

# Un panorama complet sur l'énergie nucléaire

**Emmanuelle Galichet**

**Enseignante-chercheuse Sciences et Technologies Nucléaires**

**Le Cnam**



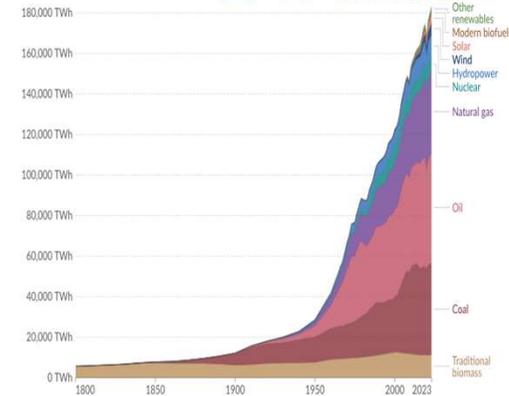
# Sommaire

- 1. Introduction : Quelques définitions et situation énergétique**
- 2. Quels usages domestiques et industriels pour l'énergie ?**
- 3. Politiques publiques de l'énergie et transition énergétique**
- 4. L'énergie nucléaire :**
  - 1. Un peu de physique nucléaire**
  - 2. Histoire et état actuel de la filière**
  - 3. L'énergie nucléaire dans le futur :**
    - a) Quels défis pour l'énergie nucléaire?**
    - b) Quelles technologies pour quels besoins?**
- 5. La filière nucléaire : ses besoins et ses métiers**
- 6. Conclusion**

# Cadre de l'intervention

le cnam

WiN FRANCE



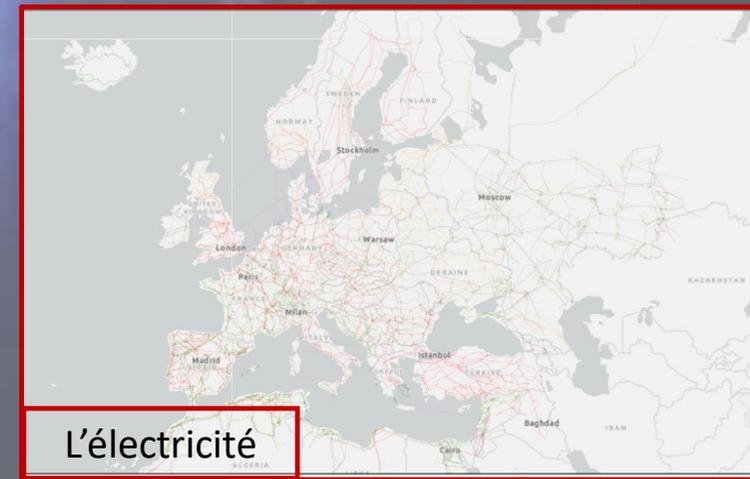
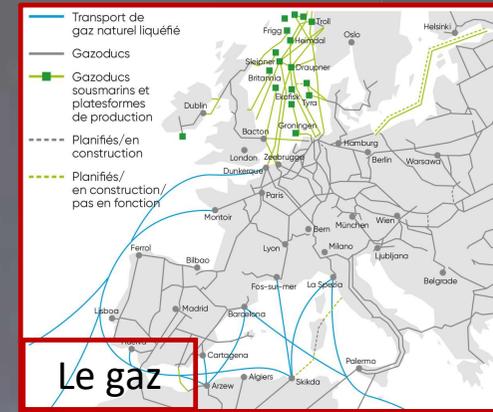
PARIS2015  
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE  
COP21·CMP11

## Hypothèses:

- L'accord de Paris doit être respecté: NZE à l'horizon 2050.
- Le besoin en énergie dans le monde augmente.
- La France est une démocratie qui fait partie de l'Europe et du monde.



# L'interdépendance dans le monde

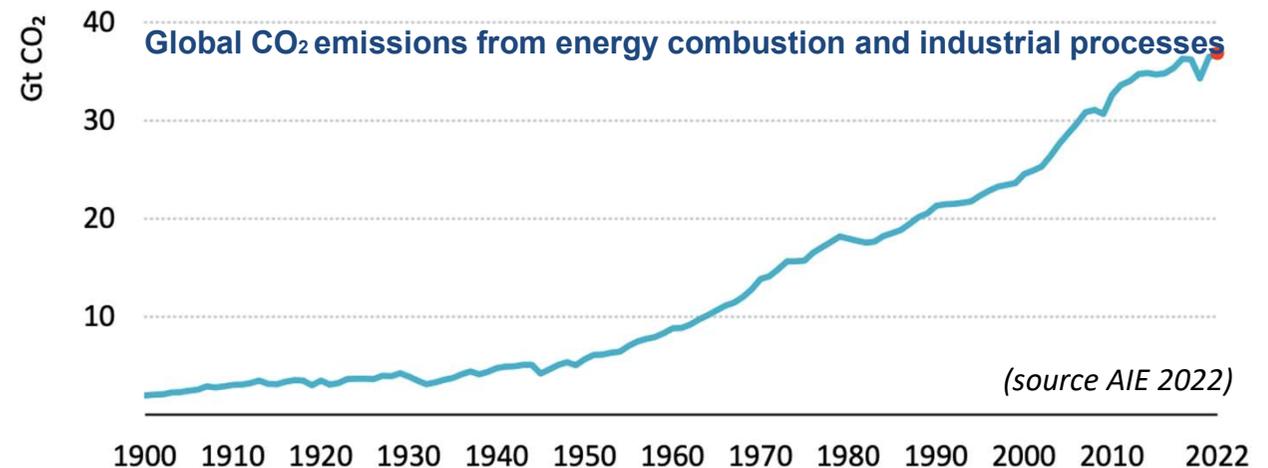
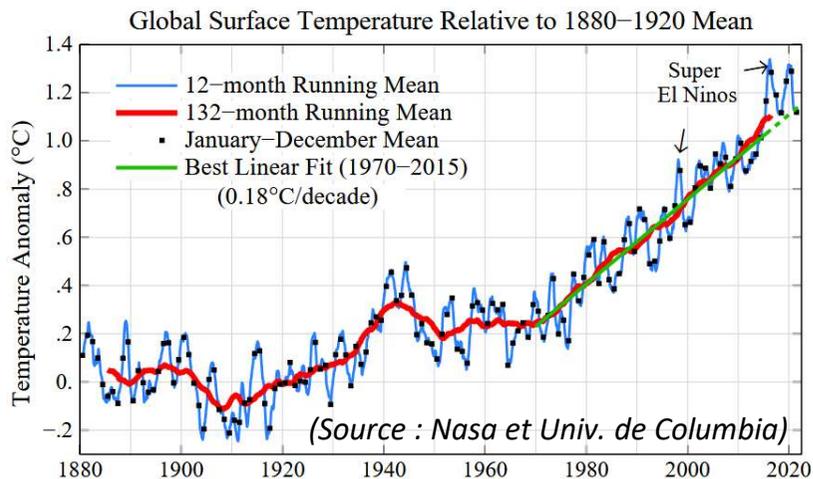


(Source Wikipédia, Entso-e, Google, Ministère des Armées)

# Conclusion Rapport du GIEC 2022

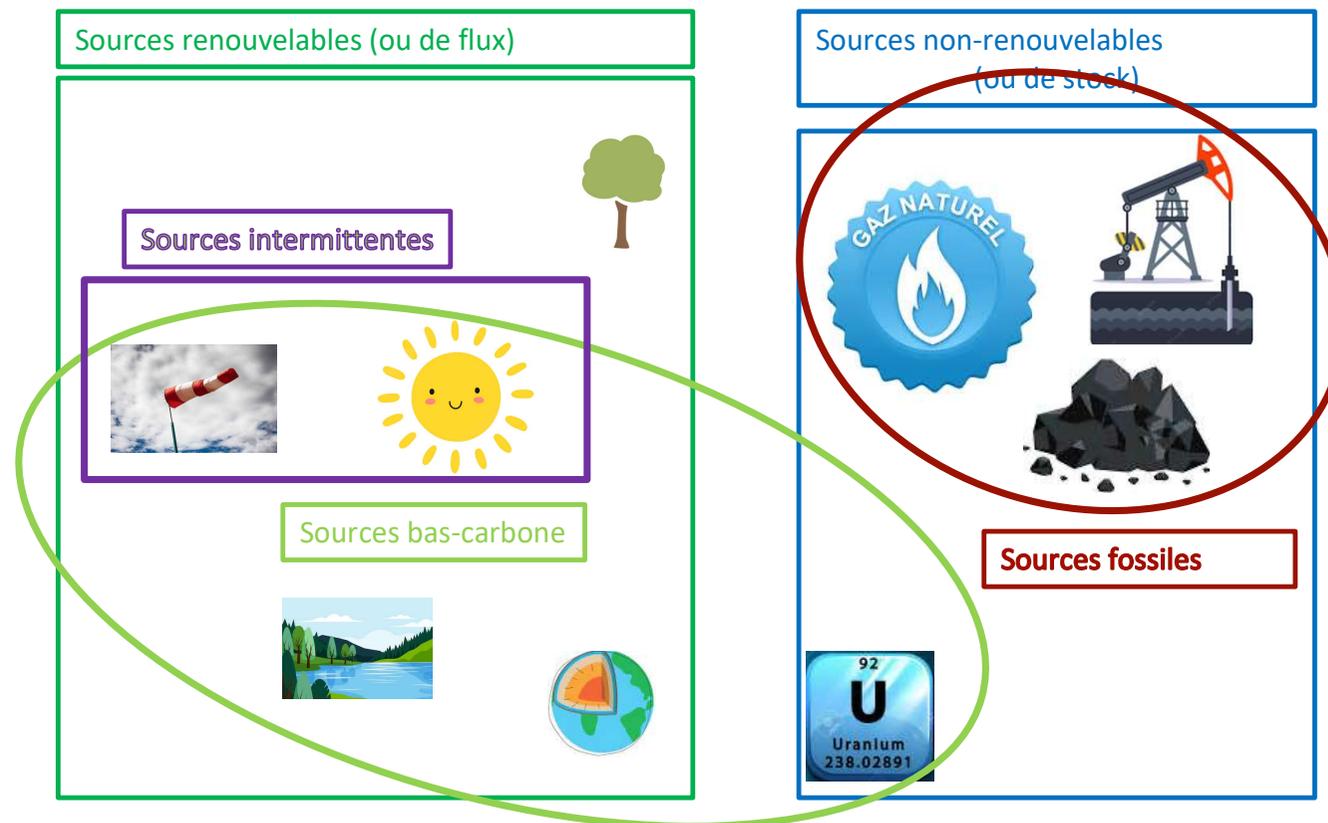
« Les preuves scientifiques sont sans équivoque : le changement climatique est une menace pour le bien-être humain et la santé de la planète. Tout retard supplémentaire dans une action mondiale concertée manquera la brève fenêtre qui se referme rapidement pour assurer un avenir vivable.

**Ce rapport offre des solutions au monde. » GIEC 2022**



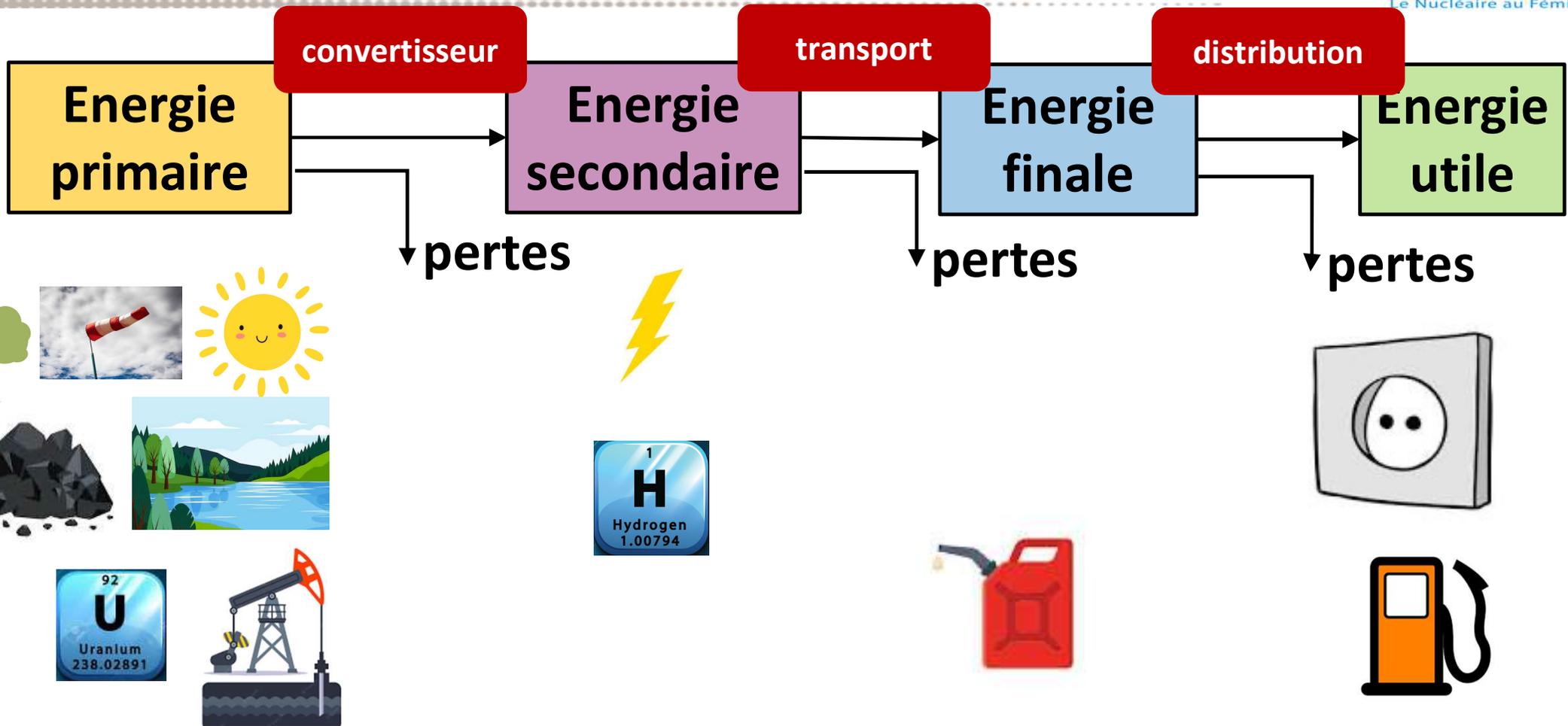
# Les différentes sources d'énergie

Énergie = grandeur qui mesure la capacité d'un système à effectuer une transformation.



