

Un panorama complet sur l'énergie nucléaire

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheuse Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



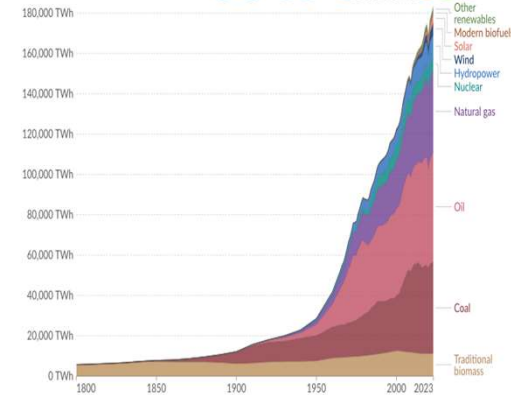
Sommaire

- 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



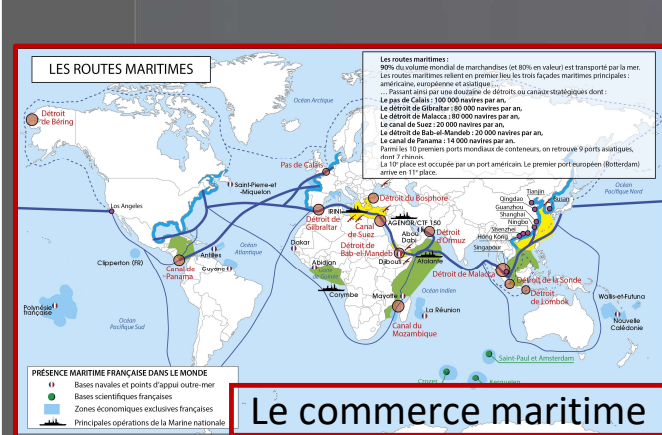
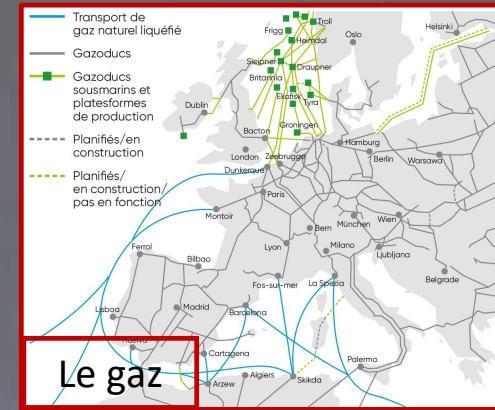
PARIS2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE
COP21·CMP11

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

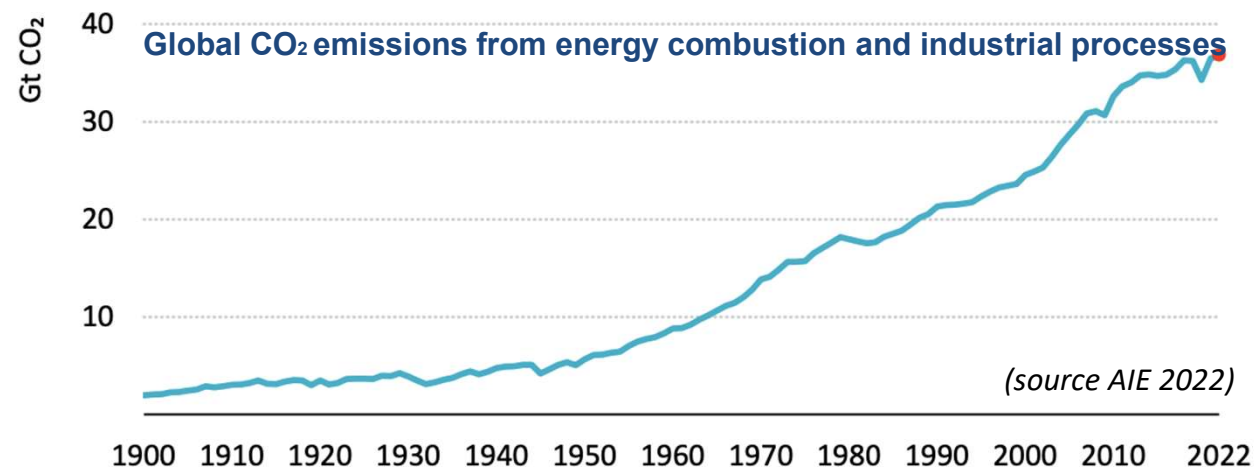
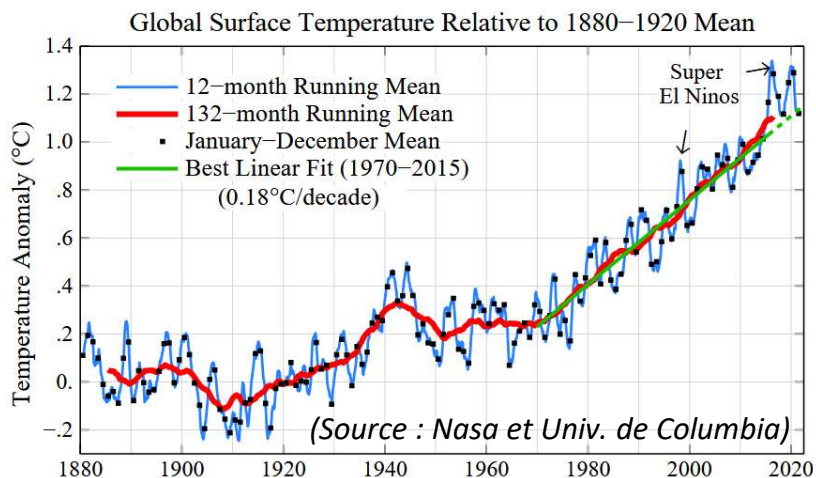


(Source Wikipédia, Entso-e, Google, Ministère des Armées)

Conclusion Rapport du GIEC 2022

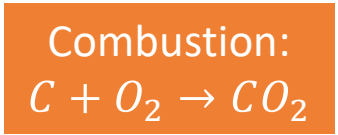
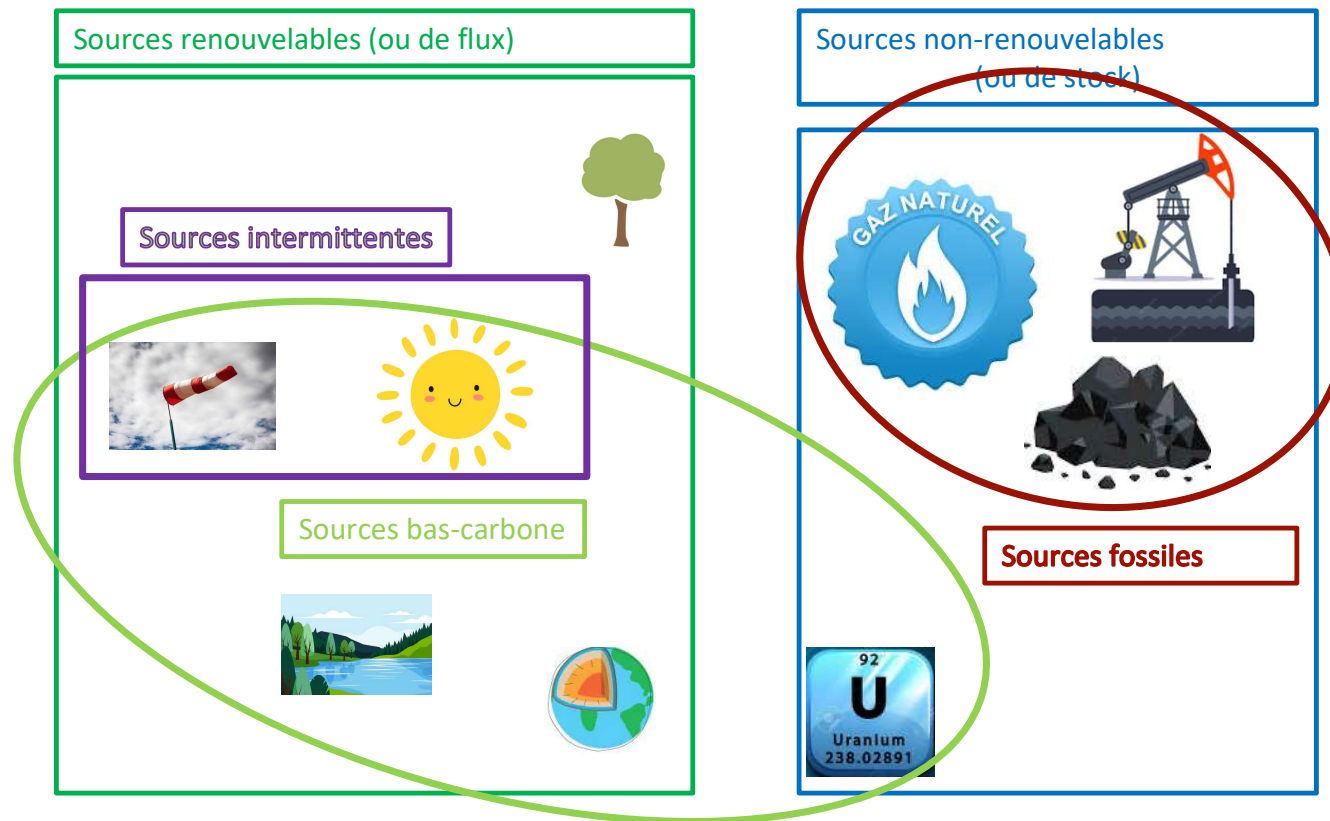
« Les preuves scientifiques sont sans équivoque : le changement climatique est une menace pour le bien-être humain et la santé de la planète. Tout retard supplémentaire dans une action mondiale concertée manquera la brève fenêtre qui se referme rapidement pour assurer un avenir vivable.

Ce rapport offre des solutions au monde. » GIEC 2022

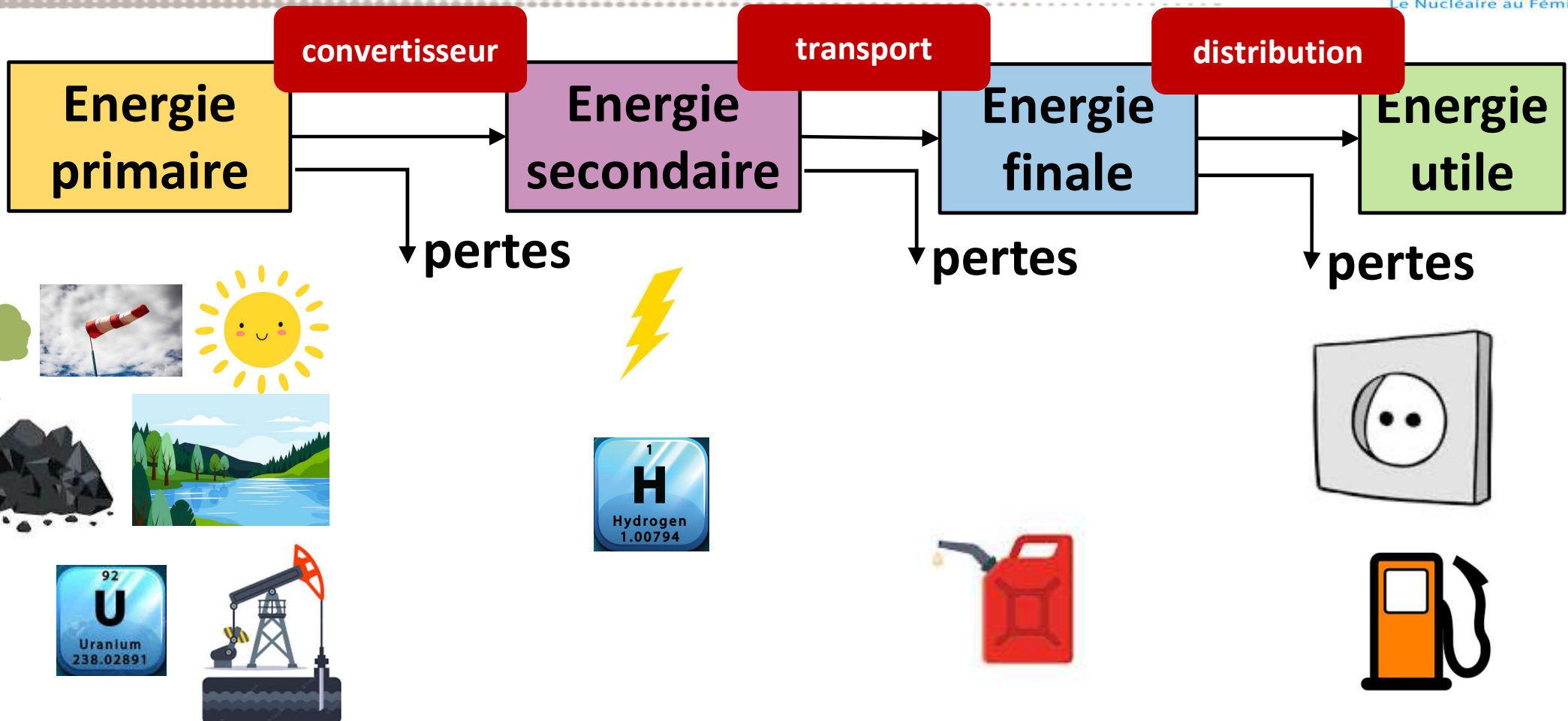


Les différentes sources d'énergie

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



Quelques définitions



Énergie et convertisseur

soleil →
photosynthèse

hydrocarbures →
centrale
thermique

Noyau atomique →
centrale nucléaire



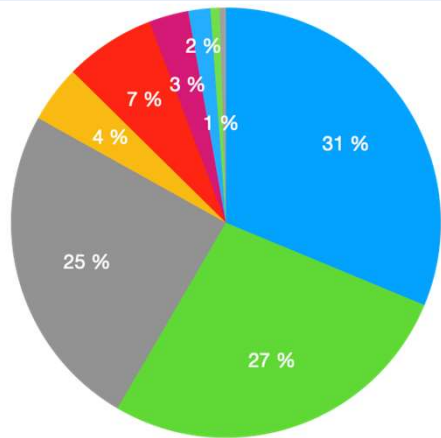
Vent → éolienne

Soleil → panneau solaire

Chute d'eau →
centrale
hydraulique

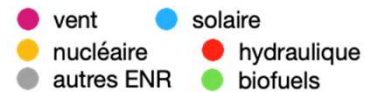
Consommation mondiale d'énergie en 2021

Consommation énergie primaire



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

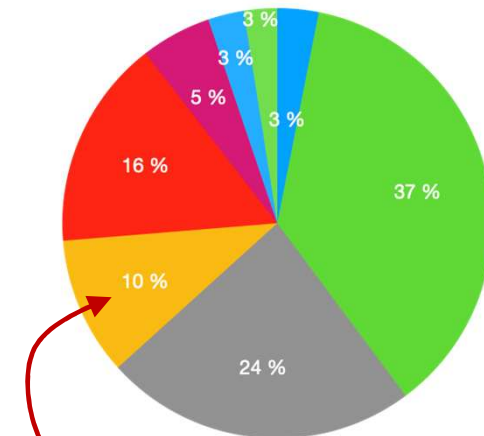
Energies bas-carbone



Energies fossiles



Production électrique

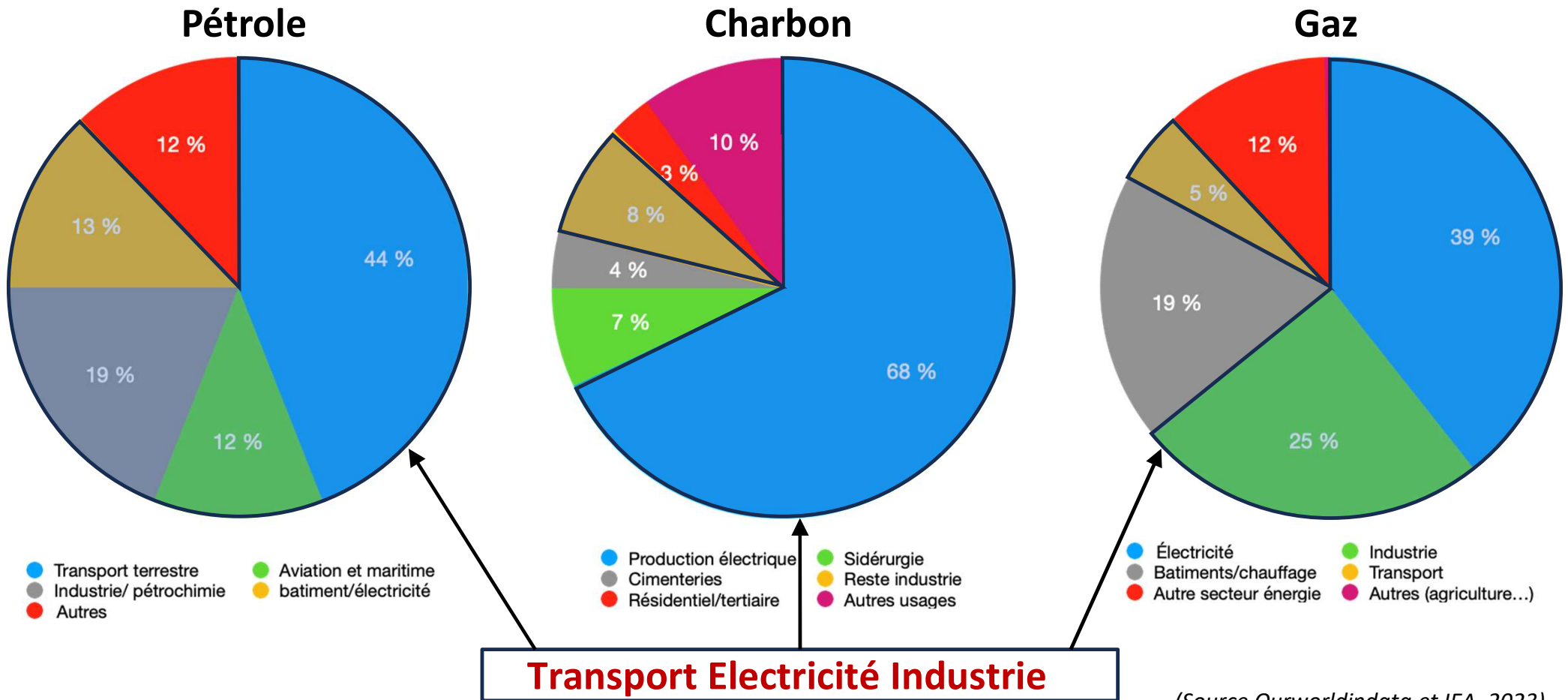


Nucléaire = 2^{ème} source d'électricité bas-carbone

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

(source AIE 2022 et Eurostat)

