

# Les enjeux de l'énergie nucléaire

**Emmanuelle Galichet**

**Enseignante-chercheuse Sciences et Technologies Nucléaires**

**Le Cnam**

**Présidente Win France**

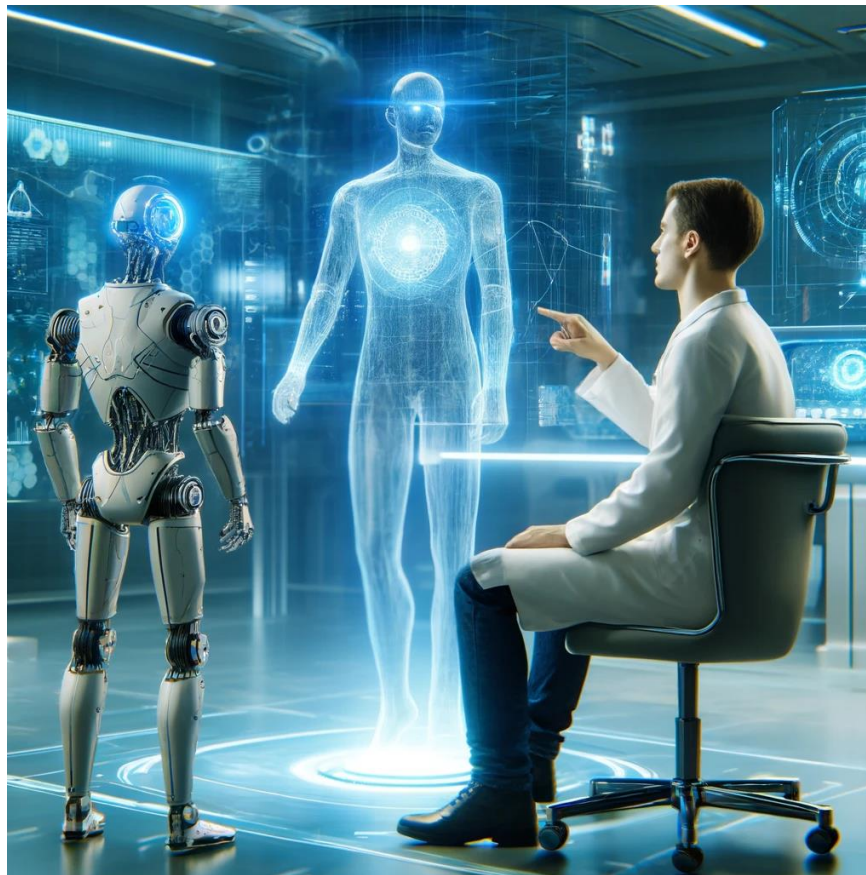


# Sommaire

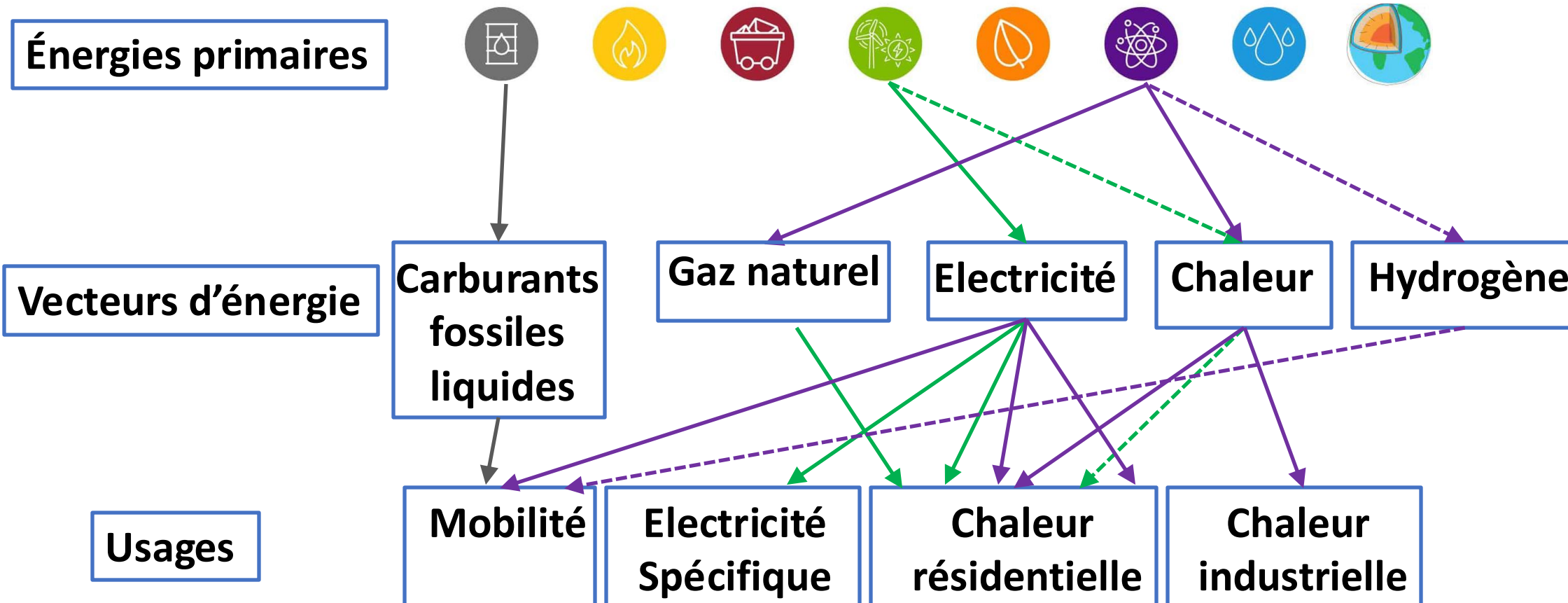
- ☐ Introduction : Situation énergétique actuelle
- ☐ Besoins en ressources minérales
- ☐ Un peu d'histoire
- ☐ Politiques publiques de l'énergie et transition énergétique
- ☐ La filière nucléaire aujourd'hui
- ☐ L'énergie nucléaire dans le futur
- ☐ La filière nucléaire : ses besoins et ses métiers
- ☐ En guise de conclusion...

# Image générée par ChatGPT

Illustration de comment l'intelligence artificielle peut aider l'homme dans l'analyse de données et la recherche scientifique.



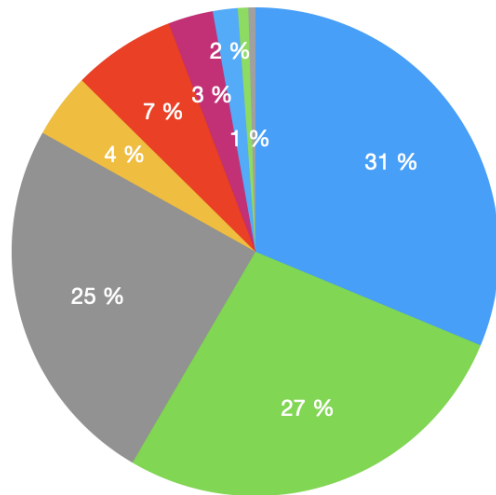
# Vecteurs énergétiques et usages



(D'après Académie des technologies)

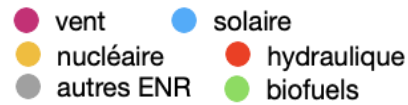
# Consommation mondiale d'énergie en 2021

## Consommation énergie primaire



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

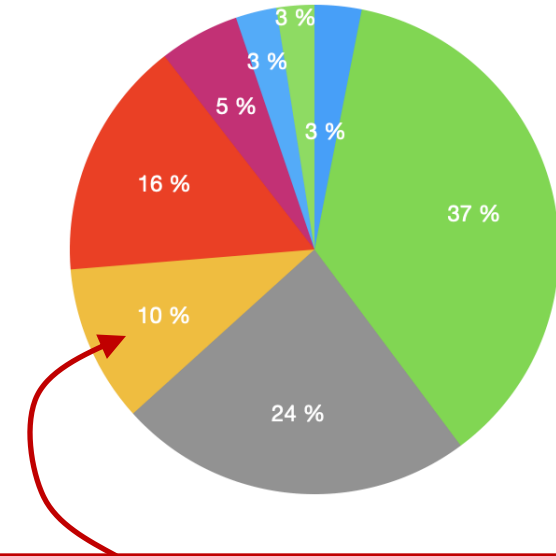
### Energies bas-carbone



### Energies fossiles



## Production électrique



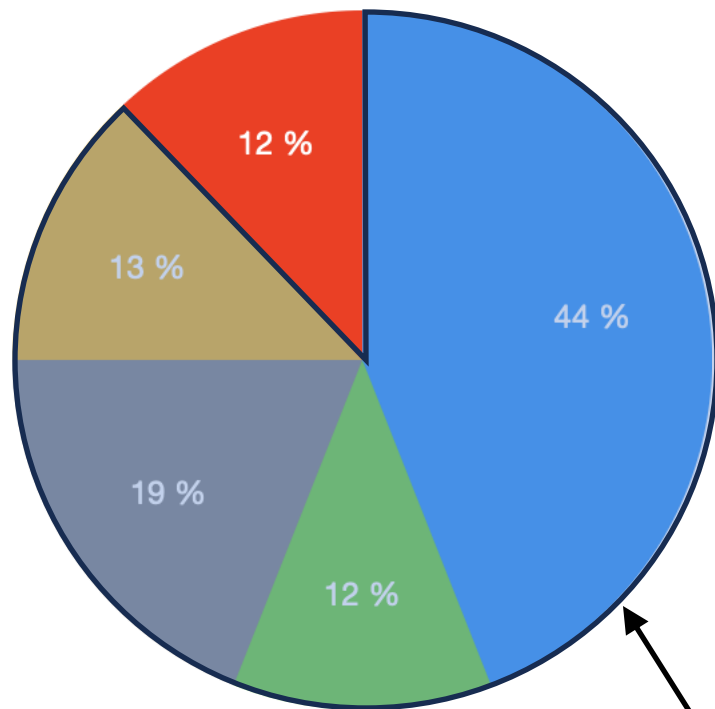
**Nucléaire = 2<sup>ème</sup> source d'électricité bas-carbone**

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

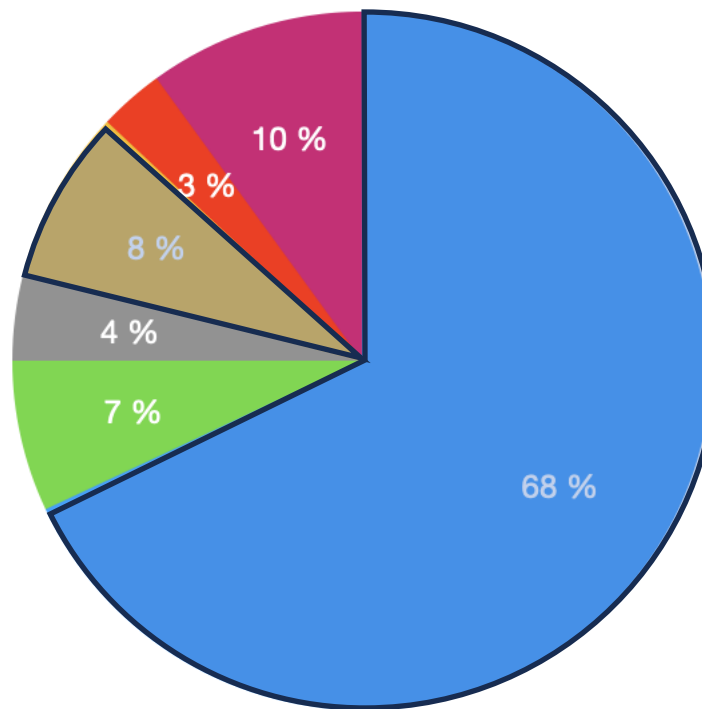
(source AIE 2022 et Eurostat)

# Usages hydrocarbures dans le monde

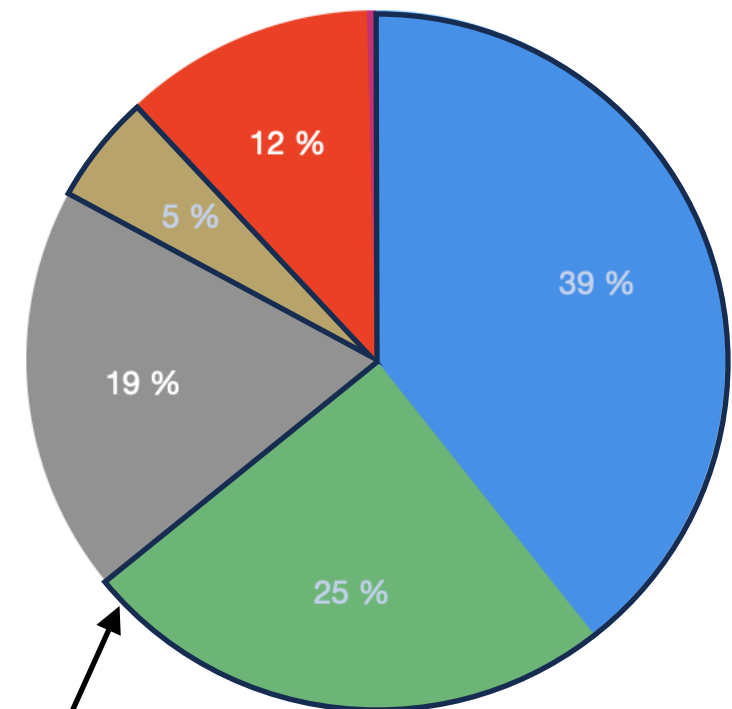
## Pétrole



## Charbon



## Gaz

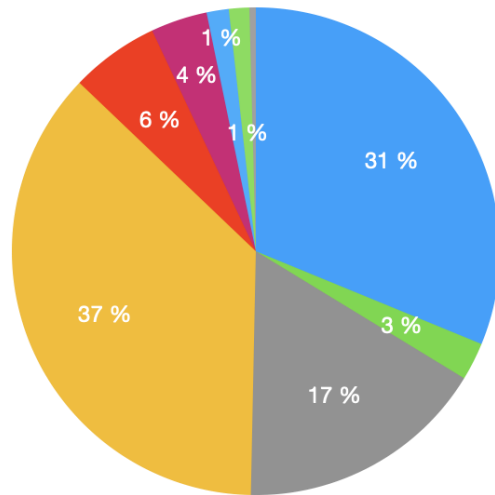


**Transport Electricité Industrie**

(Source Ourworldindata et IEA, 2023)

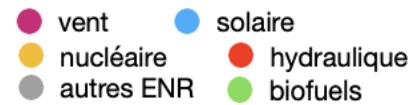
# Le cas de la France

## Consommation énergie primaire



2482 TWh

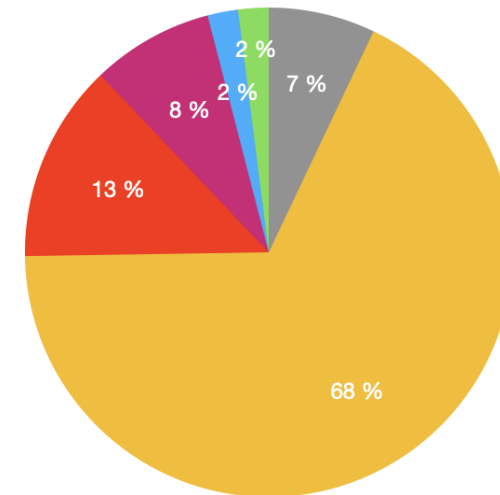
### Energies bas-carbone



### Energies fossiles



## Production électrique



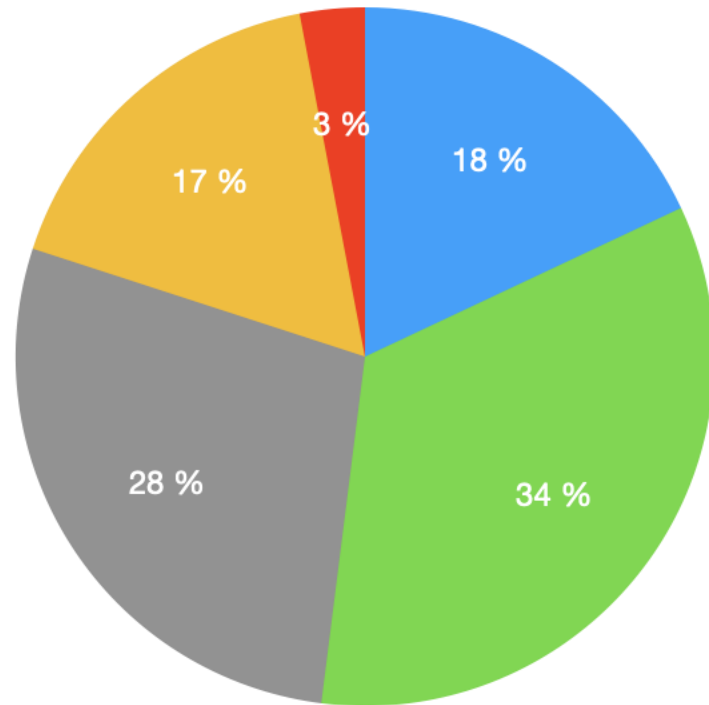
413 TWh

(Chiffres Clés de l'Energie, Edition 2023)

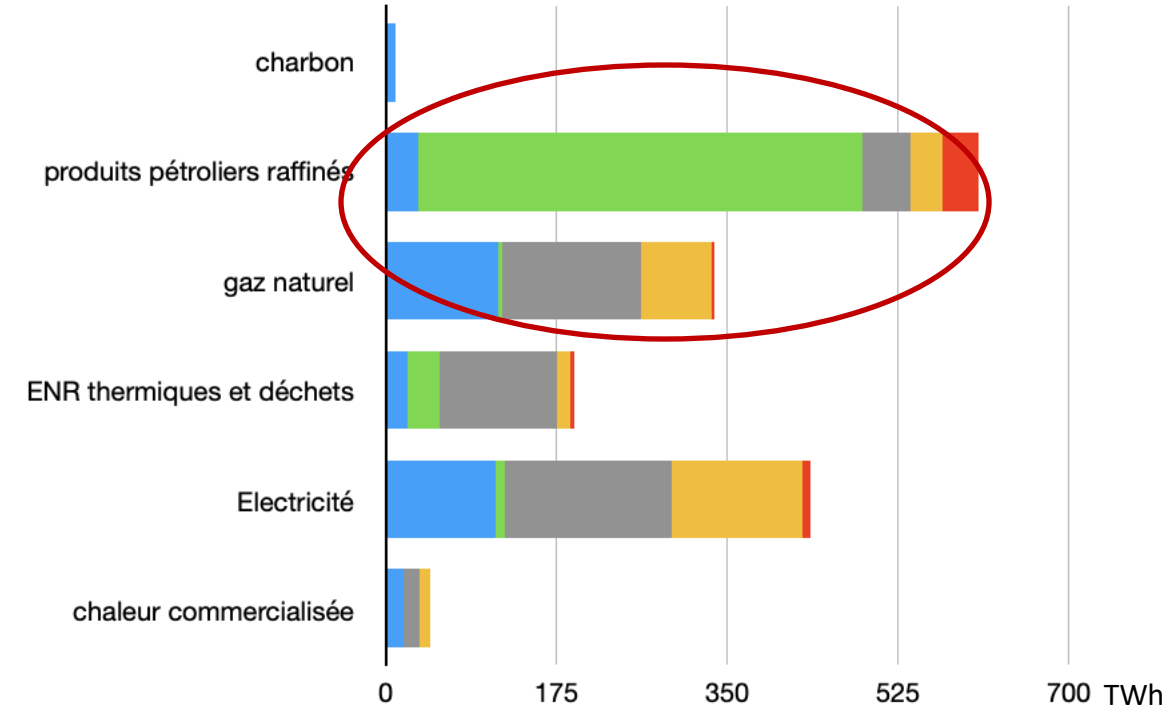
**~ 60% d'énergies fossiles consommées**  
**Electricité bas-carbone à + de 90% (grâce à l'énergie nucléaire)**