Combustion:  
 $C + O_2 \rightarrow CO_2$

# Quelques définitions



# Énergie et convertisseur

soleil →  
photosynthèse

hydrocarbures →  
centrale  
thermique

Noyau atomique →  
centrale nucléaire



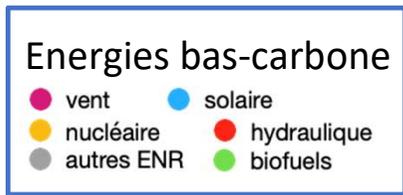
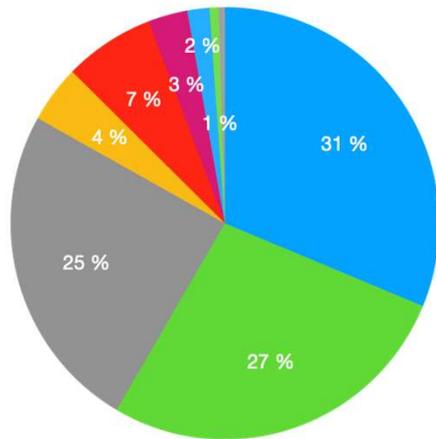
Vent → éolienne

Soleil → panneau solaire

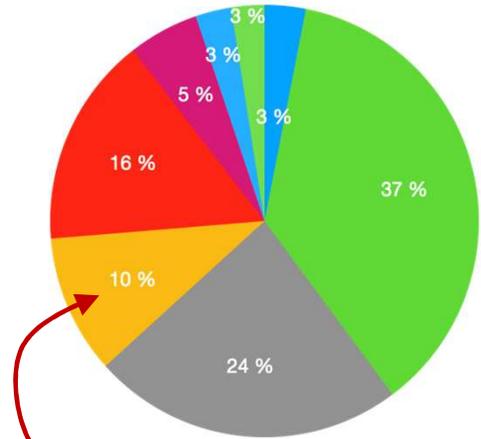
Chute d'eau →  
centrale  
hydraulique

# Consommation mondiale d'énergie en 2021

## Consommation énergie primaire



## Production électrique



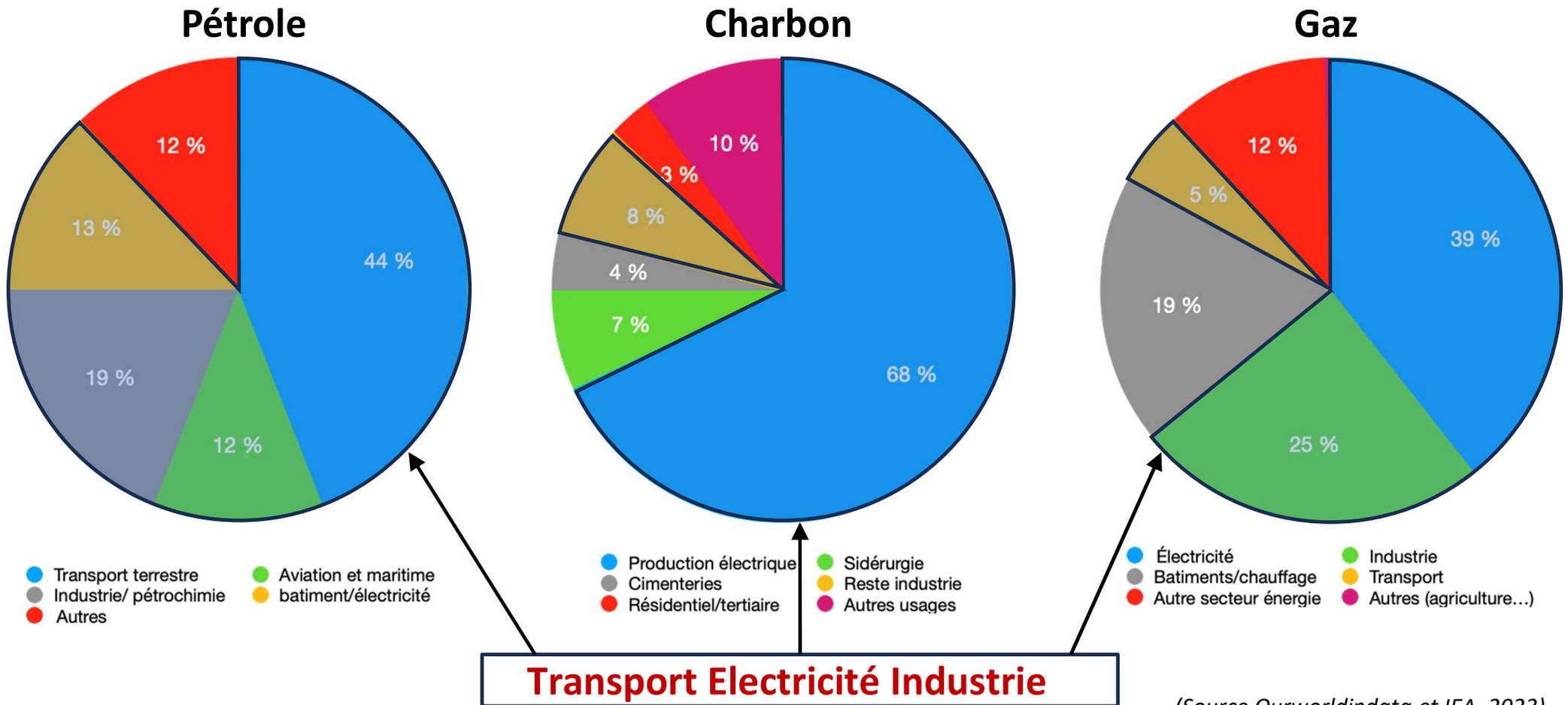
**Nucléaire = 2<sup>ème</sup> source d'électricité bas-carbone**

**Monde:  
165 000 TWh  
plus de 80%  
d'hydrocarbures  
17% électricité**

**Augmentation de la consommation sans arrêt depuis 1800  
733 millions sans électricité ( ~ 80% en Afrique subsaharienne)**

(source AIE 2022 et Eurostat)

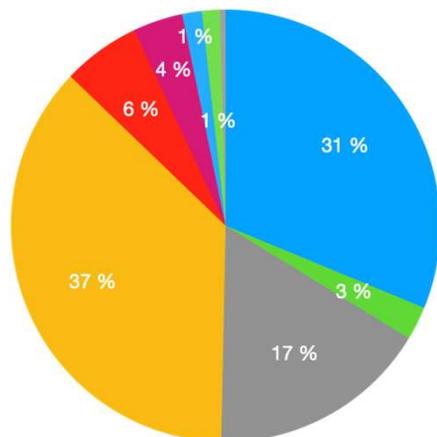
# Usages hydrocarbures dans le monde



(Source Ourworldindata et IEA, 2023)

# Le cas de la France

## Consommation énergie primaire



2482 TWh

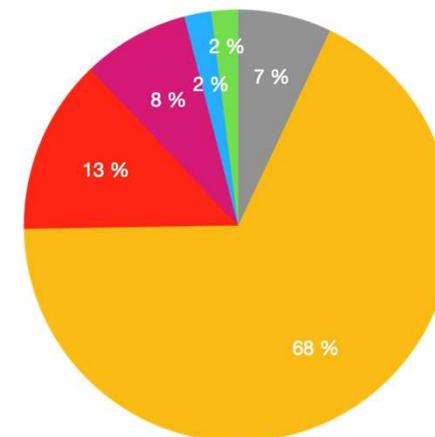
### Energies bas-carbone

- vent
- nucléaire
- autres ENR
- solaire
- hydraulique
- biofuels

### Energies fossiles

- pétrole
- charbon
- gaz

## Production électrique



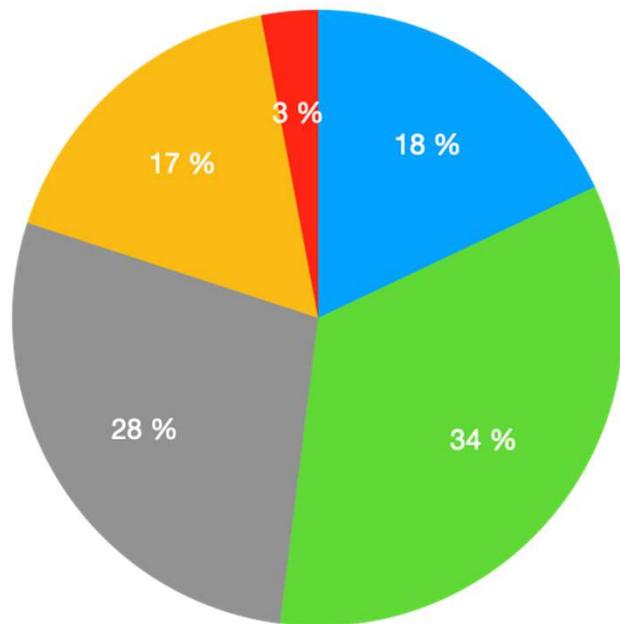
413 TWh

(Chiffres Clés de l'Energie, Edition 2023)

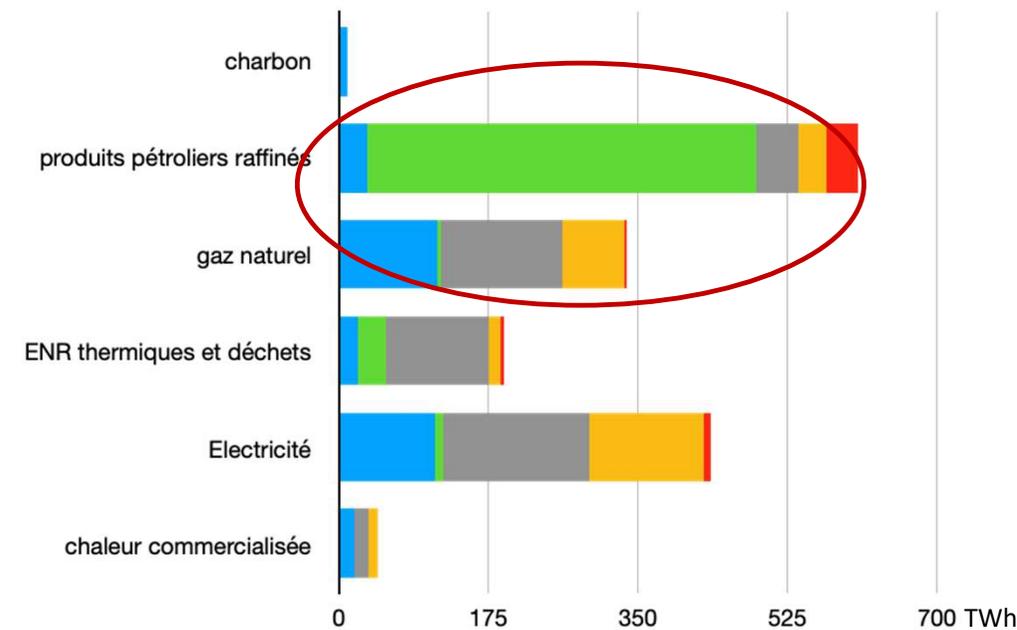
**~ 60% d'énergies fossiles consommées**  
**Electricité bas-carbone à + de 90% (grâce à l'énergie nucléaire)**

# 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)*

## 2. Quels usages domestiques et industriels pour l'énergie ?

# L'être humain et ses besoins

**Système énergétique complet:  
Extraction, transformation,  
convertisseur, transport,  
distribution.**

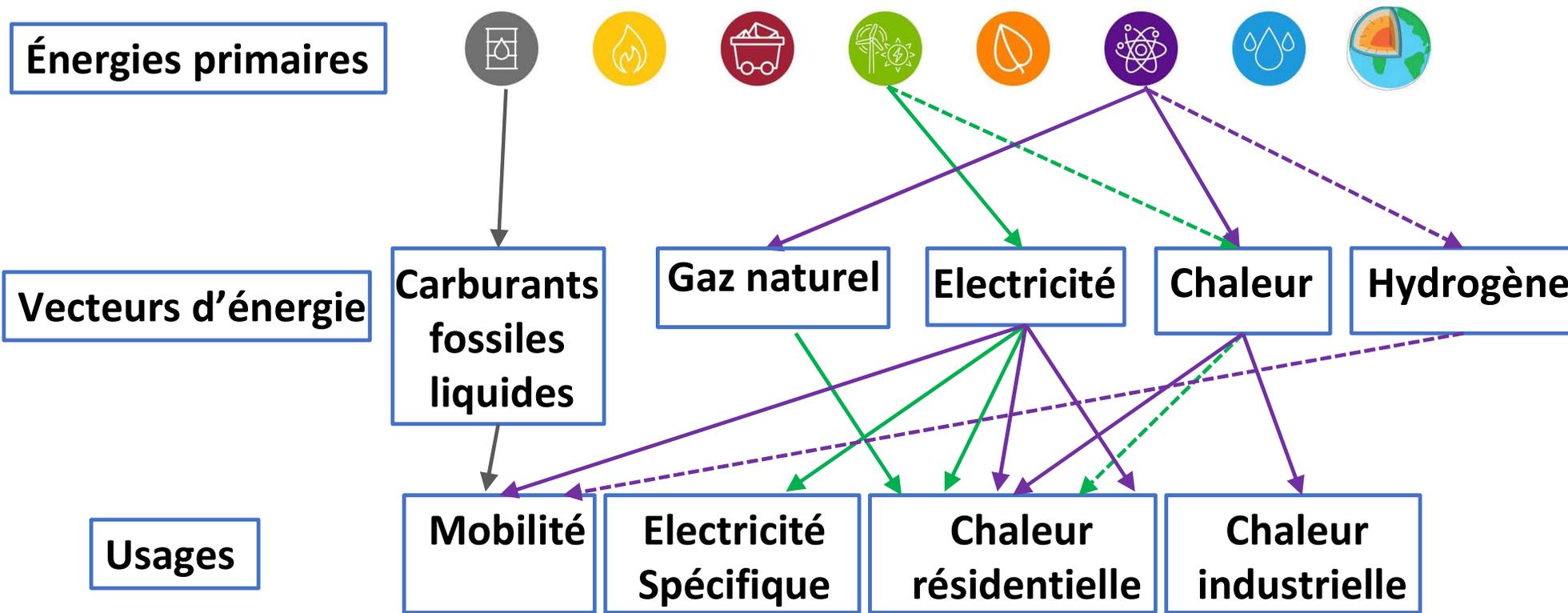
**Ressources  
minérales**



**Électricité**

**Chaleur**

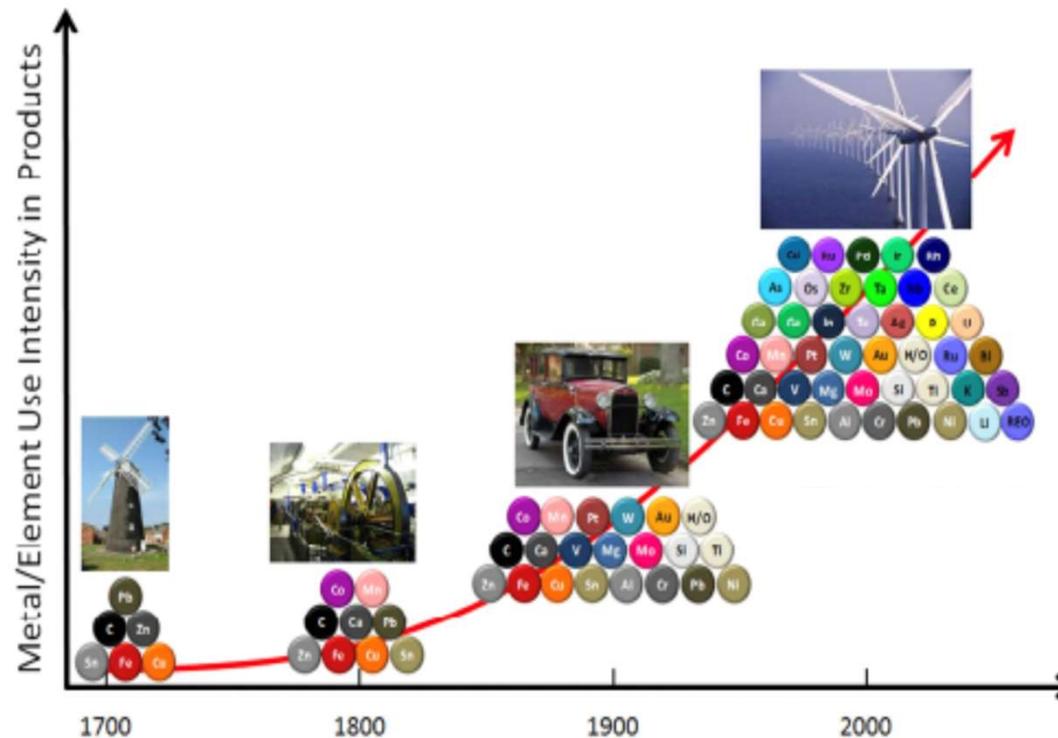
# Vecteurs énergétiques et usages



(D'après Académie des technologies)

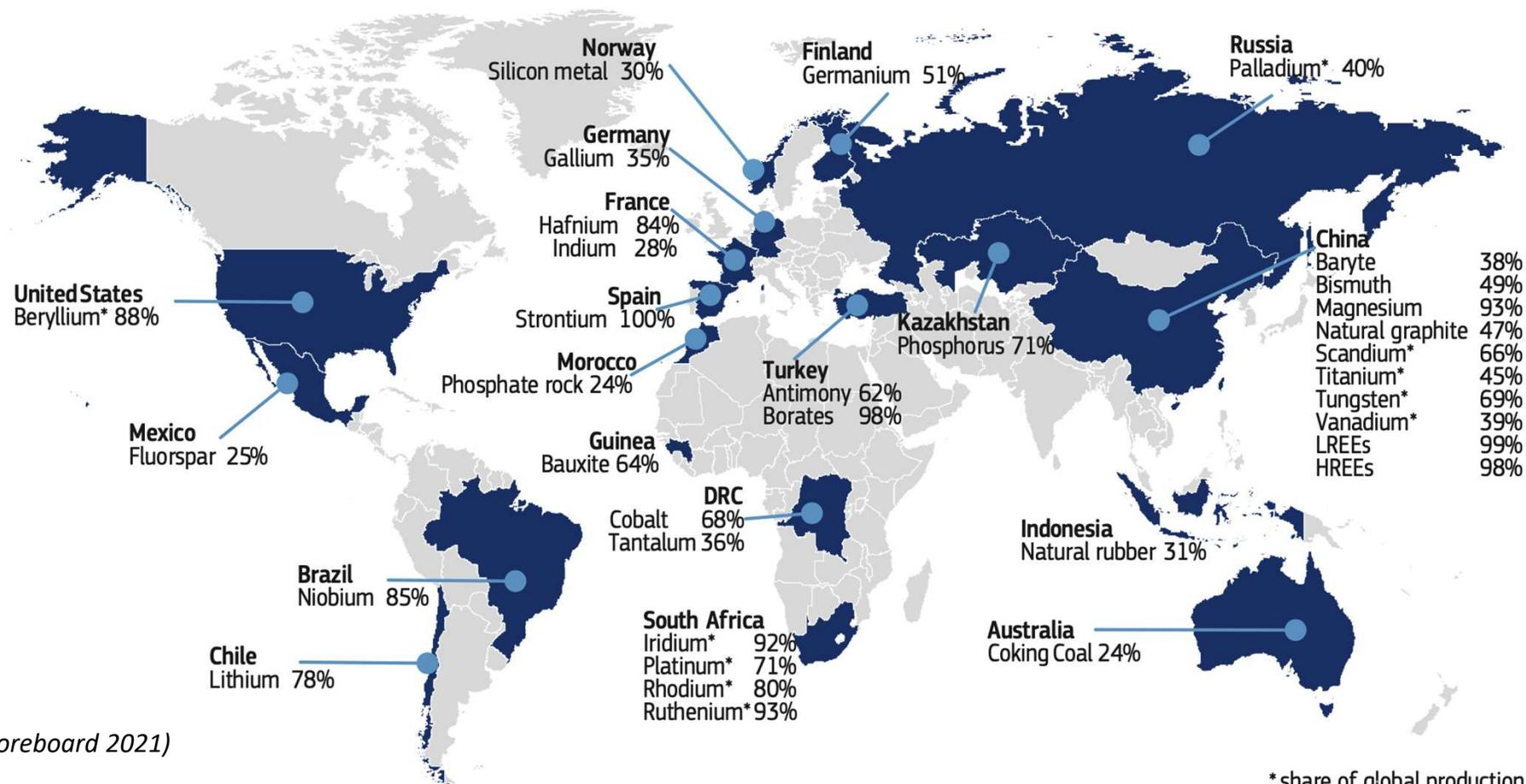
# Besoin en ressources minérales

Toute transition et révolution industrielle nécessitent des ressources minérales (et des ressources humaines) qui entraînent des dépendances géopolitiques : hier les énergies fossiles et demain les métaux.