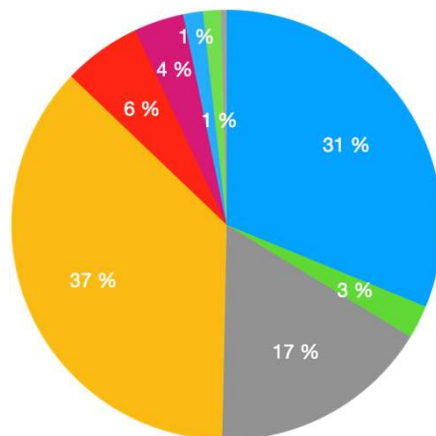
Usages hydrocarbures dans le monde



(Source Ourworldindata et IEA, 2023)

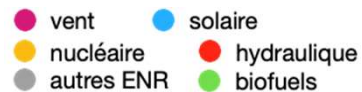
Le cas de la France

Consommation énergie primaire



2482 TWh

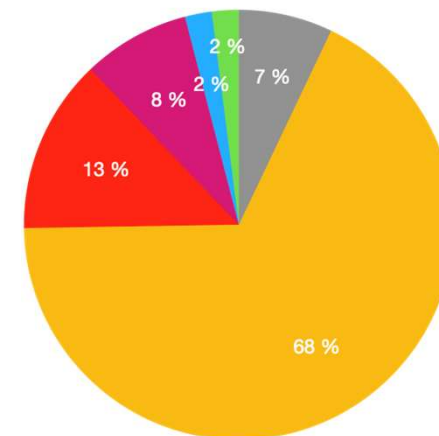
Energies bas-carbone



Energies fossiles



Production électrique



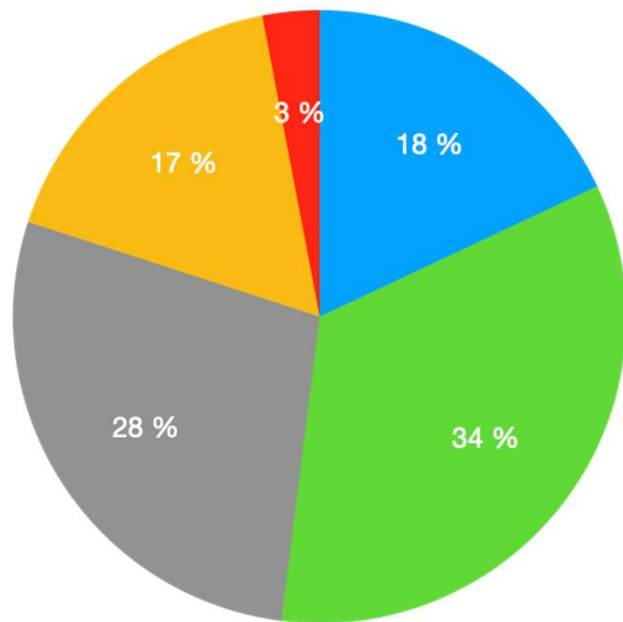
413 TWh

(Chiffres Clés de l'Énergie, Edition 2023)

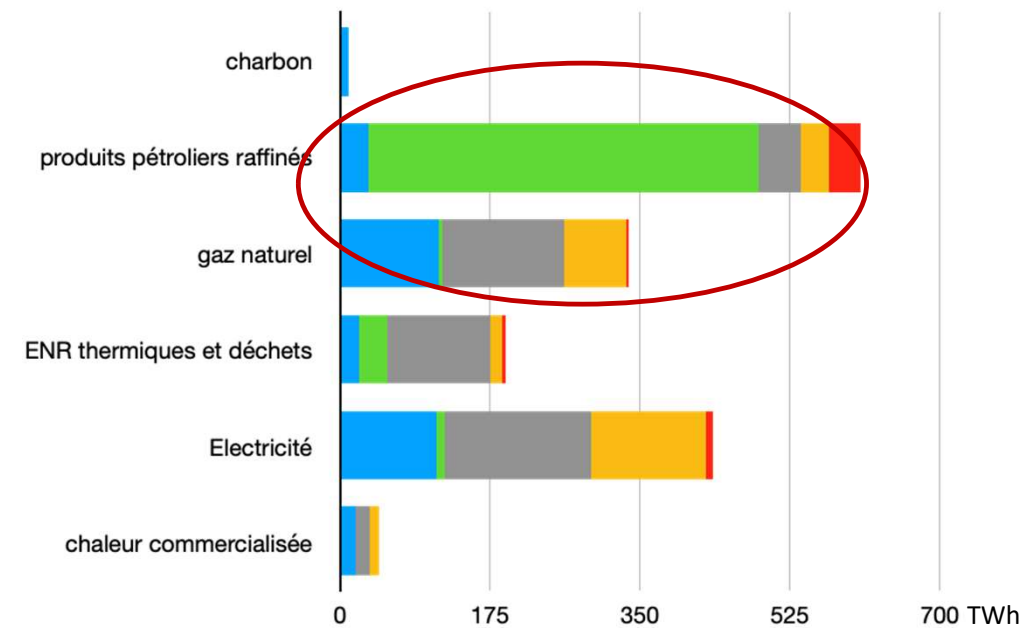
~ 60% d'énergies fossiles consommées
Electricité bas-carbone à + de 90% (grâce à l'énergie nucléaire)

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.**

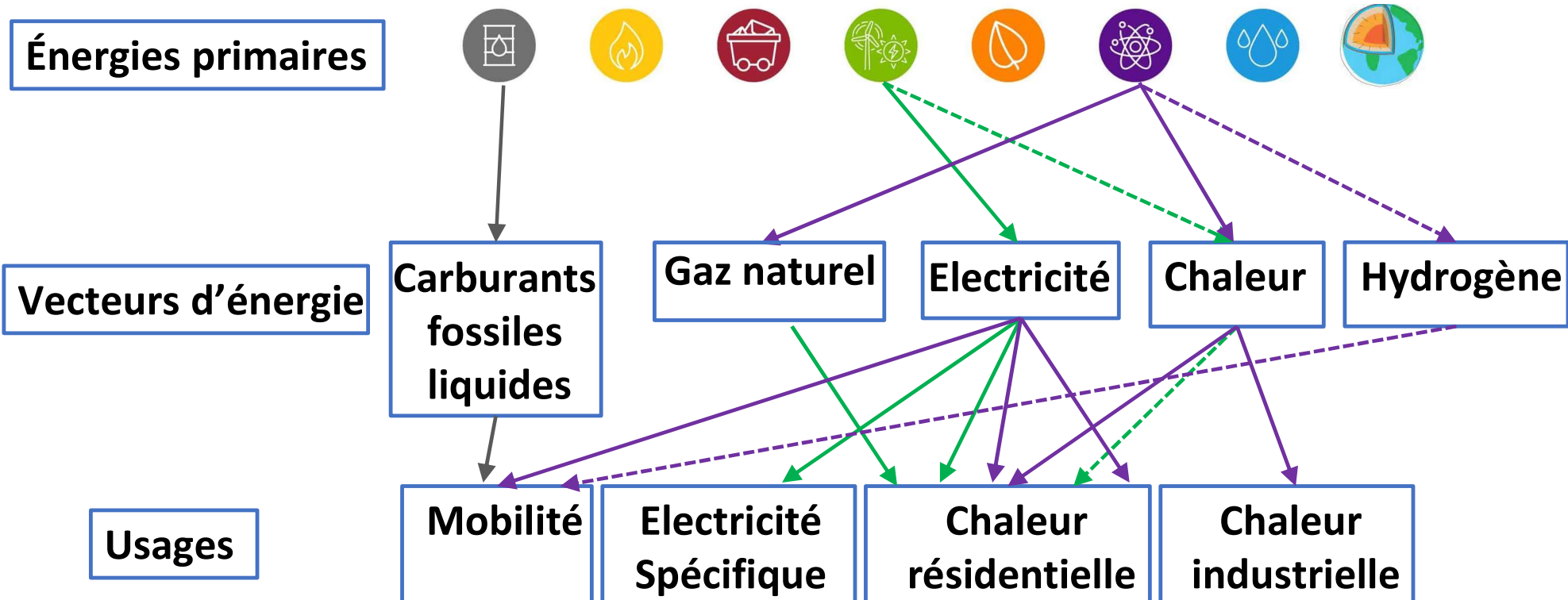
**Ressources
minérales**



Électricité

Chaleur

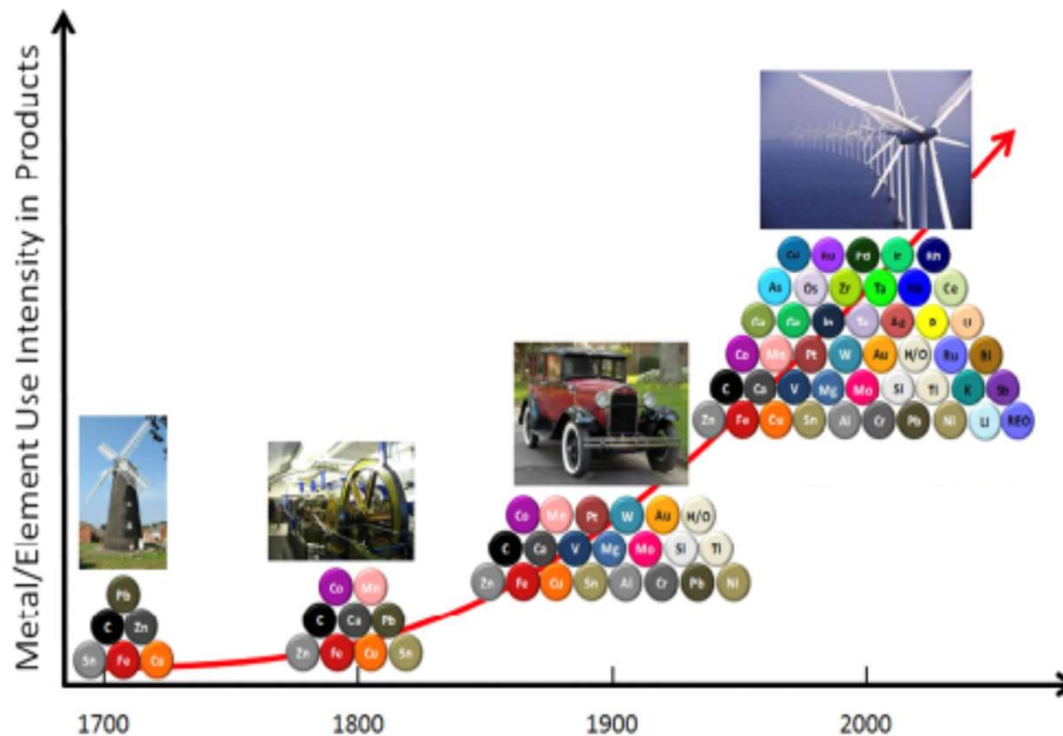
Vecteurs énergétiques et usages



(D'après Académie des technologies)

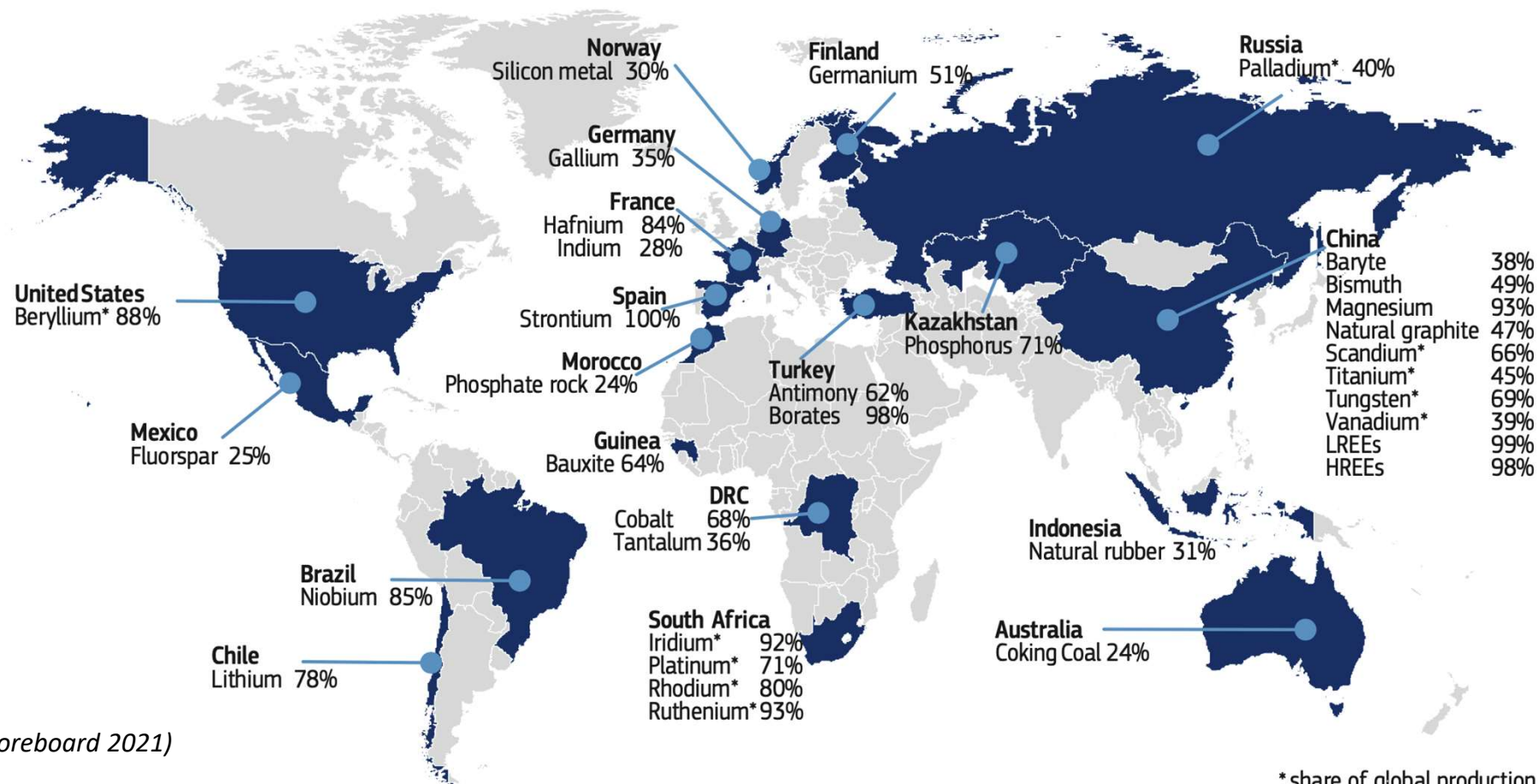
Besoin en ressources minérales

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.