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

● Industrie ● Transport ● Résidentiel ● Tertiaire ● Agriculture



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

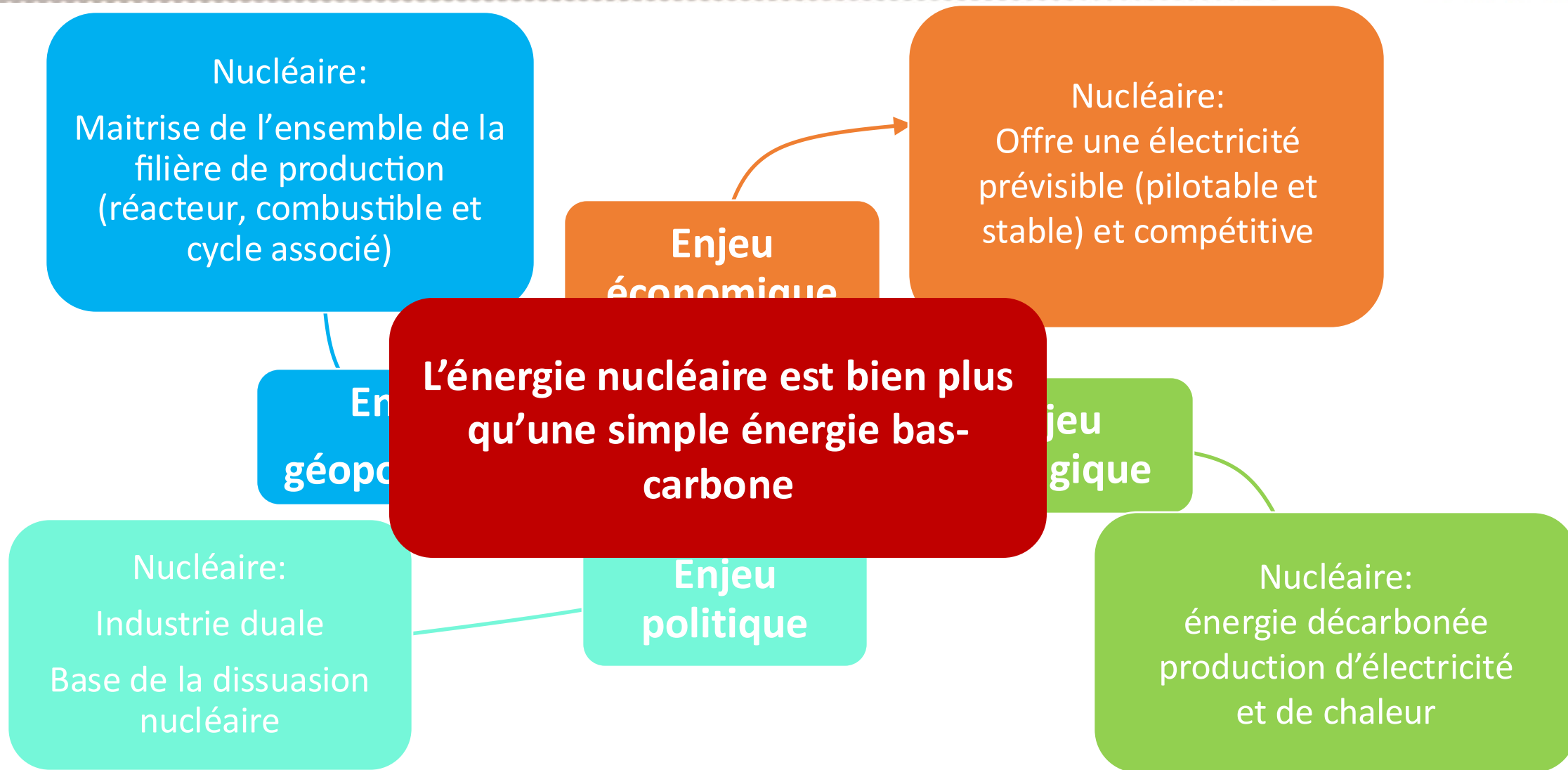


**Objectif: diminuer les fossiles :**

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

*(Chiffres Clés de l'Energie, Edition 2023)*

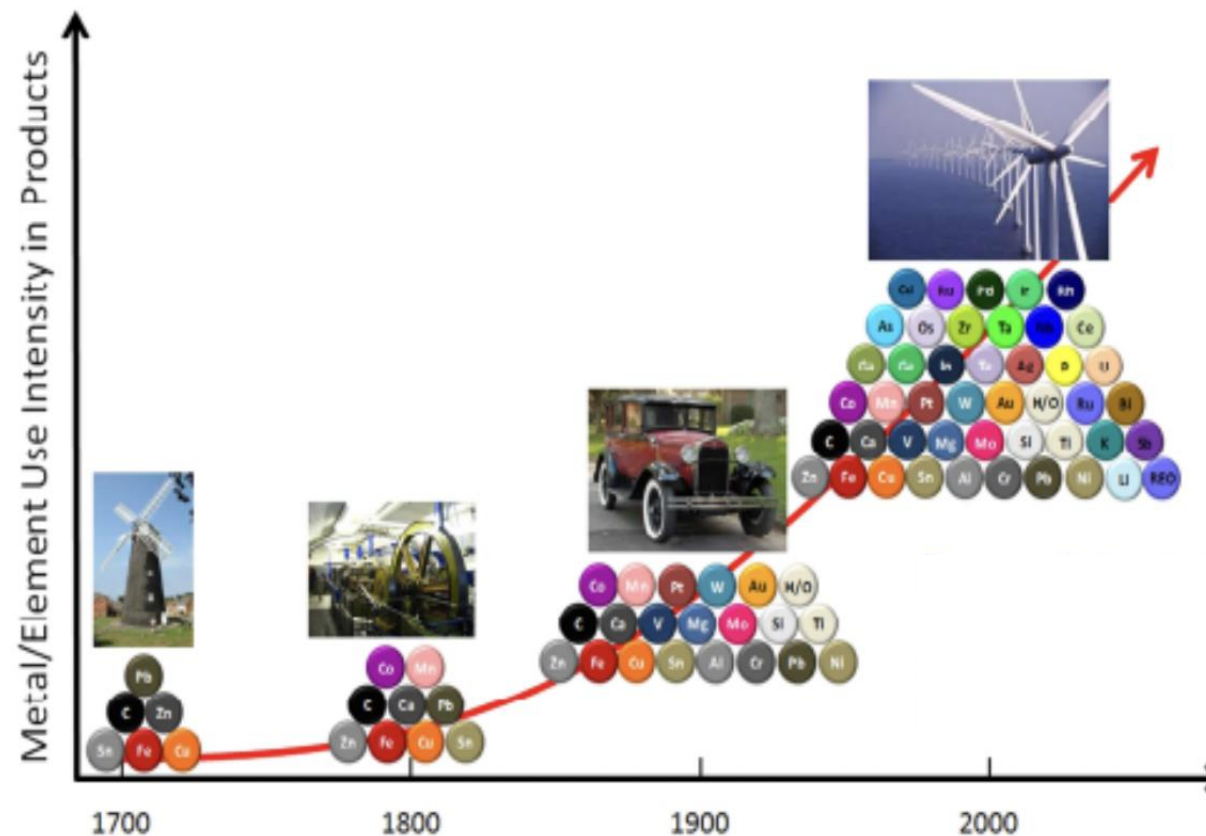
# L'énergie : Enjeu du XXI<sup>ème</sup> siècle



## Besoins en ressources minérales

# Besoin en ressources minérales

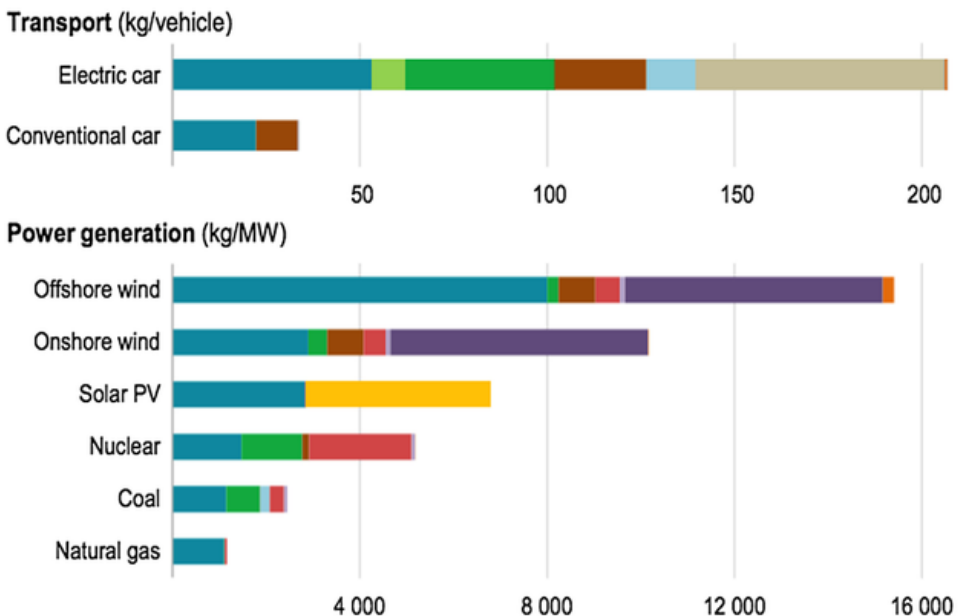
**Toute transition et révolution industrielle nécessitent des ressources minérales (et des ressources humaines) entraînant des dépendances géopolitiques : hier les énergies fossiles et demain les métaux.**



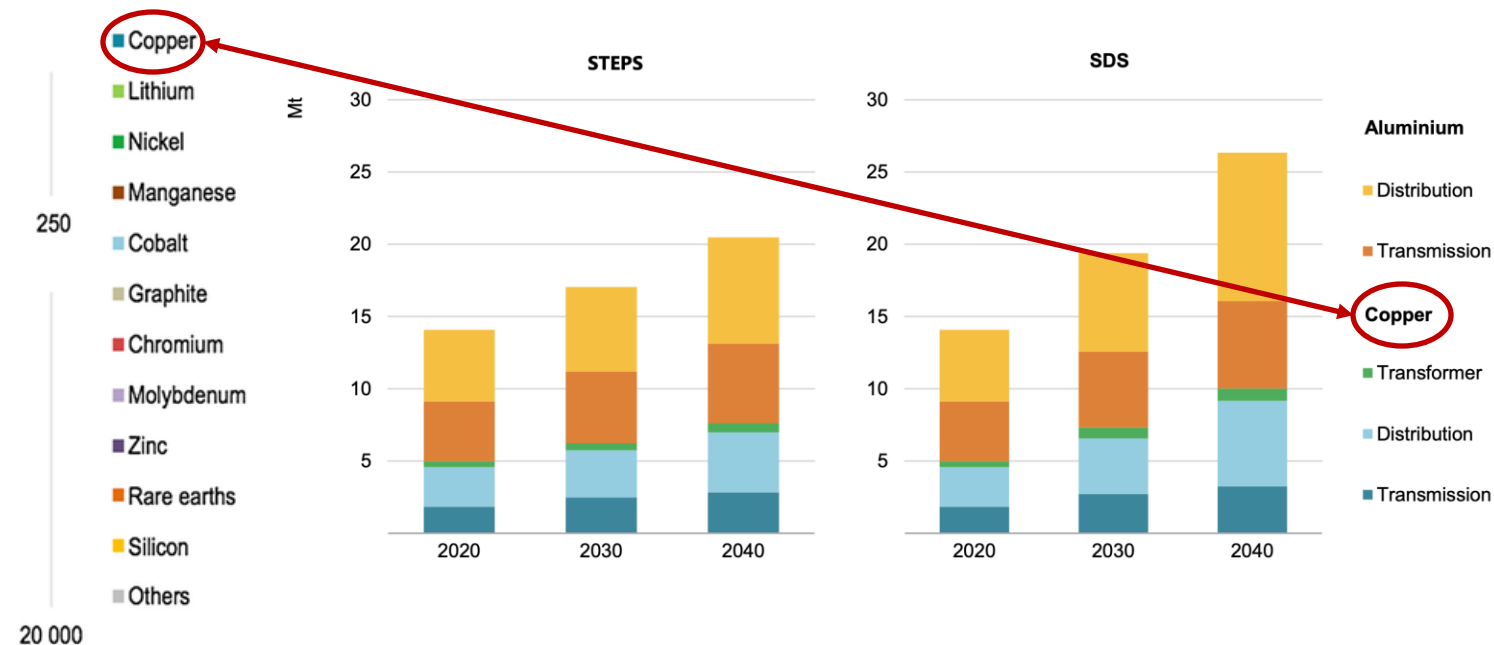
(Source Achzet et al., Materials critical to the energy industry, Augsburg, 2011)

# Conflits d'usage des matériaux critiques

Ressources minérales pour les technologies bas-carbone

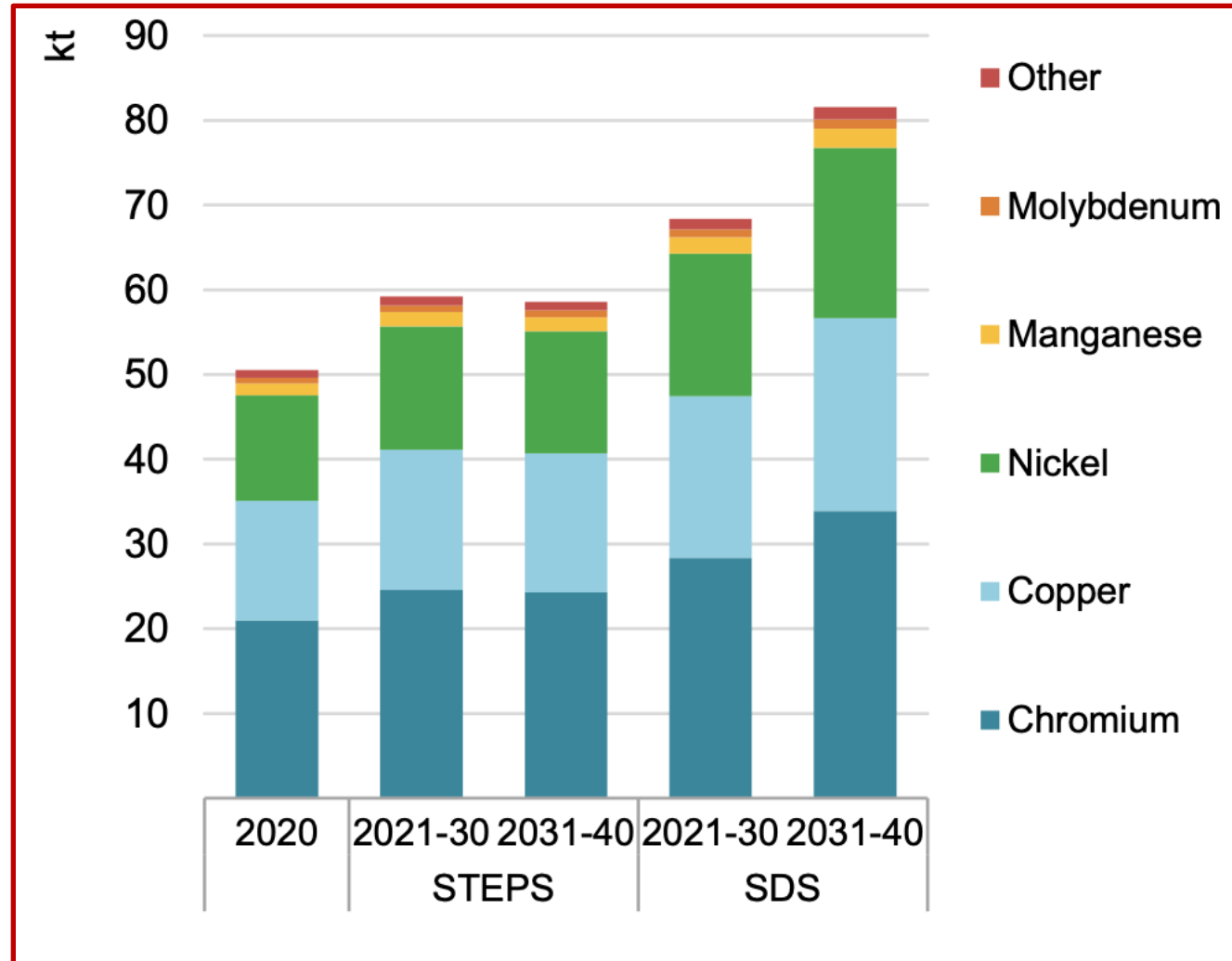


Ressources minérales pour les réseaux électriques



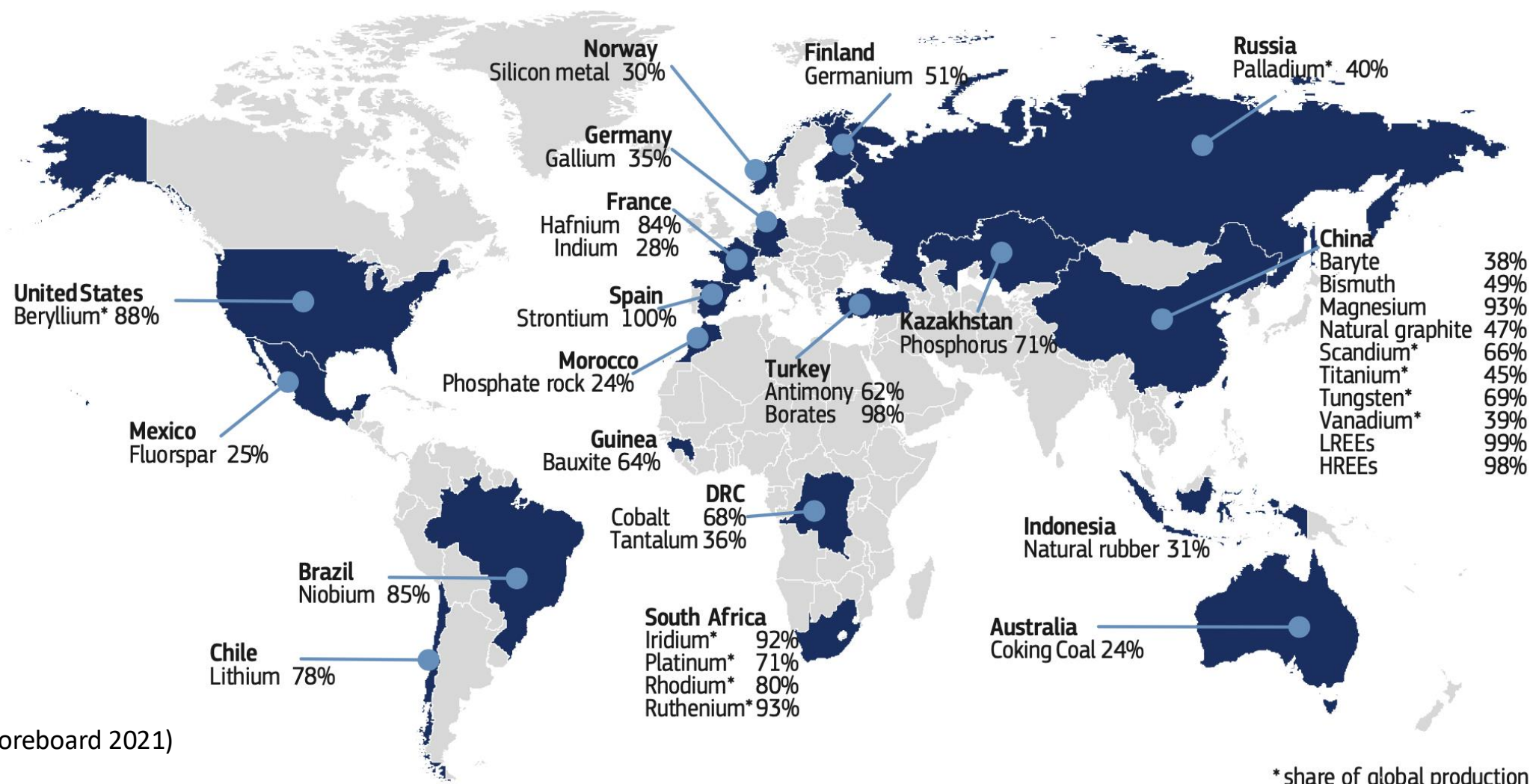
(Source The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, AIEA, 2021)

# Besoins pour l'énergie nucléaire



(Source The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, AIEA, 2021)

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



# Le numérique dans le monde en 2019



CONSOMMATION



ÉMISSIONS



CONSOMMATION



CONSOMMATION

**Consommation électrique: ~ 100 EPR**

**Consommation eau par utilisateur : ~ 1% consommation  
d'eau potable d'un français**



4,1 milliards d'utilisateurs



**1 300 TWh d'électricité consommée**

**1 400 millions de tonnes de gaz à effet de serre (GES)**

**7,8 millions de m<sup>3</sup> d'eau douce**

# Les centres de données

- ❑ Nombre de centre de données en 2023 : ~10 000 (Monde) et ~ 300 (France)
- ❑ ~ 1% de la consommation mondiale d'électricité en 2022
- ❑ ~ 1 % des émissions mondiales de CO2,
- ❑ GAFAM : ~72 TWh en 2021 (x 2 sur 2017-2021)