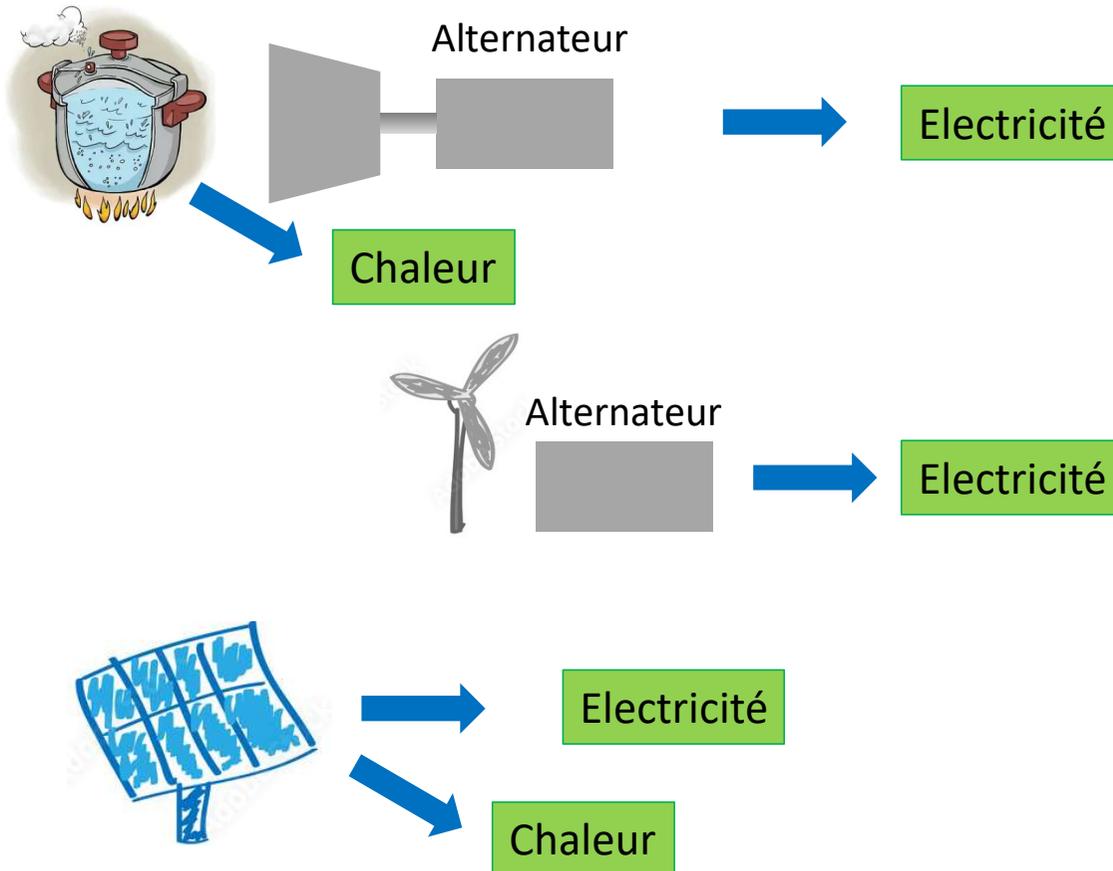
(Source Achzet et al., *Materials critical to the energy industry*, Augsburg, 2011)

# Origine des matières premières critiques utilisées en Europe (RM scoreboard 2021)



# L'électricité (et la chaleur)

- ❑ Mode de production principal = Chauffer de l'eau, avec combustibles fossiles (charbon...), énergies renouvelables (bois...) ou réactions nucléaires.
- ❑ Processus = vapeur d'eau injectée sous pression dans turbine entraînant la rotation d'un alternateur.
- ❑ Autres méthodes:
  - énergie du vent ou énergie hydraulique entraînant la rotation de l'alternateur.
  - Le rayonnement solaire converti directement en électricité dans les panneaux solaires via l'effet photoélectrique.



# Le marché de la chaleur

## La chaleur en France:

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

Chaleur

## France:

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

Haute température  
550-1000°C

Moyenne  
température  
250-550 °C

Basse température  
30-250°C

Vaporeformage, Acier,  
Électrolyse de l'eau (H<sub>2</sub>),  
désulfuration,  
Gazéification charbon...

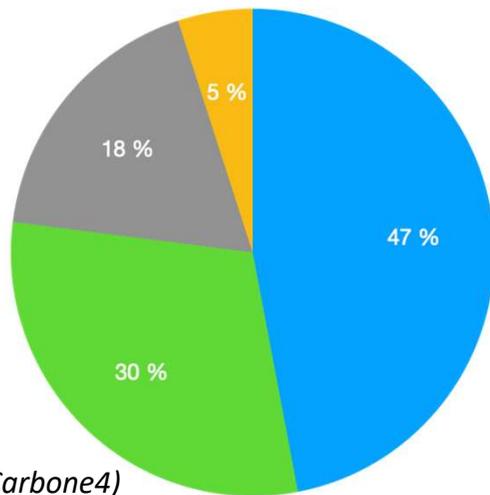
Chimie, pétrochimie,  
agroalimentaire,  
automobile, papier...

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

# La chaleur en France en 2020

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

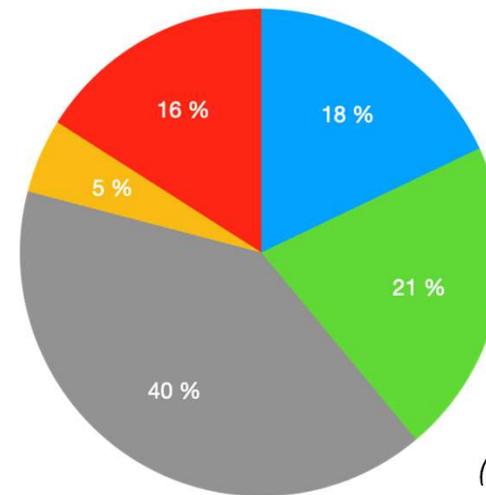
● Chaleur résidentielle ● Chaleur tertiaire ● Industrie ● Agriculture



(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

### 3. Politiques publiques de l'énergie et transition énergétique

# Politique énergétique

**Ou comment choisir le MIX énergétique français?**

- Bas-carbone
- Ressources naturelles
- Pollutions diverses
- Conditions de travail

Production la plus durable possible

Energie disponible et en quantité suffisante

Diplomatie nucléaire

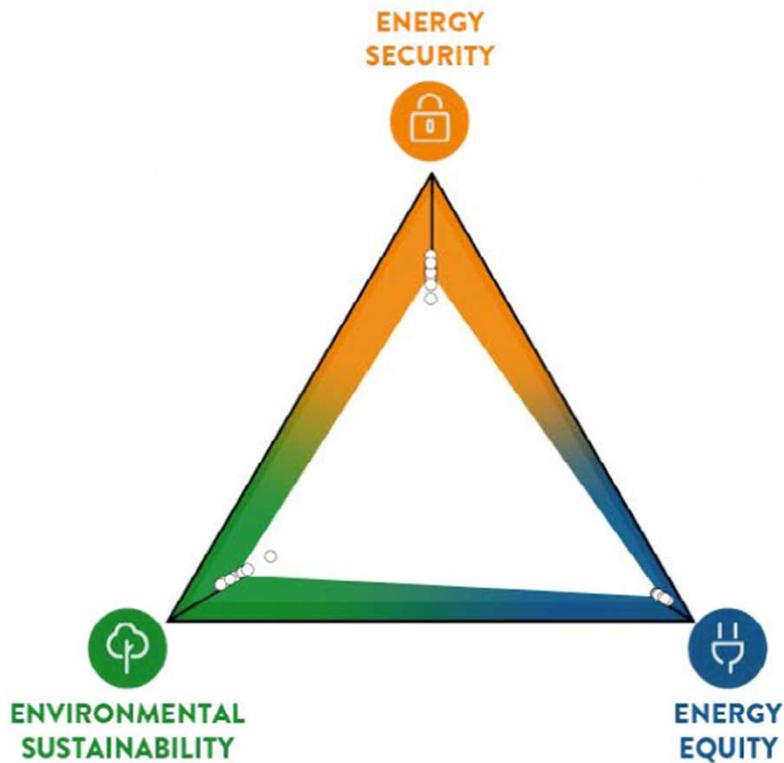
- Indépendance/Souveraineté énergétique
- Diversification fournisseurs
- Sécurité approvisionnement

Politique énergétique

Coût constant et le plus bas possible

- Exportation
- Emplois à haute valeur ajoutée
- Emplois (délocalisables)

# Le trilemme énergétique (Word Energy Council)



## Les 10 pays aux meilleures performances

- 1 Sweden
- 2 Switzerland
- 2 Denmark
- 3 Finland
- 4 United Kingdom
- 4 Canada
- 5 Austria
- 6 France
- 6 Norway
- 7 Germany
- 8 New Zealand
- 9 Slovenia
- 9 Estonia
- 10 United States

Rank

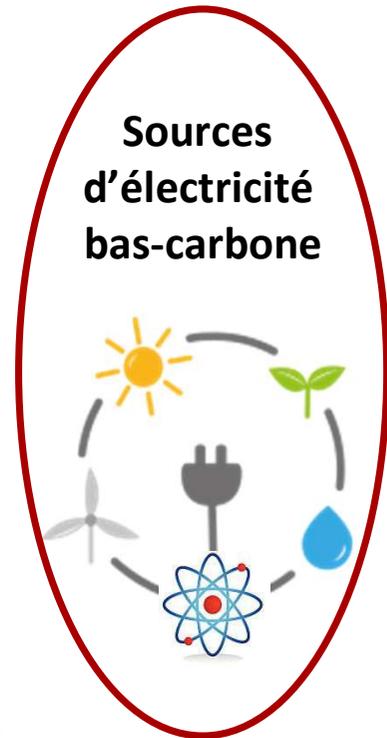
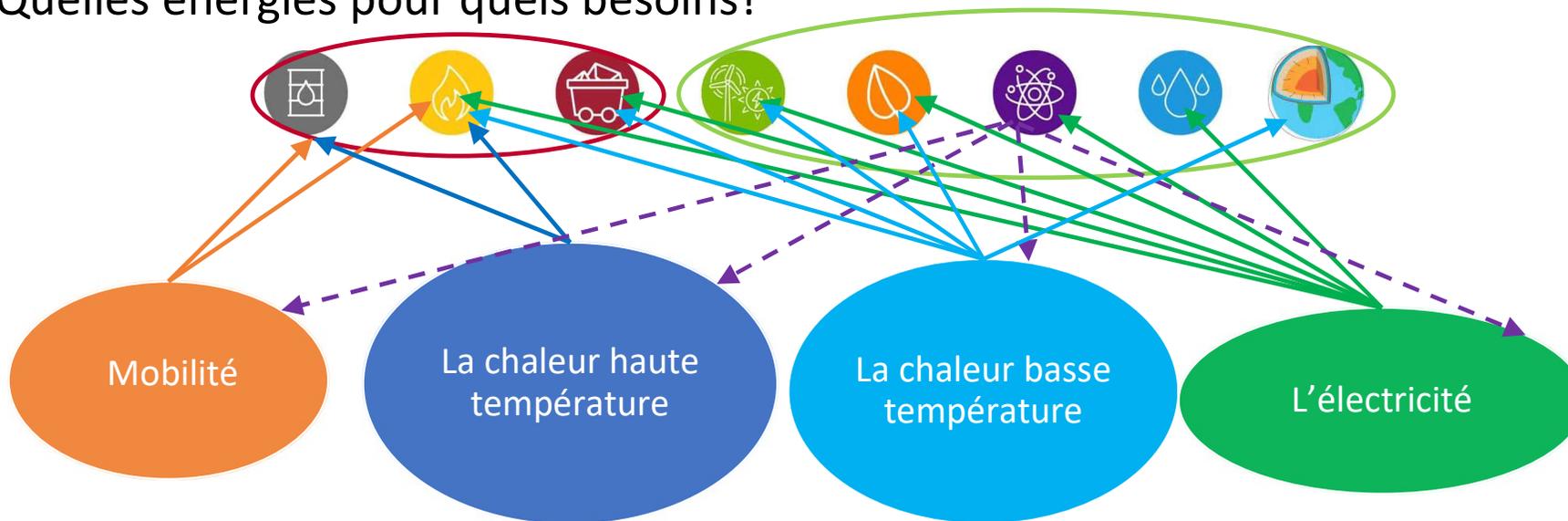
Nous sommes tous en voie de développement!

# La transition énergétique

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



❑ Quelles énergies pour quels besoins?



# La neutralité carbone: définition

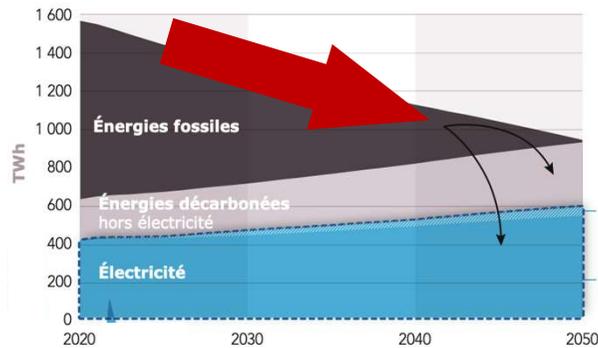
La neutralité carbone :

Émissions de GES

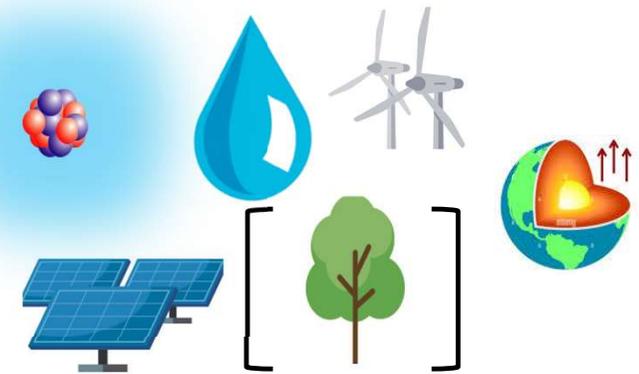


Absorption CO<sub>2</sub>  
(puits carbone)

Deux leviers :