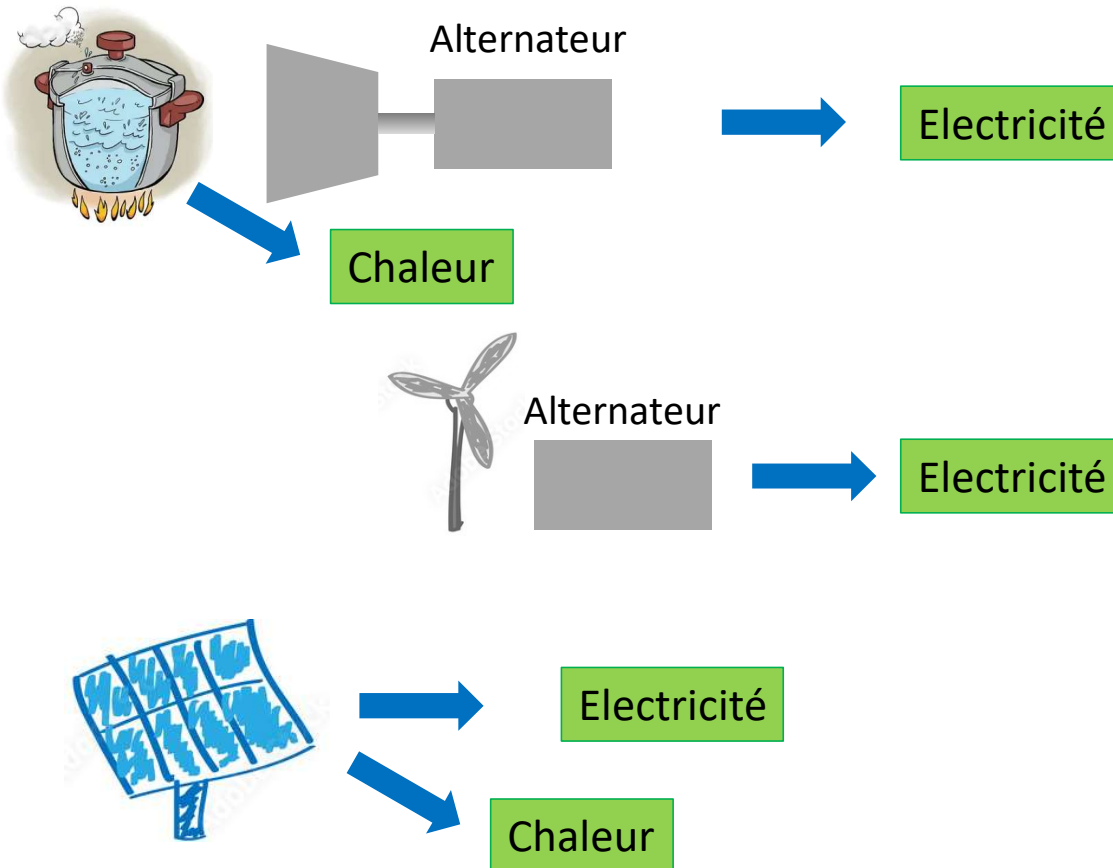
(Source Achzet et al., *Materials critical to the energy industry*, Augsburg, 2011)

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

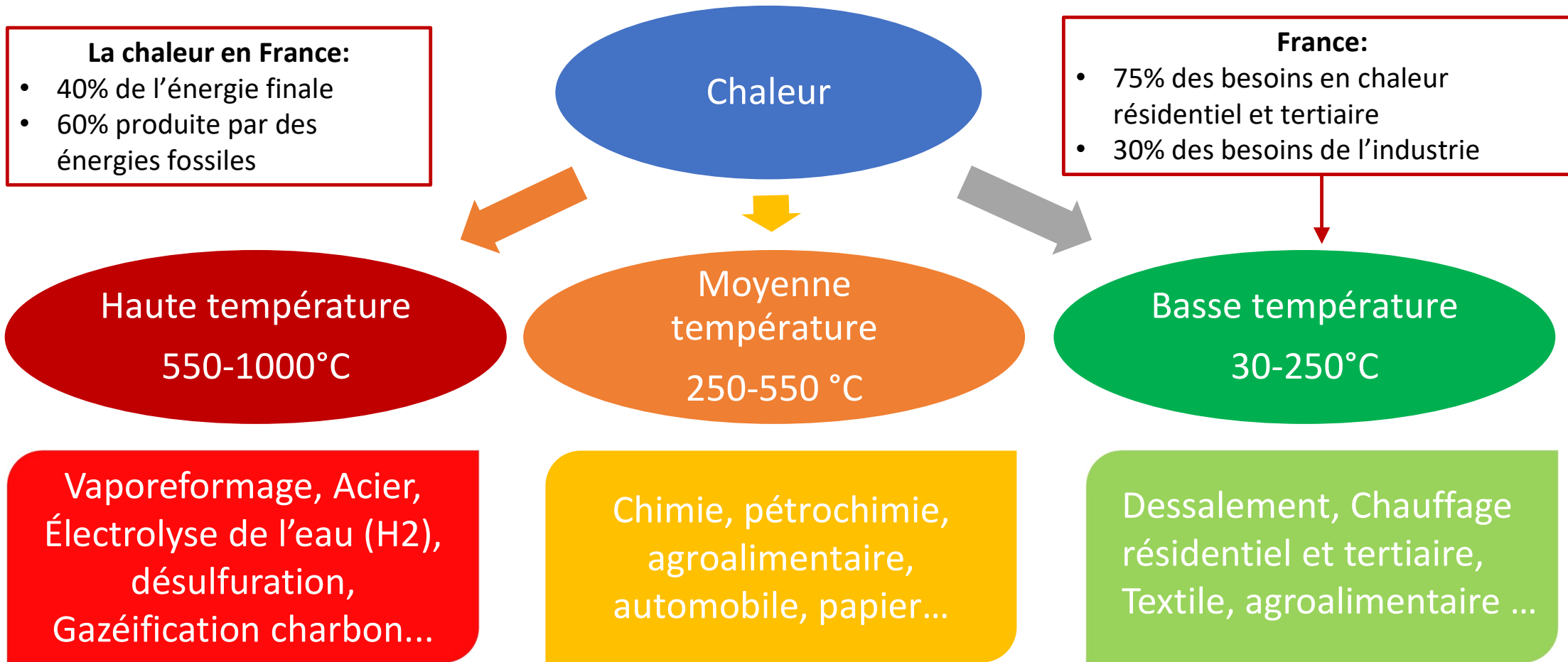


L'électricité (et la chaleur)

- ❑ 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.



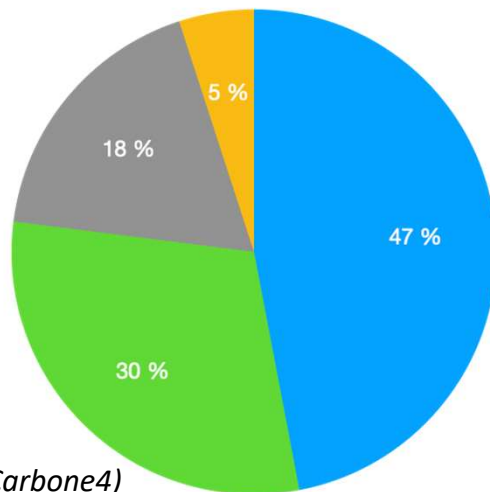
Le marché de la chaleur



La chaleur en France en 2020

Part des usages dans la consommation finale d'énergie

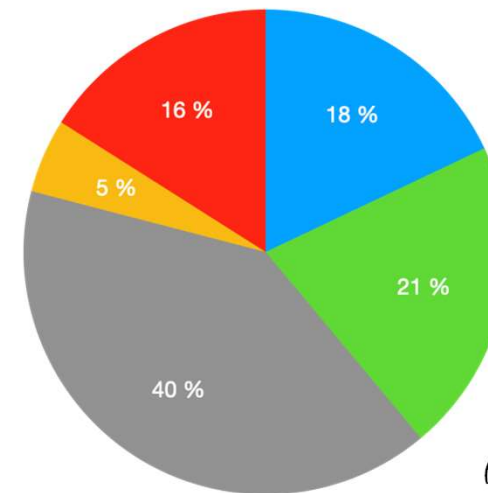
● Chaleur résidentielle ● Chaleur tertiaire ● Industrie ● Agriculture



(Source d'après Carbone4)

Répartition des sources de chaleur

● Électricité ● Chaleur renouvelable ● gaz ● Charbon ● Fioul



(Source d'après Carbone4)

Chaleur = 1^{er} usage énergétique en France

3. Politiques publiques de l'énergie et transition énergétique

Politique énergétique

Ou comment choisir le MIX énergétique français?

Energie disponible et en quantité suffisante

Diplomatie nucléaire

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

- Indépendance/Souveraineté énergétique
- Diversification fournisseurs
- Sécurité approvisionnement

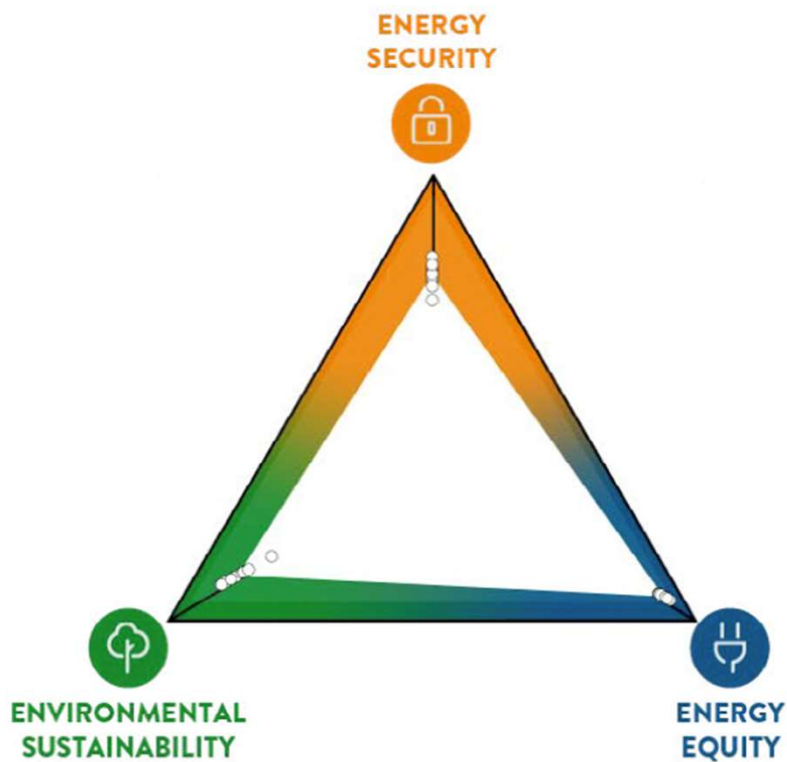
Politique énergétique

Production la plus durable possible

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

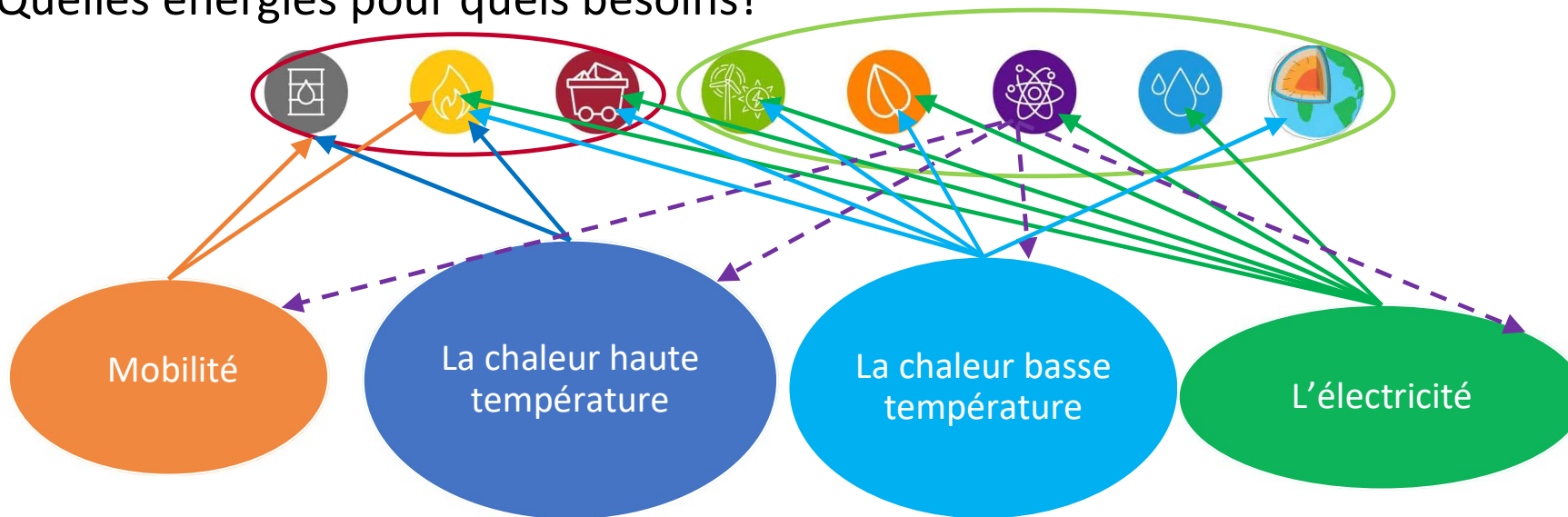
Nous sommes tous en voie de développement!

La transition énergétique

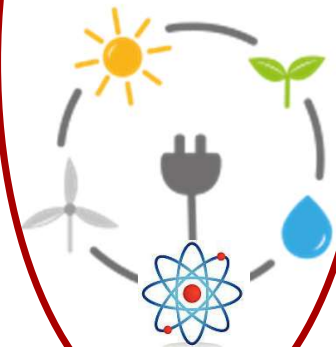
❑ Passer des sources d'énergies fossiles aux sources d'énergies bas carbone.



❑ Quelles énergies pour quels besoins?



