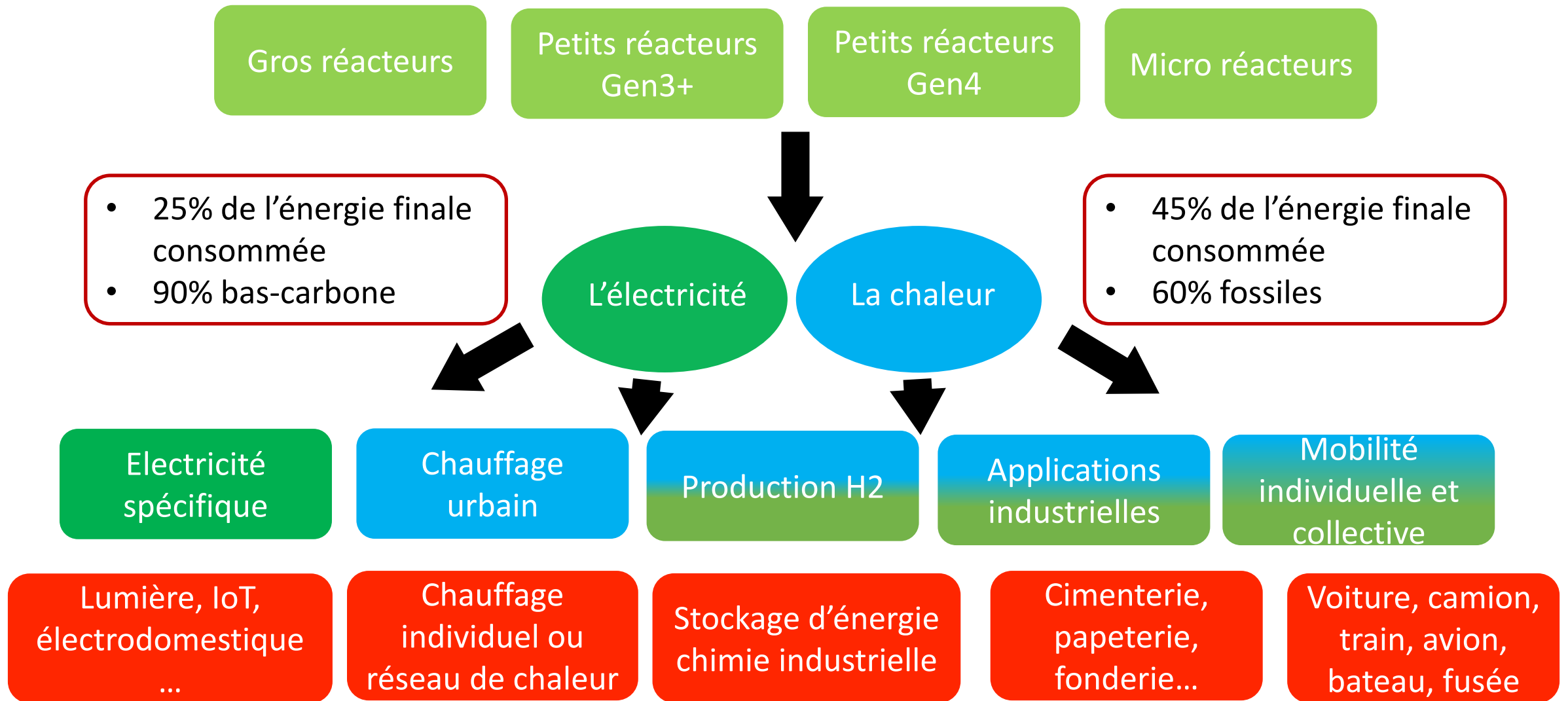


● Chauffage locaux ● Séchage ● Fours ● matières ● autres

● 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)

# Quels usages adressés par l'énergie nucléaire?



# 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



# Concepts du futur (SMR/AMR)

❑ Faible puissance (50-300 MWe) 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 et (11+1) sélectionnés.