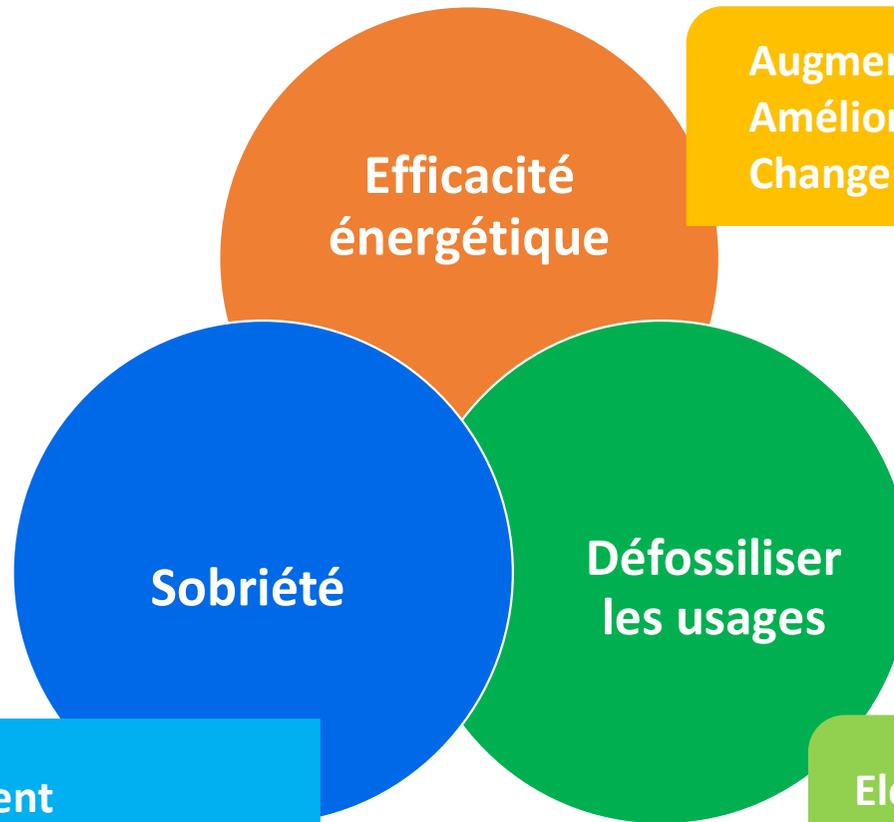


Réduire conso. d'énergie  
Sobriété/efficacité énergétique



Construire un MIX  
Bas-carbone et diversifié

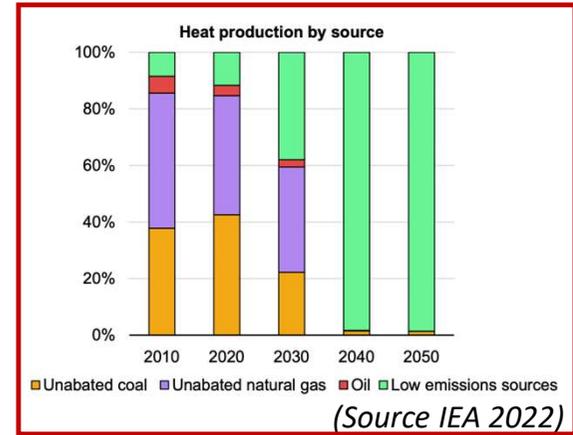
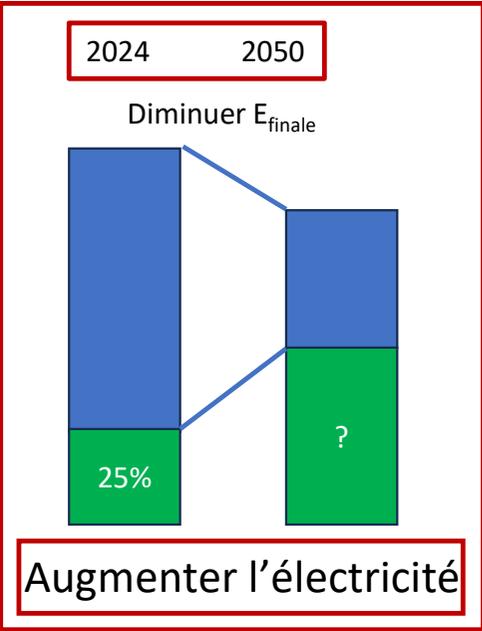
# Les trois piliers de la transition énergétique



Augmenter les rendements  
Améliorer l'existant  
Changer de procédés

Electrification  
Production de chaleur bas-carbone

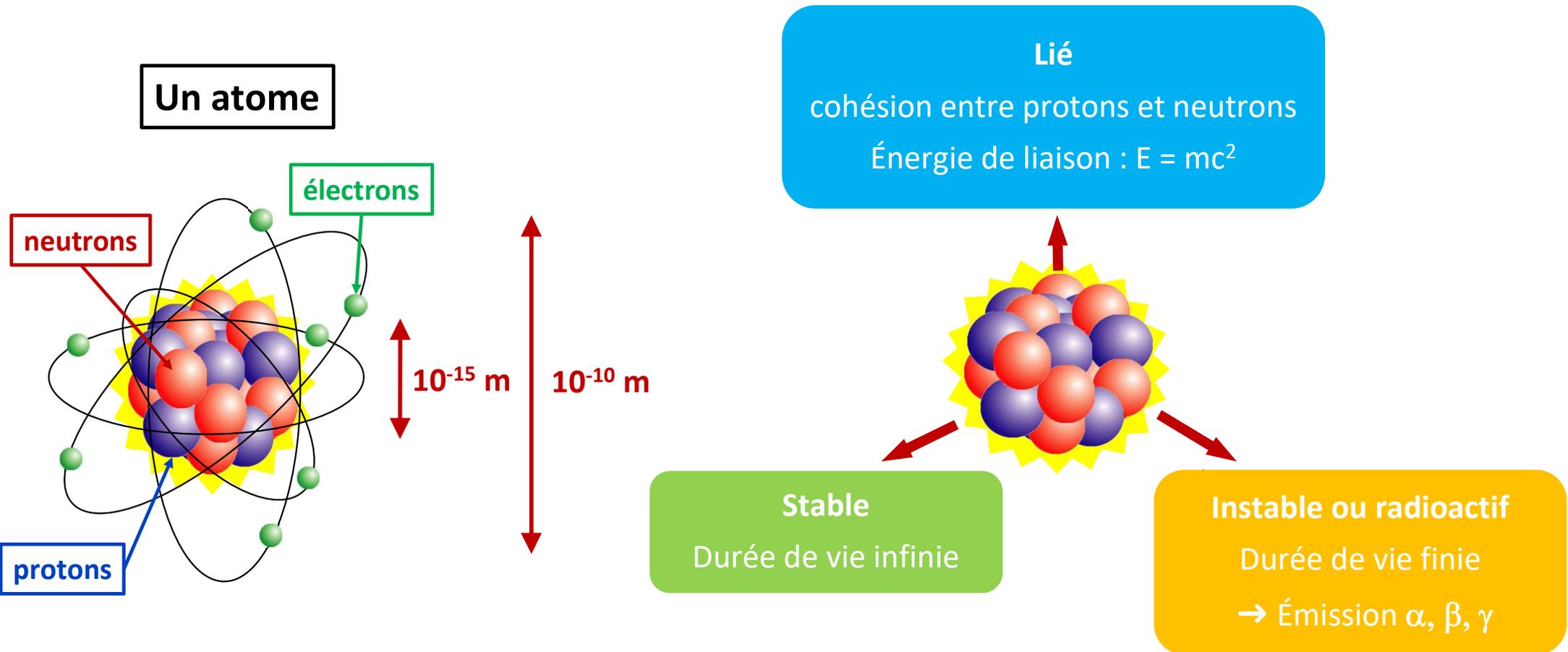
Changement de comportement  
Changement de société et/ou d'économie ?



## **4. L'énergie nucléaire :**

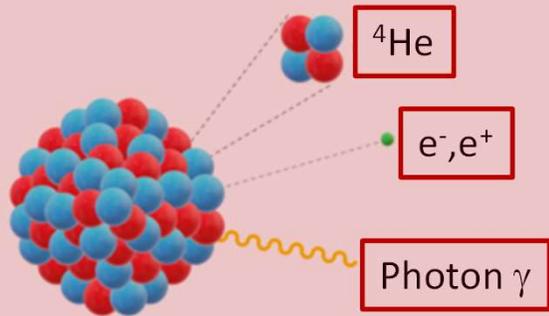
- 1. Un peu de physique nucléaire**
- 2. Histoire et état actuel de la filière**
- 3. L'énergie nucléaire dans le futur :**
  - a) Quels défis pour l'énergie nucléaire?**
  - b) Quelles technologies pour quels besoins?**

# C'est quoi l'énergie nucléaire?



# Loi de la désintégration radioactive

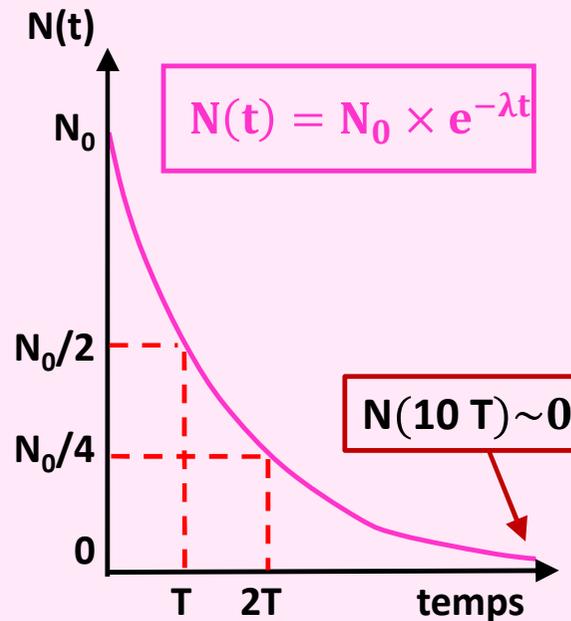
## Un noyau radioactif



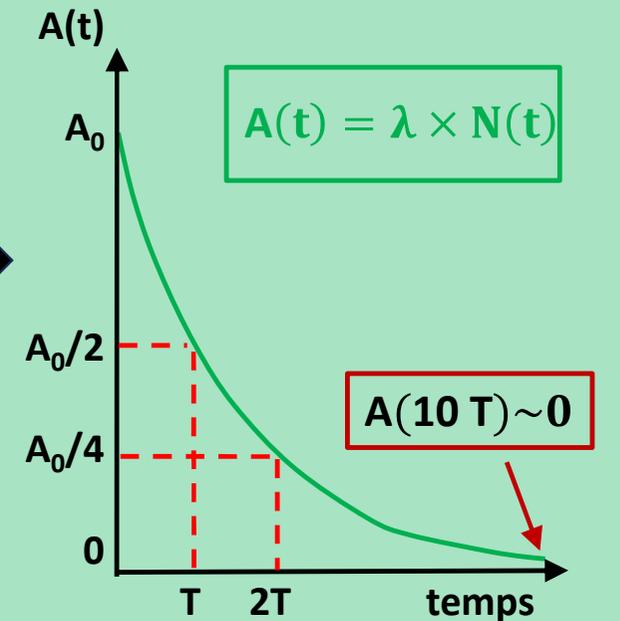
- Période radioactive  $T$
- Constante de désintégration  $\lambda$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

## Nombre de noyaux d'une source radioactive



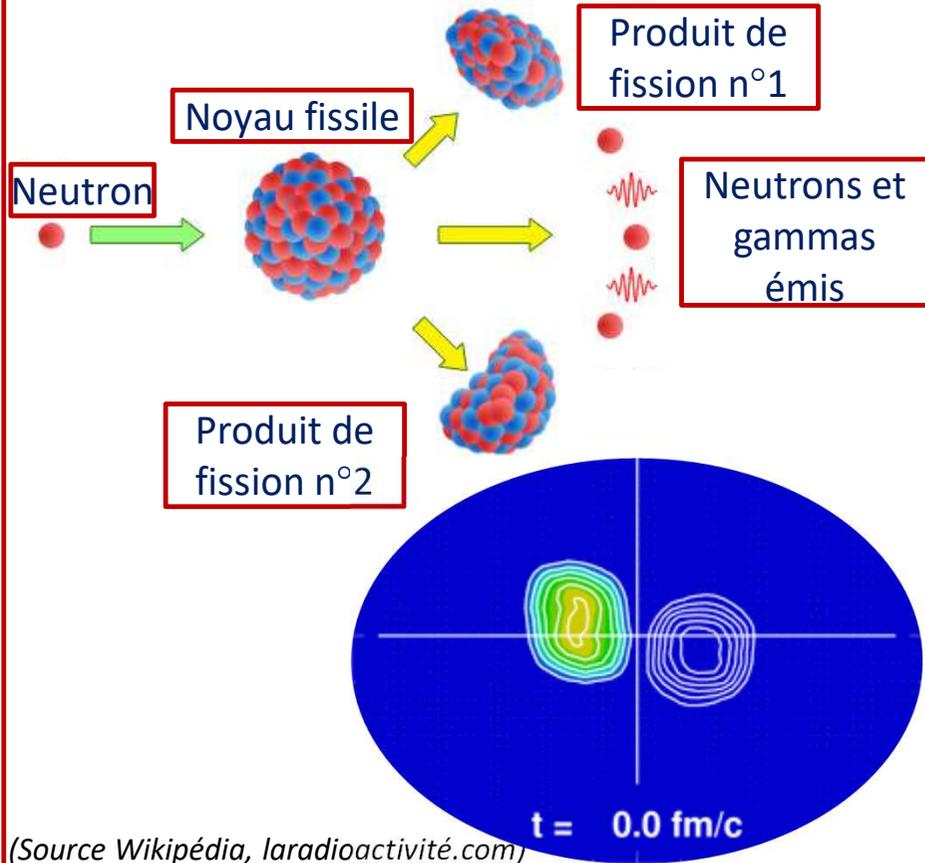
## Activité d'une source radioactive



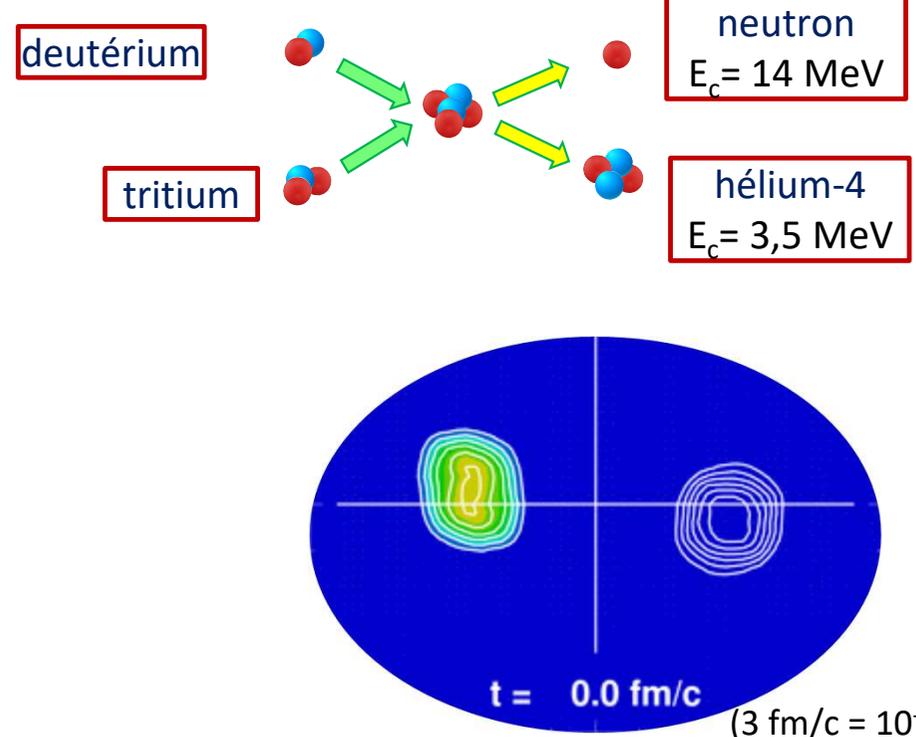
- Unité : le becquerel Bq
- 1 Bq = 1 désintégration/s