Sources d'électricité bas-carbone



La neutralité carbone: définition

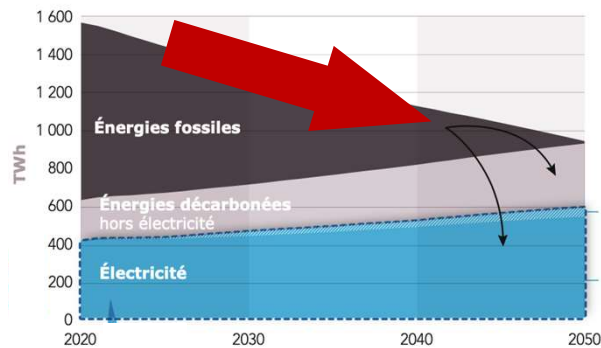
La neutralité carbone :

Émissions de GES

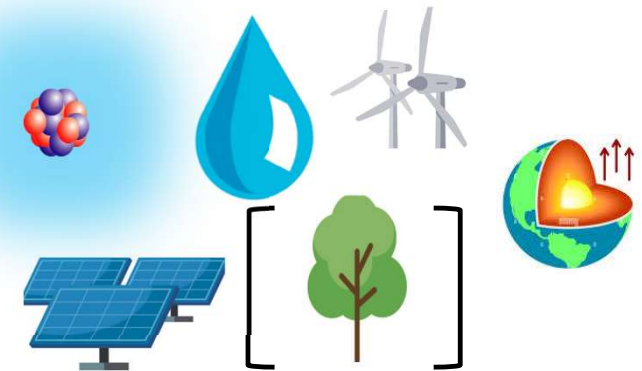


Absorption CO₂
(puits carbone)

Deux leviers :

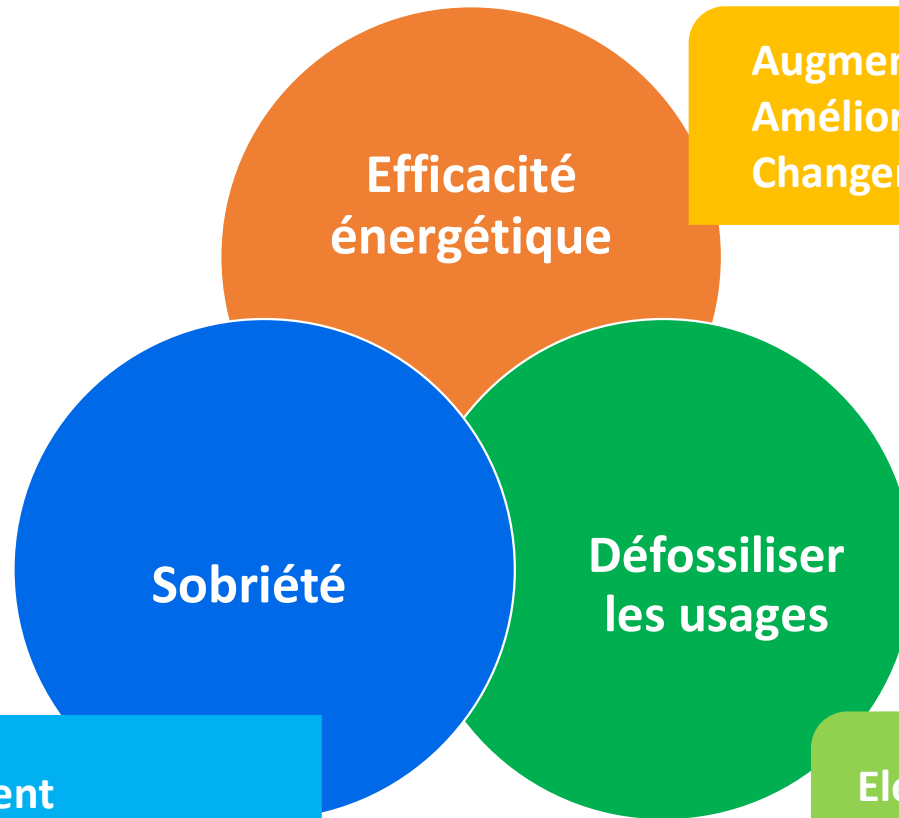
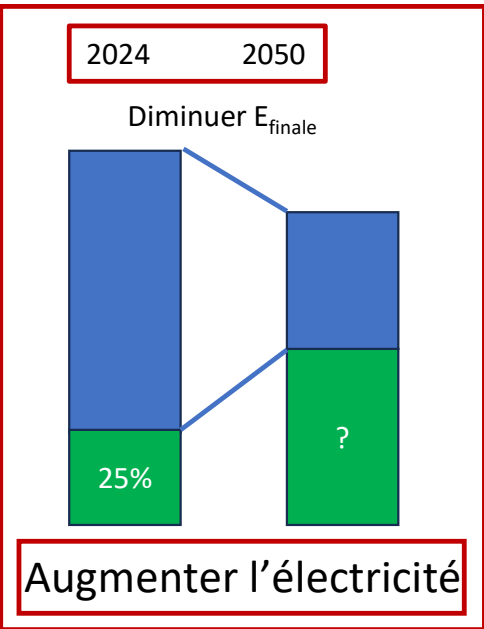


Réduire conso. d'énergie
Sobriété/efficacité énergétique

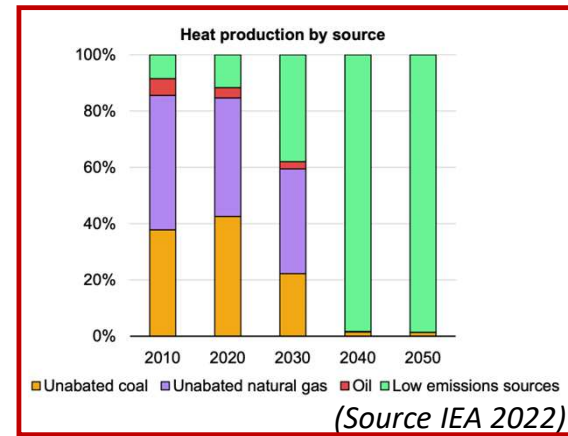


Construire un MIX
Bas-carbone et diversifié

Les trois piliers de la transition énergétique



Augmenter les rendements
Améliorer l'existant
Changer de procédés



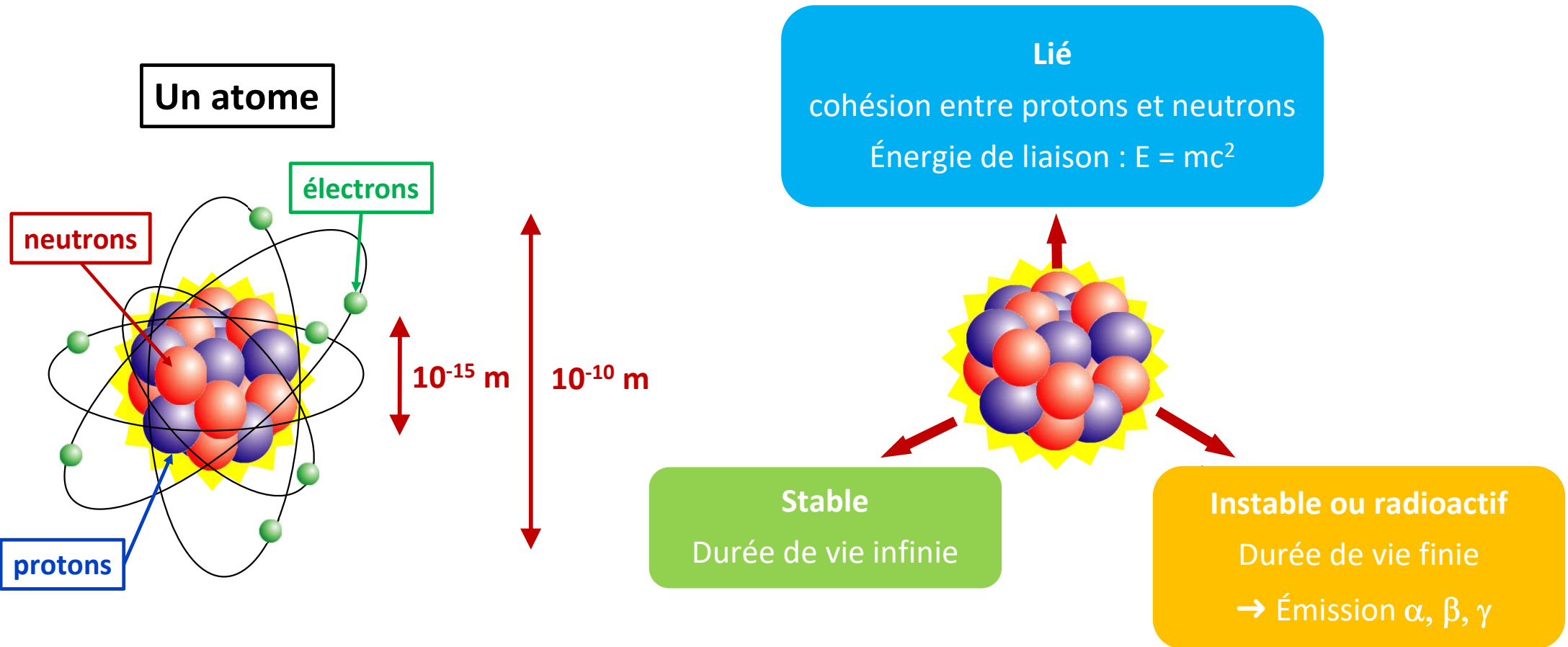
Changement de comportement
Changement de société et/ou d'économie ?

Electrification
Production de chaleur bas-carbone

4. L'énergie nucléaire :

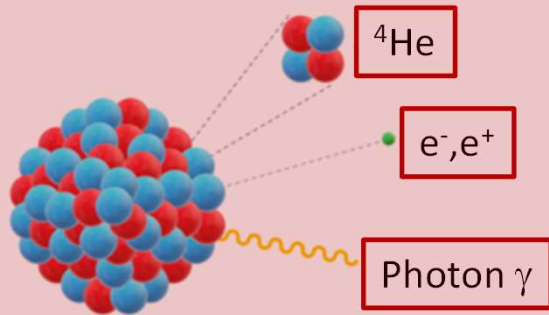
- 1. Un peu de physique nucléaire**
- 2. Histoire et état actuel de la filière**
- 3. L'énergie nucléaire dans le futur :**
 - a) Quels défis pour l'énergie nucléaire?**
 - b) Quelles technologies pour quels besoins?**

C'est quoi l'énergie nucléaire?



Loi de la désintégration radioactive

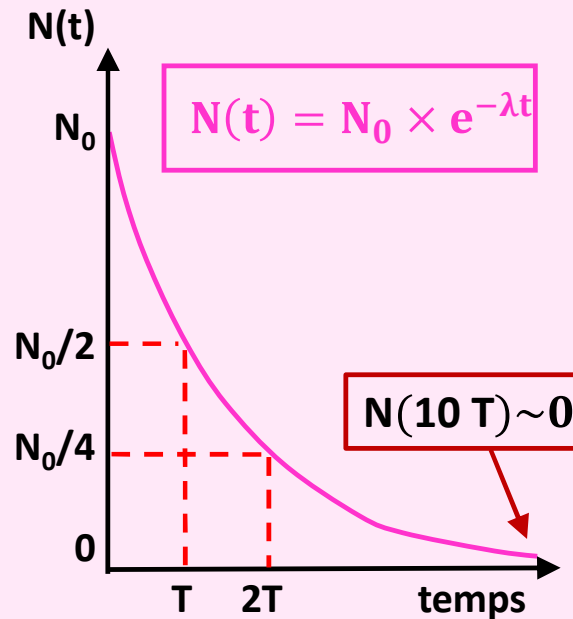
Un noyau radioactif



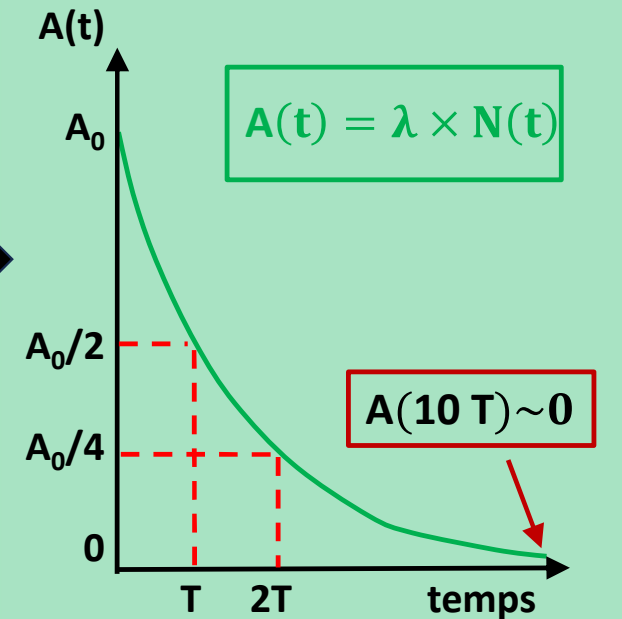
- Période radioactive T
- Constante de désintégration λ

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

Nombre de noyaux d'une source radioactive



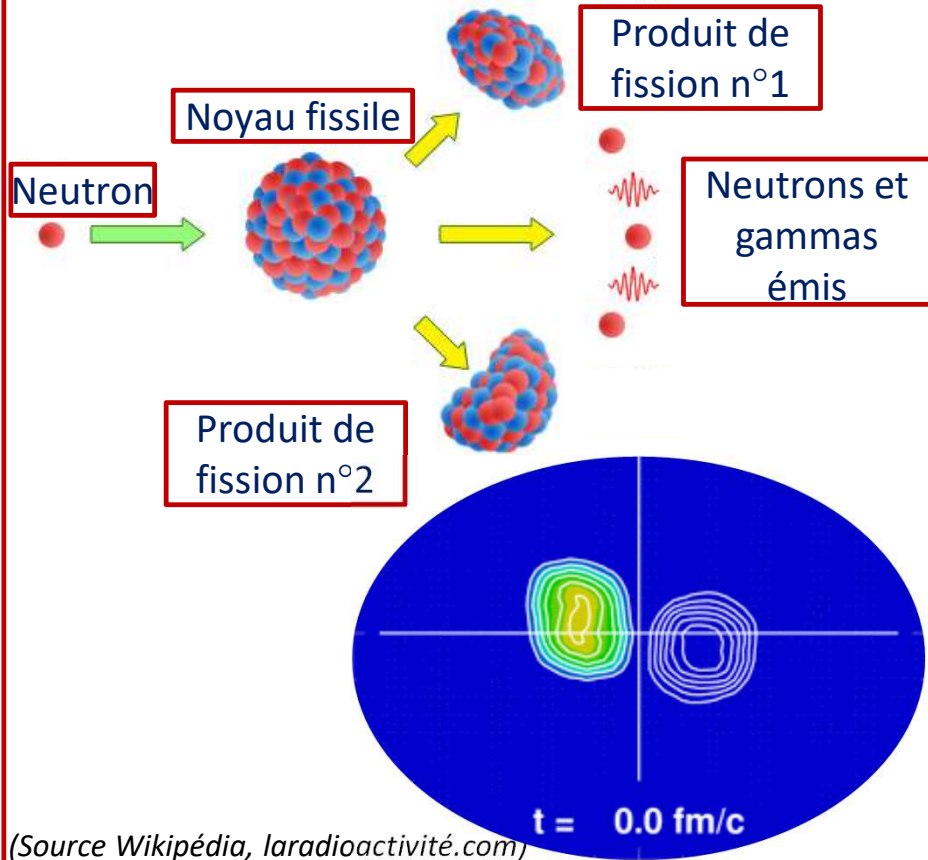
Activité d'une source radioactive



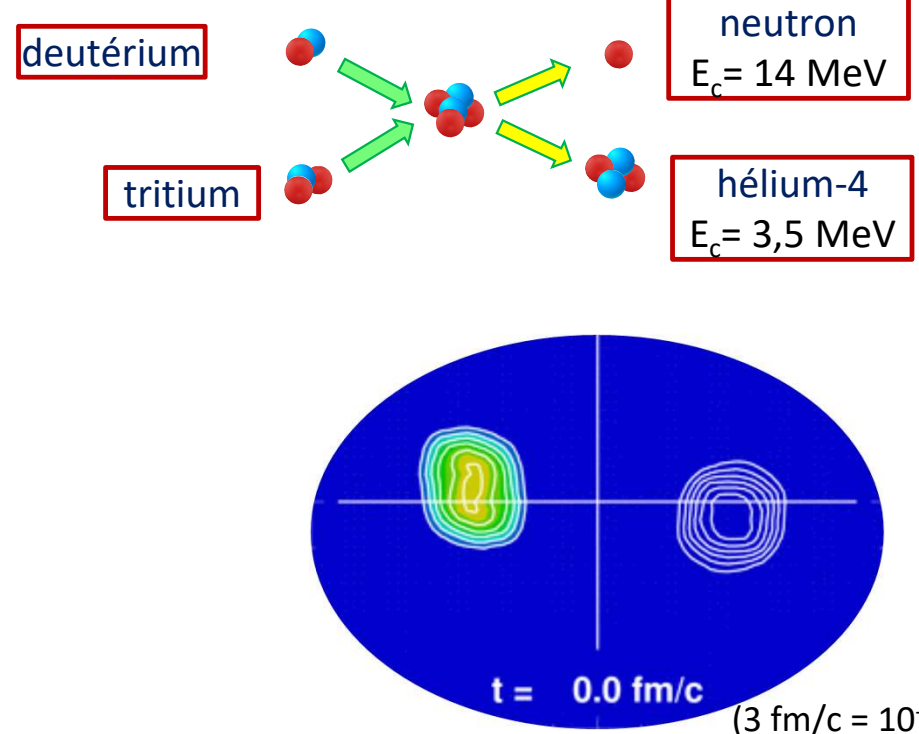
- Unité : le becquerel Bq
- 1 Bq = 1 désintégration/s