**Besoin en énergie pour data center et IA :  
1000 TWh en 2030  
C'est plus de 3 fois la production française.**

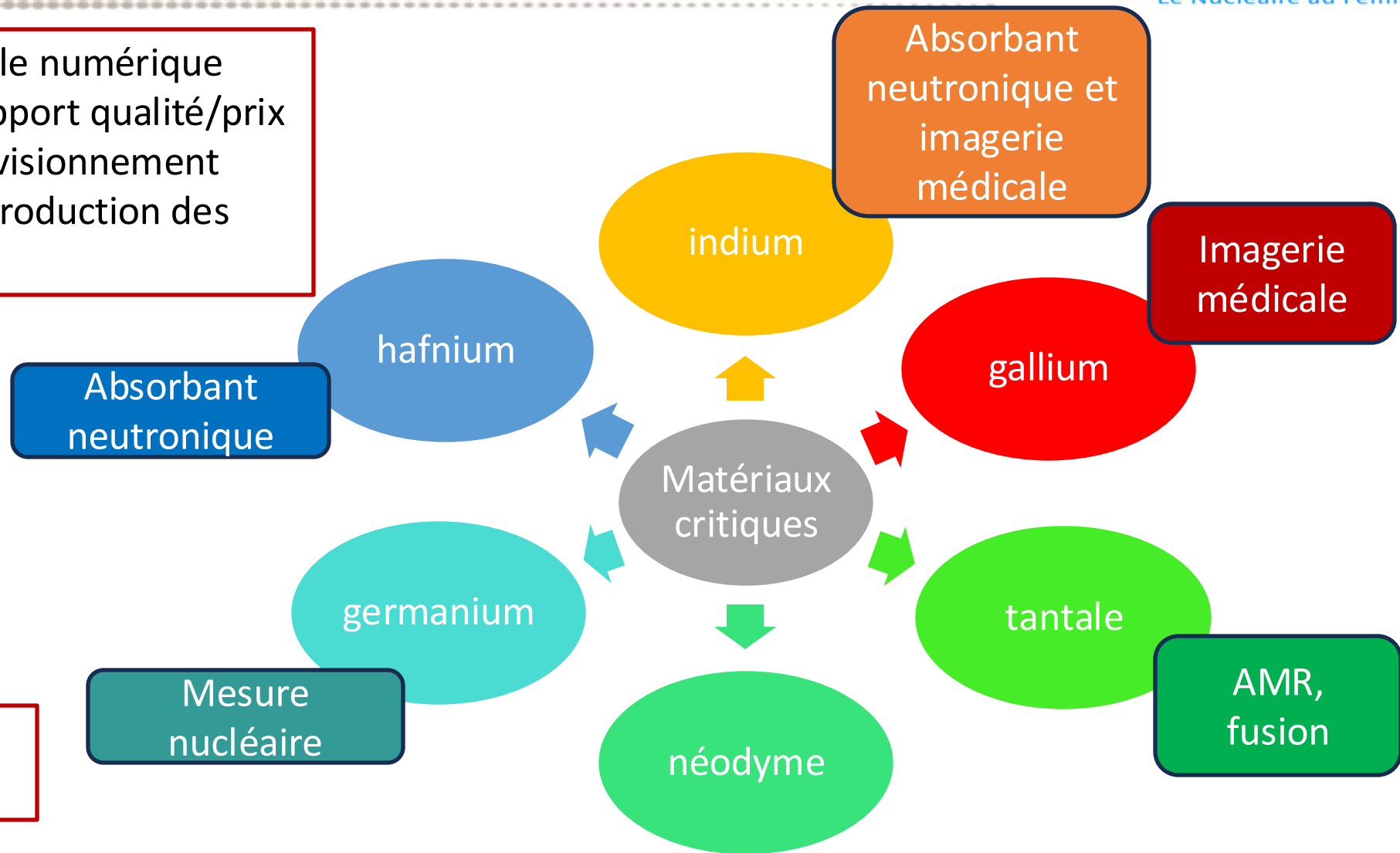
|                                       |             |             |         |
|---------------------------------------|-------------|-------------|---------|
| Internet users                        |             |             |         |
| Internet traffic                      | 0.6 ZB      | 4.4 ZB      | +600%   |
| Data centre workloads                 | 180 million | 800 million | +340%   |
| Data centre energy use (excl. crypto) | 200 TWh     | 240-340 TWh | +20-70% |
| Data transmission network energy use  | 220 TWh     | 260-360 TWh | +18-64% |



(Source IEA, 2023)

# Le numérique en général au niveau mondial

- ❑ Utilisés uniquement dans le numérique
- ❑ Essentiels pour un bon rapport qualité/prix
- ❑ Vulnérabilité dans l'approvisionnement
- ❑ Alternatives → coûts de production des équipements ↗



- ❑ Monopole chinois
- ❑ Recyclage quasiment nul

## □ Un peu d'histoire

# Les grandes étapes d'une découverte fondamentale

H. Becquerel

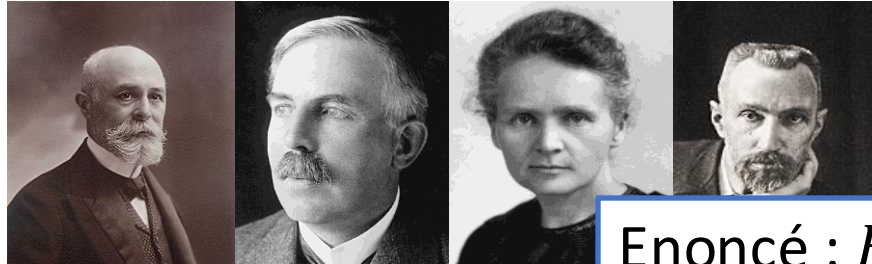
E. Rutherford

M. Curie

P. Curie

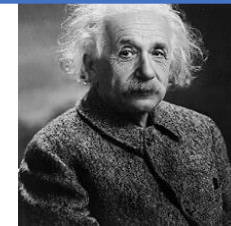
L. Meitner

O. Hahn



Découverte  
radioactivité artificielle

Enoncé :  $E = m \times c^2$



A. Einstein

Découverte radioactivité

1896

1905

1934

1938

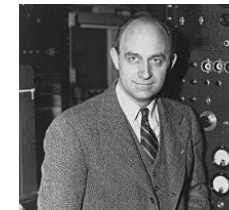
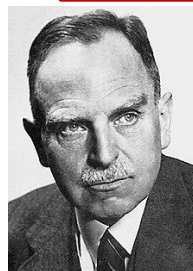
1939

1942

Découverte fission



Découverte  
réaction en chaîne



I. Joliot-Curie

F. Joliot-Curie

Construction  
1<sup>er</sup> réacteur (Chicago)

E. Fermi

## **Année 1939 : un tournant**

**Passage de la science à l'industrie nucléaire.  
Début de la guerre  
l'énergie nucléaire nous permettra la victoire.**

# Année 1939 : Les brevets français : la dualité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE  
DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE  
SERVICE  
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**BREVET D'INVENTION**  
Gr. 5. — Cl. 2. N° 976.541

Dispositif de production d'énergie.

CAISSE NATIONALE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE résidant en France (Seine).

Demandé le 1<sup>er</sup> mai 1939, à 16<sup>h</sup> 55<sup>m</sup>, à Paris.

(Brevet d'invention)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE  
DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE  
SERVICE  
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**BREVET D'INVENTION**

Gr. 12. — Cl. 2. N° 976.542

Procédé de stabilisation d'un dispositif producteur d'énergie.

CAISSE NATIONALE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE résidant en France (Seine).

Demandé le 2 mai 1939, à 14<sup>h</sup> 12<sup>m</sup>, à Paris.

Délivré le 1<sup>er</sup> novembre 1950. — Publié le 19 mars 1951.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

Dans une demande de brevet français déposée le 1<sup>er</sup> mai 1939 pour « Dispositif de production d'énergie », on a décrit la réalisation d'un tel dispositif, constitué par une masse, de configuration déterminée, d'uranium (ou de composé d'uranium) sur laquelle agit une source externe ou interne de neutrons. Il se produisait une succession de ruptures de noyaux d'uranium suivant des chaînes à ramification illimitées, avec dégagement d'une énergie extrêmement considérable. Et, dans cette demande de brevet, l'on avait indiqué que — pour empêcher un dégagement non maîtrisable d'énergie, la réaction pouvant devenir explosive — il y avait lieu de stabiliser cette réaction par introduction dans la masse d'éléments ralentissants de tout ou partie des neutrons émis et éventuellement d'éléments absorbants, dans certaines conditions, de

Ce procédé de stabilisation — qui a pour but, encore une fois, de limiter la rapidité du dégagement d'énergie — est basé sur le fait, connu en soi, que ces chaînes mettent un certain temps à se développer.

Le procédé qui fait l'objet de la présente invention consiste essentiellement à laisser se développer les réactions en chaînes illimitées pendant le temps nécessaire pour obtenir un dégagement d'énergie suffisant, et à arrêter ce développement en agissant sur l'un ou plusieurs des facteurs dont la ou les valeurs primitives donnaient le caractère illimité aux chaînes. On rétablit les conditions du développement des chaînes illimitées que l'on interrompt de nouveau comme précédemment. La répétition de ces opérations, périodiquement ou non, permet d'obtenir un dégagement d'énergie

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE  
DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE  
SERVICE  
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**BREVET D'INVENTION**

Gr. 12. — Cl. 2. N° 971.386

Perfectionnements apportés aux dispositifs de production d'énergie.

MM. HANS HEINRICH VON HALBAN, JEAN-FRÉDÉRIC JOLIOT et LEW KOWARSKI résidant en France (Seine).

Demandé le 1<sup>er</sup> mai 1940, à 11<sup>h</sup> 30<sup>m</sup>, à Paris.

Délivré le 12 juillet 1950. — Publié le 16 janvier 1951.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

On sait que l'irradiation de l'uranium par des neutrons provoque une rupture nucléaire de très asymétrique, ou autre), ou aplatie (plaque, couche sphérique ou autre).

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE  
DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE  
SERVICE  
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**BREVET D'INVENTION**

Gr. 14. — Cl. 3. N° 971.324

Perfectionnements aux charges explosives.

CAISSE NATIONALE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE résidant en France (Seine).

Demandé le 4 mai 1939, à 15<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>, à Paris.

Délivré le 12 juillet 1950. — Publié le 16 janvier 1951.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

On sait que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium peut provoquer la rupture de ce dernier avec dégagement d'énergie et émission de nouveaux neutrons en nombre en moyenne supérieur à l'unité. Parmi les neutrons ainsi émis, un certain nombre peuvent à leur

en utilisant la formule suivante, valable pour une masse sphérique :

$$M = \frac{4}{3} \times \pi^4 \left[ 3 D (n P - A) \right]^{-\frac{3}{2}}$$

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE  
DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE  
SERVICE  
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

**BREVET D'INVENTION**

Gr. 12. — Cl. 2. N° 971.384

Perfectionnement aux dispositifs producteurs d'énergie.

MM. HANS HEINRICH VON HALBAN, JEAN-FRÉDÉRIC JOLIOT et LEW KOWARSKI résidant en France (Seine).

Demandé le 30 avril 1940, à 11<sup>h</sup> 6<sup>m</sup>, à Paris.

Délivré le 12 juillet 1950. — Publié le 16 janvier 1951.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

On sait que l'irradiation de l'uranium par des neutrons provoque une rupture nucléaire de l'uranium, avec dégagement de quantités considérables d'énergie. Cette rupture donne lieu à l'émission de neutrons secondaires, parmi lesquels un certain nombre peuvent provoquer à leur tour de nouvelles ruptures, et une réaction à chaîne explosive peut ainsi prendre naissance et se propager au sein de la masse uranifère.

Divers moyens ont été proposés pour permettre l'extraction et l'utilisation à des fins industrielles de l'énergie développée par ces chaînes de rupture successives, et notamment, l'on a déjà eu l'idée de réduire la vitesse de tout ou partie des neutrons secondaires (de manière qu'ils deviennent les neutrons lents approximativement en équilibre thermique avec le milieu) en introduisant au sein de la masse uranifère un ou des éléments de ralentissement (hydrogène, eau, etc.).

Or on s'est rendu compte, conformément à la présente invention, que le développement des chaînes de ruptures et par suite le dégagement d'énergie qui en résulte se trouvaient favorisés si l'on opérait avec une masse d'uranium comportant une proportion d'isotope 235 plus élevée que n'en contient l'uranium naturel.

On sait que (si l'on fait abstraction de l'isotope 234 extrêmement rare) l'uranium naturel est un mélange de deux isotopes : l'isotope 238

Et un enrichissement plus élevé en isotope 235 (par exemple dans la proportion de 5 à 1 ou de 10 à 1) donnera des résultats encore plus favorables.

Au cours de la marche du dispositif et au fur et à mesure que se développent les chaînes de réactions, l'isotope 235 est consommé, sa proportion tombe, ce qui amènerait les conditions à redevenir moins favorables. Mais en même temps la masse uranifère s'enrichit en isotope 239 (qui se forme à partir de l'isotope 238) et cet isotope 239 peut vraisemblablement remplir un rôle analogue à l'isotope 235 et compenser par suite, du moins en partie, l'appauvrissement graduel de la masse en isotope 235.

Dans la présente invention, l'uranium peut être sous forme d'uranium métallique, de composé d'uranium ou de mélange contenant de l'uranium.

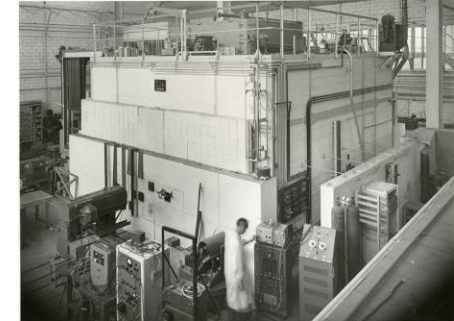
Les dispositions de la présente invention peuvent être combinées avec celles faisant l'objet de la demande de brevet français du 1<sup>er</sup> mai 1939 pour « Dispositif de production d'énergie » et/ou de la demande de brevet français du 2 mai 1939 pour « Procédé de stabilisation d'un dispositif producteur d'énergie ».

RÉSUMÉ.

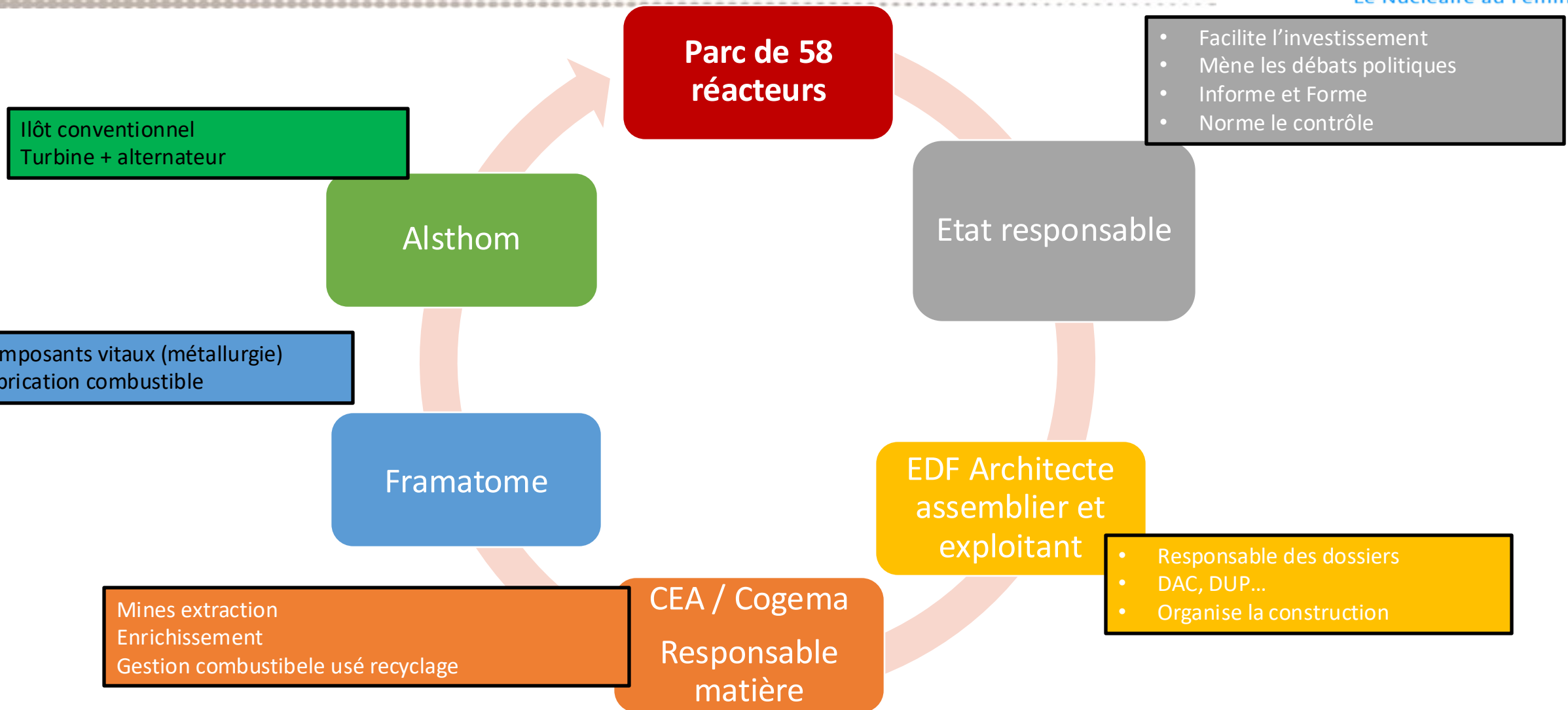
Perfectionnement aux dispositifs de production d'énergie utilisant les réactions nucléaires de milieux uranifères; ce perfectionnement consis-

# Histoire du programme nucléaire français après-guerre

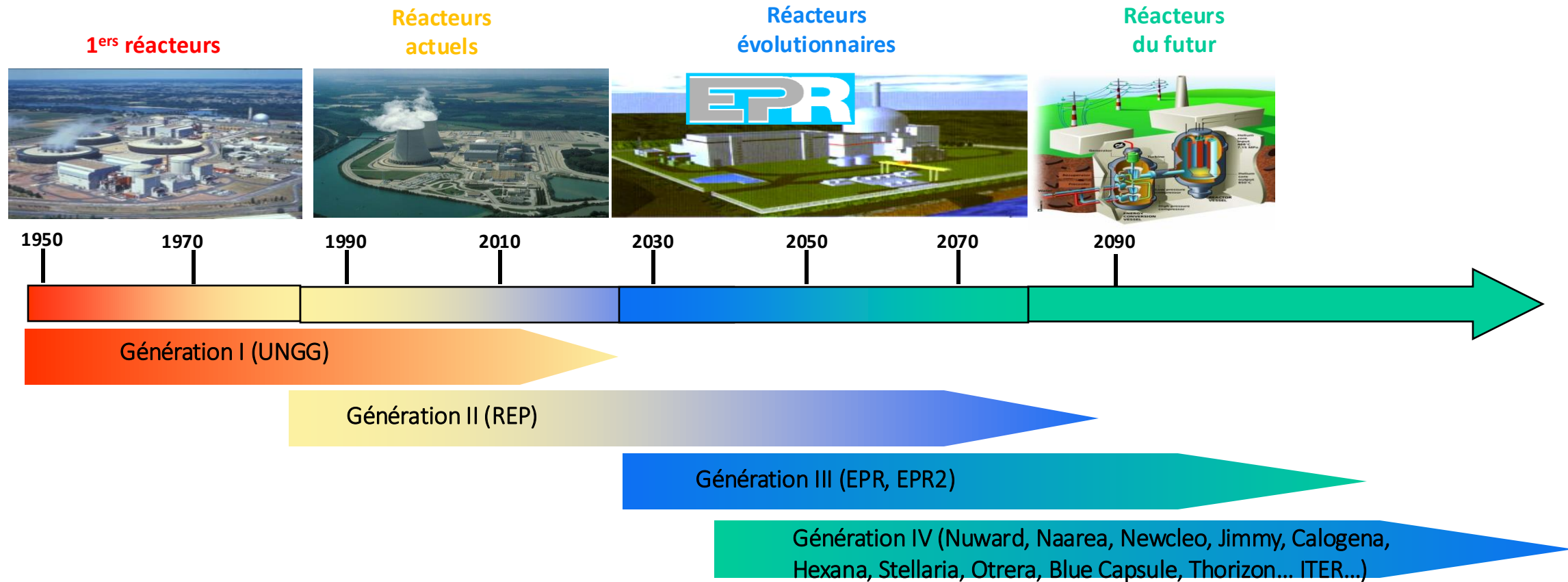
- ❑ **1945** : création du CEA, mission : conduire des recherches pour développer une capacité nucléaire civile comme militaire.
- ❑ **15/12/48** : la pile Zoé diverge.
- ❑ **1954** : décision du gouv't de Pierre Mendès France de doter la France de l'arme nucléaire.
- ❑ **13/02/60** : 1<sup>er</sup> 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.
- ❑ **02/24** : Le CPN valide des investissements importants à la Hague.
- ❑ **8/05/24** : MIS de l'EPR de Flamanville.



# Le plan Messmer



# Les différentes générations de réacteurs



# ❑ Politiques publiques de l'énergie et transition énergétique

**Rôle de l'Etat :**  
**vision long terme**  
**Coordonner,**  
**impulser, animer et**  
**financer**

Exigence de durabilité → Minimisation :  
- Besoins (ress. nat., espace, conflits d'usages...)  
- Pollutions (déchets, GES, particules fines...)