# Deux réactions fondamentales : de la science à l'industrie

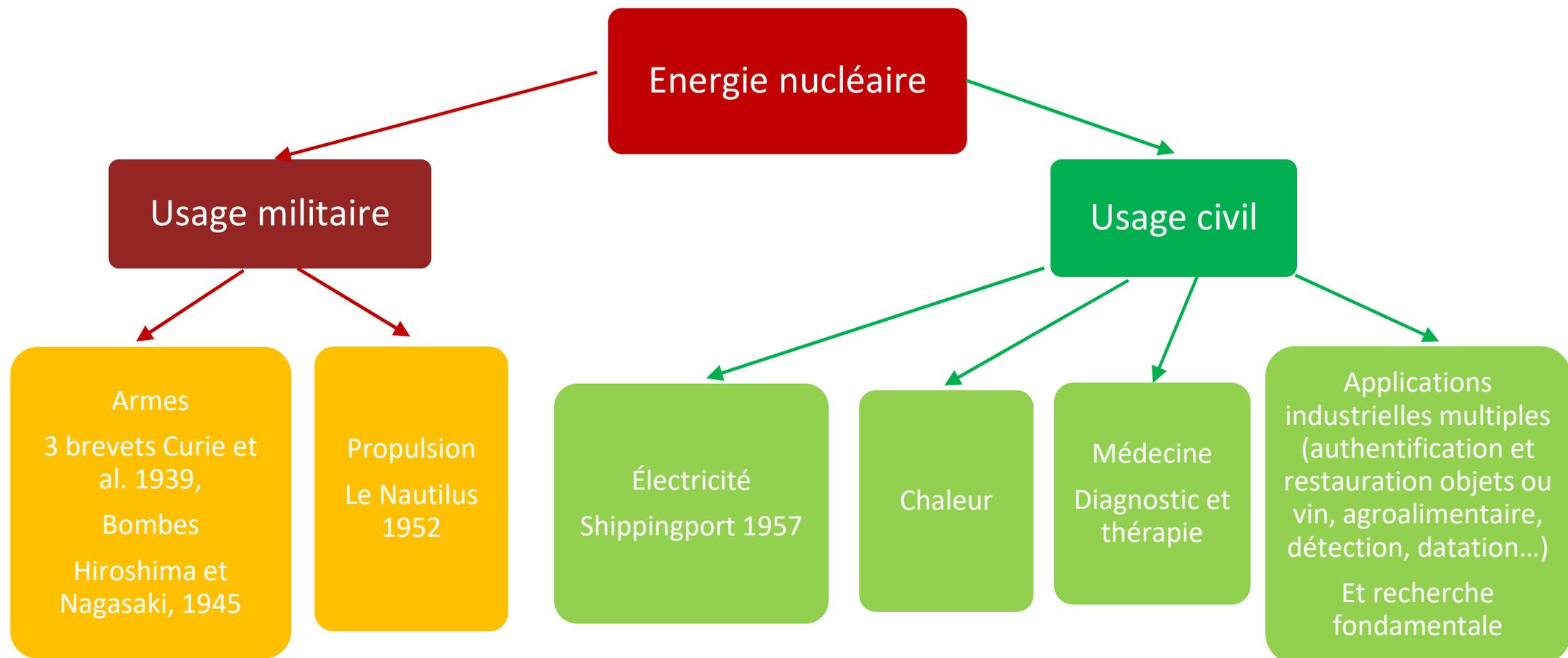
## Réaction de fission



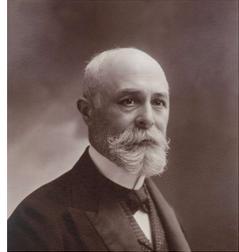
## Réaction de fusion



# Dualité d'usage



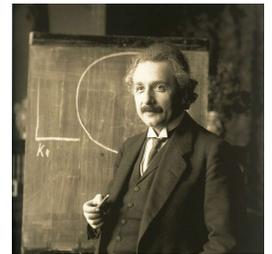
# Les grandes étapes d'une découverte fondamentale



- ❑ 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.  
L'énergie nucléaire



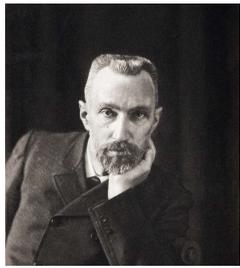
Irène Curie et Frédéric Joliot



Albert Einstein



Enrico Fermi



Marie Curie

Pierre Curie



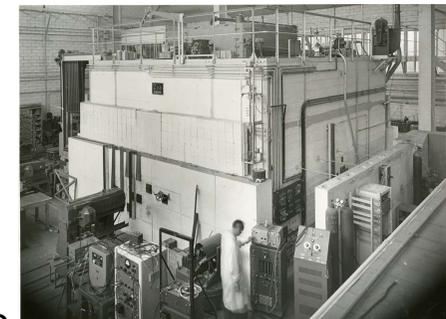
Lise Meitner et Otto Hahn

# Histoire du programme nucléaire français

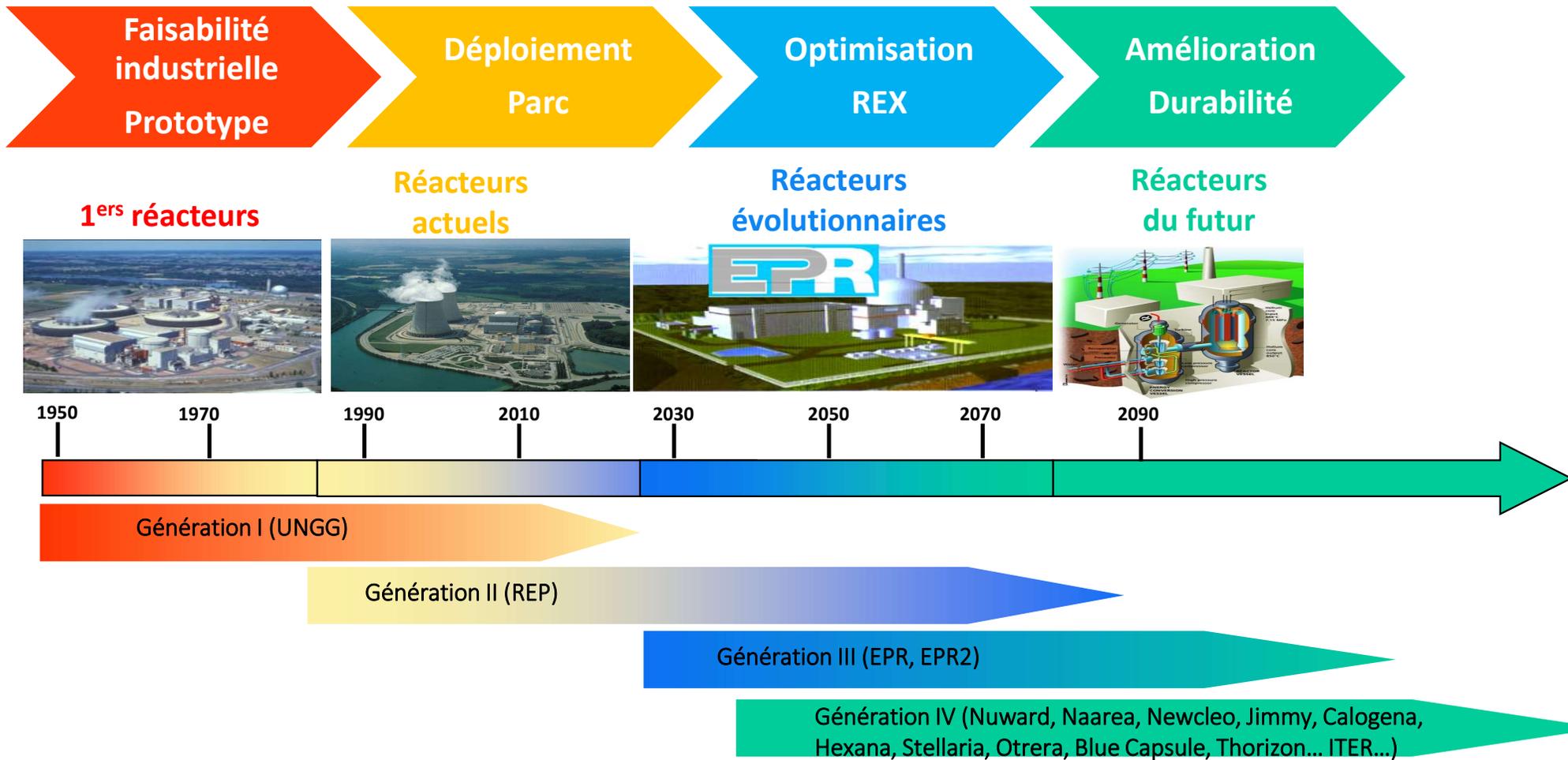
le cnam

WiN FRANCE  
Le Nucléaire au Féminin

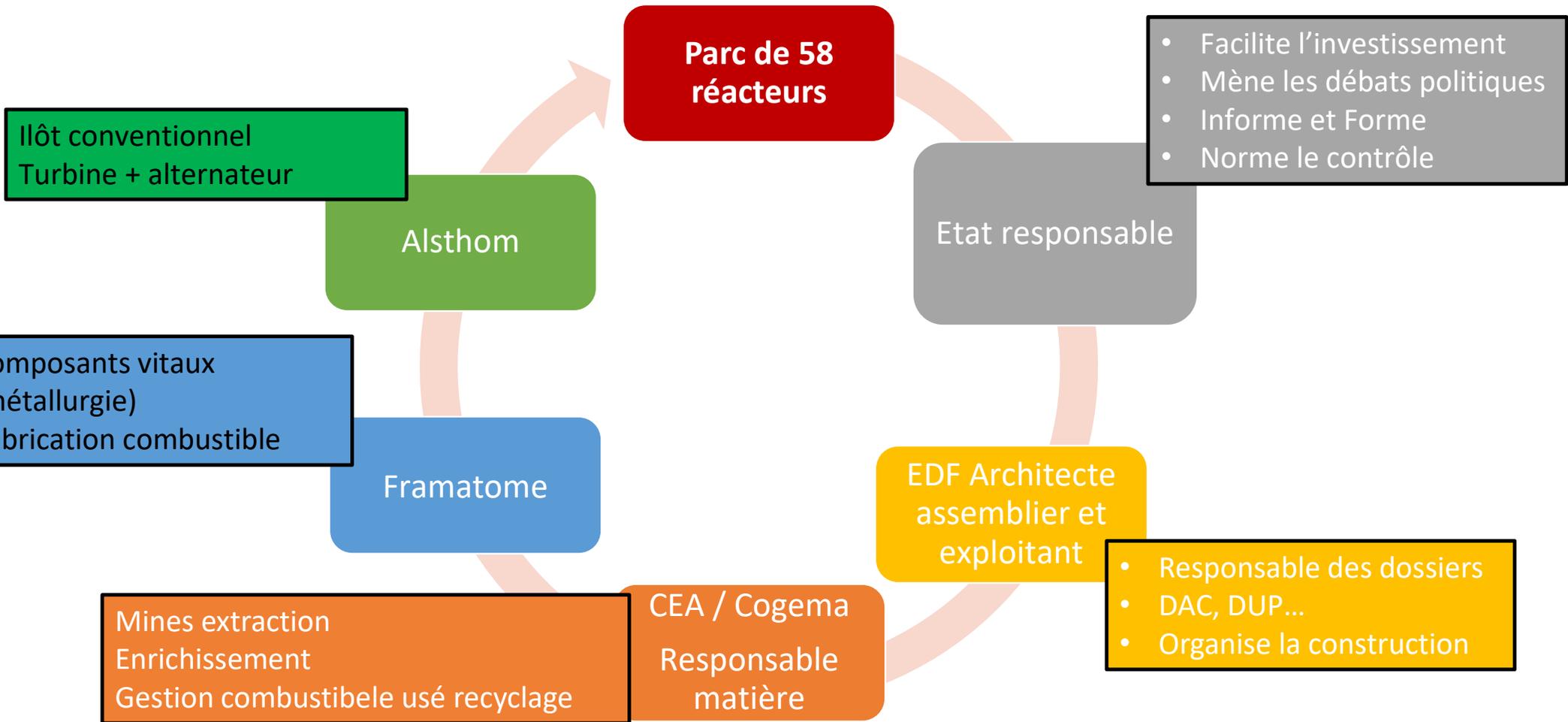
- ❑ 1945 : création du CEA, mission : conduire des recherches pour développer une capacité nucléaire civile comme militaire.
- ❑ 15/12/48: la pile Zoé diverge.
- ❑ 1954: décision du gouv't de Pierre Mendès France de doter la France de l'arme nucléaire.
- ❑ 13/02/60 : 1<sup>er</sup> essai nucléaire français à Reggane, dans le désert du Sahara.
- ❑ 14/08/64 : le PAT (prototype à Terre), 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 PR E.Macron décide de construire 6(+8) EPR2.
- ❑ 03/23 : Le SNA Duguay-Trouin effectue sa première sortie en mer.
- ❑ 8/05/24 : MIS de l'EPR de Flamanville.



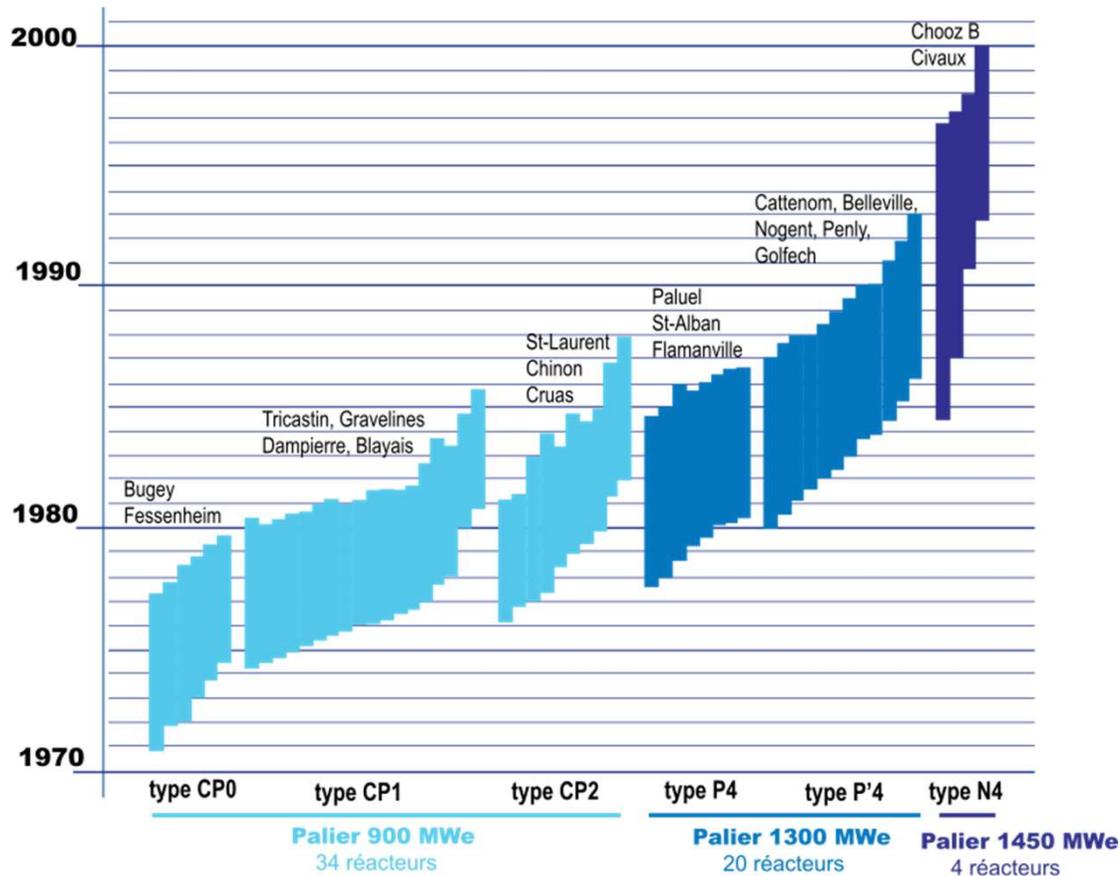
# Les différentes générations de réacteurs



# Le plan Messmer

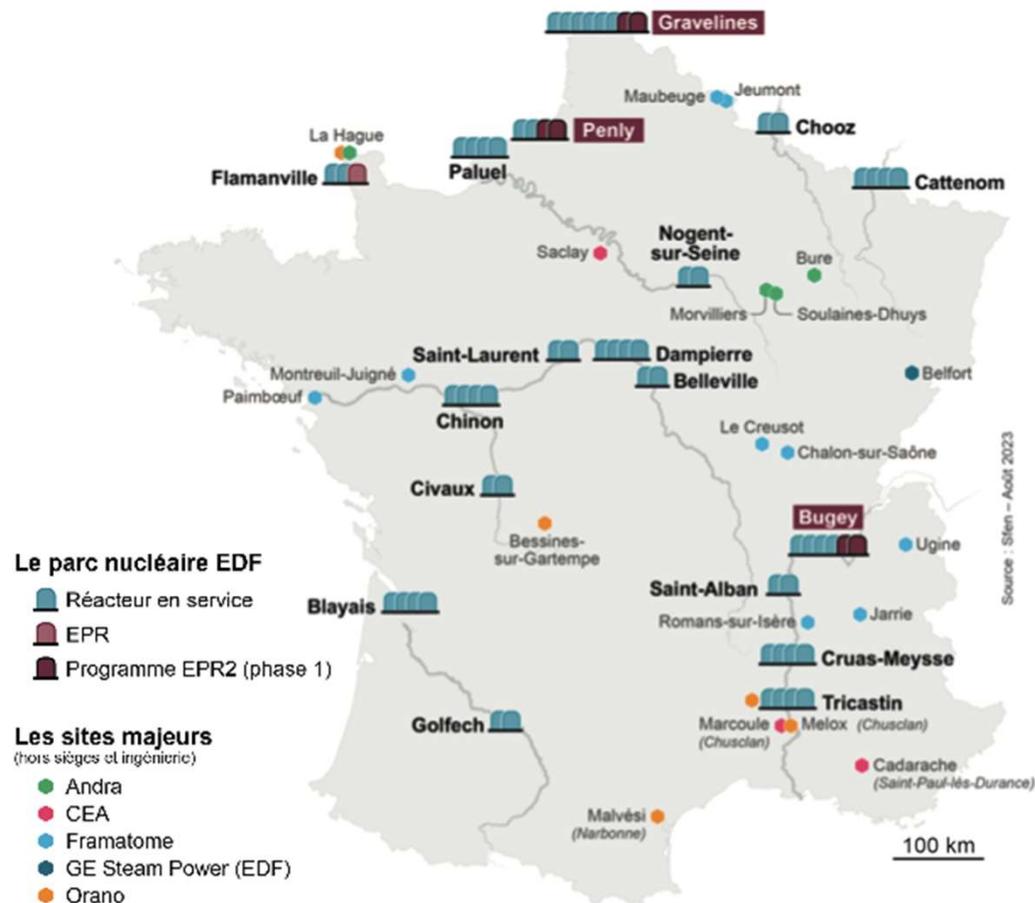


# Planning de construction plan Messmer



- ❑ 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.