Deux réactions fondamentales : de la science à l'industrie

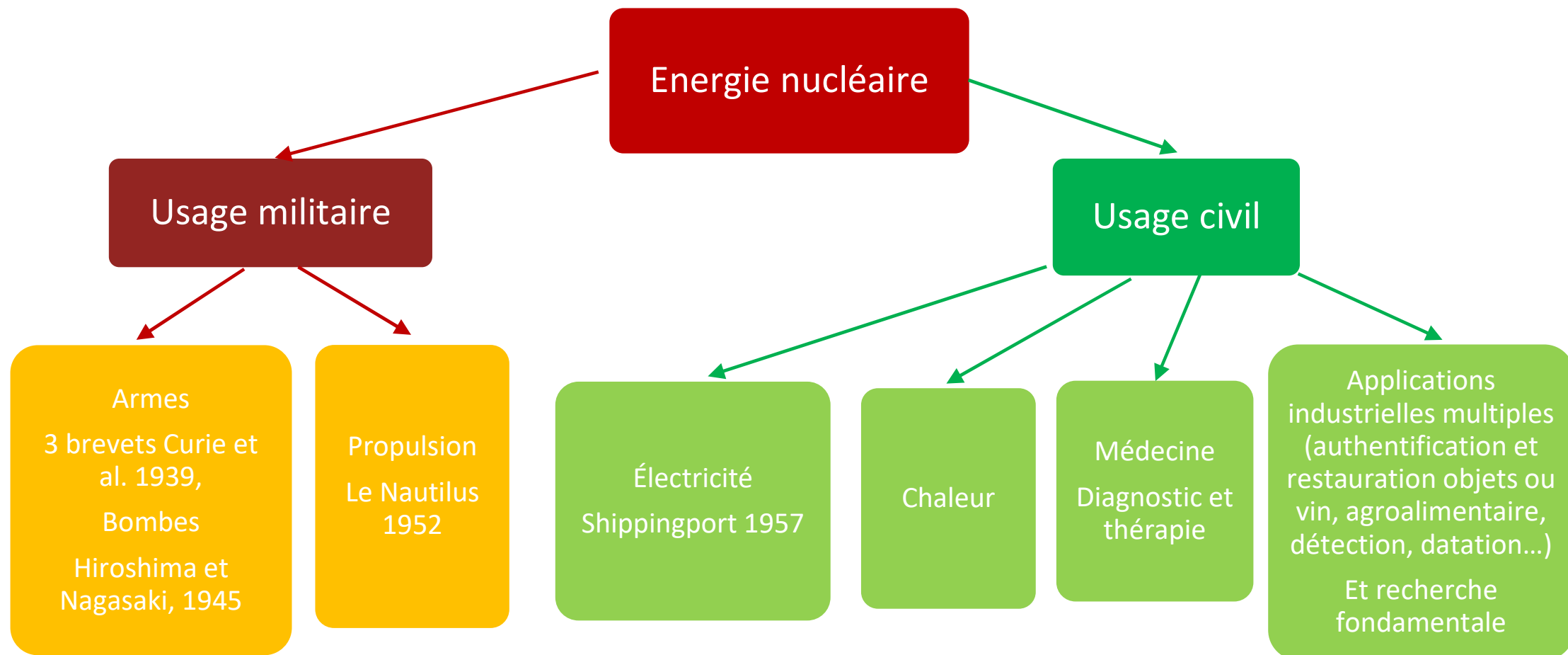
Réaction de fission



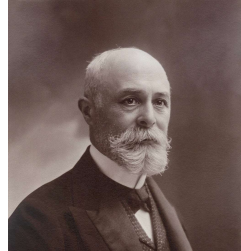
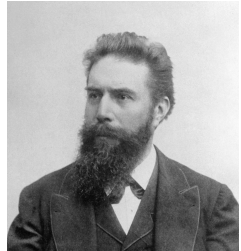
Réaction de fusion



Dualité d'usage



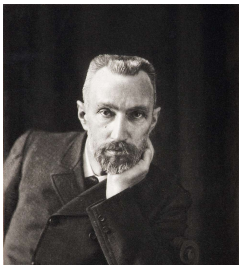
Les grandes étapes d'une découverte fondamentale



- ❑ 1895 : Wilhem Röntgen découvre les rayons X.
- ❑ 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité α .
- ❑ 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^{ère} pile atomique.
L'énergie nucléaire



Irène Curie et Frédéric Joliot

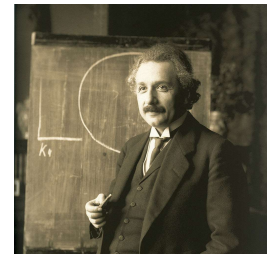


Marie Curie

Pierre Curie



Lise Meitner et Otto Hahn



Albert Einstein



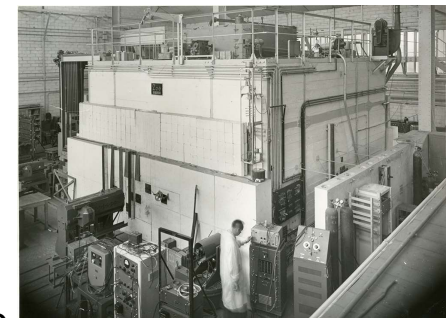
Enrico Fermi

Histoire du programme nucléaire français

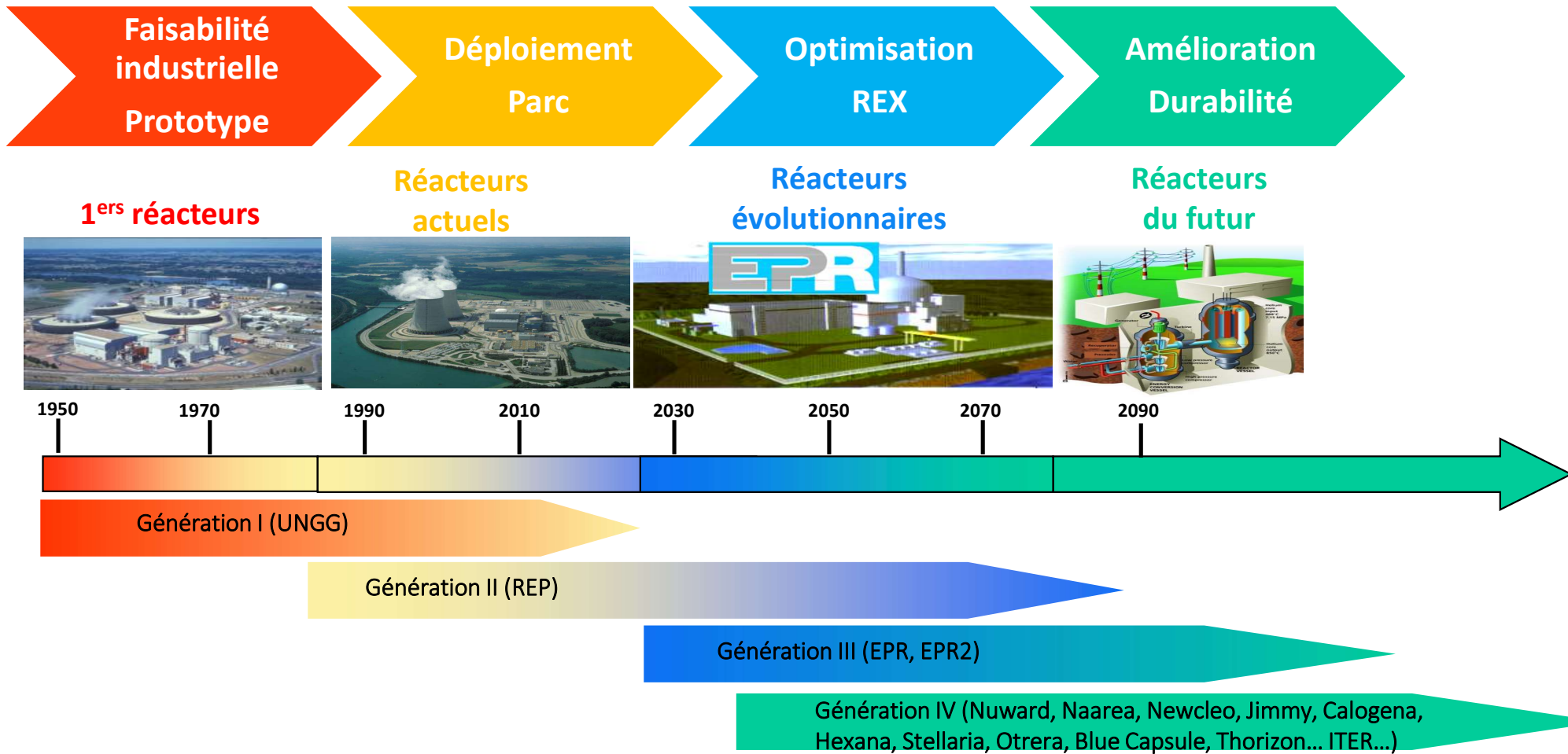
le cnam

WiN FRANCE
Le Nucléaire au Féminin

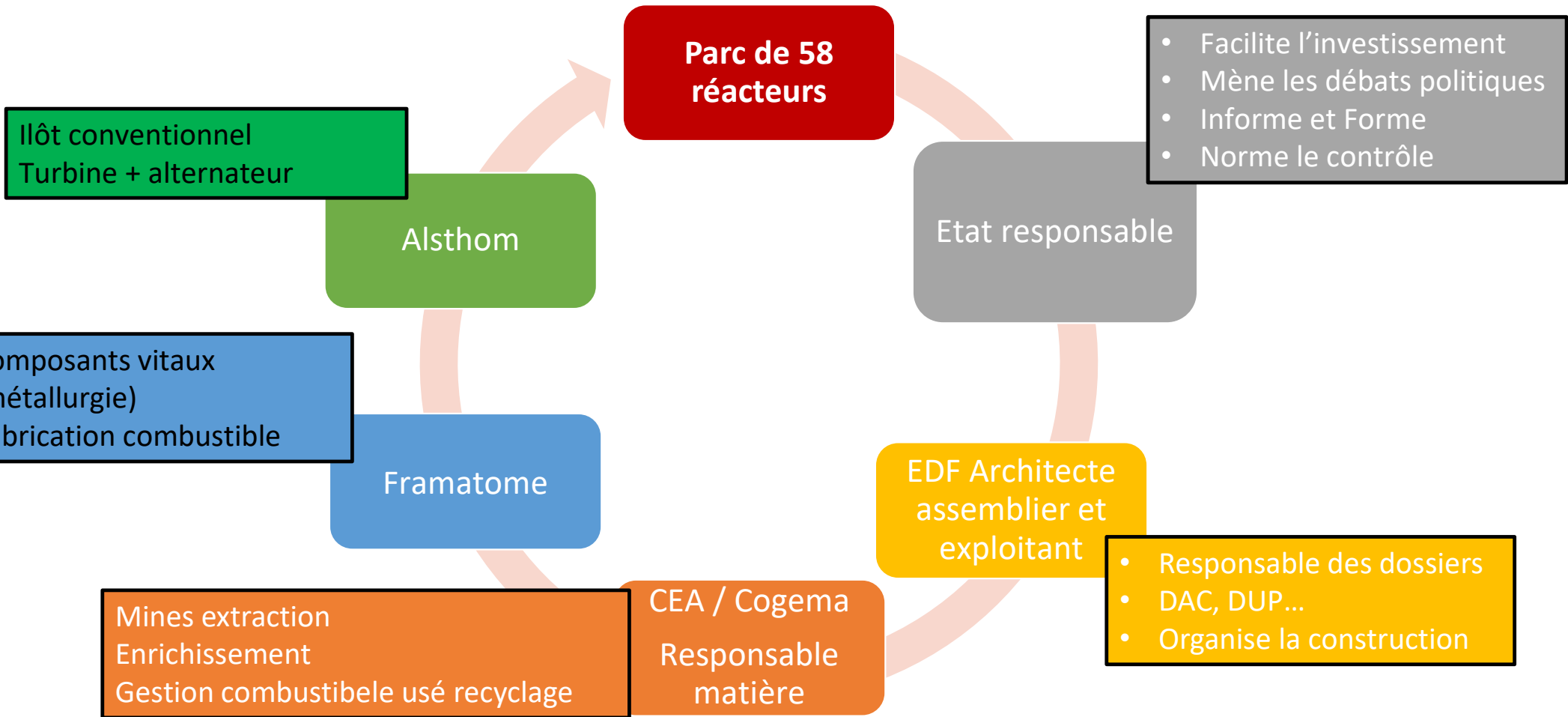
- ❑ 1945 : création du CEA, mission : conduire des recherches pour développer une capacité nucléaire civile comme militaire.
- ❑ 15/12/48: la pile Zoé diverge.
- ❑ 1954: décision du gouv't de Pierre Mendès France de doter la France de l'arme nucléaire.
- ❑ 13/02/60 : 1^{er} essai nucléaire français à 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.



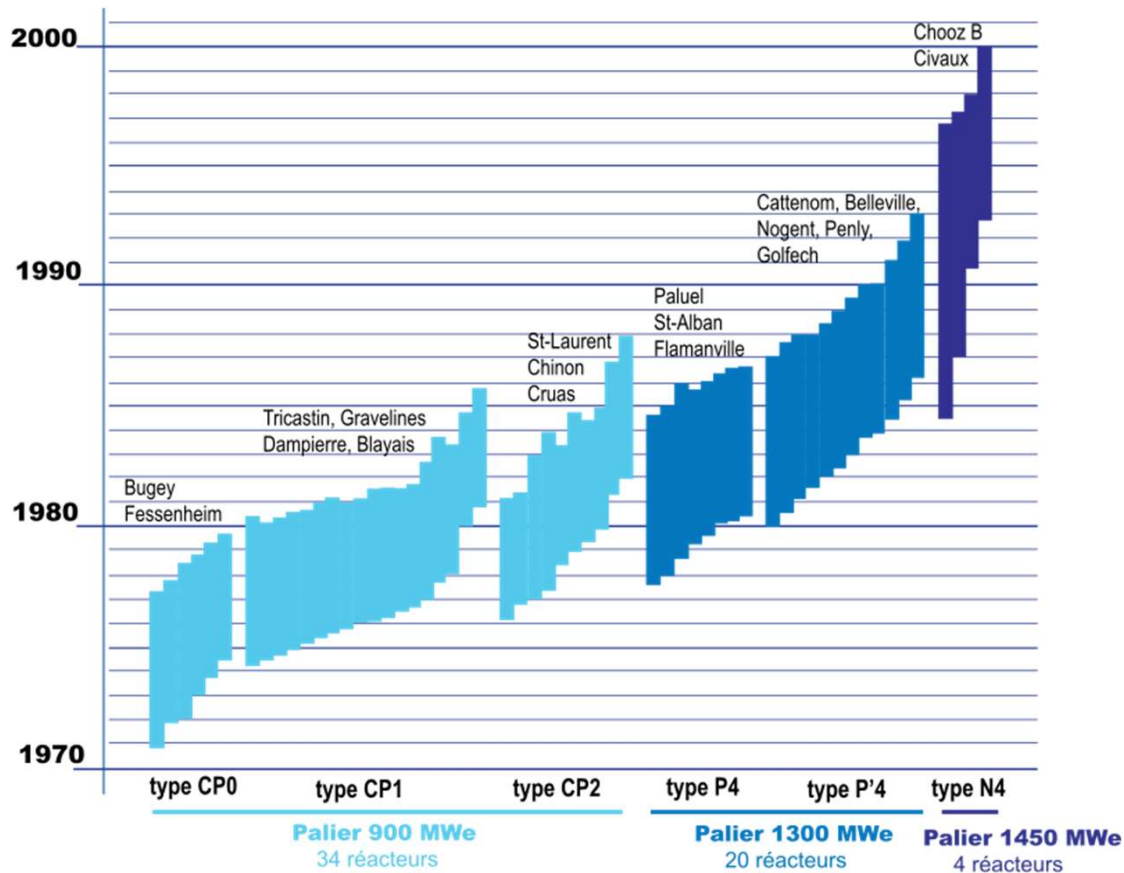
Les différentes générations de réacteurs



Le plan Messmer

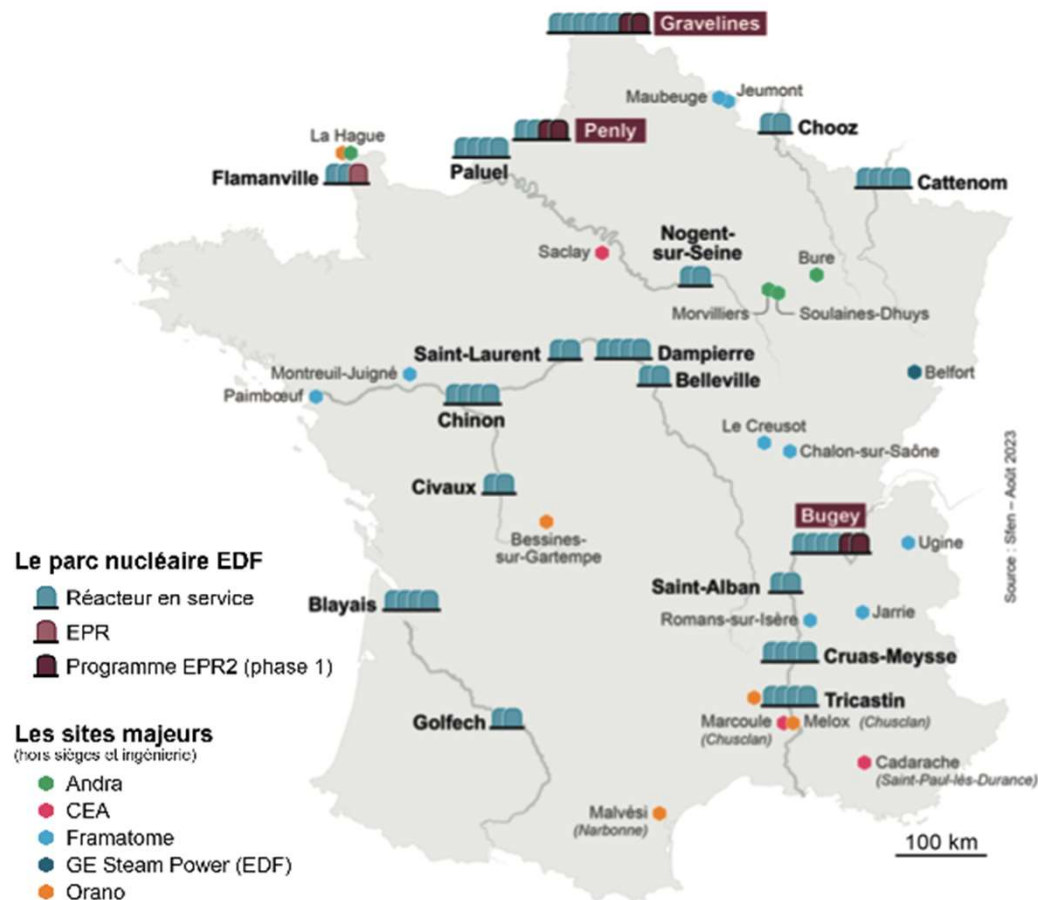


Planning de construction plan Messmer



- ❑ 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.