Supply chain de qualité et  
souveraine

Conception

Hommes et femmes en  
nombre suffisant et bien  
formés

Déconstruction

**Système énergétique  
basé sur l'énergie  
nucléaire**  
Durée de vie : 100 ans

Construction

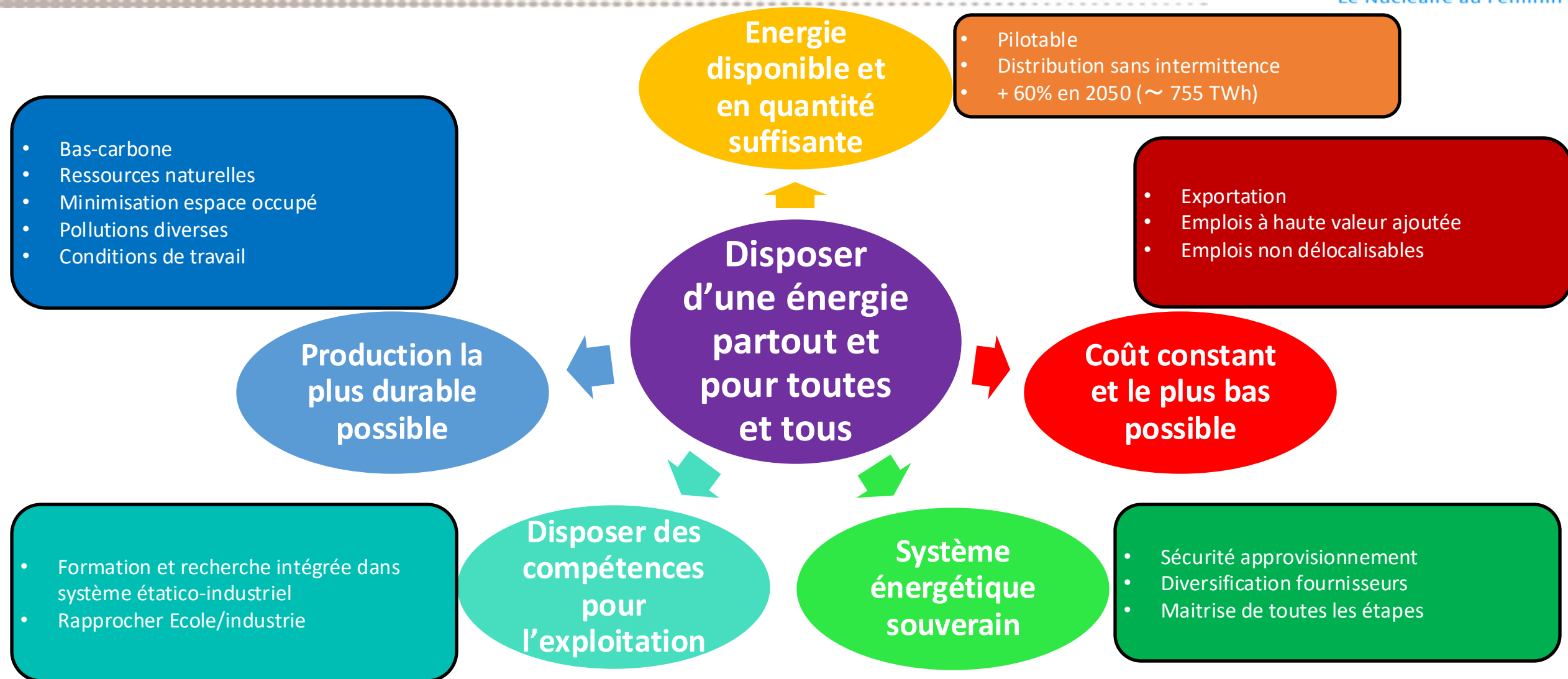
Cadre législatif, Régulation,  
Réglementations

Système de recherche et  
d'innovation bien organisé et  
efficace

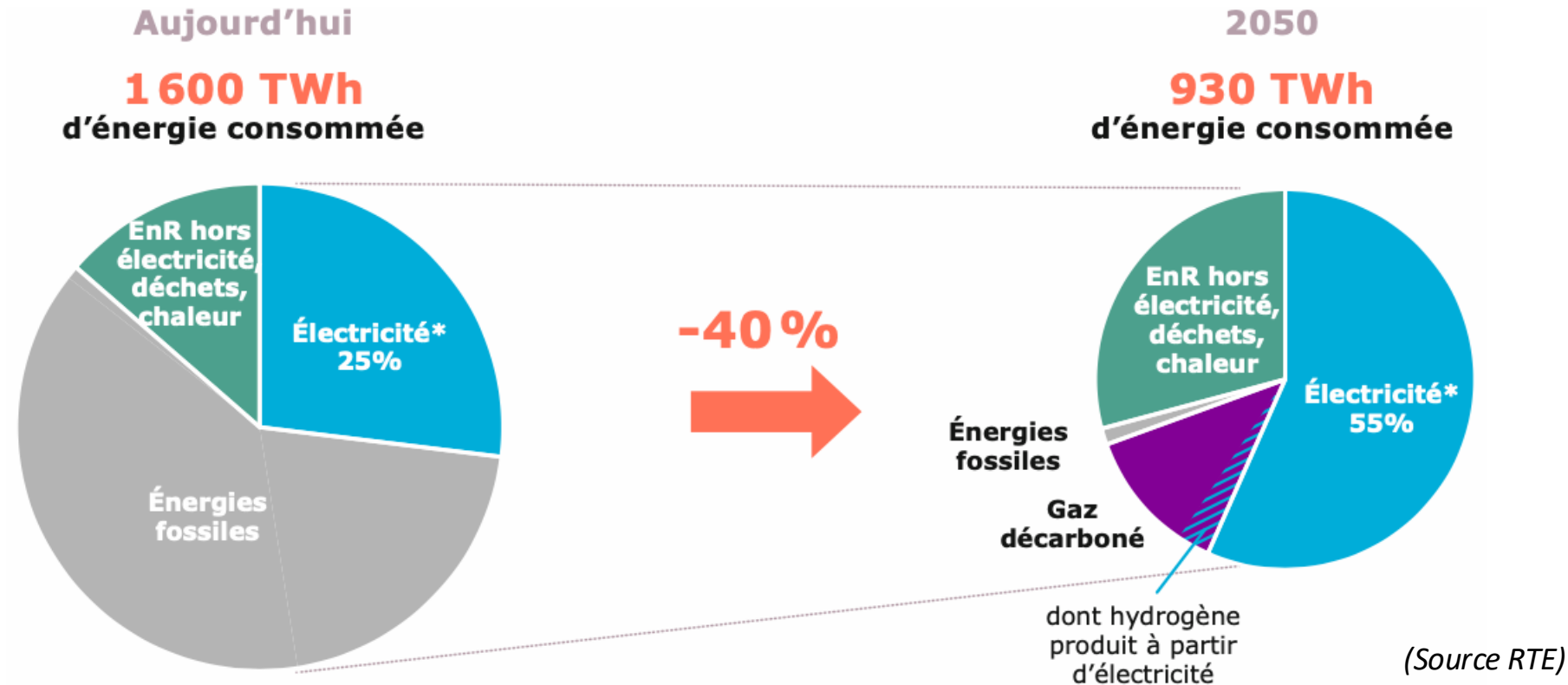
Exploitation

Soutien financier

# Souveraineté énergétique : quelles exigences?



# Projection pour 2050 en France (Scénarios RTE)

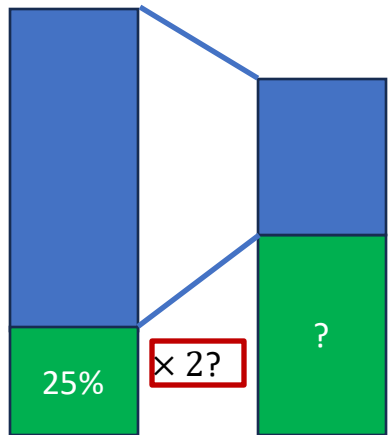


Consommation électricité en 2050 :  
scénario de référence = 645 TWh (+35%)  
scénario « réindustrialisation » = 755 TWh (+60%)

# Les trois piliers de la transition énergétique

2024      2050

Diminuer  $E_{\text{finale}}$



Augmenter l'électricité

Effacité  
énergétique

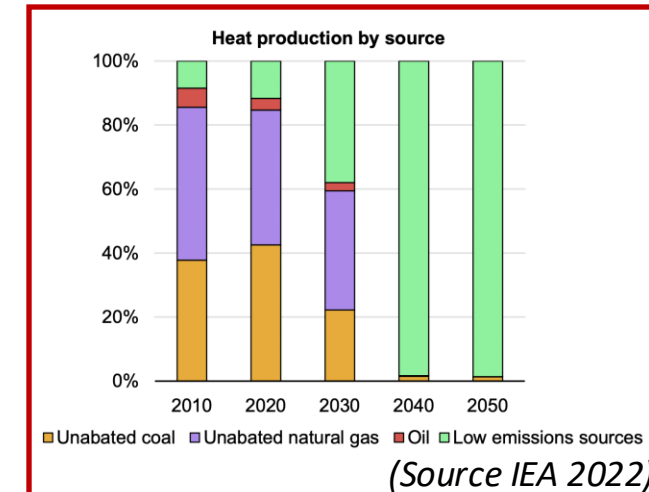
Augmenter les rendements  
Améliorer l'existant  
Changer de procédés

Sobriété

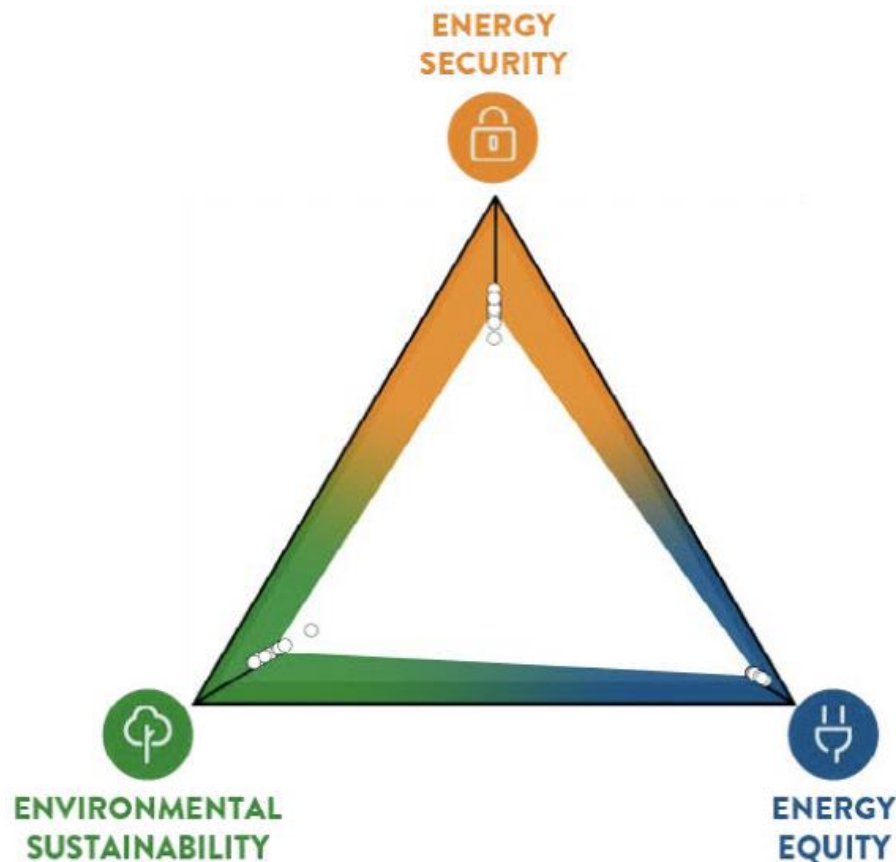
Défossiliser  
les usages

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

Electrification  
Production de chaleur bas-carbone



# Le trilemme énergétique (Word Energy Council)



Les 10 pays aux meilleures performances

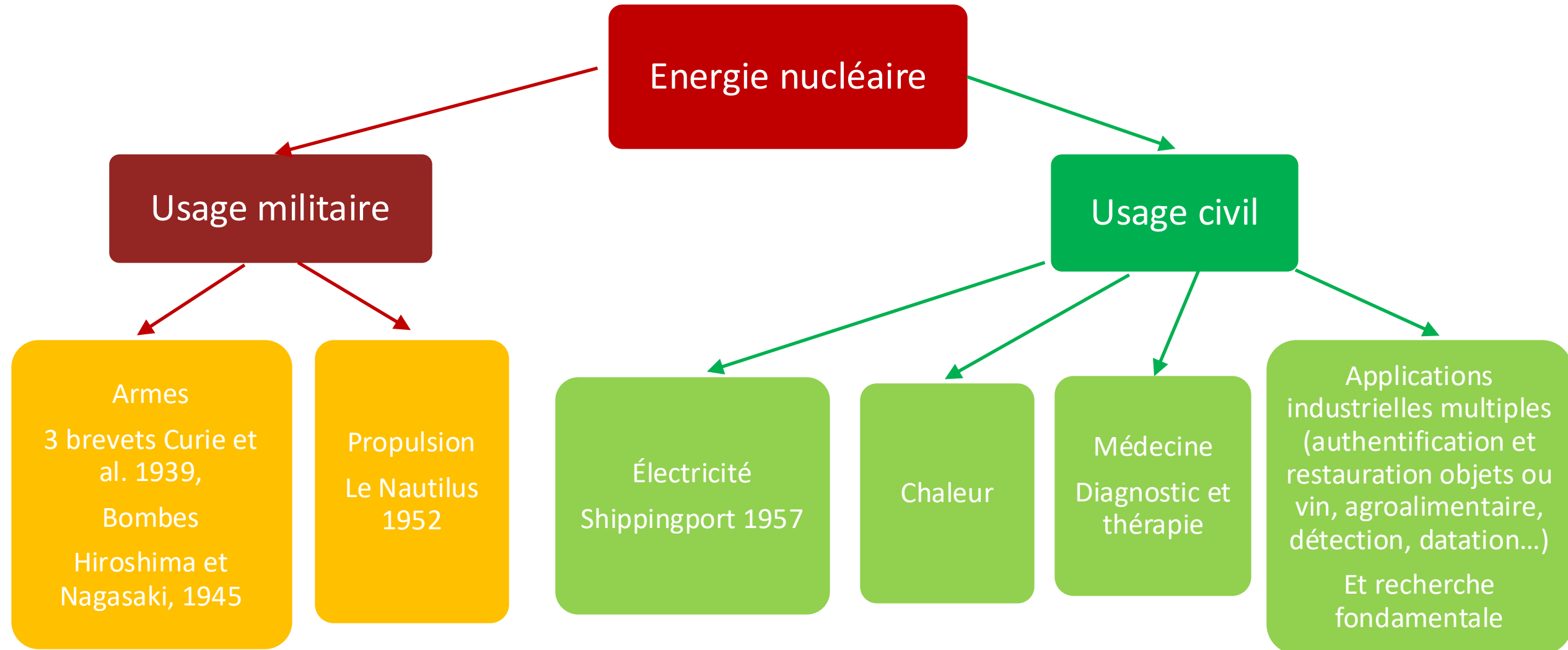
- 1 Sweden
- 2 Switzerland
- 2 Denmark
- 3 Finland
- 4 United Kingdom
- 4 Canada
- 5 Austria
- 6 France
- 6 Norway
- 7 Germany
- 8 New Zealand
- 9 Slovenia
- 9 Estonia
- 10 United States

Rank

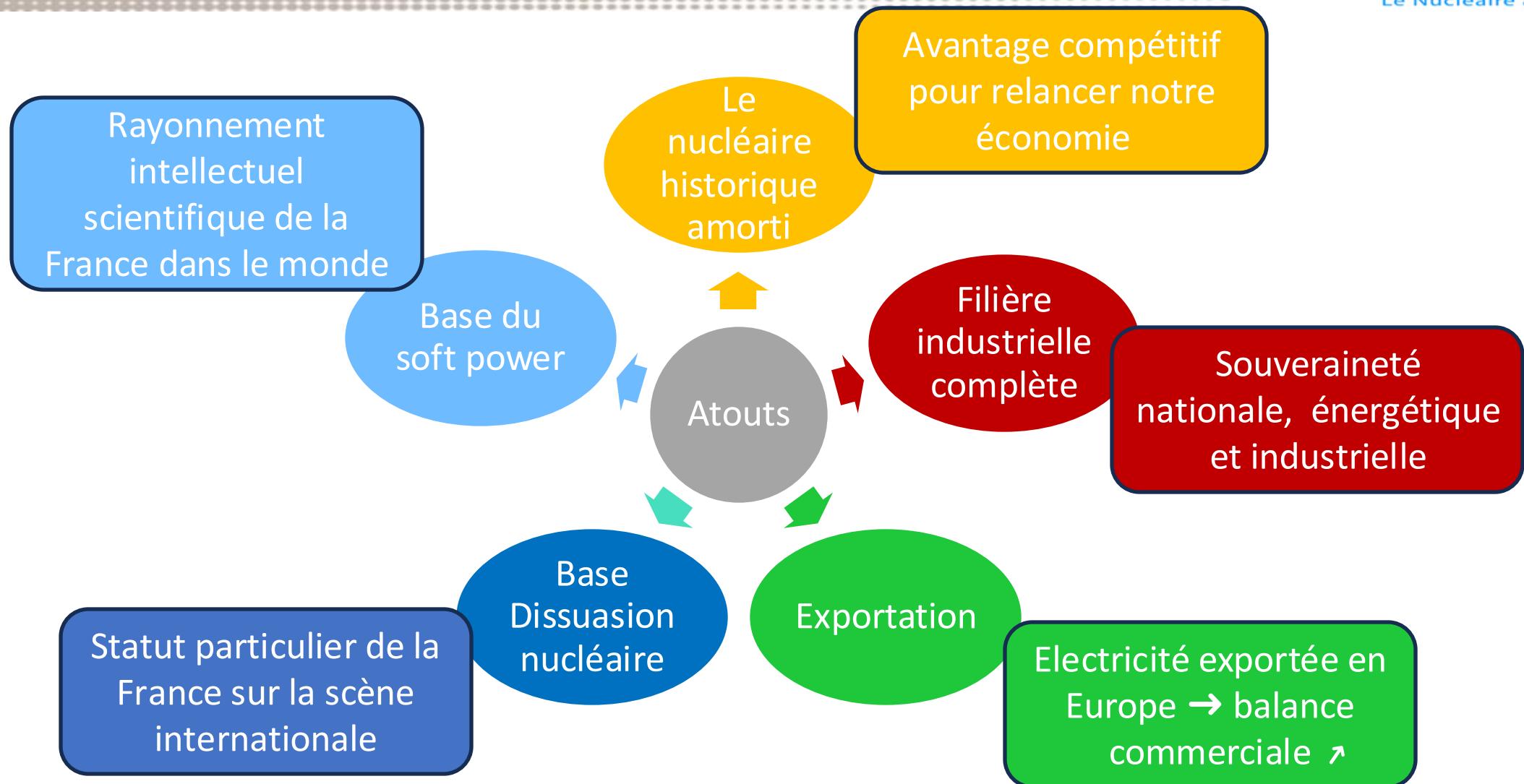
**Nous sommes tous en voie de développement!**

## □ La filière nucléaire aujourd'hui

# Filière industrielle duale



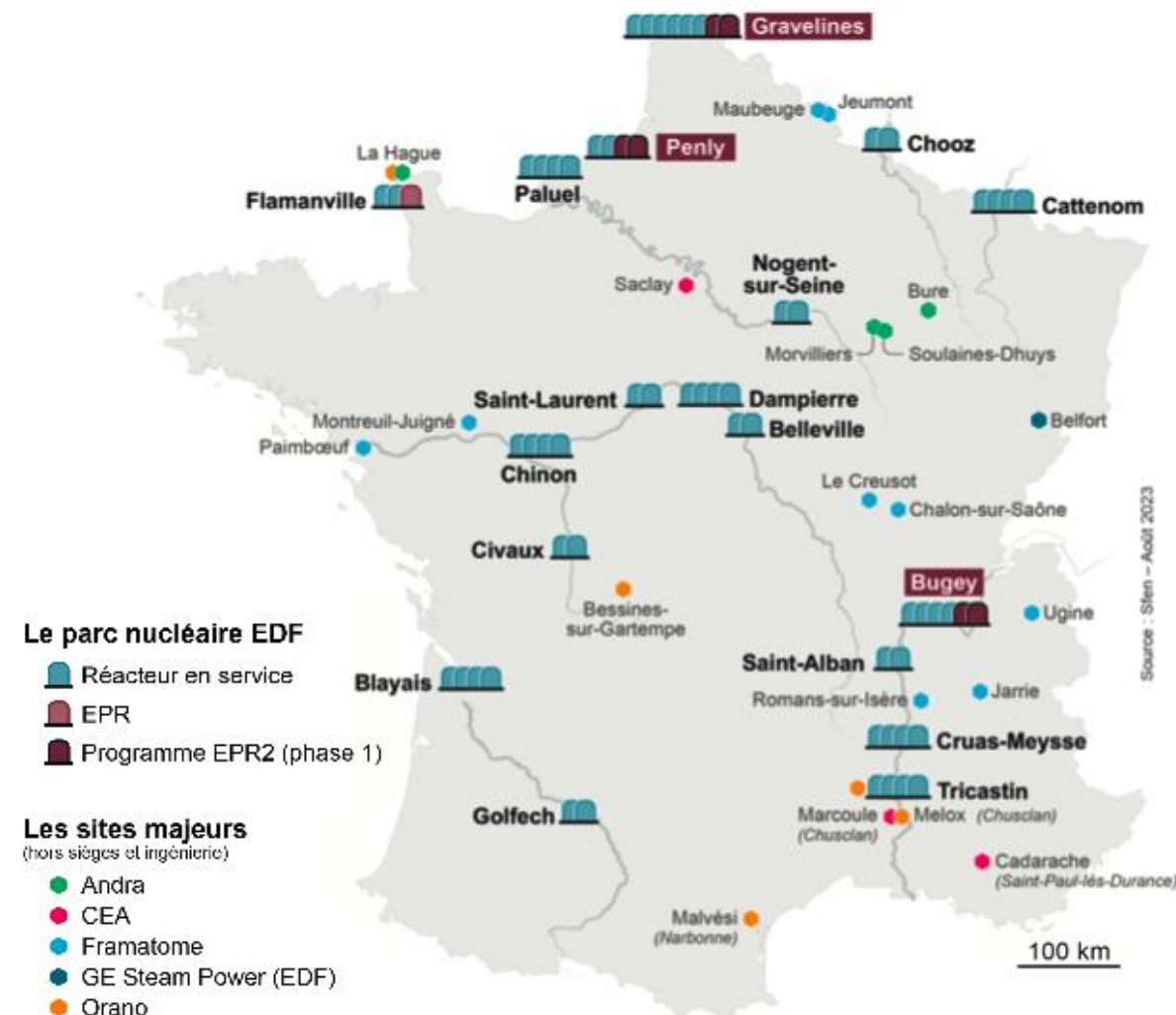
# Les atouts politiques de l'énergie nucléaire



# Au-delà d'une histoire commune, un partage quasi complet



# Le parc français: un héritage



- ❑ 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.