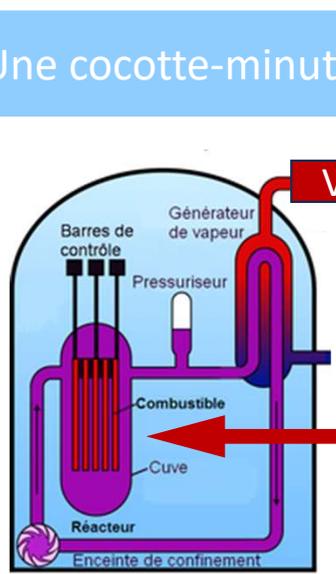
# Le parc français



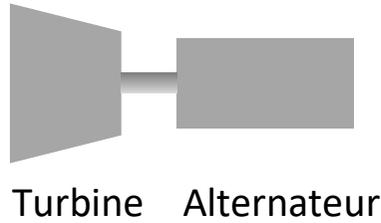
- ❑ Parc actuel : 61,4 GWe installé.
  - 18 sites ; 56 réacteurs REP
  - 32 REP900; 20 REP1300; 4 REP1450.
- ❑ EPR de Flamanville :
  - 1,65 GWe
  - MIS le 8 mai 2024.
- ❑ Projets futurs:
  - 3 paires EPR2 (Penly, Gravelines, Bugey)
  - 4 paires possibles en préparation
- ❑ En démantèlement: Au 1<sup>er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

# Un réacteur nucléaire: de l'infiniment petit au macroscopique

Une cocotte-minute!



Vapeur d'eau



Electricité

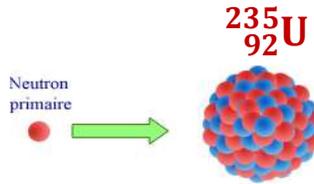
Chaleur

$$P_{th} = E_{fission} \times \text{taux de fission}$$

Watt

Joules

Nombre de fissions/s

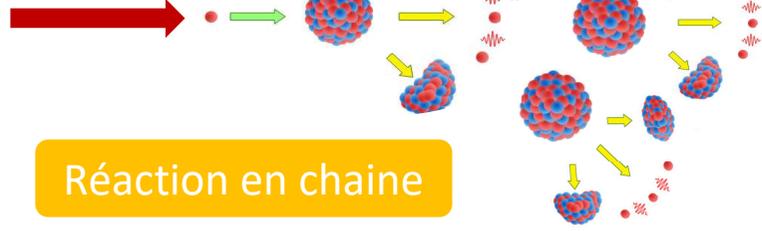


Une fission

Produit de fission A

Neutrons et gamma secondaires

Produit de fission B



Réaction en chaîne

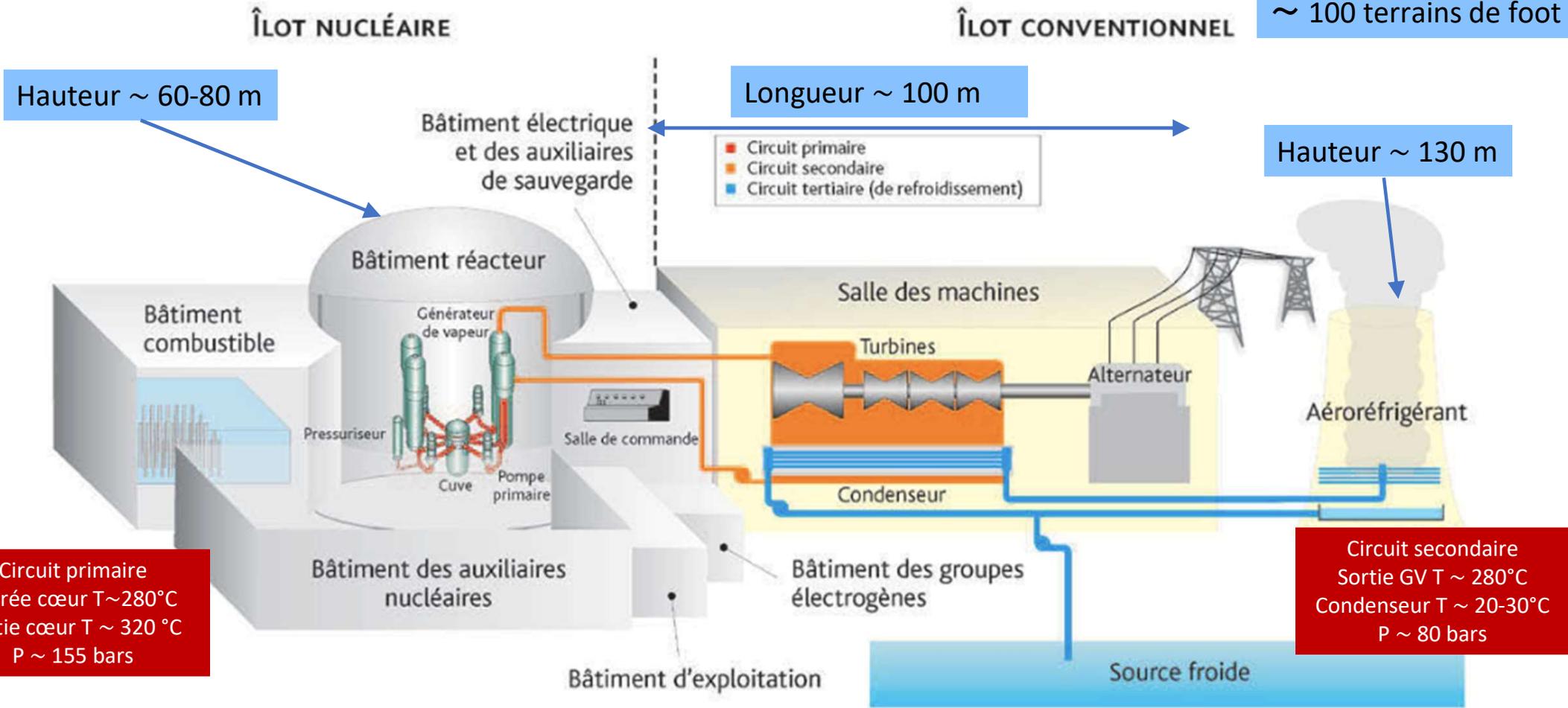
Pour 1 réacteur de 1GWe

$$N_{fissions} \cong 10^{20} \text{ fissions/s}$$

(Source d'après dessins site la Radioactivité)

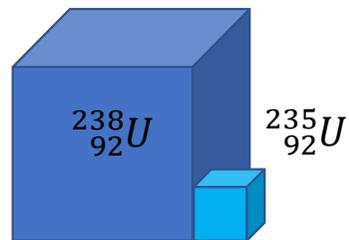
# Vue d'ensemble

Superficie d'une centrale  
 ~ 100 hectares = 1 km<sup>2</sup>  
 ~ 100 terrains de foot



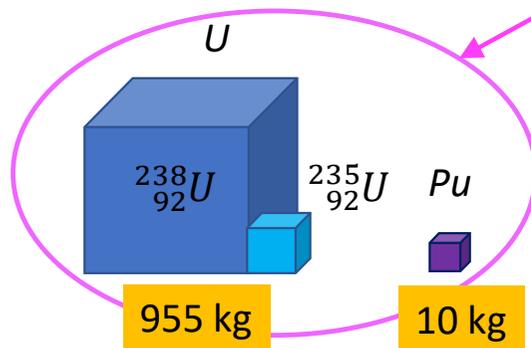
# Le combustible

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

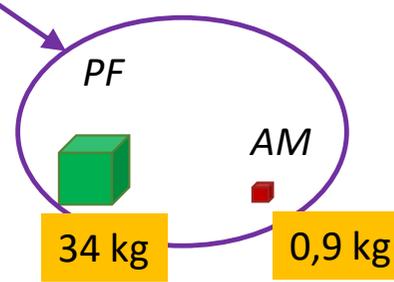


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes



Après passage en cœur :

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

# Le nucléaire durable

Noyaux fissiles



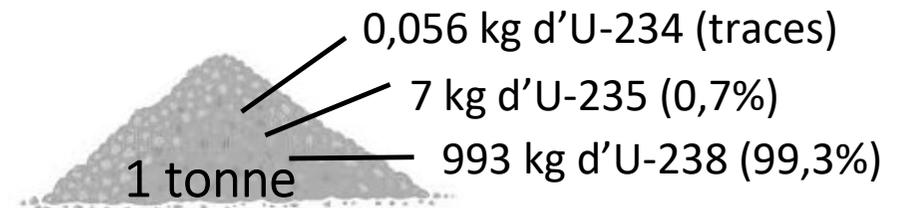
Noyaux naturels

Noyaux artificiels

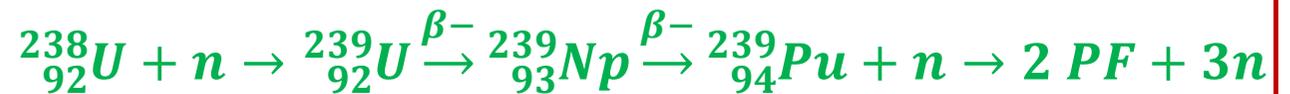


Noyaux fertiles

Composition uranium naturel : 3 isotopes



réaction de fission des REL



réaction de fission des RNR

# Quels avantages pour la transition énergétique?

☐ L'énergie nucléaire est une énergie bas carbone.



(Source GIEC)

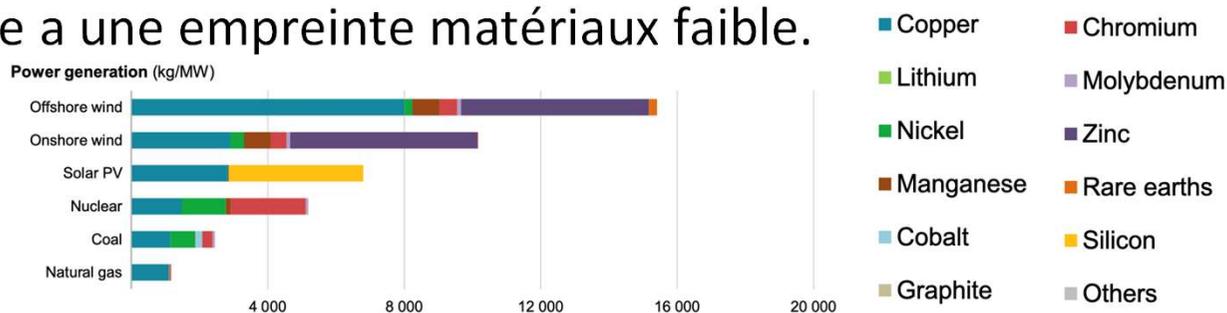
☐ L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée.



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

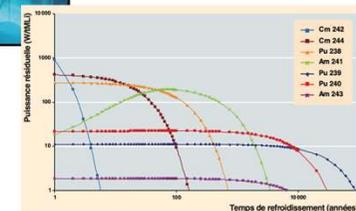


## ☐ Freins intrinsèques à l'utilisation de l'énergie nucléaire :

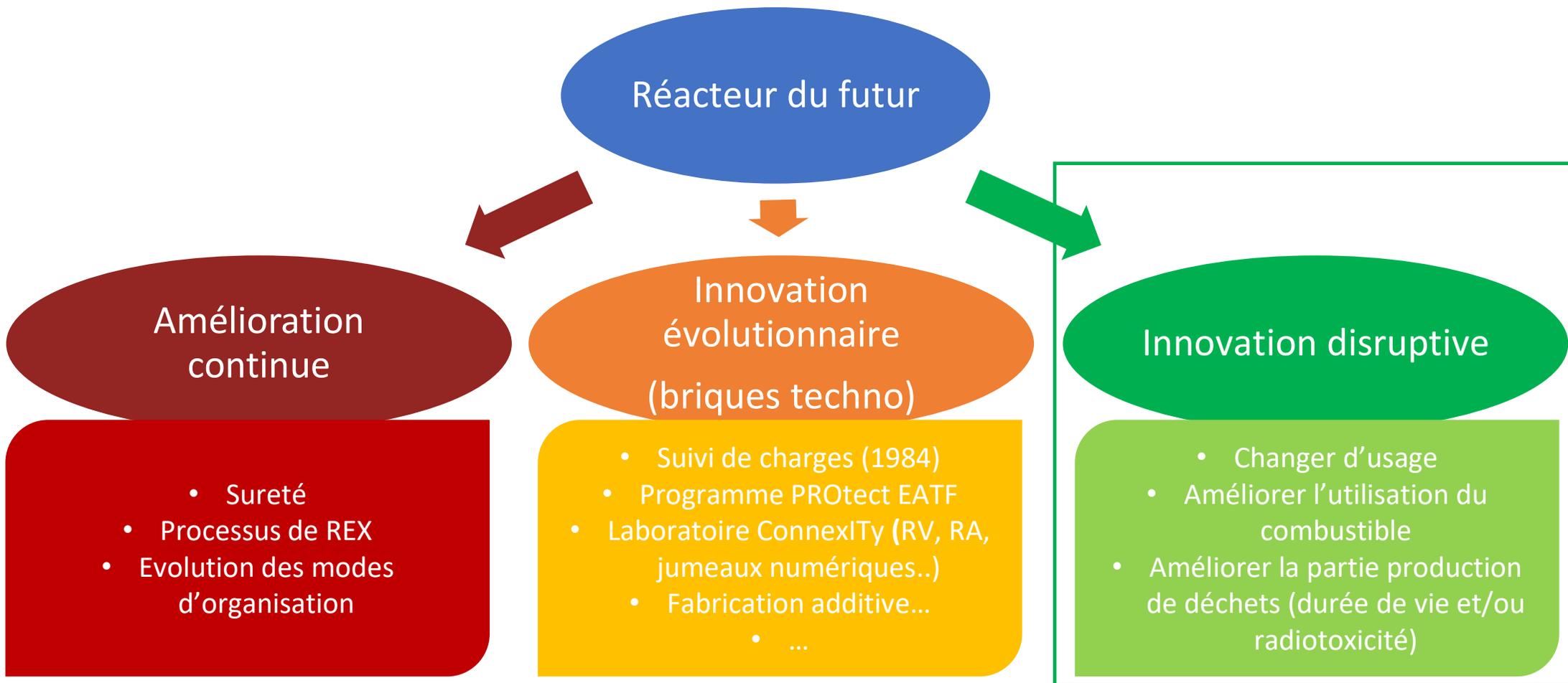
- Coût d'investissement élevé (toutes filières),
- Arrêts pour rechargement : perte de disponibilité,
- Mauvaise utilisation de l'uranium,
- Contraintes d'exploitation résultant de l'enceinte de confinement,
- Puissance résiduelle à évacuer (toutes filières).