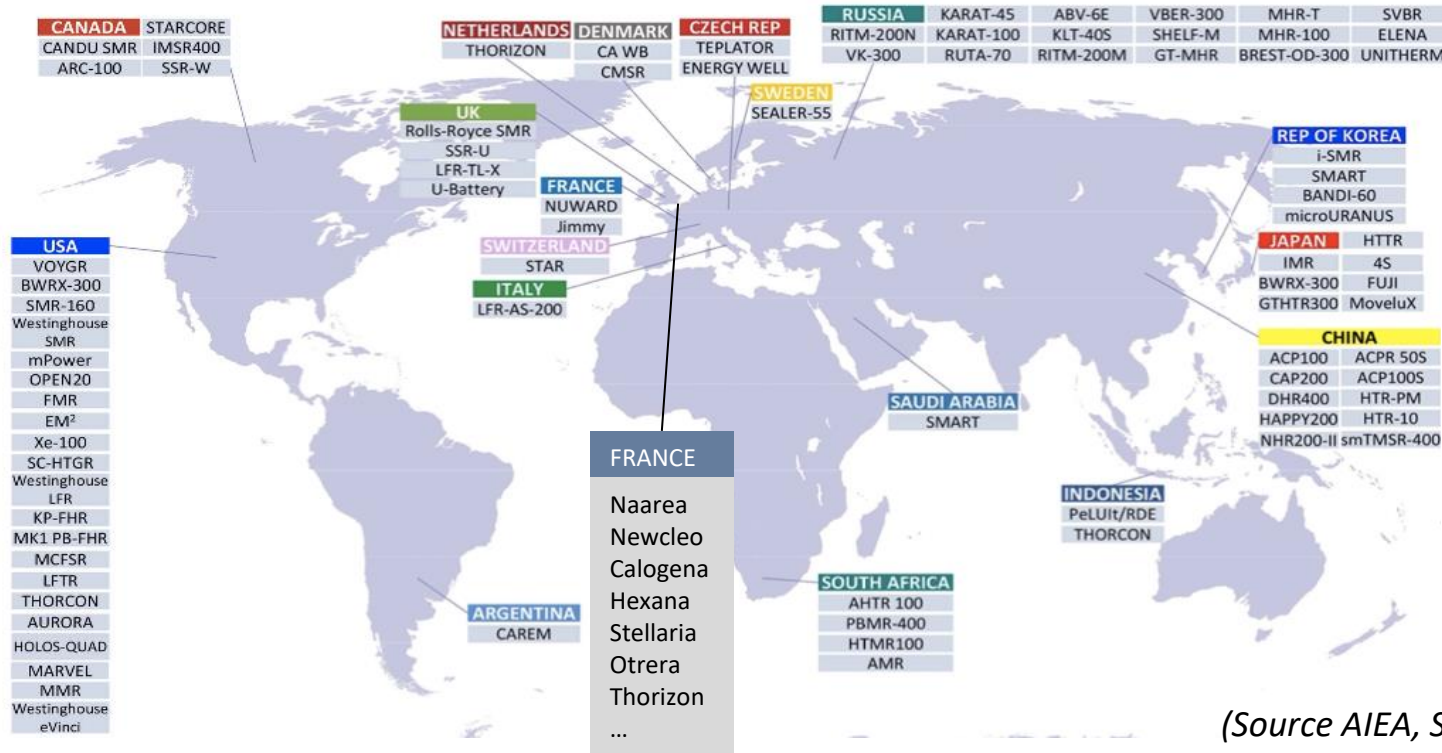
❑ On peut les classer par leurs solutions aux usages industriels :

- Électricité et chaleur basse et moyenne température : tous
- Chaleur haute température : HTR
- Meilleure utilisation des matières premières : RSF, RNR
- Brûleur des déchets: RSF, RNR