- ❑ 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)

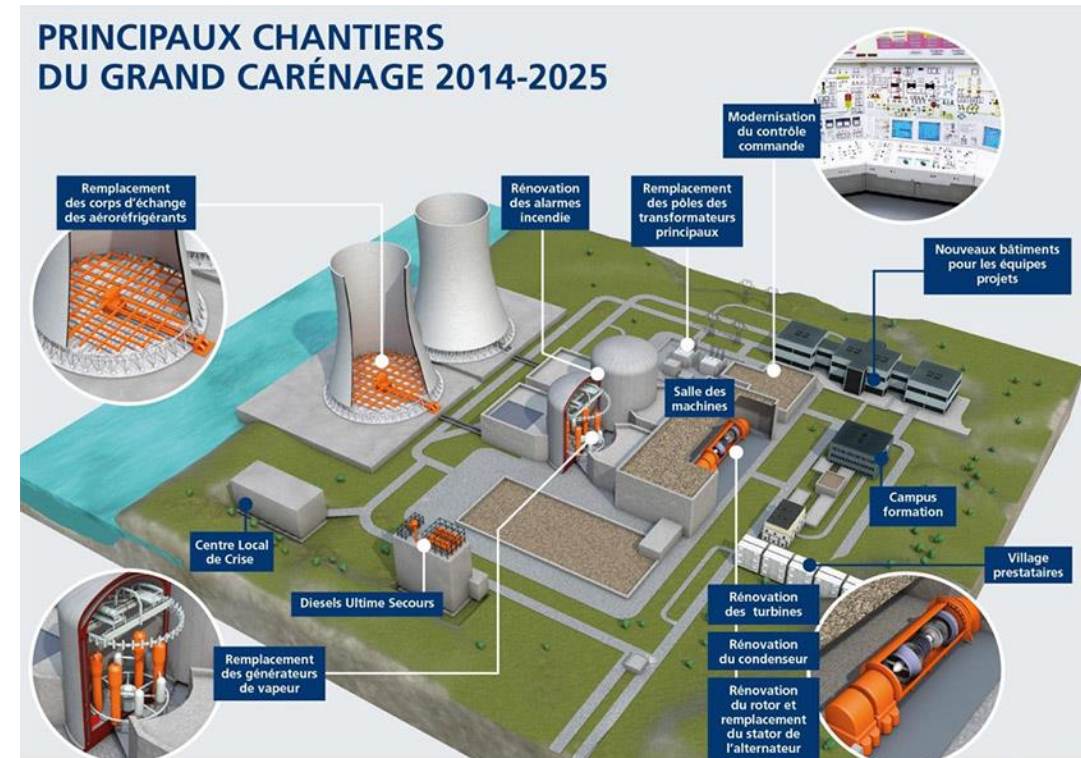
# Exploitation à long terme des parcs existants

## ❑ 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.

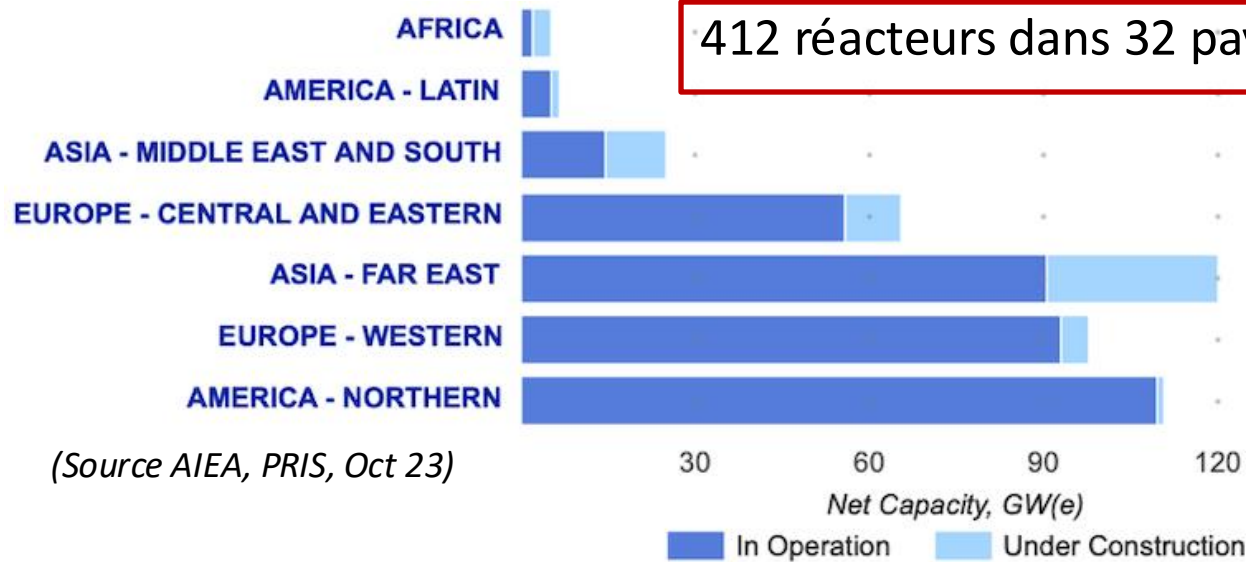
## ❑ Arrêt sur le grand carénage: programme industriel de renforcement et des installations initié en 2008.

- **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)

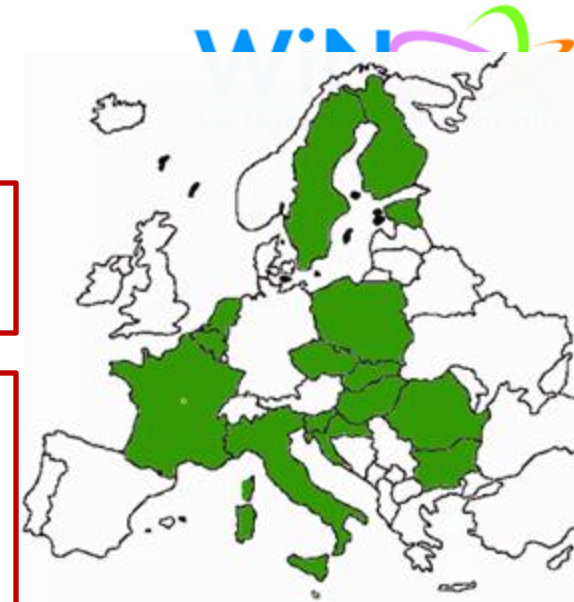
# Nouveaux programmes de construction



412 réacteurs dans 32 pays

Alliance du Nucléaire  
(16 pays européens)

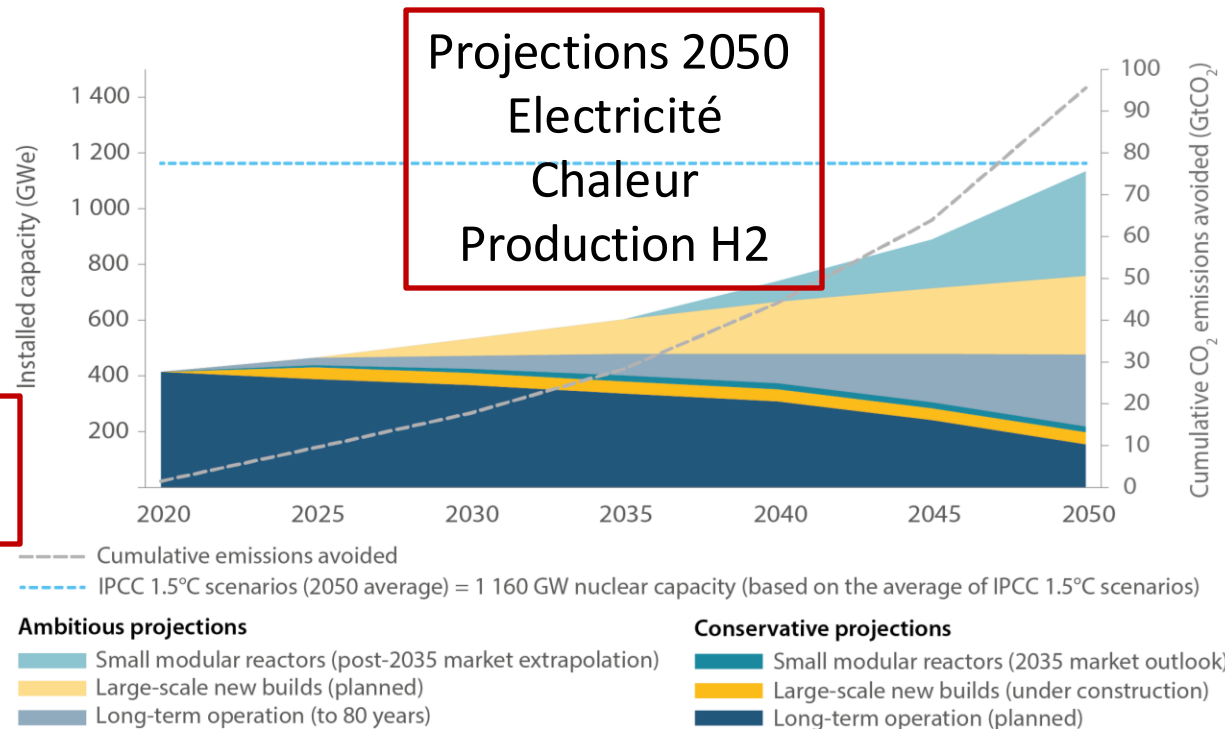
**Pays intéressés :** France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie Suède.



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.

# Potentiel de l'énergie nucléaire



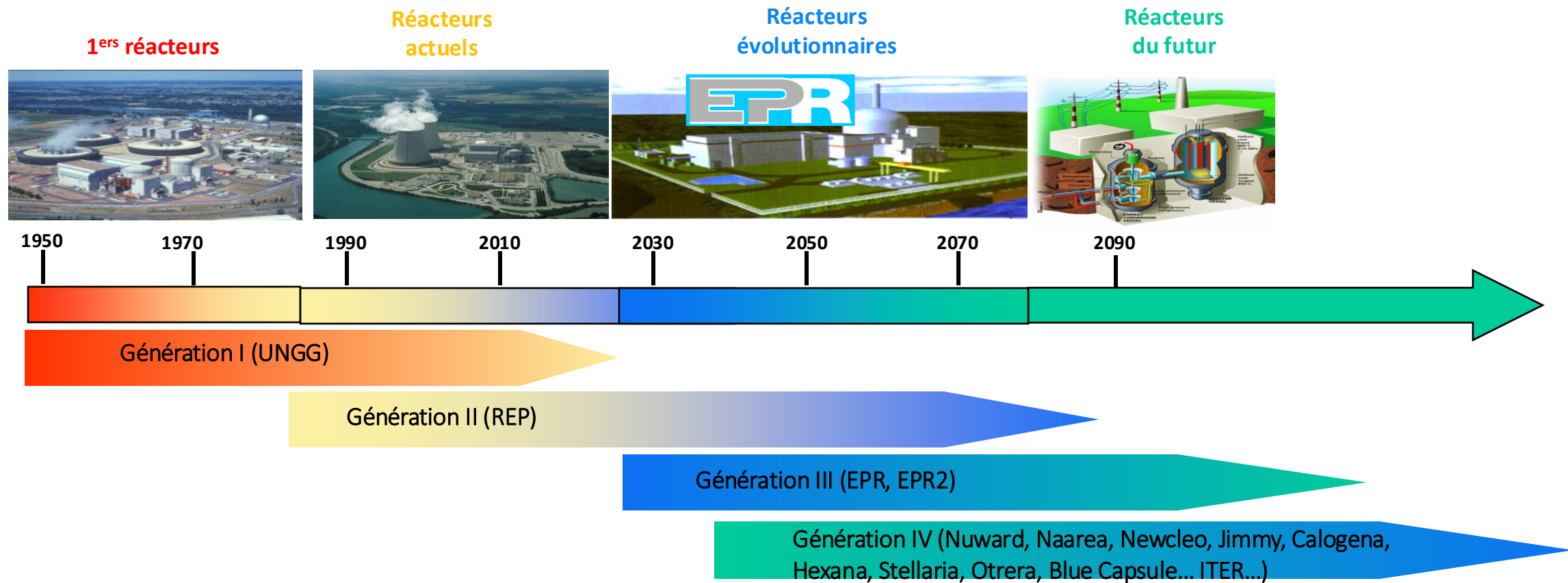
(Source OCDE/NEA 2021)

## Points de vigilance :

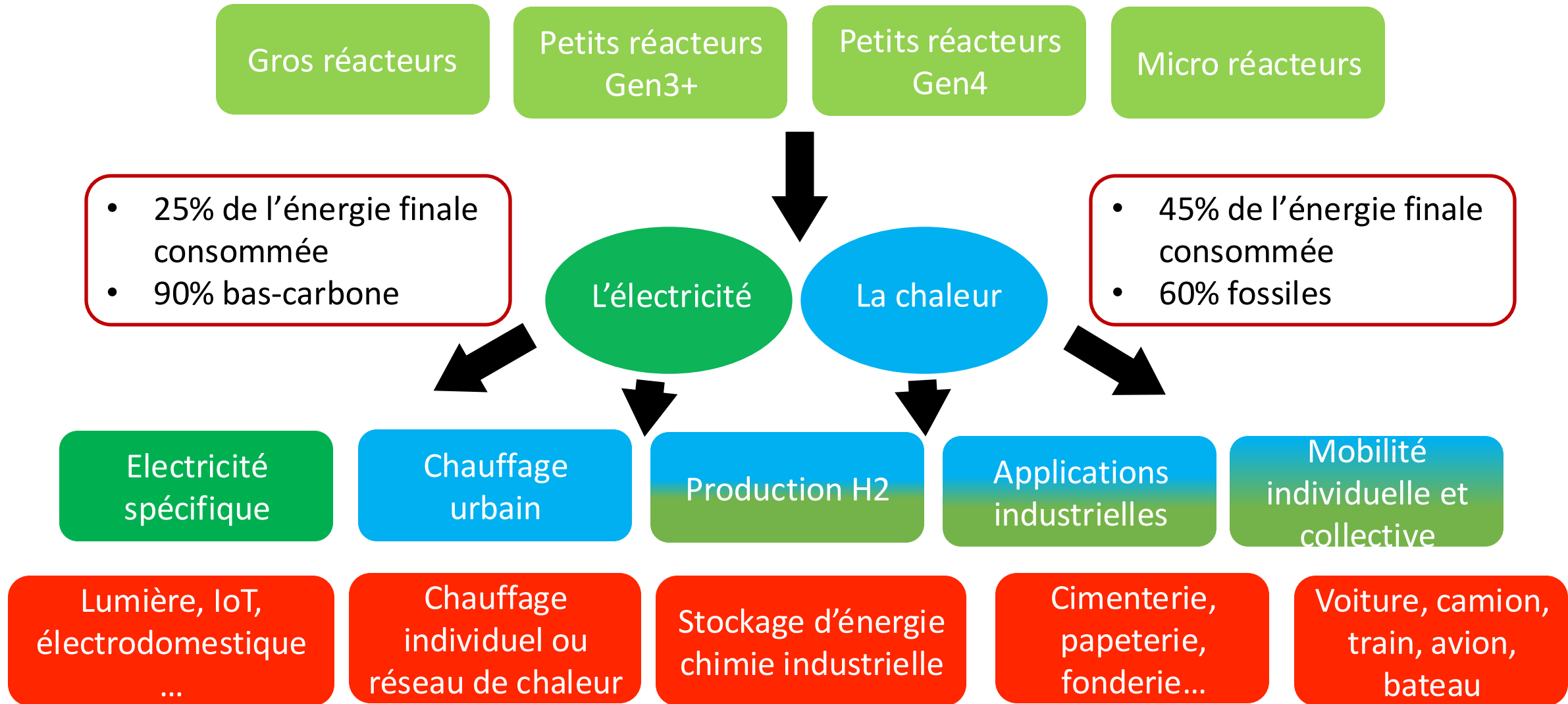
- Vision politique de long terme et décisions pérennes pour le système industriel complet,
- Transparence et responsabilité des exploitants,
- Démontrer la capacité à construire et déployer les innovations rapidement,
- Rôle fort de l'Etat dans la formation, l'information et la financement.