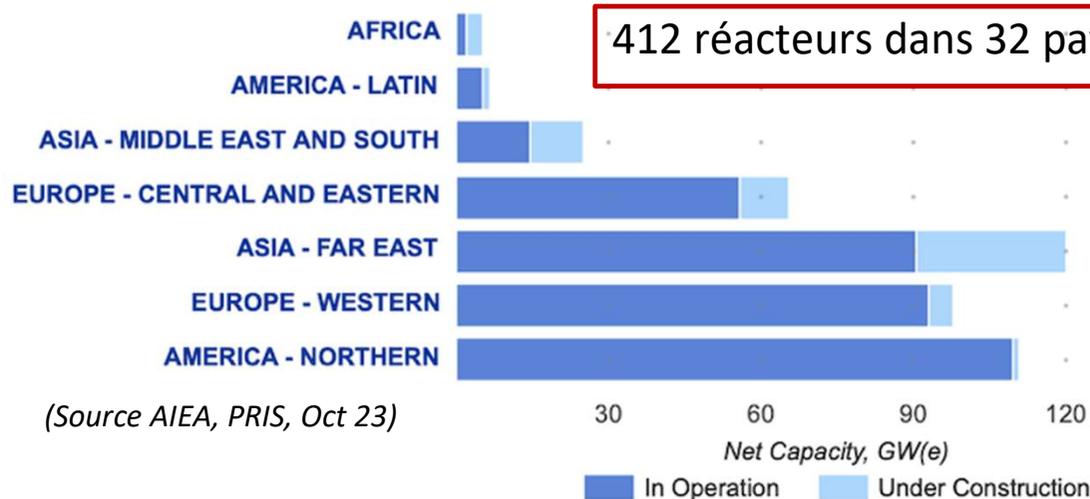
(source Wikipédia, IRSN, TI BN3296, CEA)



# Les processus d'innovation dans le nucléaire



# Nouveaux programmes de construction



412 réacteurs dans 32 pays

Alliance du Nucléaire  
(16 pays européens)

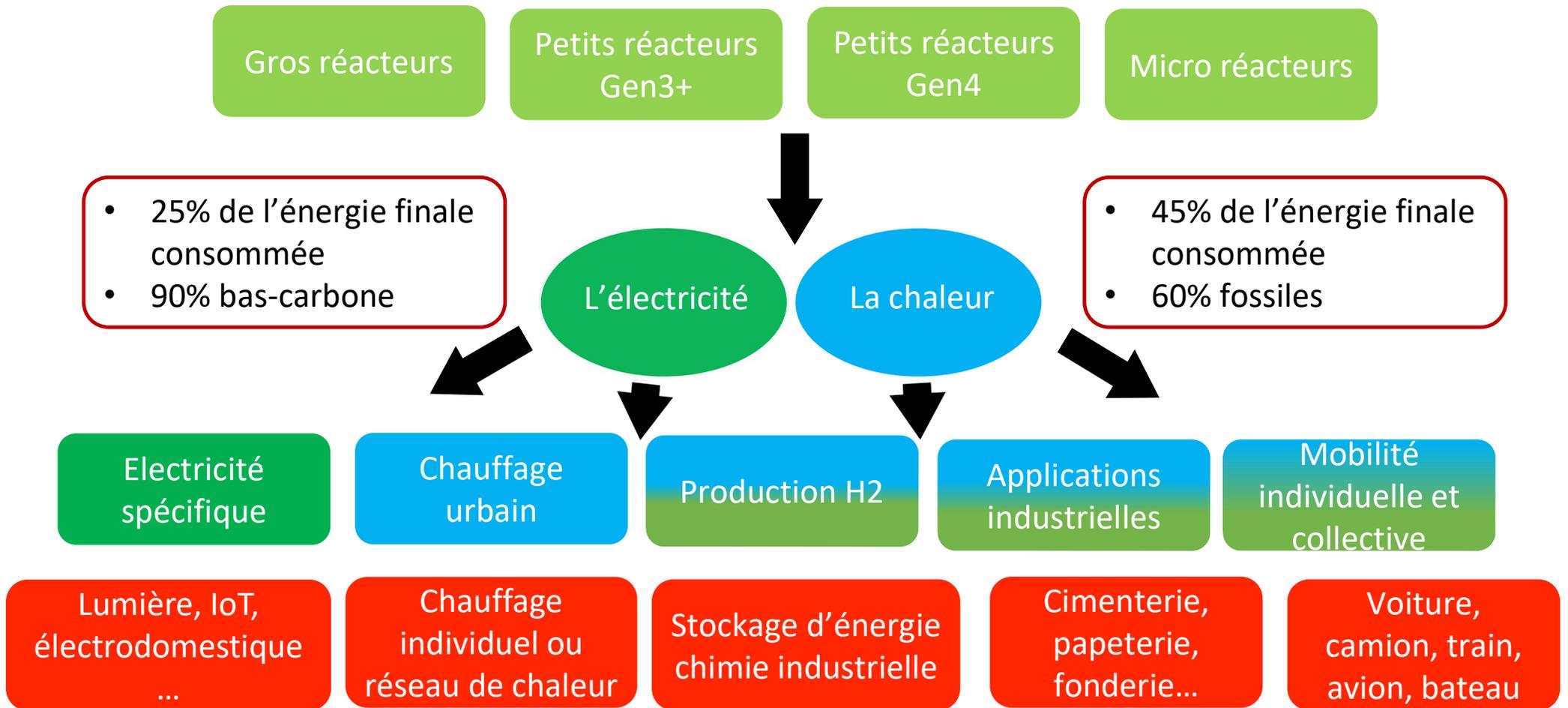
Pays intéressés : France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie Suède.



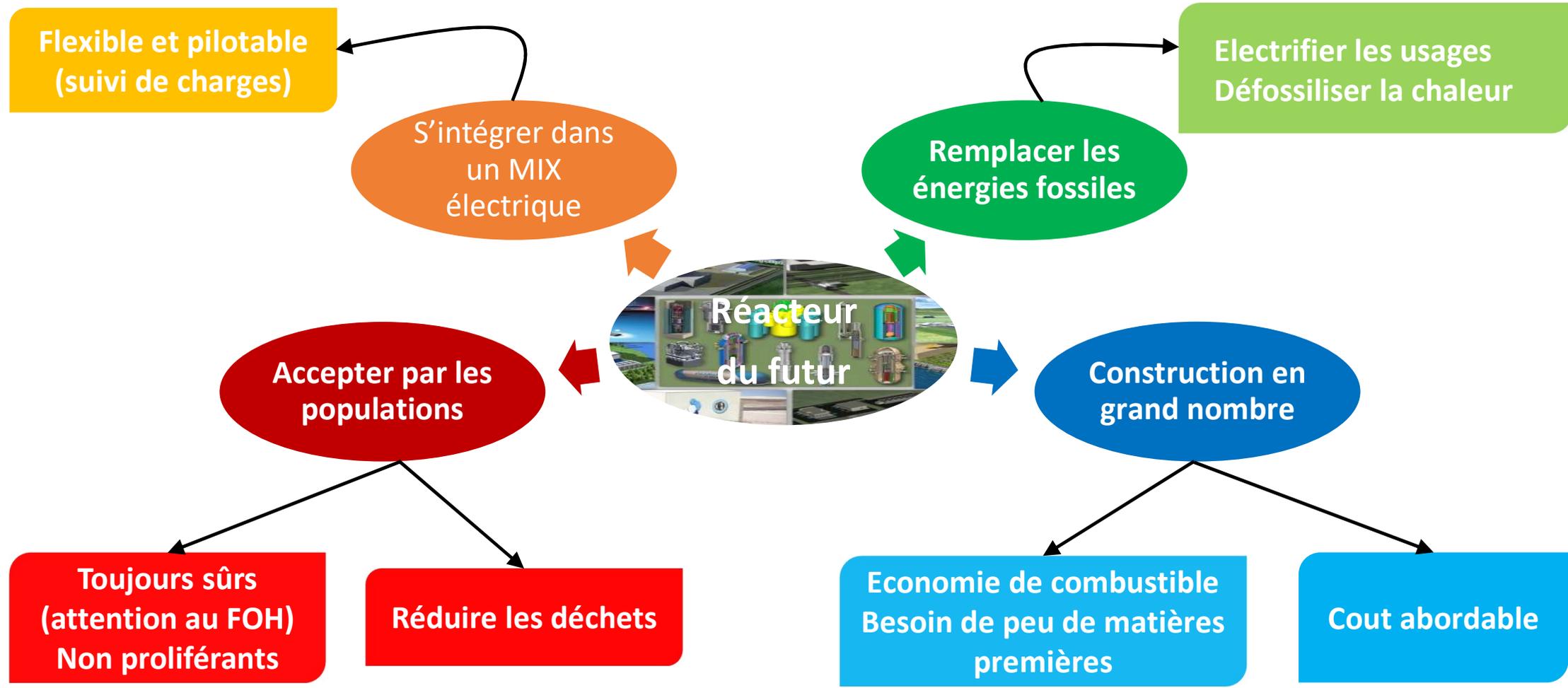
Puissance installée = 370,17 GWe  
Production électrique = 2486,8 TWh en 2022

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

# A quoi peut répondre l'énergie nucléaire?



# A quoi doit répondre un réacteur du futur?



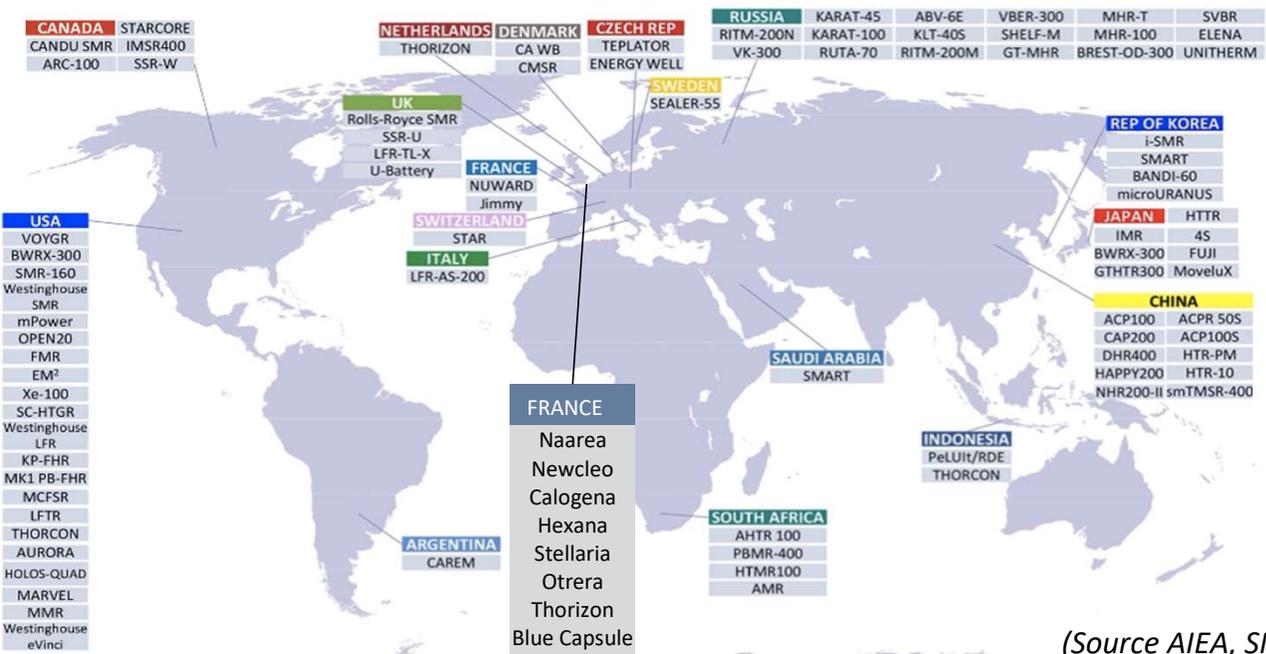
# Concepts du futur (SMR/AMR)

- ❑ 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

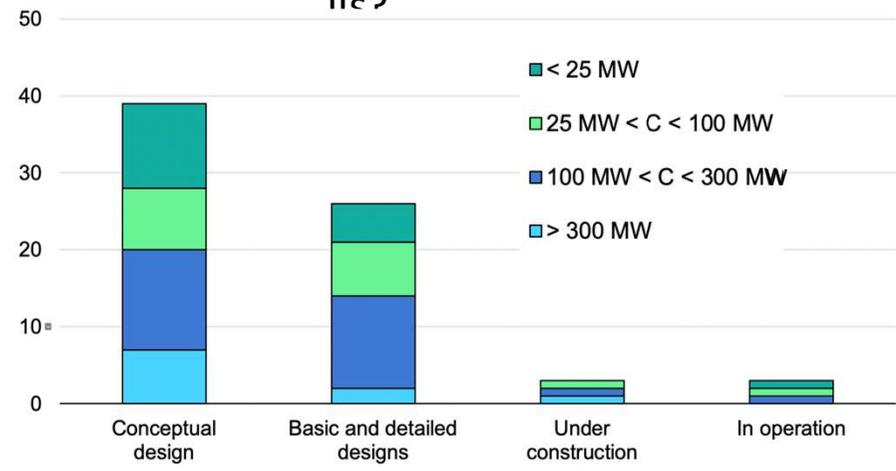


(Photos Source AIEA)

# Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



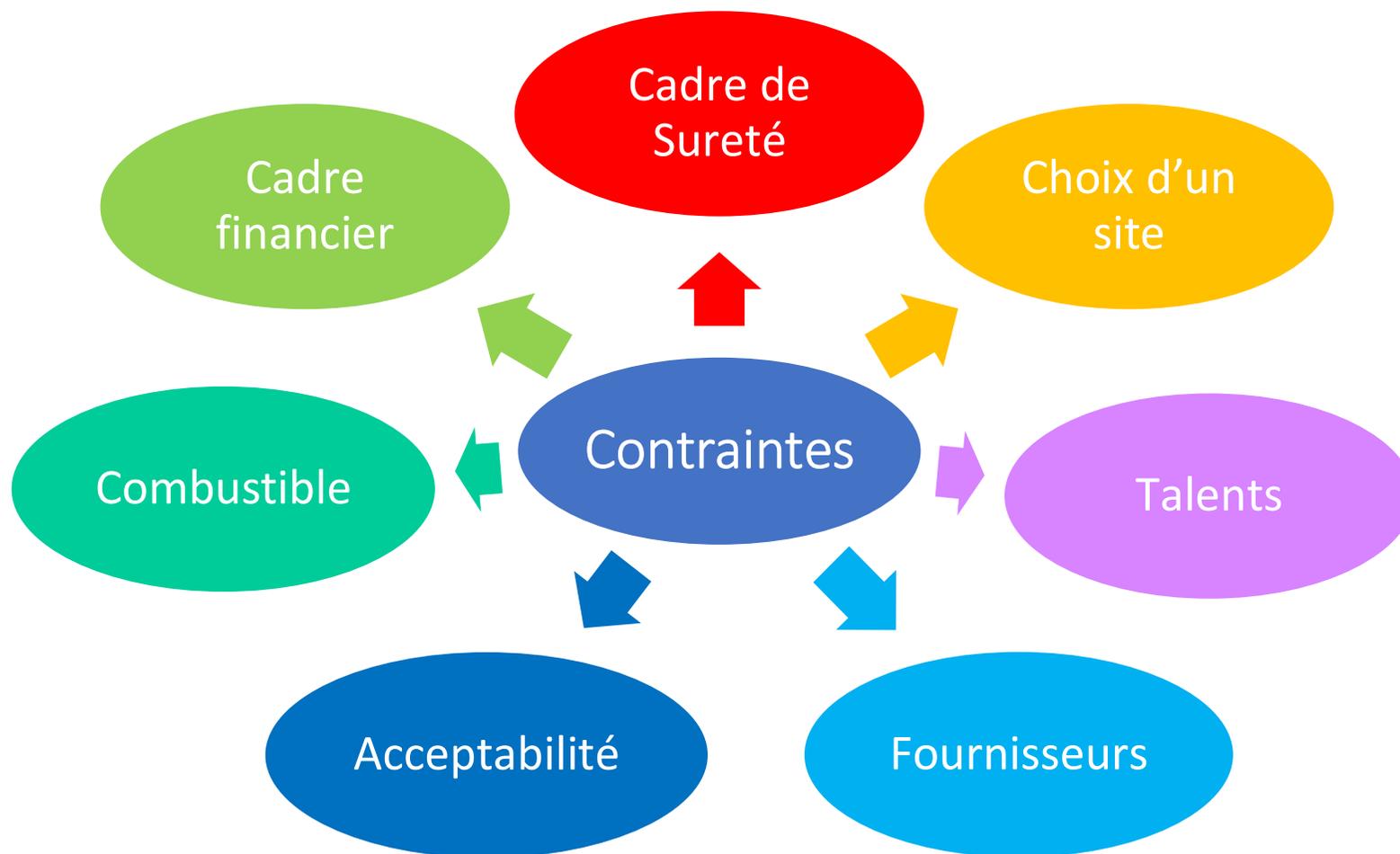
Où en sont-ils ?