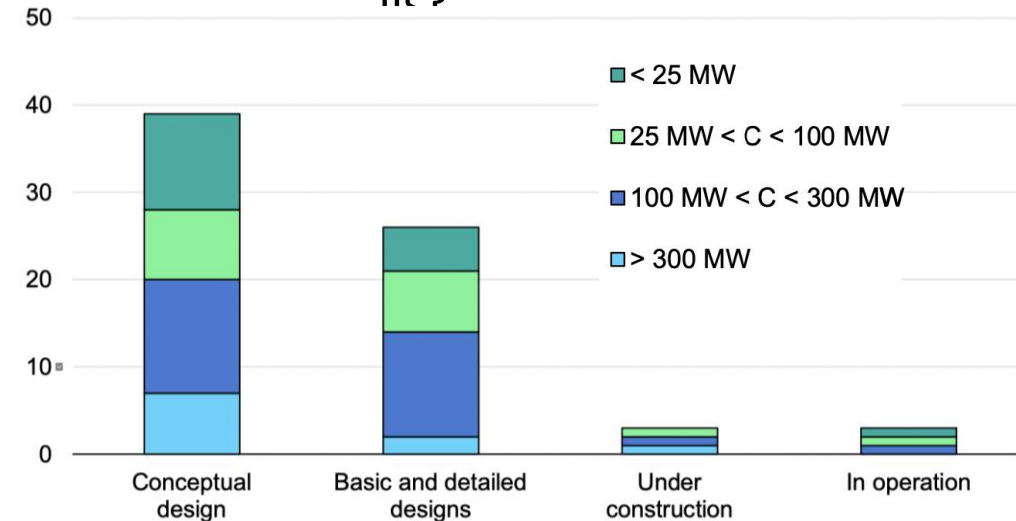


(Photos Source AIEA)

# 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 écosystème économique

# Evolution des technologies de fission

Parc REP



Amélioration continue

Technologie maîtrisée

Verrous scientifiques, technologiques ou industriels

EPR, EPR2



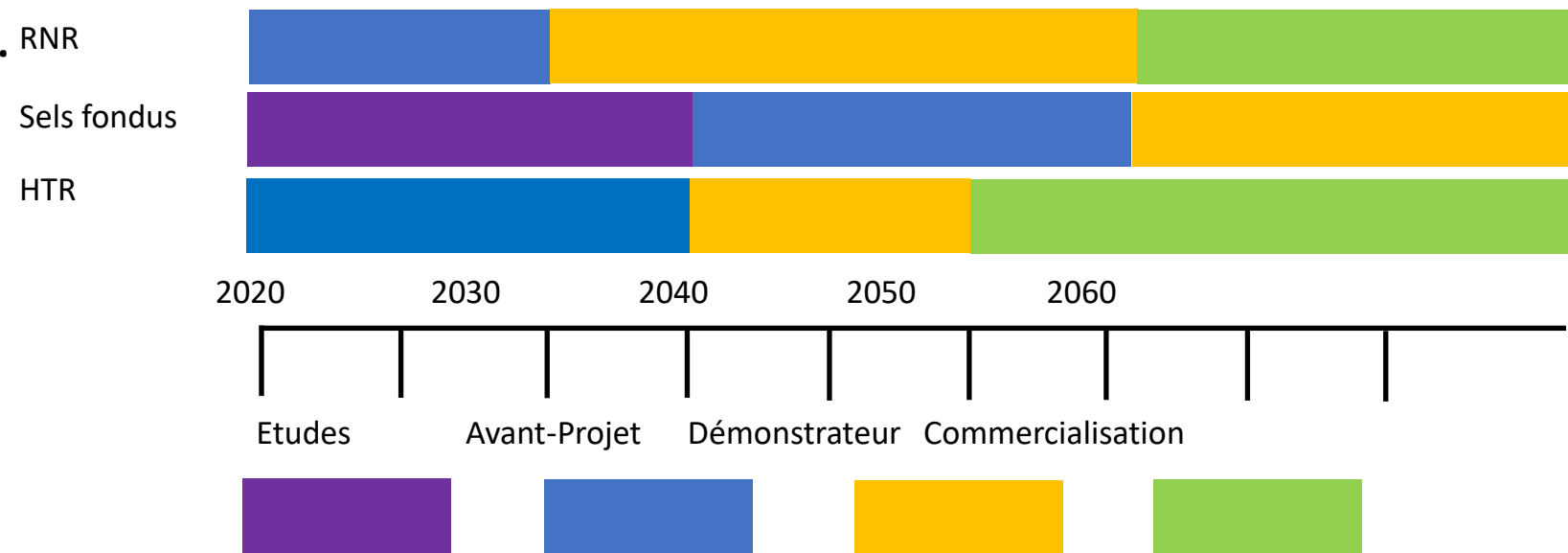
# Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

## ❑ 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.



**La réussite du renouveau du nucléaire en France et en Europe est possible, malgré les immenses défis.  
Mais rien ne pourra être fait sans des femmes et des hommes bien informés et bien formés.**

**Merci pour votre attention.**

le cnam