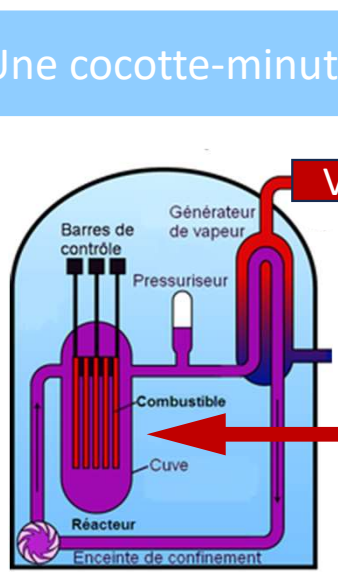
Le parc français



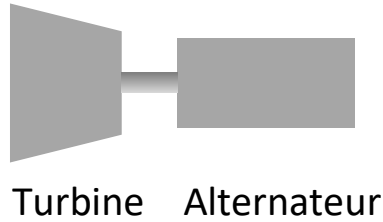
- ❑ Parc actuel : 61,4 GWe installé.
 - 18 sites ; 56 réacteurs REP
 - 32 REP900; 20 REP1300; 4 REP1450.
- ❑ EPR de Flamanville :
 - 1,65 GWe
 - MIS le 8 mai 2024.
- ❑ Projets futurs:
 - 3 paires EPR2 (Penly, Gravelines, Bugey)
 - 4 paires possibles en préparation
- ❑ En démantèlement: Au 1^{er} juillet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

Un réacteur nucléaire: de l'infiniment petit au macroscopique

Une cocotte-minute!



Vapeur d'eau



Electricité

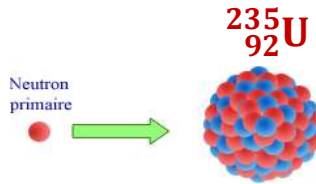
Chaleur

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

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 km²
 ~ 100 terrains de foot

ÎLOT NUCLÉAIRE

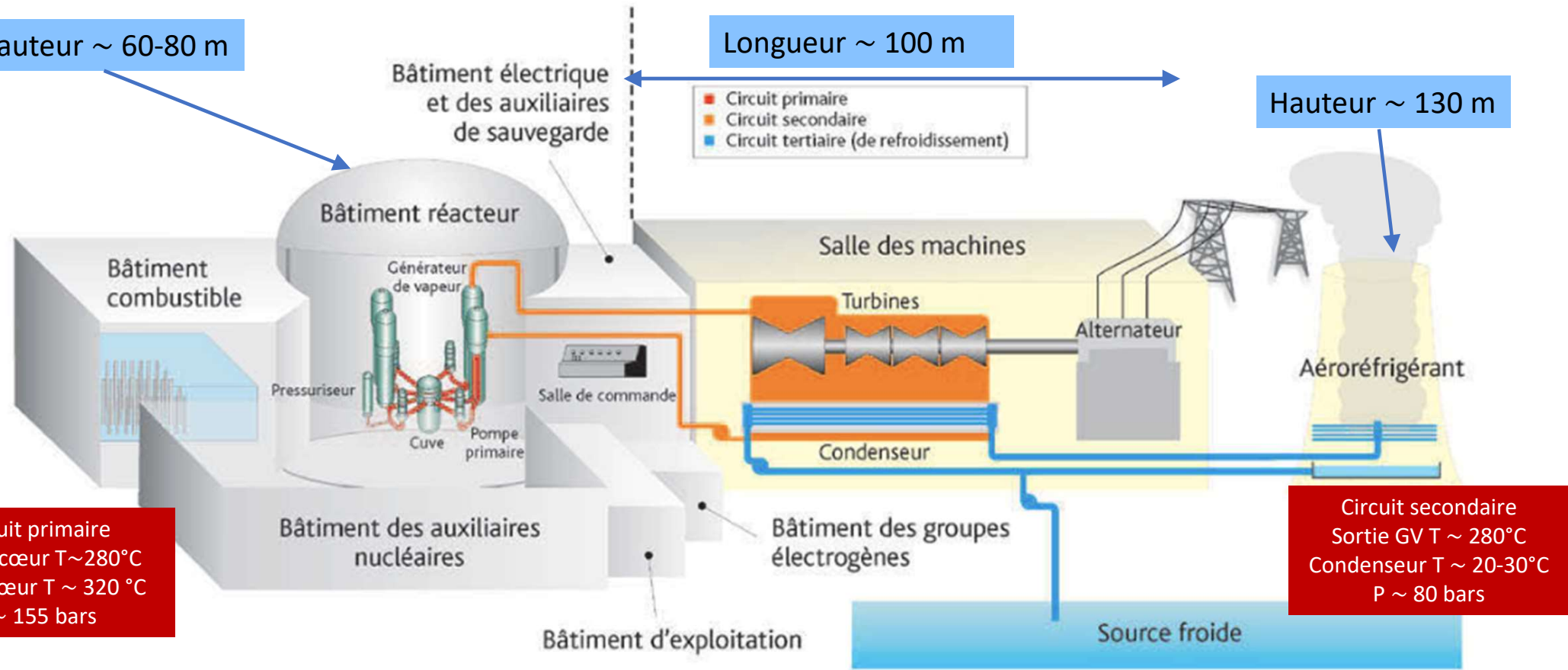
ÎLOT CONVENTIONNEL

Hauteur ~ 60-80 m

Longueur ~ 100 m

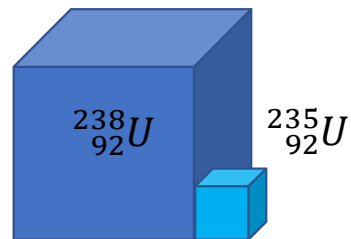
Hauteur ~ 130 m

- Circuit primaire
- Circuit secondaire
- Circuit tertiaire (de refroidissement)



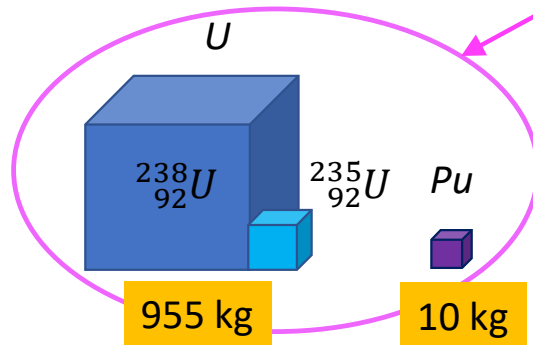
Le combustible

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

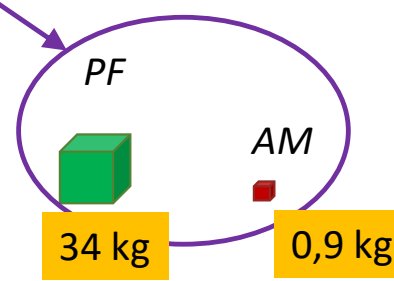


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes



Après passage en cœur :

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

Le nucléaire durable

Noyaux fissiles



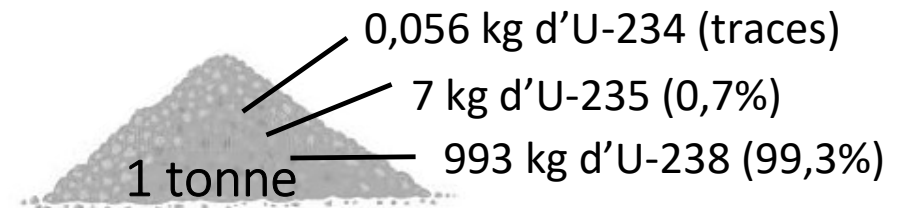
Noyaux naturels

Noyaux artificiels

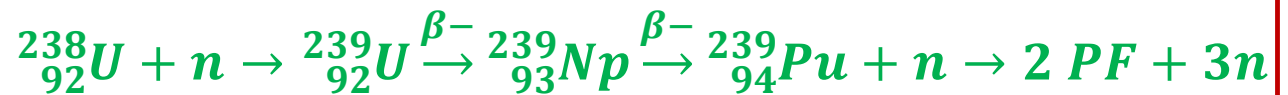


Noyaux fertiles

Composition uranium naturel : 3 isotopes



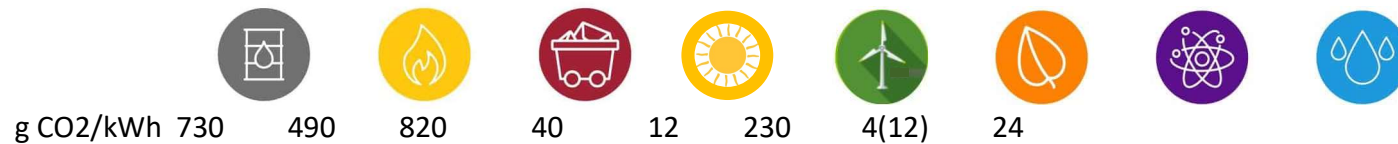
réaction de fission des REL



réaction de fission des RNR

Quels avantages pour la transition énergétique?

☐ L'énergie nucléaire est une énergie bas carbone.



(Source GIEC)

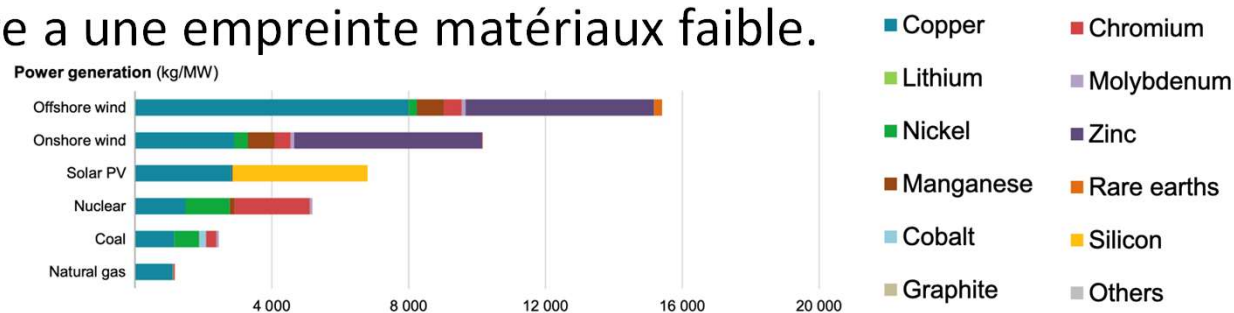
☐ L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée.



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?

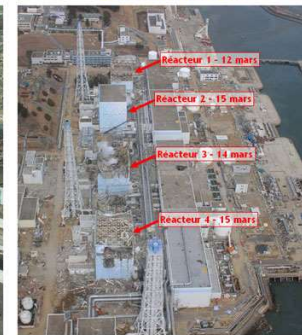
☐ Freins dus aux peurs de l'opinion publique :

- Accidents nucléaires,
- Production de déchets radioactifs.

Tchernobyl



Fukushima Dai-ichi

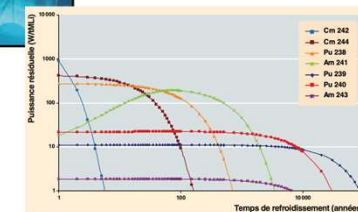


☐ Freins intrinsèques à l'utilisation de l'énergie nucléaire :

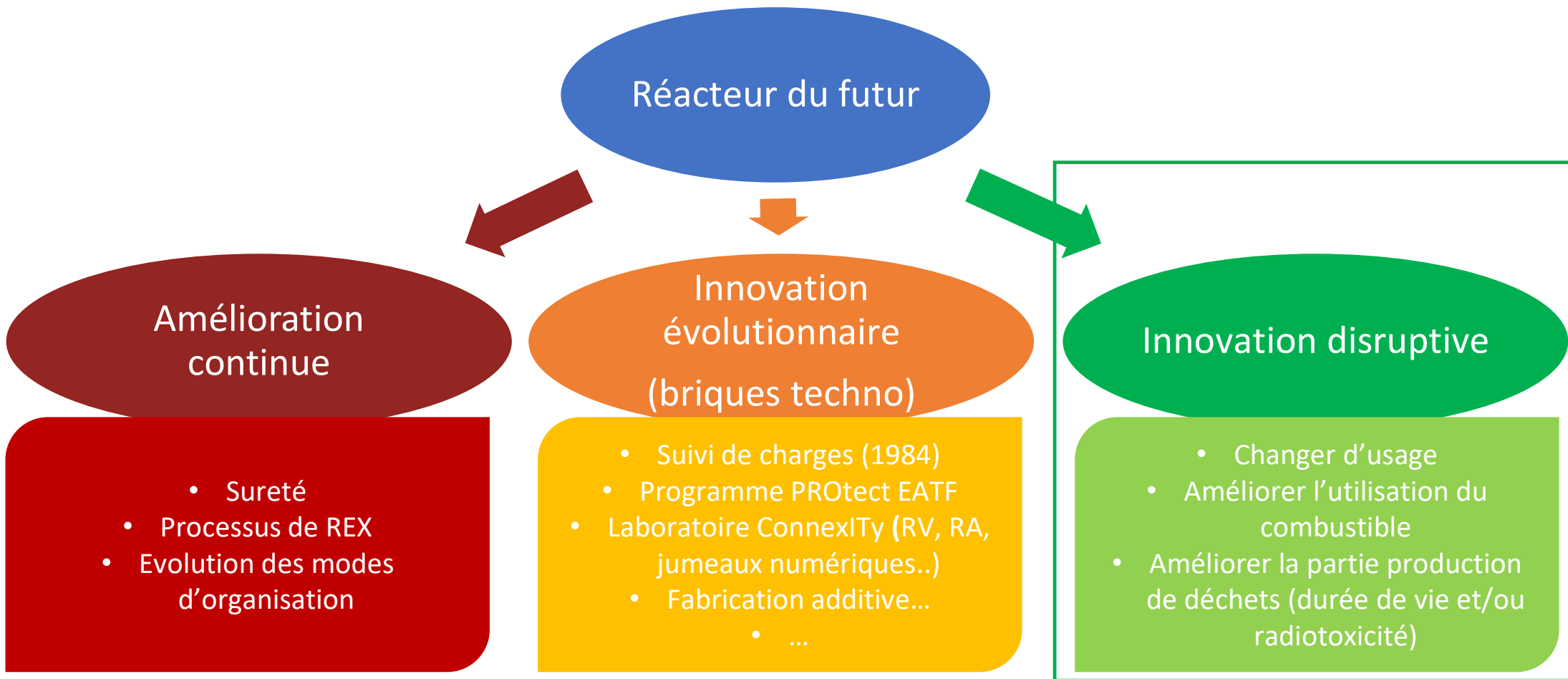
- Coût d'investissement élevé (toutes filières),
- Arrêts pour rechargement : perte de disponibilité,
- Mauvaise utilisation de l'uranium,
- Contraintes d'exploitation résultant de l'enceinte de confinement,
- Puissance résiduelle à évacuer (toutes filières).