## □ L'énergie nucléaire dans le futur

# Les différentes générations de réacteurs



# A quoi peut répondre l'énergie nucléaire?



# 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 ...

# 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

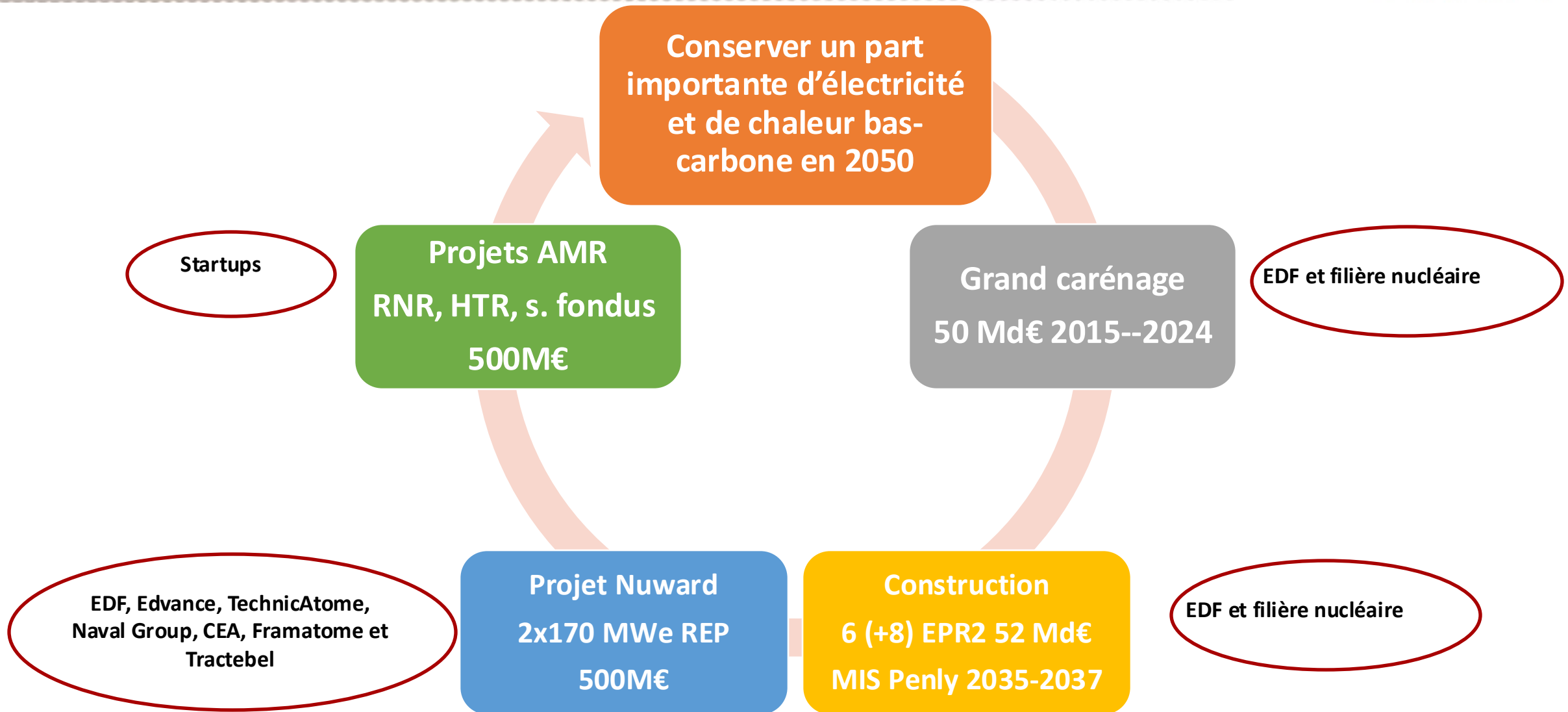
→  
~300°C

→  
~550°C

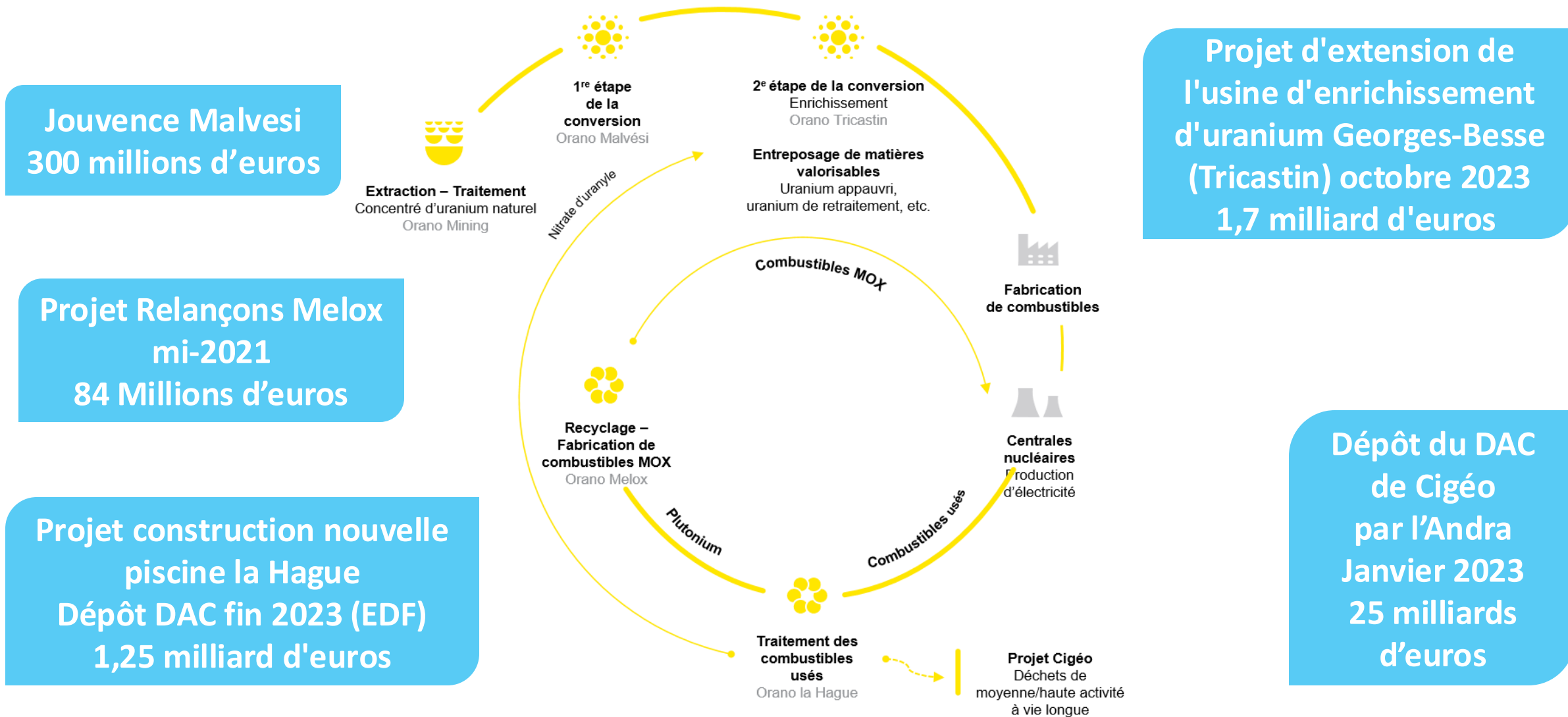
→  
~650°C

→  
~1000°C

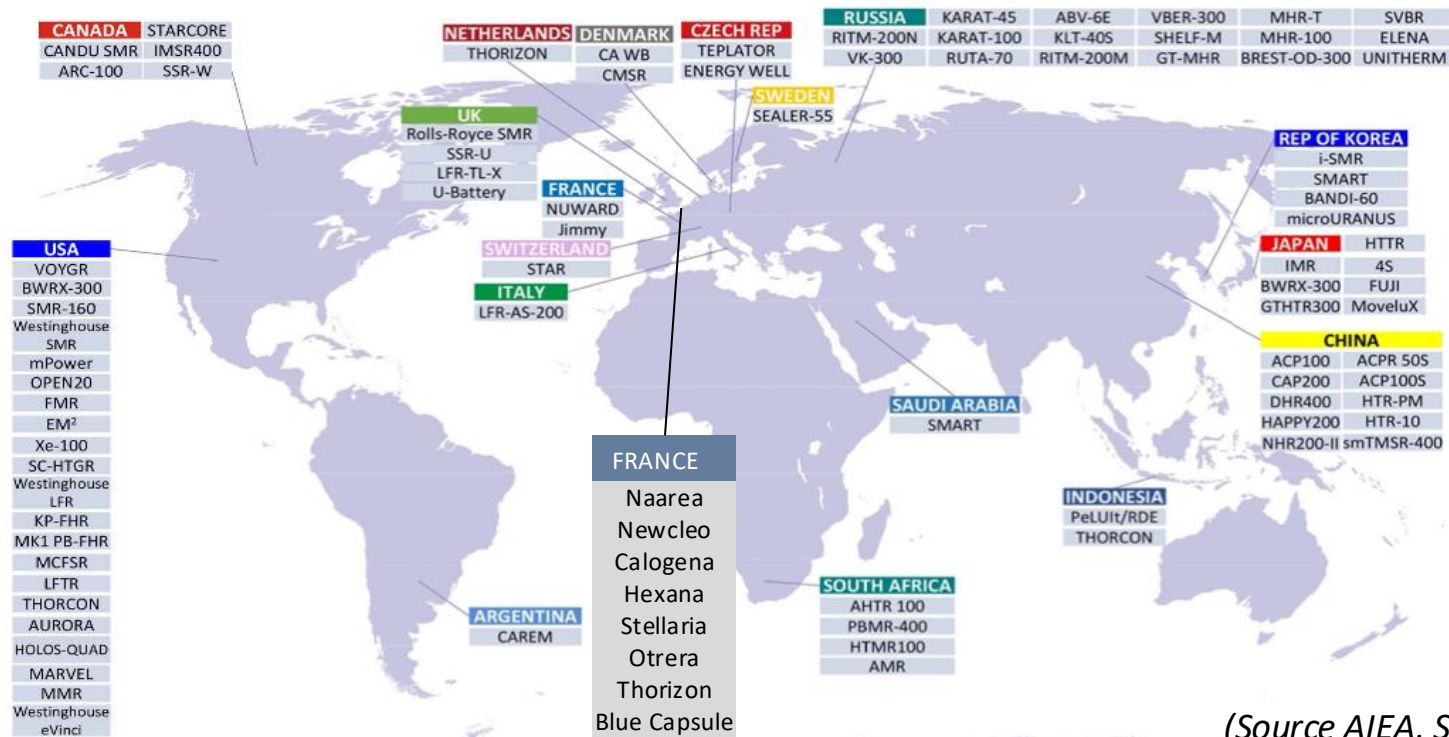
# Les 4 grands projets de réacteurs en France



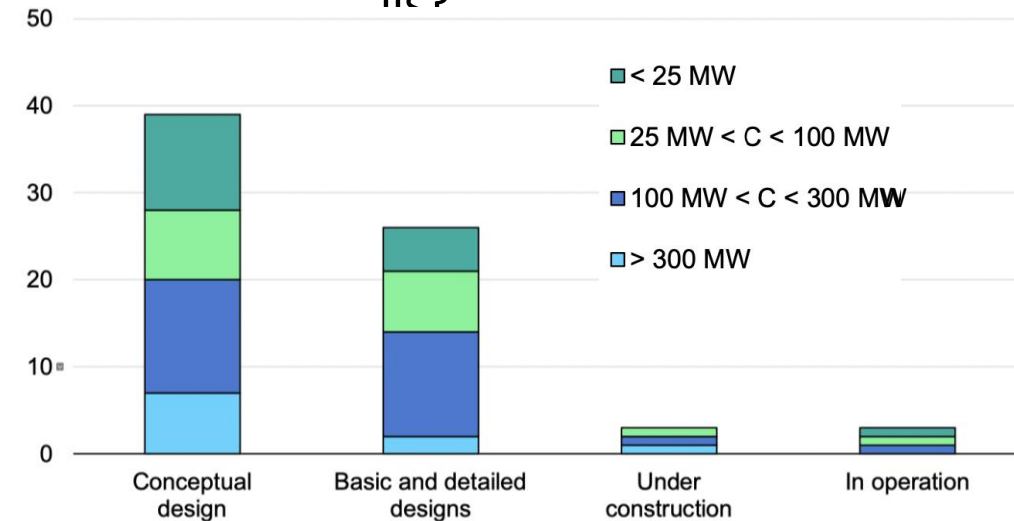
# Les grands projets du cycle



# 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

# A quoi doit répondre un réacteur du futur?

Flexible et pilotable  
(suivi de charges)

S'intégrer dans  
un MIX  
électrique

Electrifier les usages  
Défossiliser la chaleur

Remplacer les  
énergies fossiles



Accepter par les  
populations

Construction en  
grand nombre

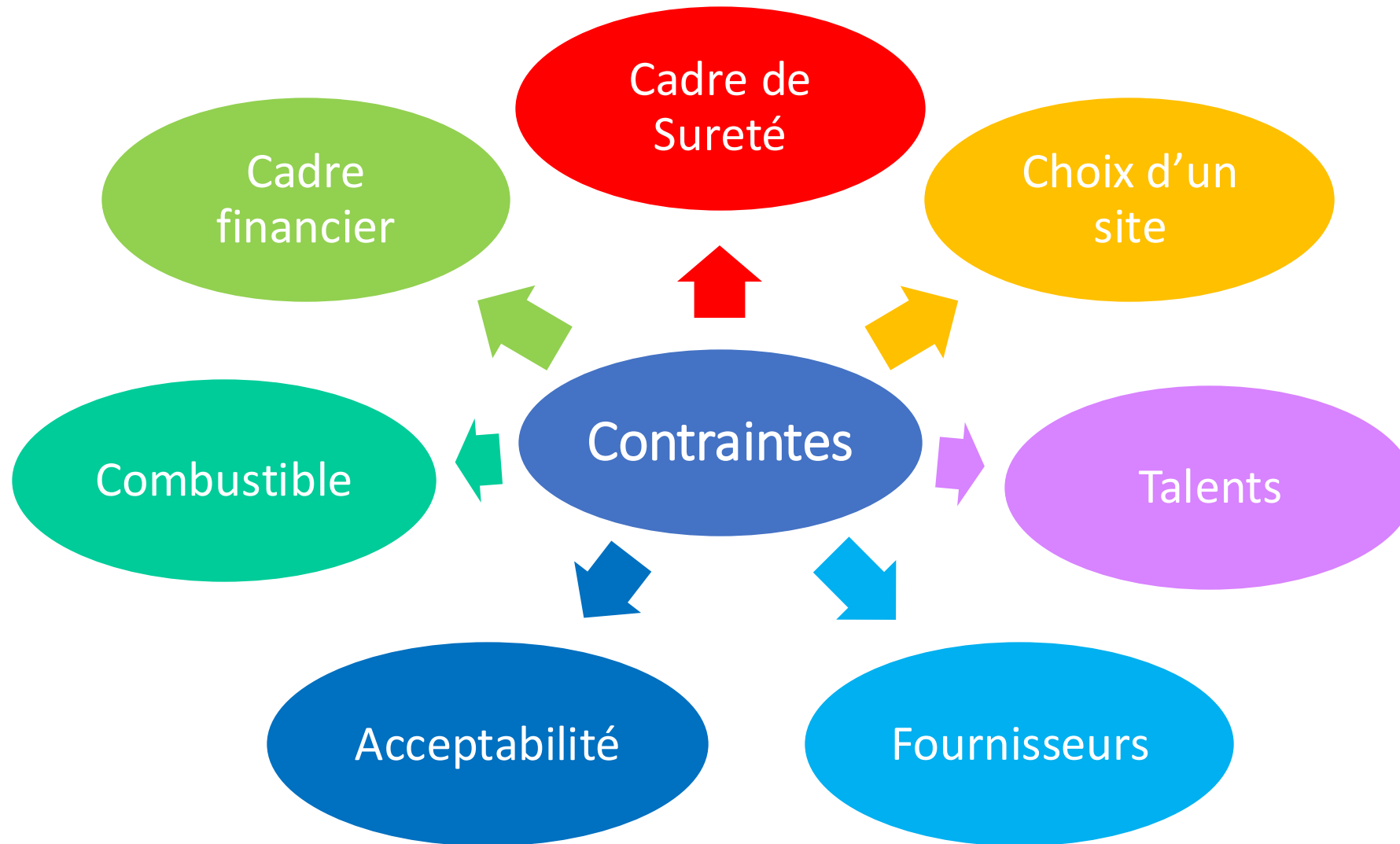
Toujours sûrs  
(attention au FOH)  
Non proliférants

Réduire les déchets

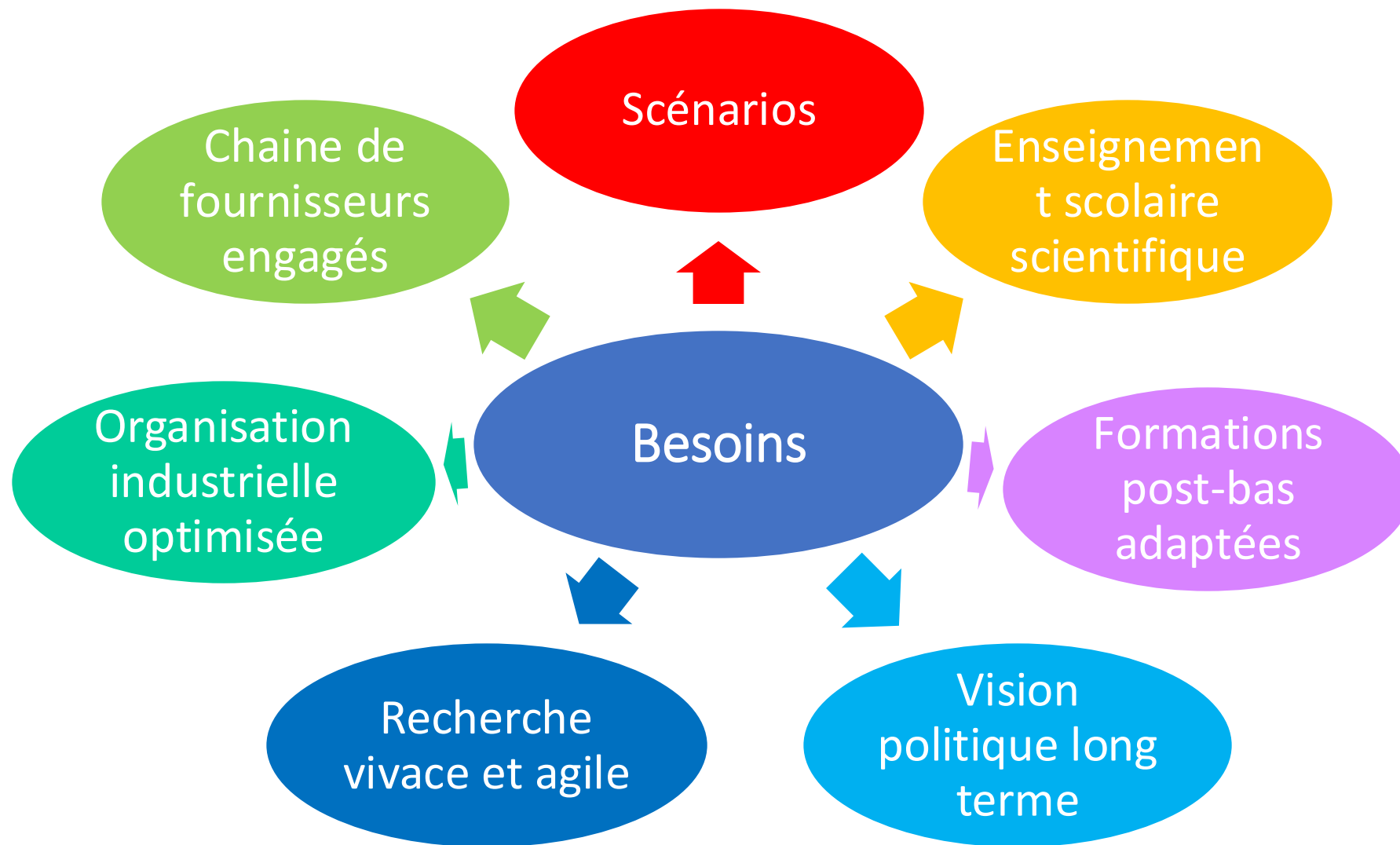
Economie de combustible  
Besoin de peu de matières  
premières

Cout abordable

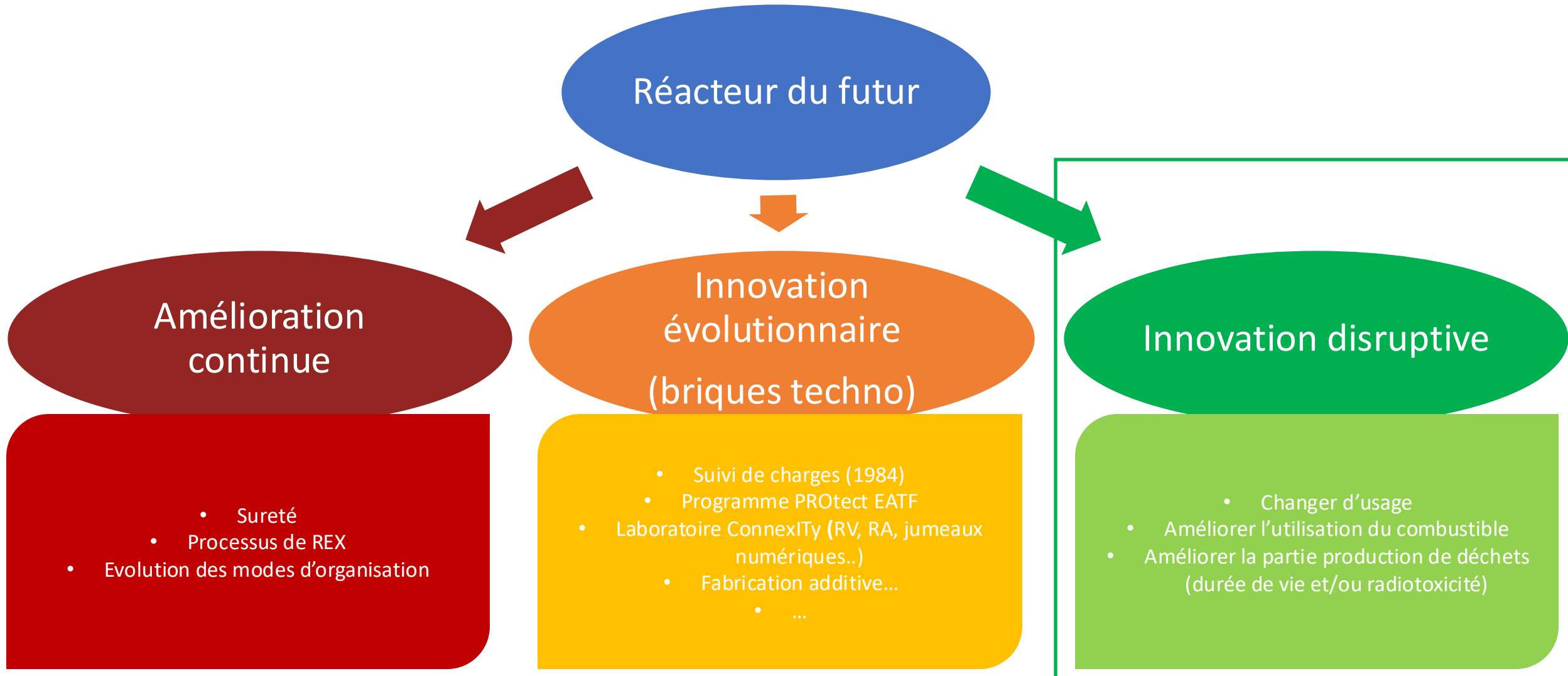
# Conditions de succès



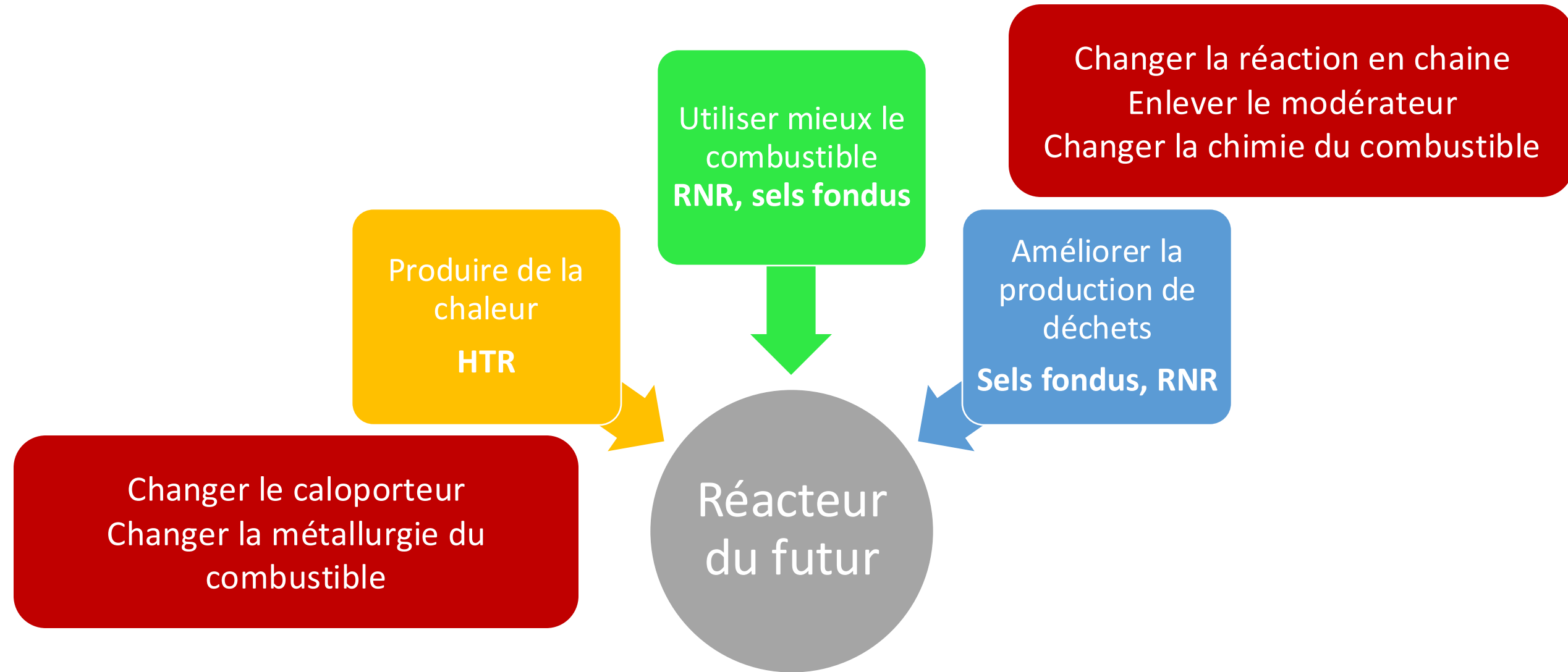
# Conditions de succès



# Les processus d'innovation dans le nucléaire

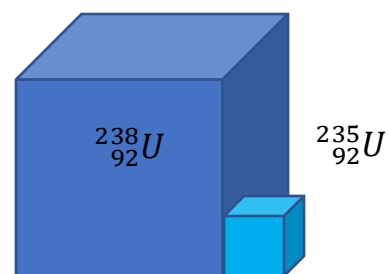


# Innovation dans les réacteurs nucléaires



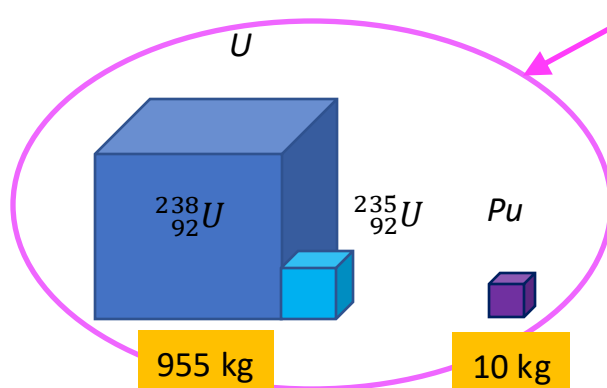
# Le combustible

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

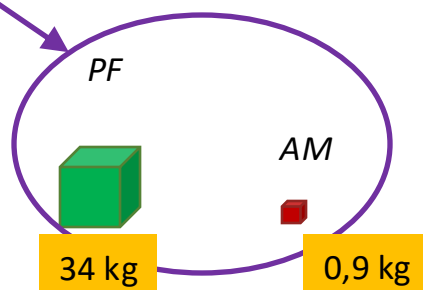


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes



Après passage en cœur :