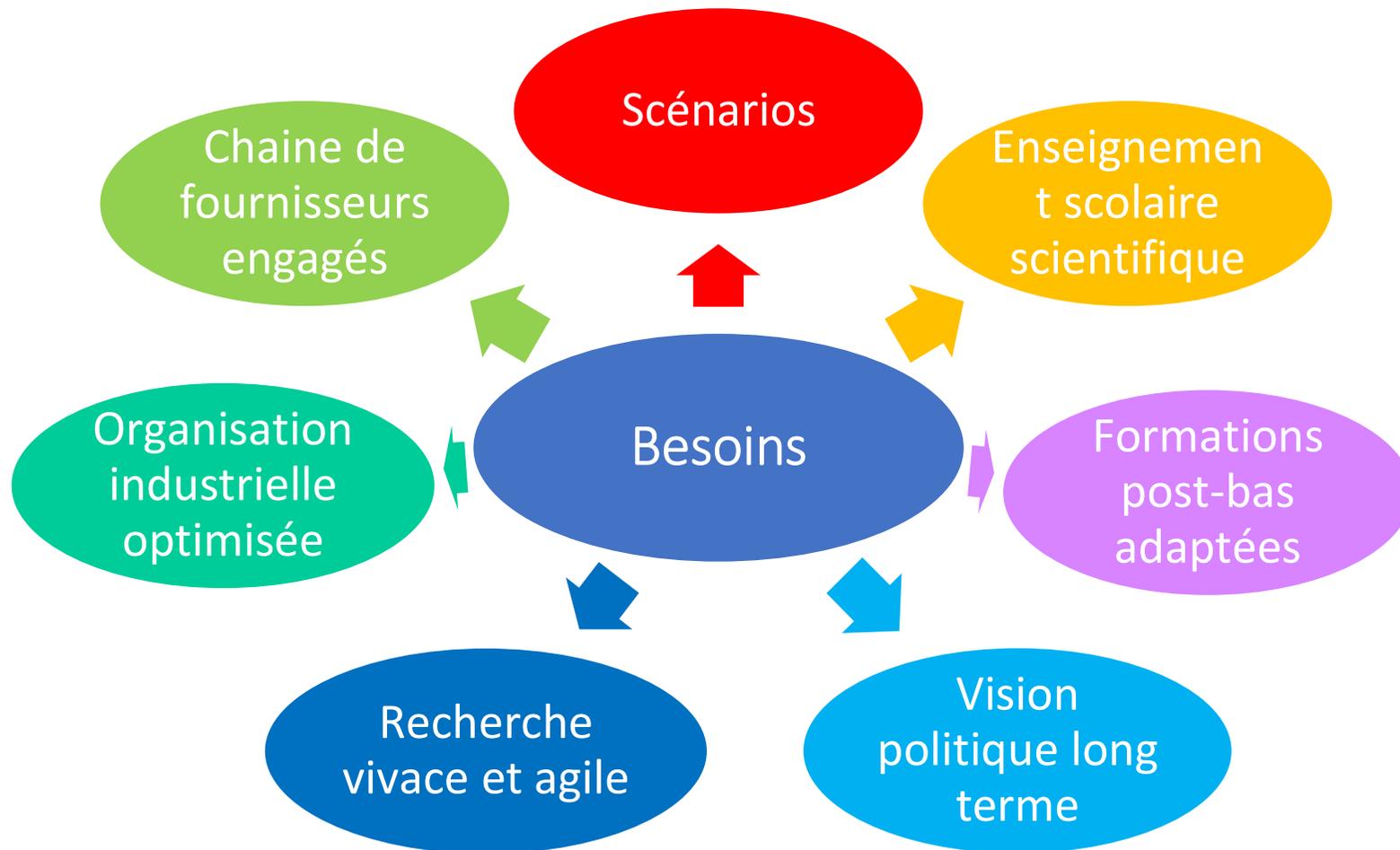
(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

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

# Conditions de succès



# Conditions de succès

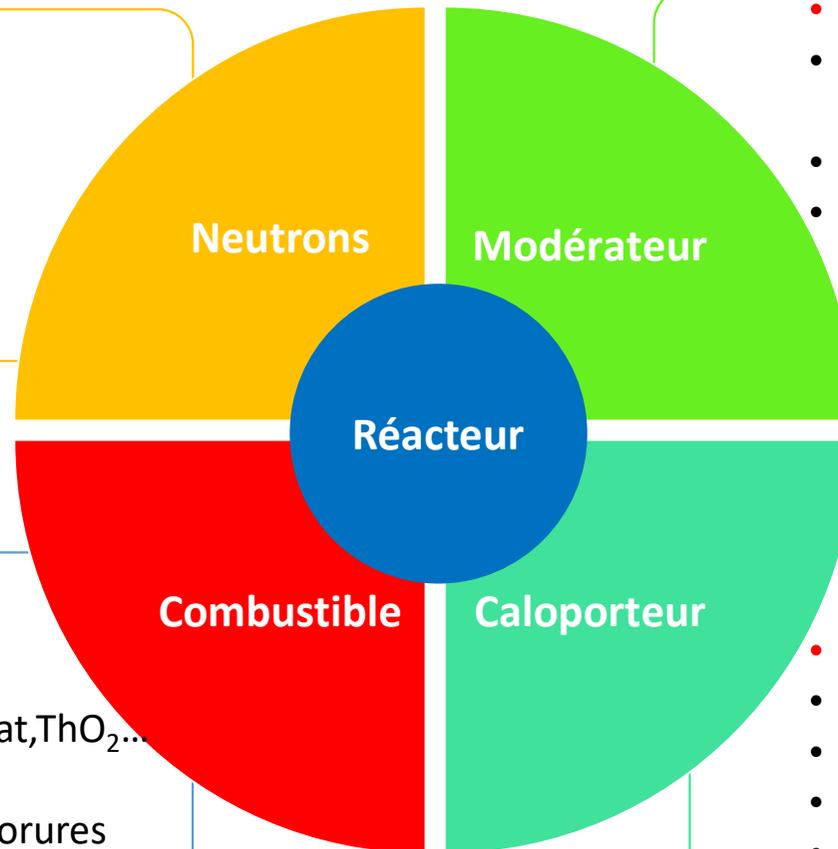


# Les multiples filières de réacteurs

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

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

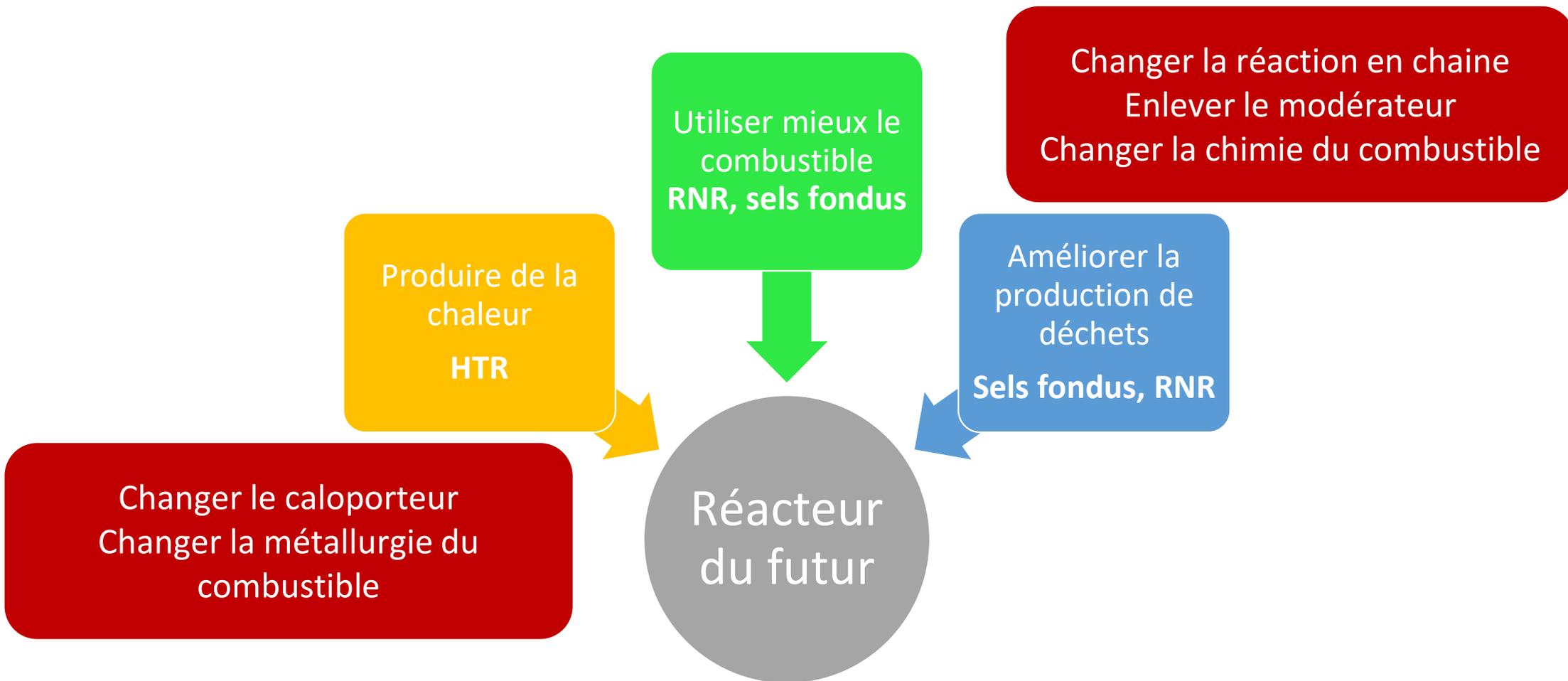
- **Noyaux fissiles et/ou fertiles**
- Combustible solide:  $\text{UO}_2$ , MOX, Unat,  $\text{ThO}_2$ ...
- Combustible liquide:  
 (U/Pu ou Th/U) + sels fluorures ou chlorures



- **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...)

# Innovation dans les réacteurs nucléaires



# 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

# Evolution des technologies de fission

Parc REP



Amélioration  
continue

Technologie  
maîtrisée

Verrous  
scientifiques,  
technologiques  
ou industriels

EPR, EPR2



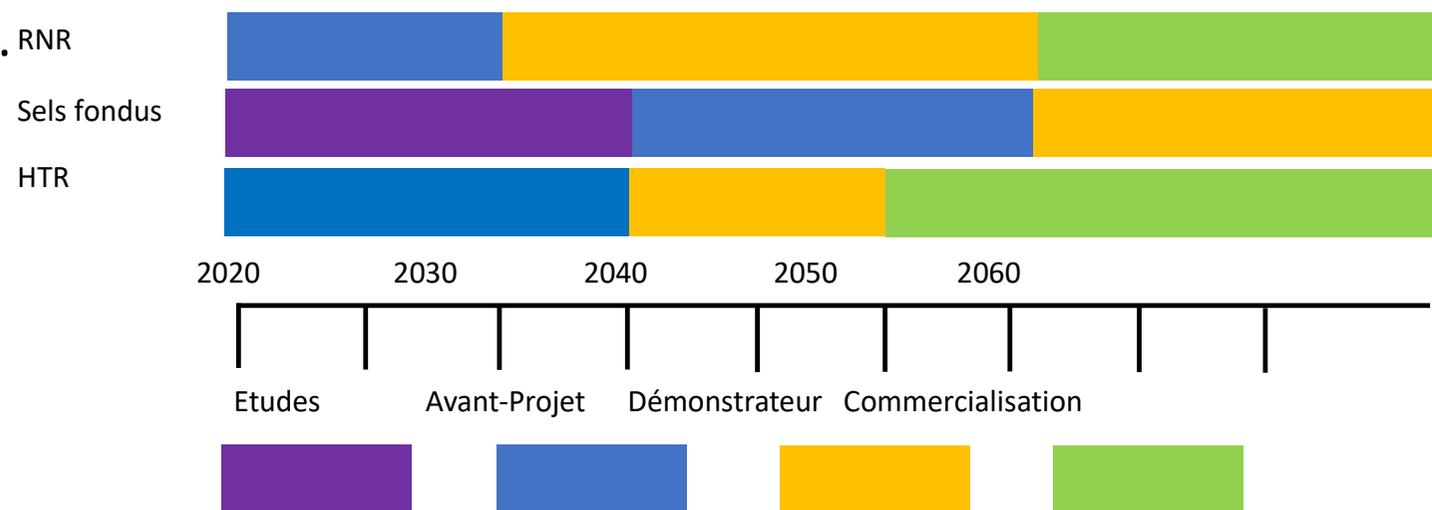
# Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

## ❑ 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.



## 5. La filière nucléaire : ses besoins et ses métiers

# L'industrie nucléaire: une industrie du temps long

R&D et études



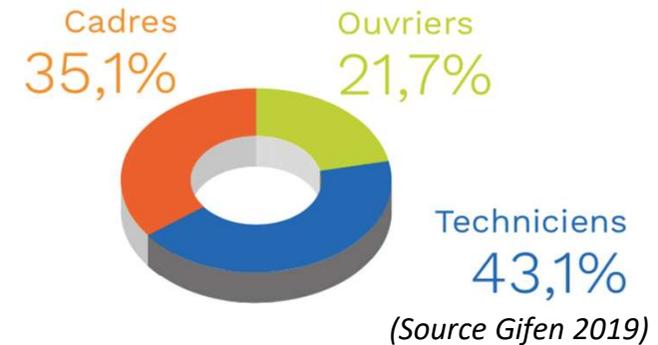
~20 ans

Fabrication et construction

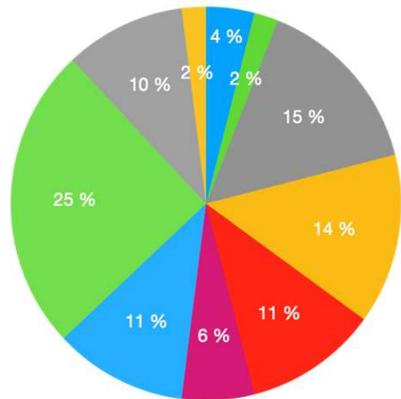


**Plus de 100 métiers techniques à haute valeur ajoutée**

Métiers hautement qualifiés



Pluridisciplinarité des compétences



- Chimie
- Code et simulation
- Mesures et Instrumentation
- Sureté, Physique des réacteurs
- Matériaux, Métallurgie, CND
- Génie Civil
- Electromécanique
- Opérations, Maintenance, gestion de projet
- Design, Thermohydraulique
- Radioprotection

Exploitation et maintenance



Démantèlement

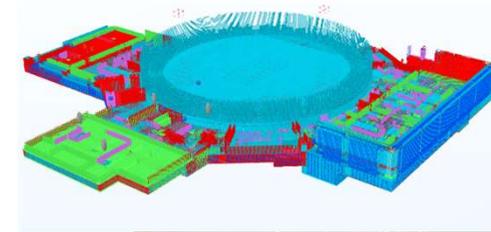


~ 30 ans

Gestion des déchets



# Chiffres clés de la filière nucléaire française



- ❑ 3<sup>ème</sup> filière industrielle, 6,7% des emplois industriels.
- ❑ CA de 47,5 Milliards d'€.
- ❑ 220 000 emplois, 3 000 entreprises (85% TPE/PME) dans tous les territoires.
- ❑ Une industrie :
  - créatrice de valeur (contribue pour 6 Mds € /an à la balance commerciale),
  - créatrice d'emplois non délocalisables et hautement qualifiés (10 000 emplois/an),
  - créatrice d'une image à l'international (50 % des entreprises ont une activité à l'export),
  - créatrice d'innovation (budget R&D 970 M d'euros/an, transition numérique bien avancée)
- ❑ Un système industriel complet permettant d'atteindre une souveraineté énergétique.
- ❑ Autorité de sûreté nucléaire (ASN) est réputée dans le monde entier.





# Futur et enjeux de la filière nucléaire

## Plusieurs importants projets : penser le présent et le futur

- Le grand carénage, jouvence usines du cycle
- MIS EPR de Flamanville + Construction des EPR2
- Cigéo
- Projets de SMR/AMR
- Démantèlement des anciennes installations
- ITER

- Programme Barracuda en cours
- Projet SNLE-3G
- Projet PA-NG

## Des défis en matière d'ingénierie

- Une transition numérique indispensable,
- Des chantiers d'envergure à forts enjeux HSE et économiques,
- La mise en œuvre de technologies complexes, voire innovantes,
- Une maîtrise des coûts et des plannings,
- Promouvoir à l'international les solutions françaises.



# Quels métiers?



Conception-Etudes, ingénierie Système, Gestion de projet, Planification, Informatique, chimie, MEP, Génie Civil

Transport-logistique, inspection, Maintenance, mesures nucléaires

Fabrication, CND, essais et mise en service

Manutention, Levage, déchets

Spécialités nucléaires (neutronique, thermohydraulique)

Ressources humaines, droit du nucléaire, communication, finance (comptabilité, gestion...)

## Conclusion

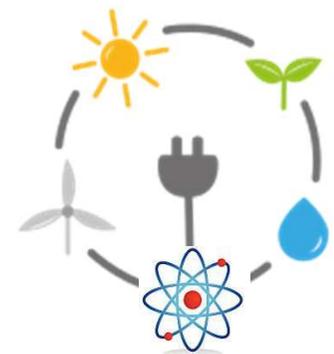
- ❑ Plus de 80% de notre consommation d'énergie est d'origine fossile.
- ❑ La transition énergétique : énergies fossiles vers énergies bas-carbone.
- ❑ Elle s'appuie sur :
  - Efficacité énergétique,
  - Electrification des usages,
  - Diminution de la consommation d'énergie.
- ❑ Les enjeux de souveraineté énergétique et de réindustrialisation, contraints par la lutte contre le réchauffement climatique.



**Énergie nucléaire incontournable (électricité et chaleur)**

le cnam

WiN FRANCE  
Le Nucléaire au Féminin



**Merci pour votre attention.**

le cnam