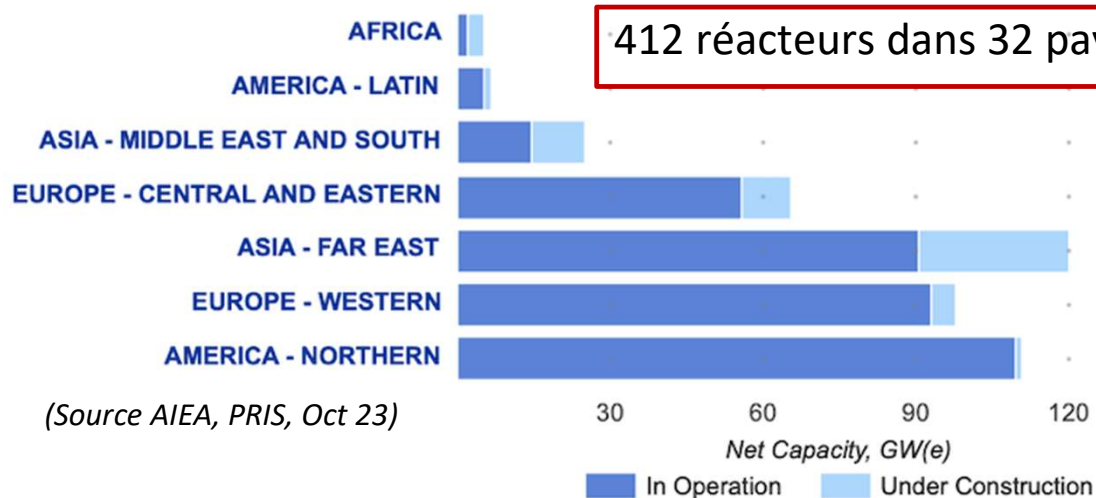
(source Wikipédia, IRSN, TI BN3296, CEA)



Les processus d'innovation dans le nucléaire



Nouveaux programmes de construction



412 réacteurs dans 32 pays

Alliance du Nucléaire
(16 pays européens)

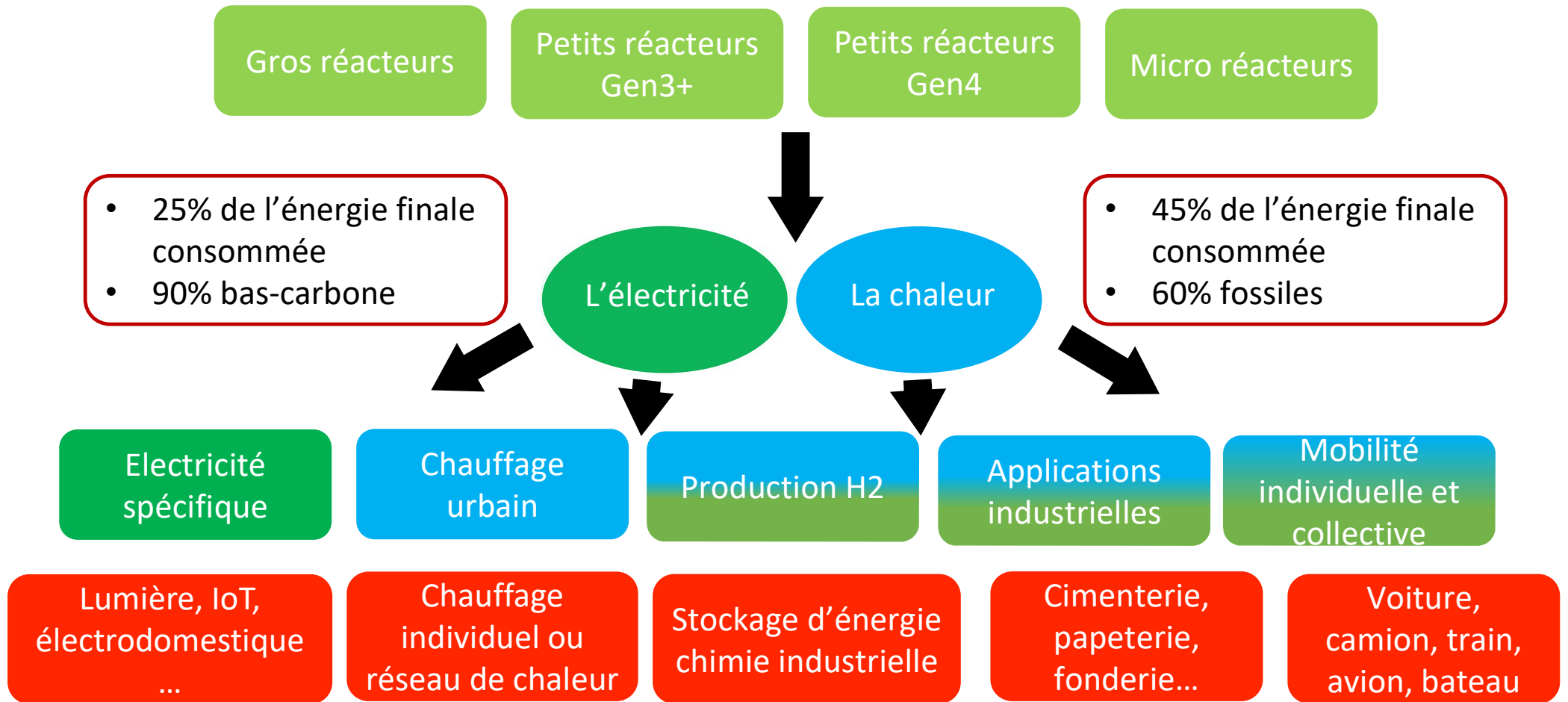
Pays intéressés : France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie Suède.



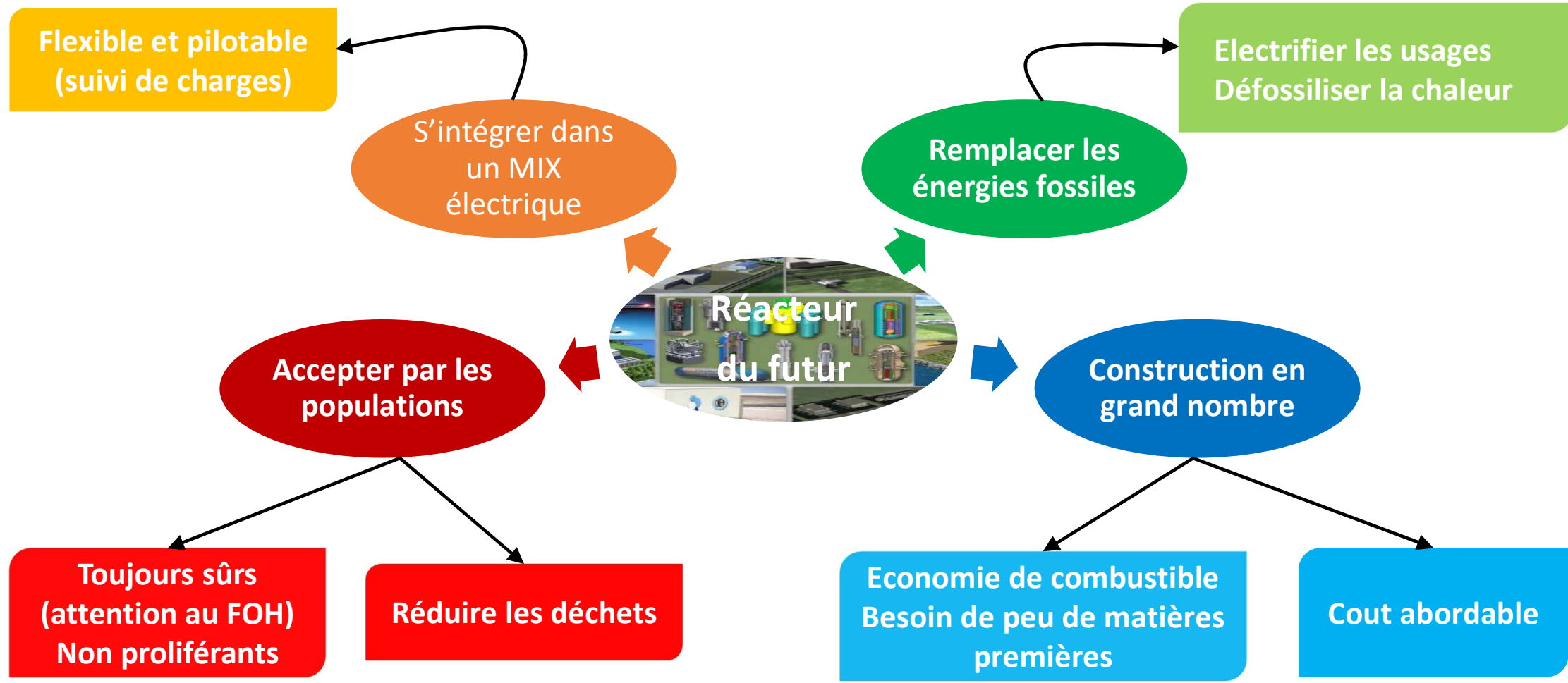
Puissance installée = 370,17 GWe
Production électrique = 2486,8 TWh en 2022

- 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?



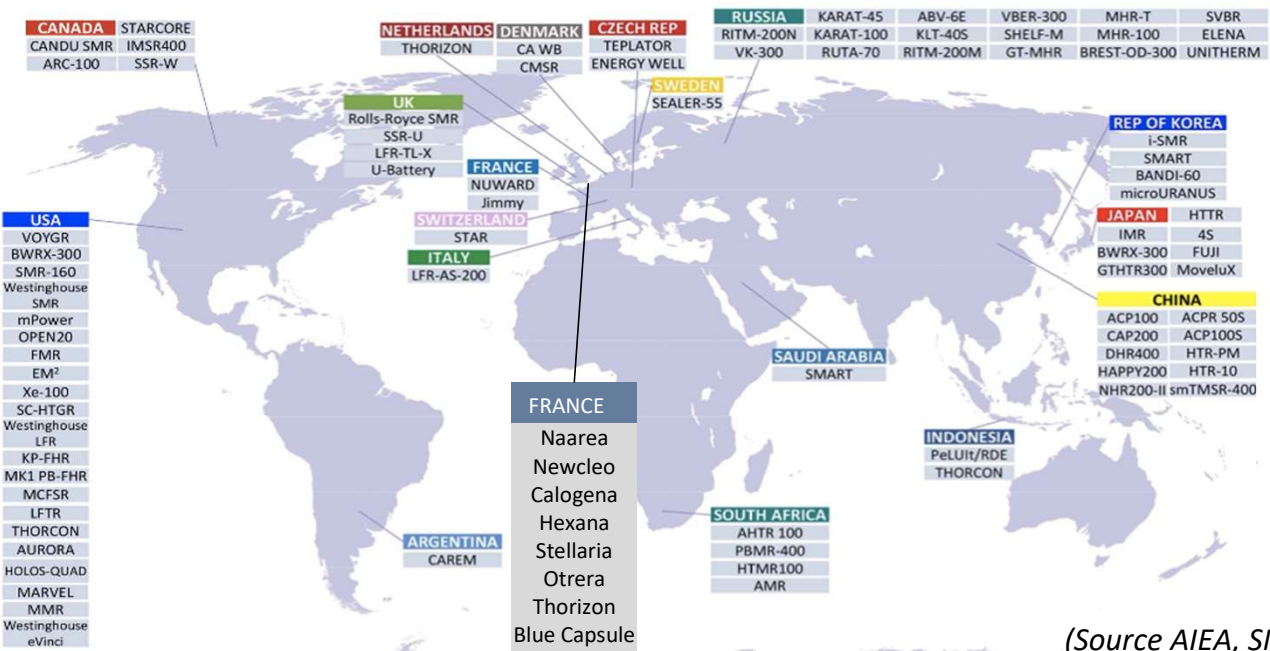
Concepts du futur (SMR/AMR)

- ❑ 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

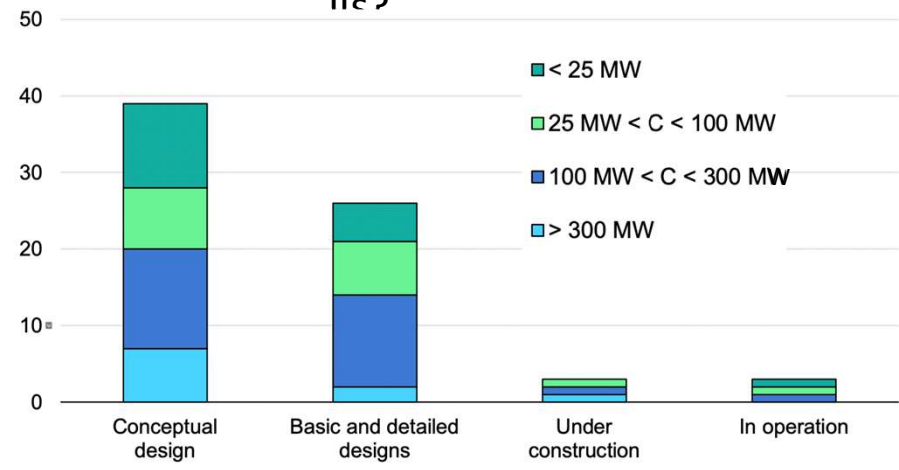


(Photos Source AIEA)

Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



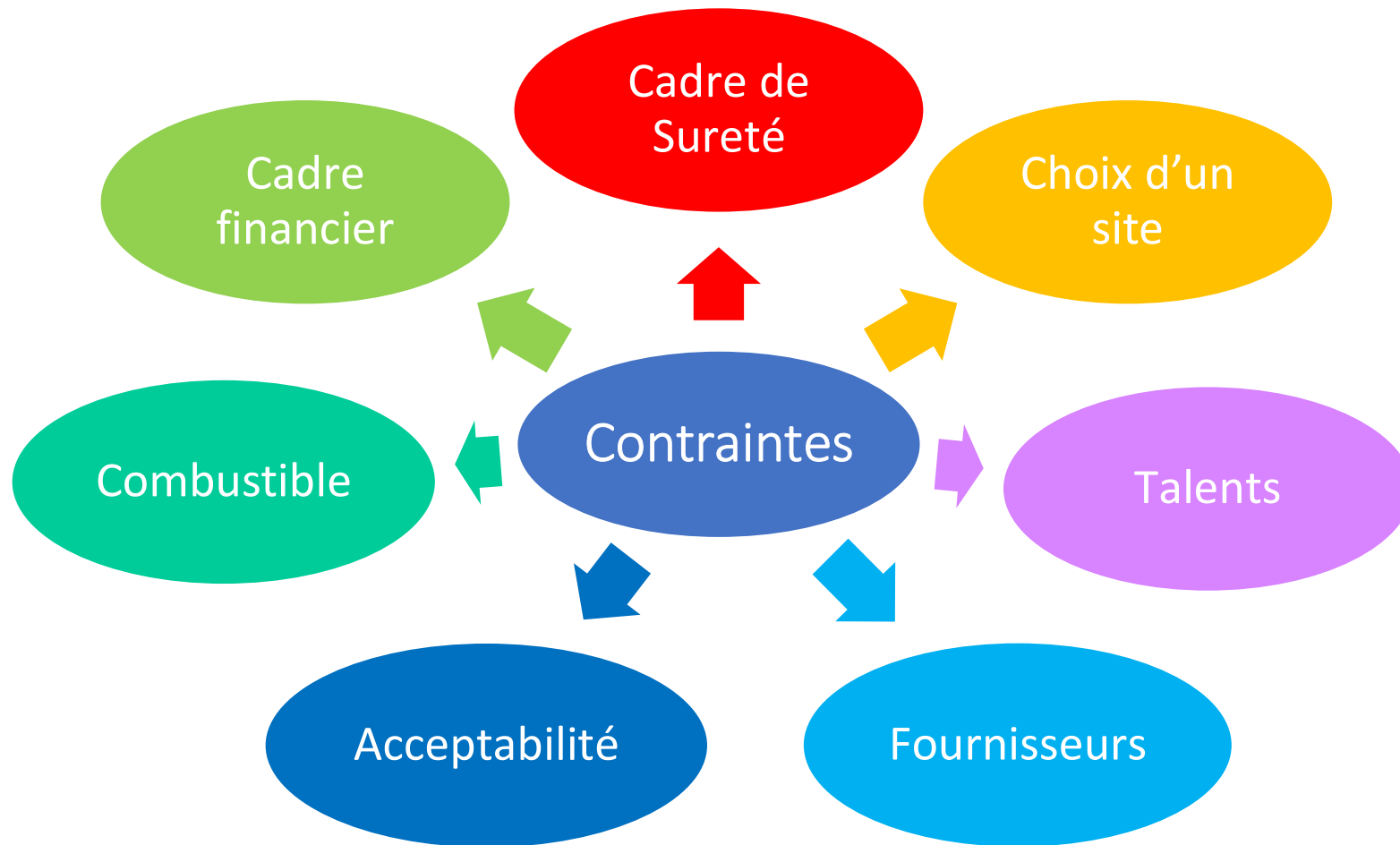
Où en sont-ils ?