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

# Le nucléaire durable

Noyaux fissiles

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

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

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

Noyaux naturels

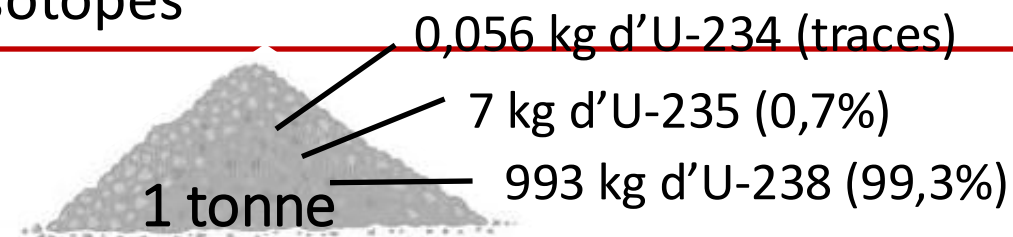
Noyaux artificiels

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

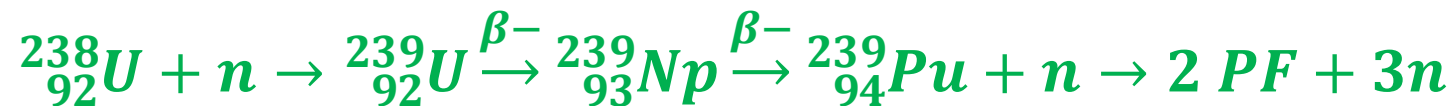
$^{232}_{90}\text{Th}$

Noyaux fertiles

Composition uranium naturel : 3 isotopes



réaction de fission des REL



réaction de fission des RNR

# Evolution des technologies de fission

Parc REP



Amélioration  
continue

Technologie  
maîtrisée

Verrous  
scientifiques,  
technologiques  
ou industriels

EPR, EPR2



# La filière nucléaire : ses besoins et ses métiers

# L'industrie nucléaire: une industrie du temps long

R&D et études



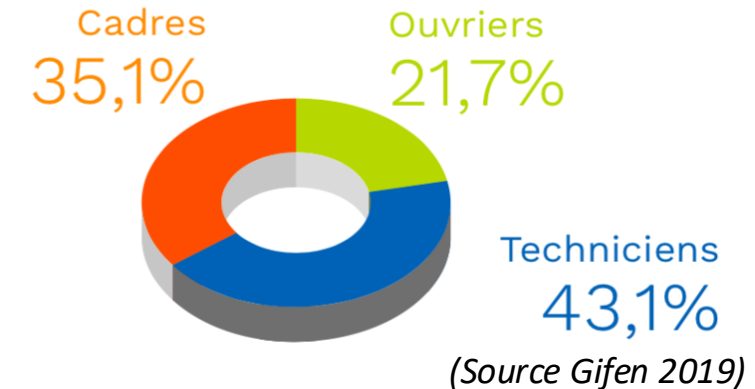
~20 ans

Fabrication et construction

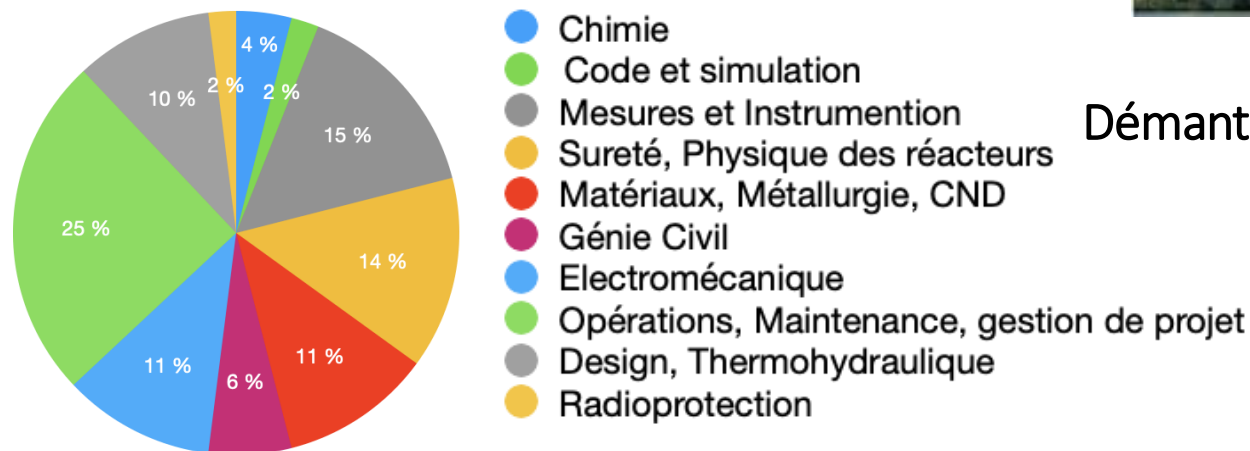


**Plus de 100 métiers techniques à haute valeur ajoutée**

Métiers hautement qualifiés



Pluridisciplinarité des compétences



Exploitation et maintenance



Démantèlement

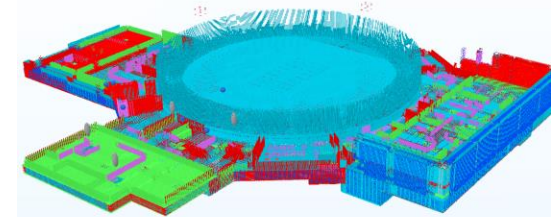


~ 30 ans

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.

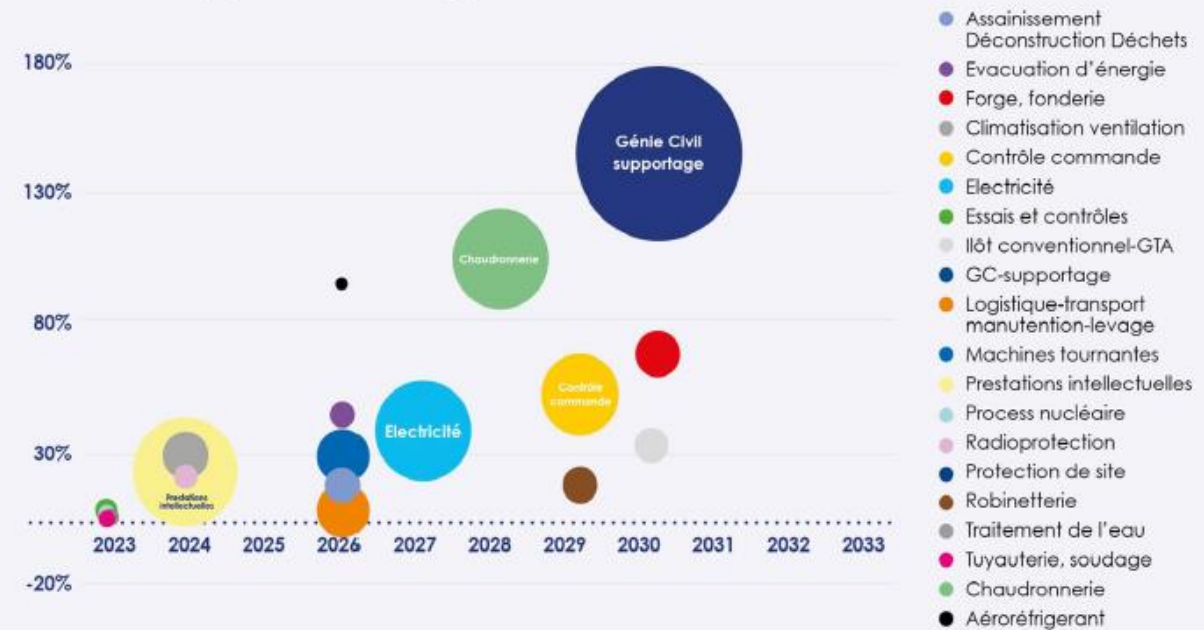


# Les métiers en tension et besoins futurs

automaticien, bobinier, chaudronnier, chef de projet,  
 conducteur de travaux,  
 personnel certifié pour les contrôles non destructifs  
 (END- CND),  
 dessinateur- projeteur, électricien, fondeur, forgeron,  
 ingénieur études conception électricité,  
 ingénieur études conception mécanique,  
 soudeur, projeteur génie-civil/projeteur BIM,  
 technicien maintenance, technicien radioprotection,  
 tuyauteur, ingénieur procédés/ingénieur installation  
 générale,  
 monteur, coffreur-bancheur.

Vision d'ensemble de l'évolution des segments

Evaluation de l'écart (%) du volume d'ETP supplémentaires



(Source Rapport MATCH, GIFEN)

➔ 100 000 recrutements sur 10 ans dans tous les métiers et à tout niveau de qualification

# Quels métiers?



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

Transport-logistique, inspection, Maintenance, mesures nucléaires

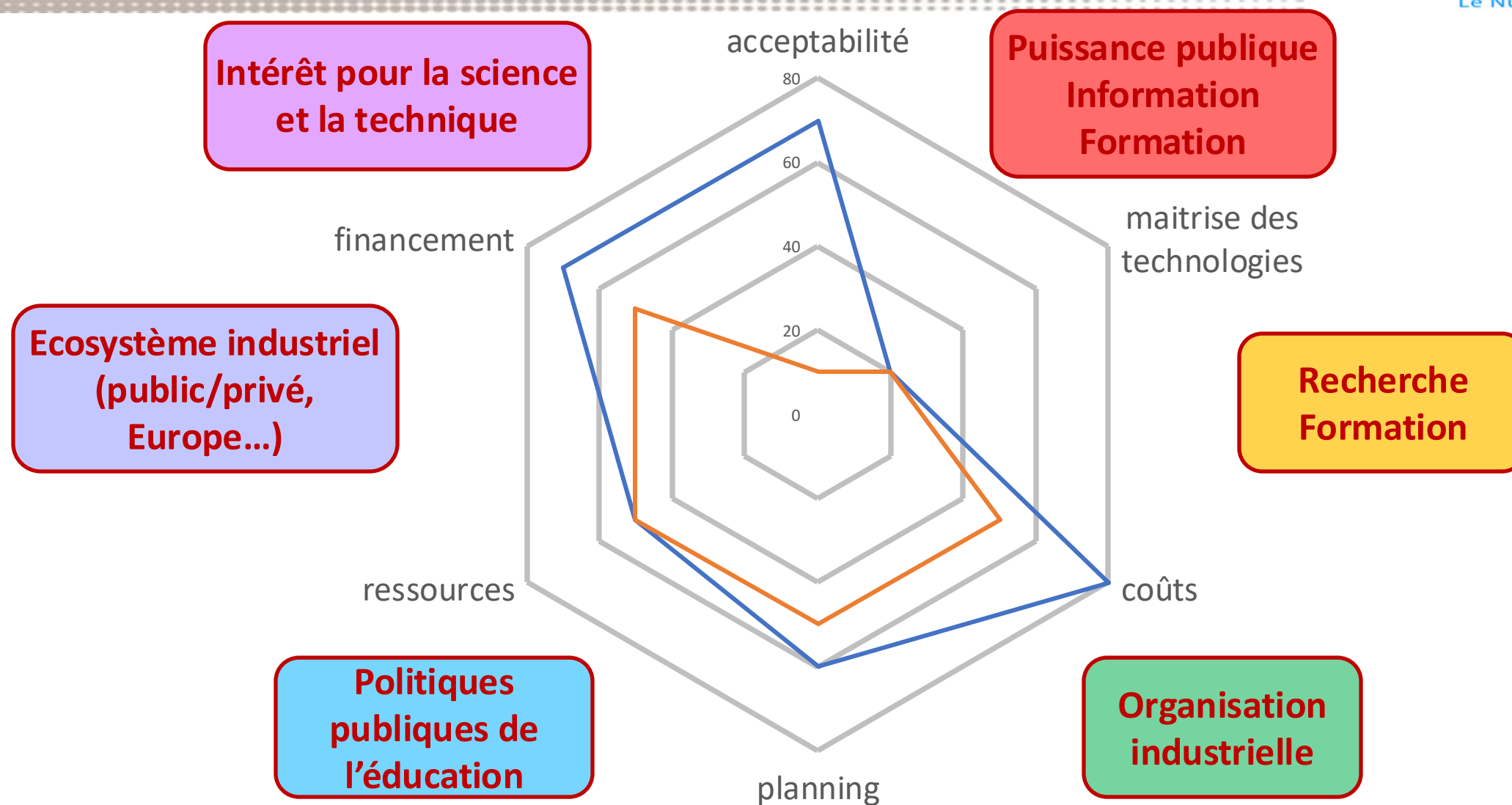
Fabrication, CND, essais et mise en service

Manutention, Levage, déchets

Spécialités nucléaires (neutronique, thermohydraulique)

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

# Vers une nouvelle organisation étatico-industrielle...



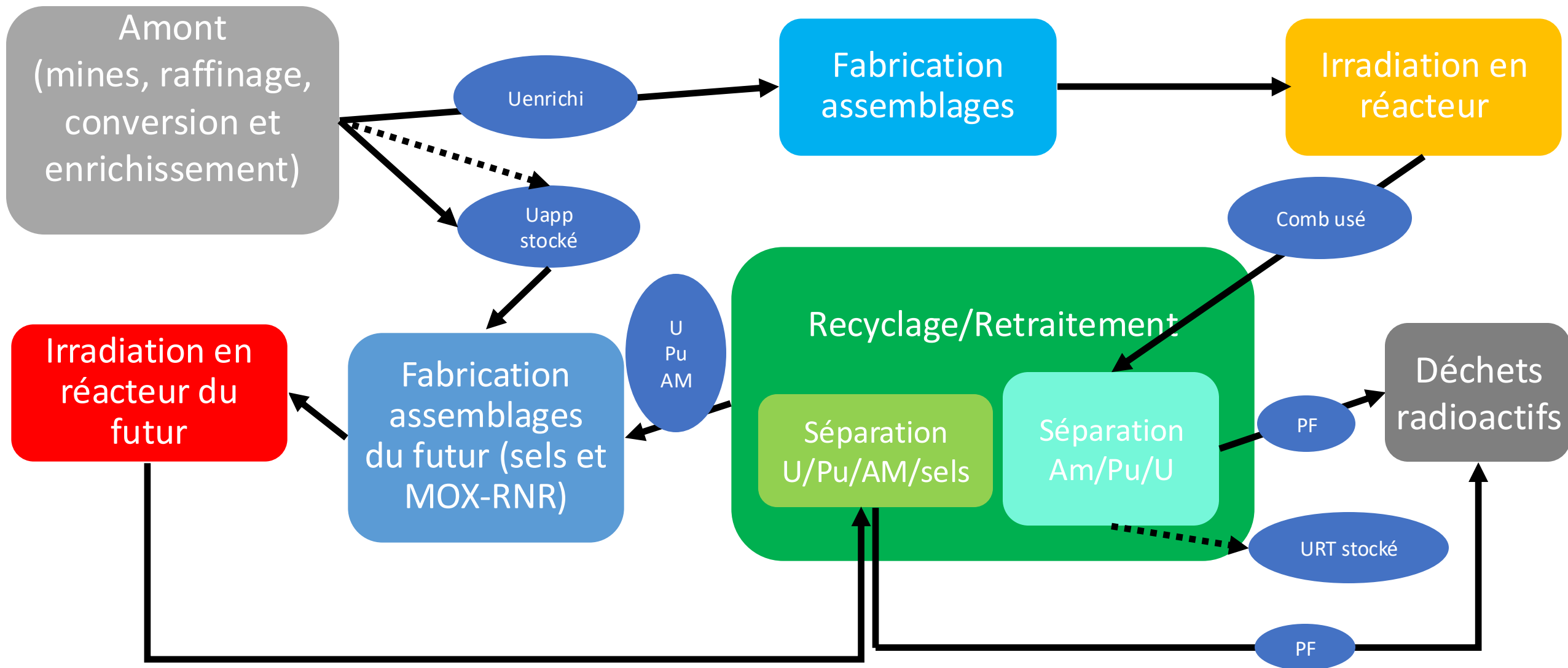
**La réussite du renouveau du nucléaire en France et en Europe  
est possible, malgré les immenses défis.  
Mais rien ne pourra être fait sans des femmes et des hommes  
bien informés et bien formés.**

**Merci pour votre attention.**

le cnam



# Cycle du combustible pour le futur



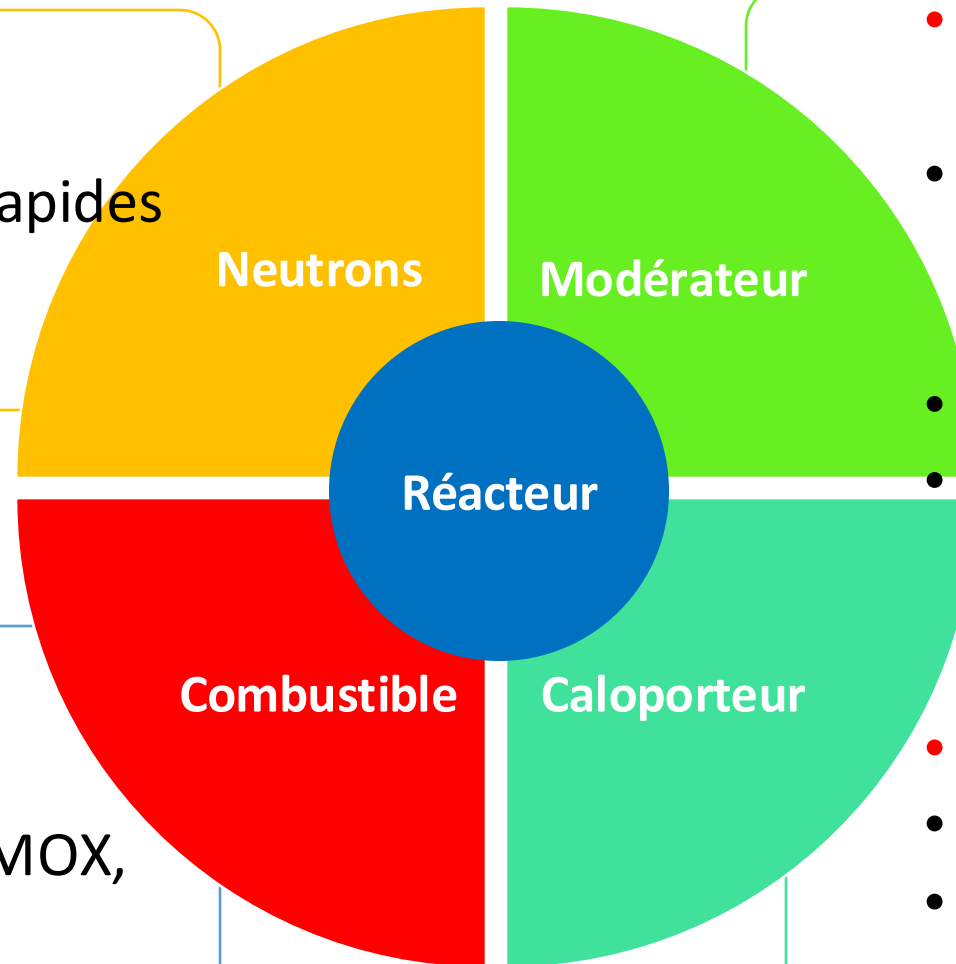
# Les multiples filières de réacteurs

- **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

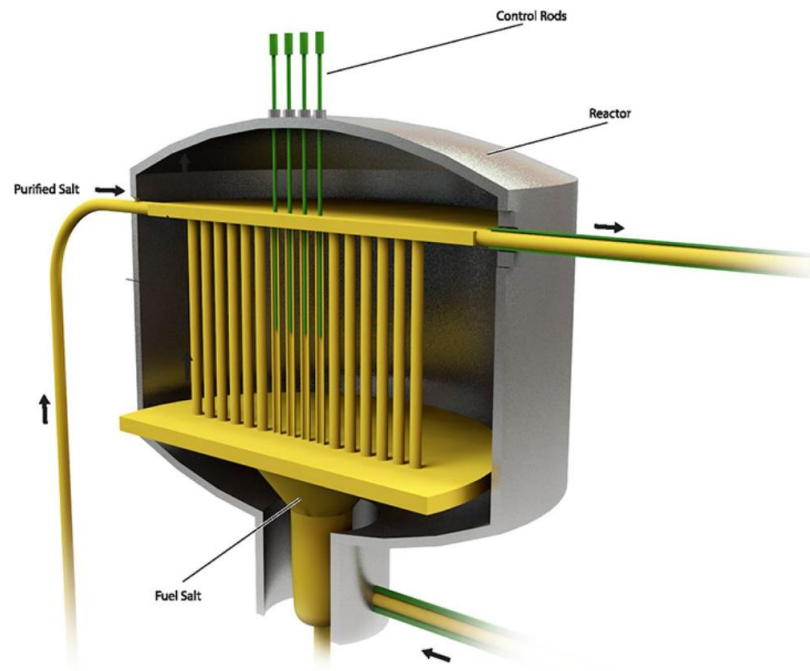


- **Peu d'absorptions des neutrons**
- Bon ralentissement des neutrons: Noyaux légers (H, D, Be, C,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,...)
- Transparent
- Non dangereux

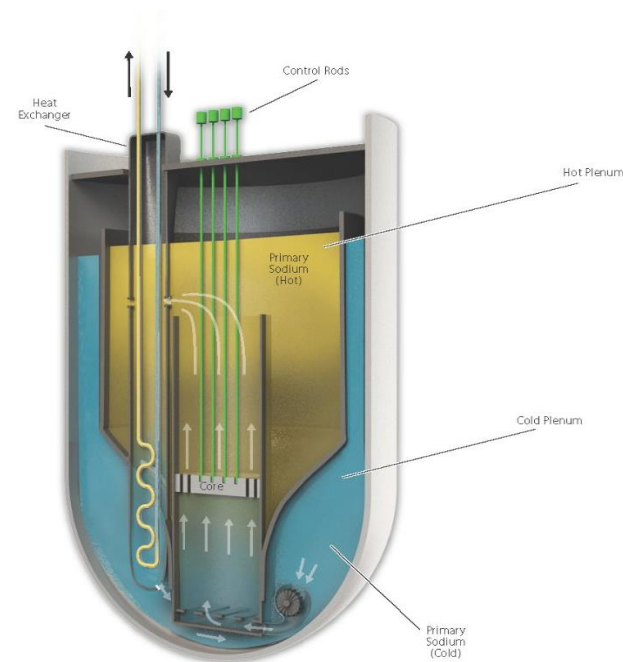
- **Bonne capacité à transporter**
- Liquide (Eau, eau lourde)
- Gaz (hélium,  $\text{CO}_2$ )
- Sels liquide fluorure
- Métal liquide (sodium, plomb...)