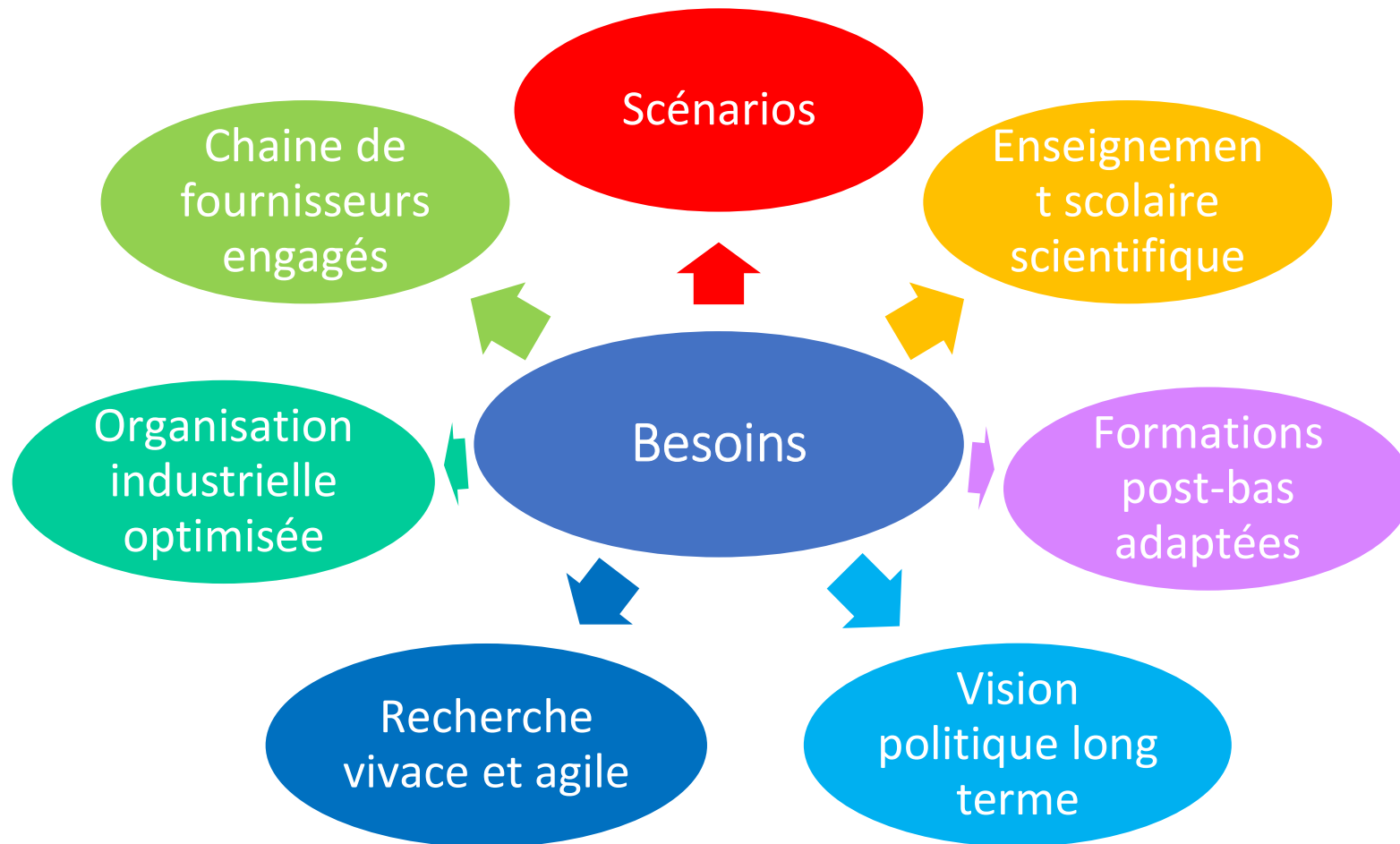
(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

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

Conditions de succès



Conditions de succès

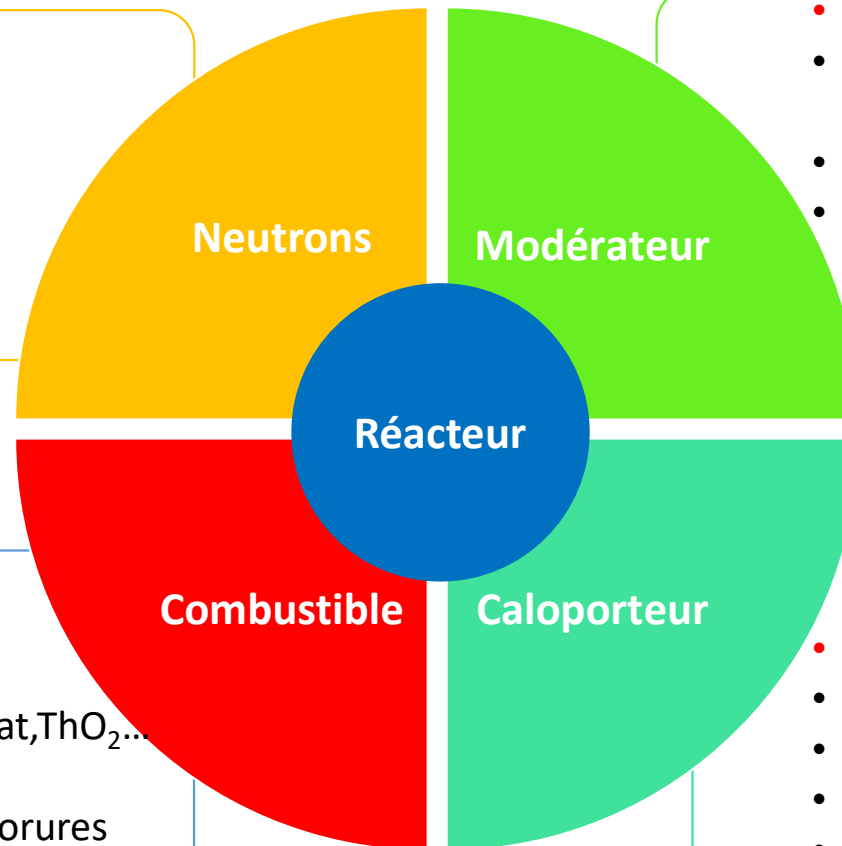


Les multiples filières de réacteurs

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

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

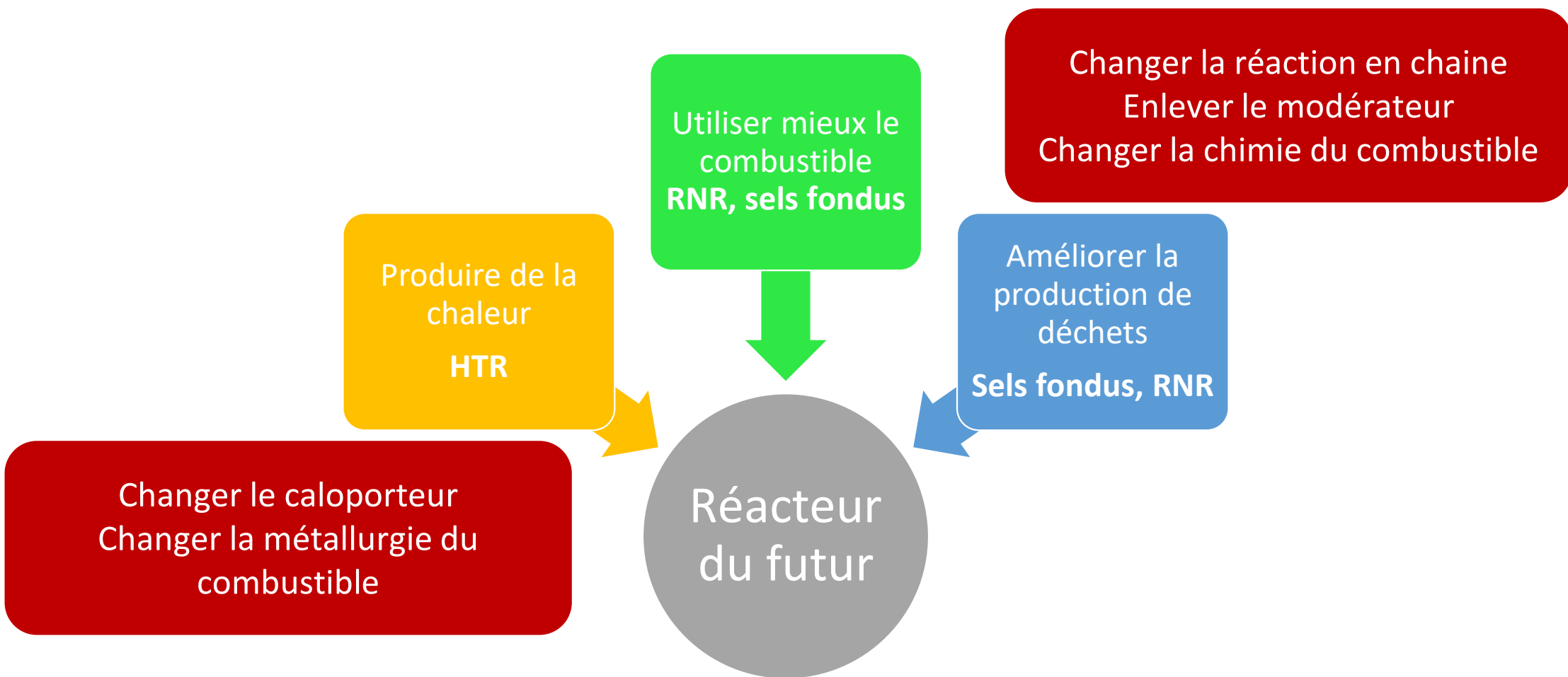
- **Noyaux fissiles et/ou fertiles**
- Combustible solide: UO_2 , MOX, Unat, ThO_2 ...
- Combustible liquide:
(U/Pu ou Th/U) + sels fluorures ou chlorures



- **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...)

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



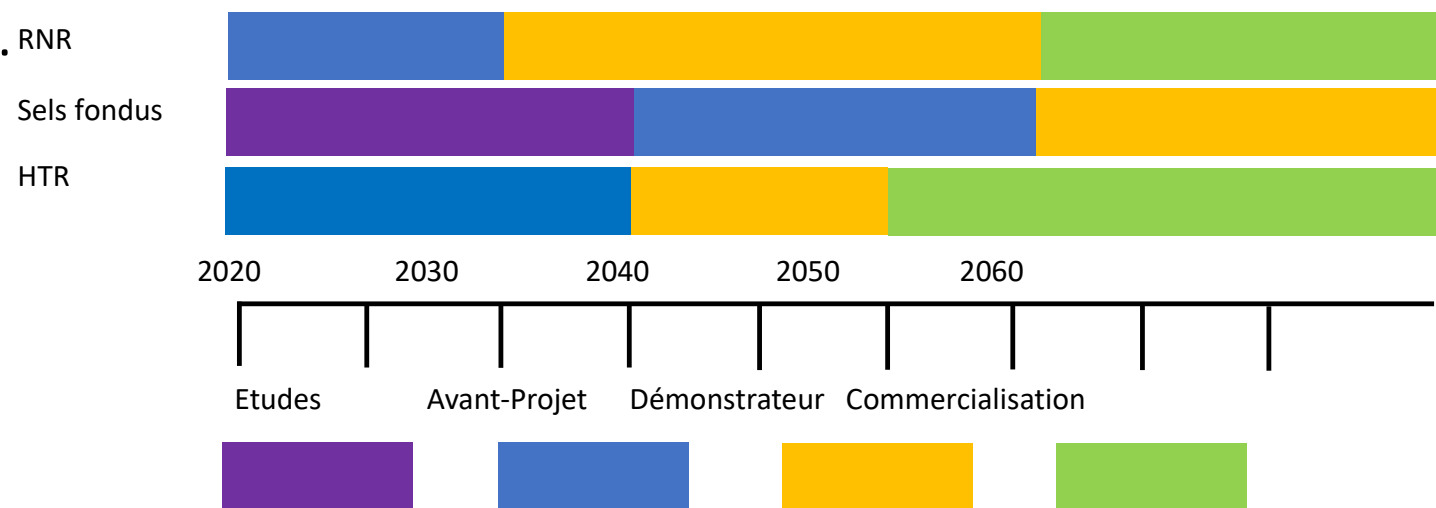
Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

❑ 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

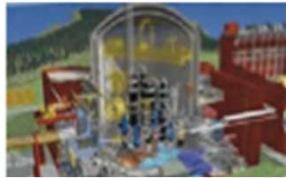
- Verrous technologiques sur le réacteur,
- Concevoir le cycle du combustible associé (fabrication et gestion des déchets),
- Licensing nouveau à instruire.



5. La filière nucléaire : ses besoins et ses métiers

L'industrie nucléaire: une industrie du temps long

R&D et études



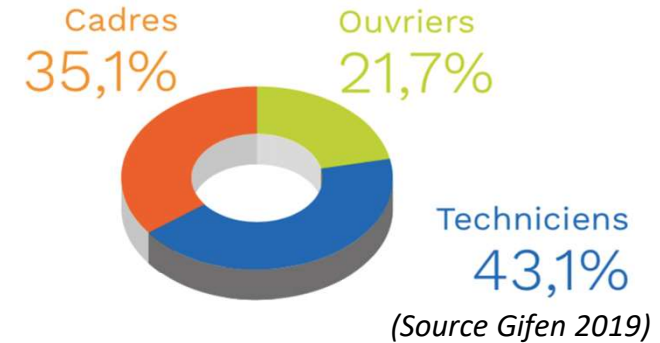
~20 ans

Fabrication et construction

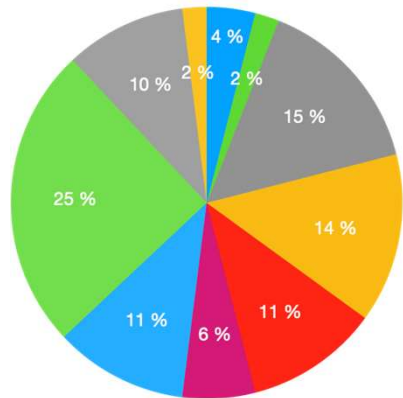


Plus de 100 métiers techniques à haute valeur ajoutée

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

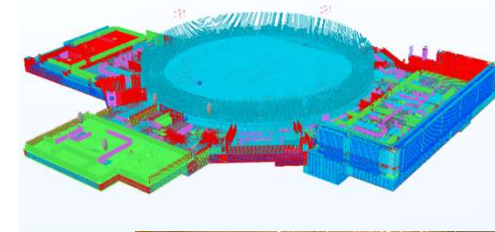


~ 30 ans

Gestion des déchets

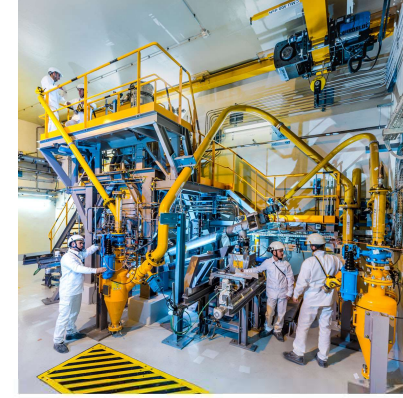


Chiffres clés de la filière nucléaire française



- ❑ 3^{ème} 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

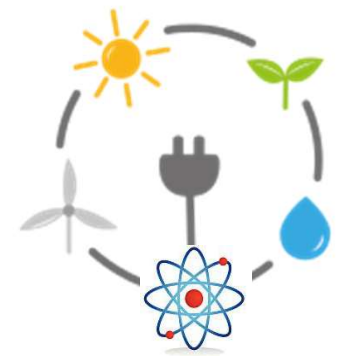
- ❑ Plus de 80% de notre consommation d'énergie est d'origine fossile.
- ❑ La transition énergétique : énergies fossiles vers énergies bas-carbone.
- ❑ Elle s'appuie sur :
 - Efficacité énergétique,
 - Electrification des usages,
 - Diminution de la consommation d'énergie.
- ❑ Les enjeux de souveraineté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