L'énergie nucléaire

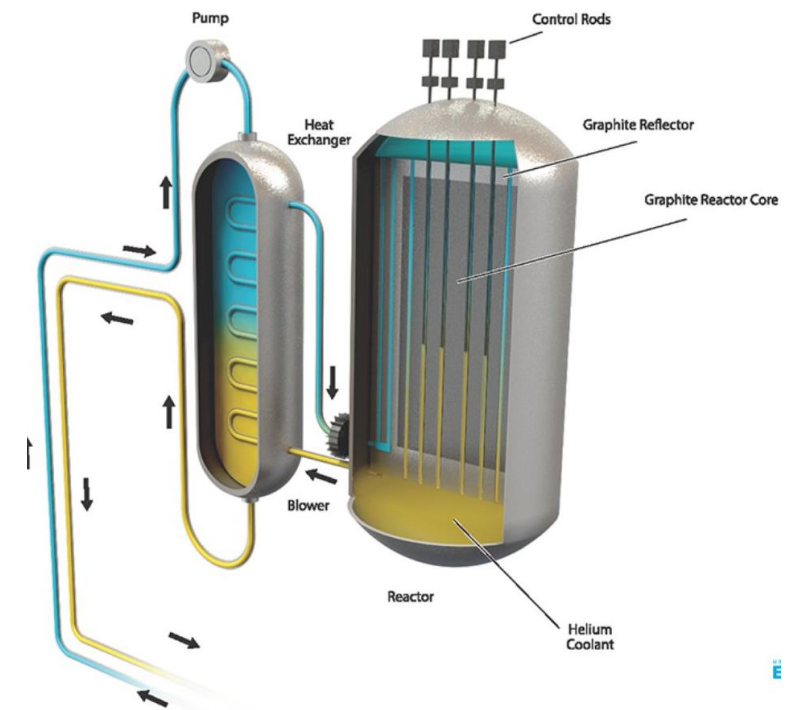
# Les concepts disruptifs



Réacteurs à sels fondus

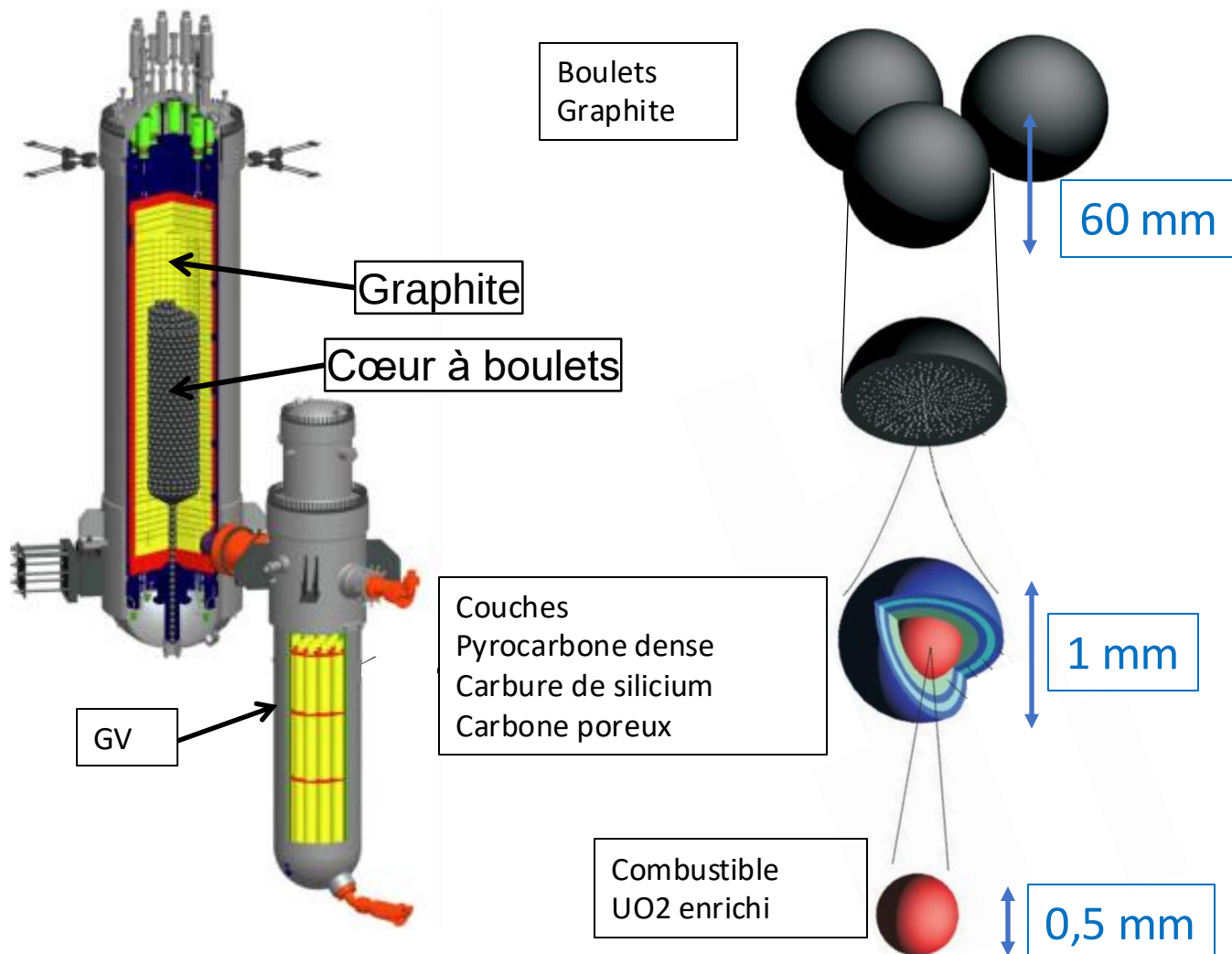


Réacteurs à neutrons rapides



Réacteurs à haute température

# Réacteur à haute température



- ☐ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ☐ 1<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  $600^{\circ}\text{C}$ .
- ☐ 1/3 des concepts des start-up sont des HTR.
- ☐ La Chine a mis en service un HTR (2 réacteurs,  $P=200\text{ MWe}$ ) le 20/12/21 à Shidao Bay.
- ☐ Start-up en France : Jimmy, Blue Capsule

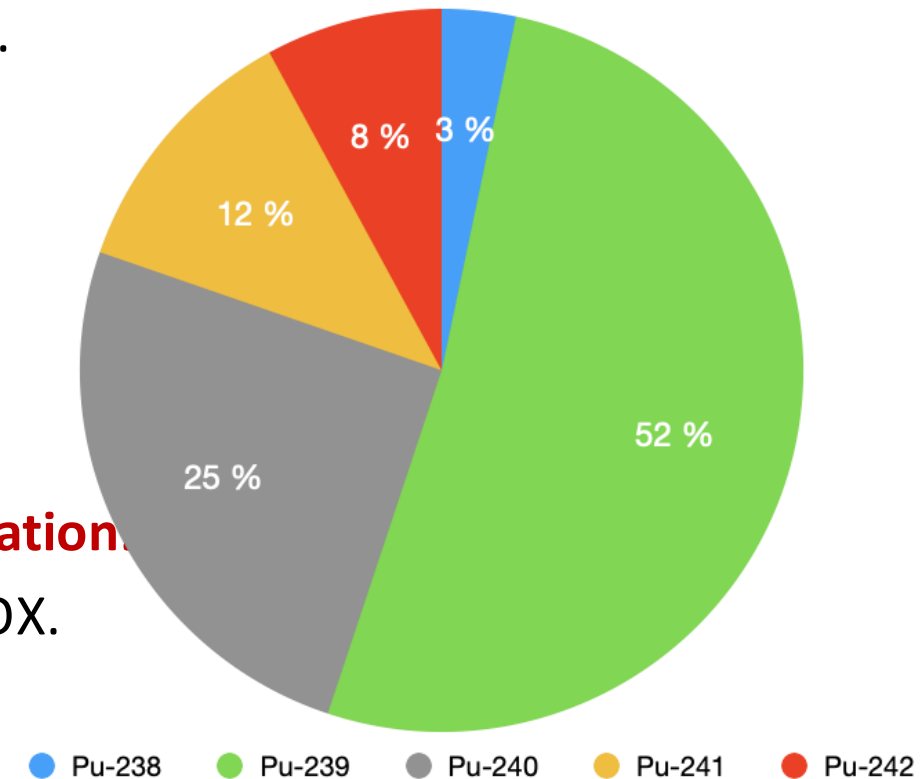
(Source Z. Zhang et al. / Engineering 2 (2016))

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

# Le cas du plutonium

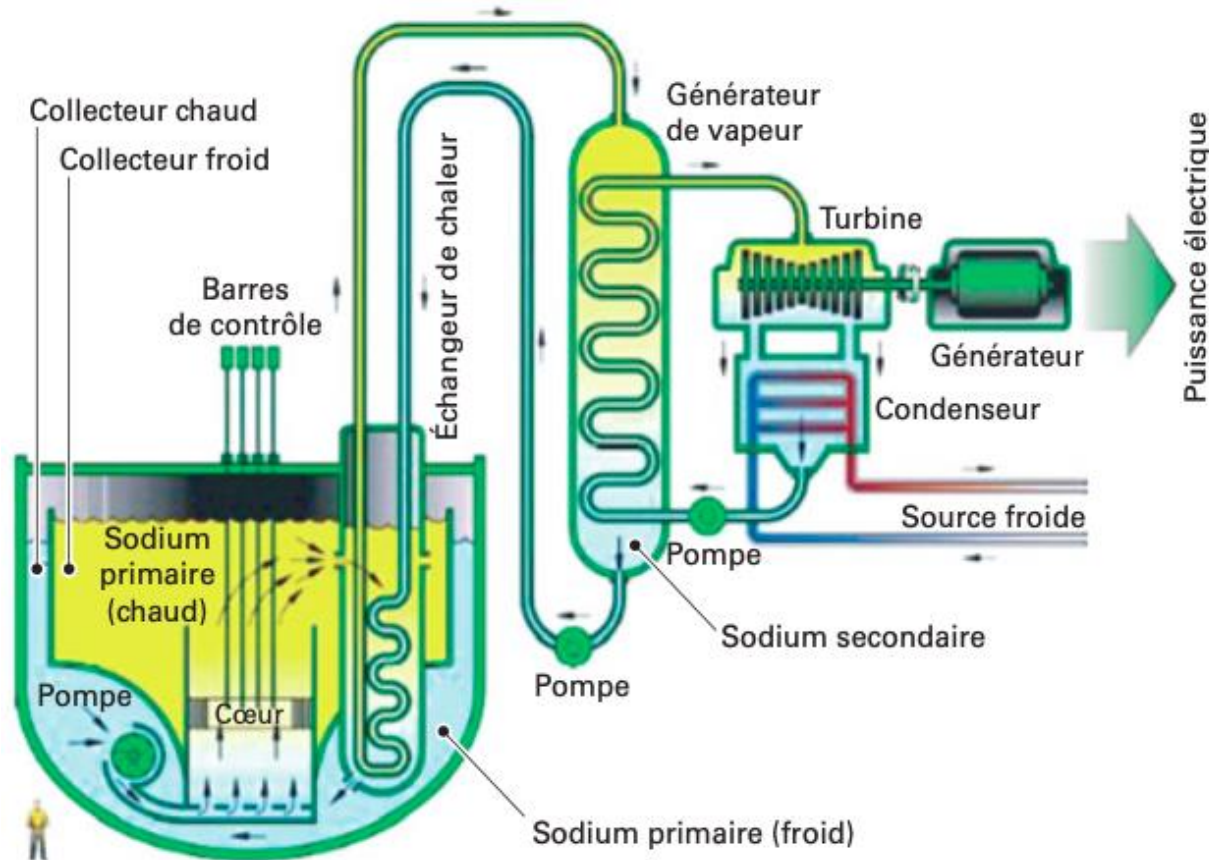
- ❑ Environ 10 kg de plutonium dans 1t de combustible utilisé.
- ❑ Dégradation de la qualité du plutonium sous irradiation en cœur.
- ❑ Fission favorisée que pour Pu-239 et Pu-241 en n thermiques.
- ❑ Les isotopes pairs du plutonium absorbent les neutrons.  
→ **problème pour stabilité de la réaction 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)

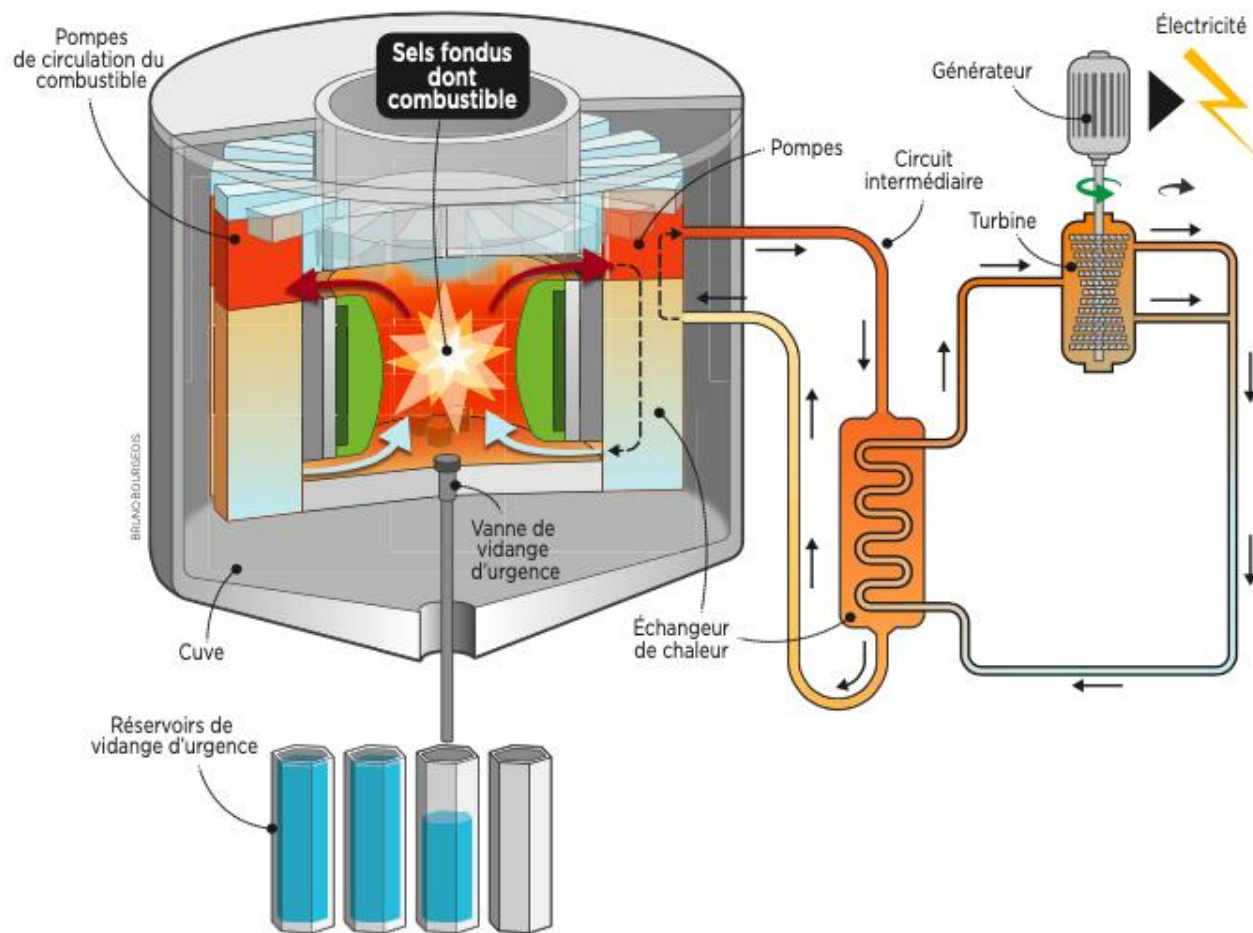
# Réacteur à neutrons rapides



(Source Techniques de l'ingénieur, dossier BN3230)

- ❑ Combustible : mélange  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$  (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: coût élevé + sûreté liée au sodium
- ❑ Start-up en France : Newcleo (avec du plomb liquide), Hexana et Otrera (avec du Na liquide).

# Réacteurs à Sels fondus



(Source sciences et avenir la Recherche mars 2022)

- ☐ Le combustible est liquide et non plus solide dissous dans un sel.
- ☐ Sel fluorure ou chlorure.
- ☐ Le sel est le caloporteur et joue le rôle de barrière de confinement.
- ☐ 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  $P_{res}$ )
- ☐ Il faut un prototype construit.
- ☐ Deux start-up en France avec des sels chlorures 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

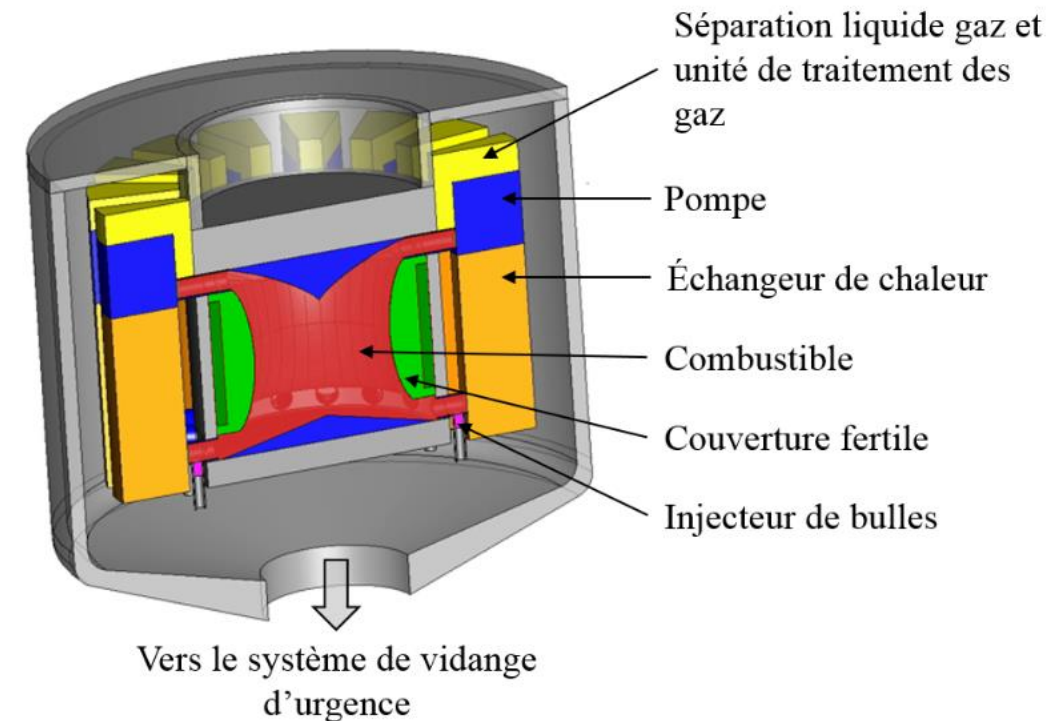
□ Avantages : Répond à une préoccupation de l'opinion sur la gestion des déchets et de matières radioactives :

- 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.

circuit combustible du MSFR



(Source Thèse de Doctorat, Delphine Gerardin, 2018)

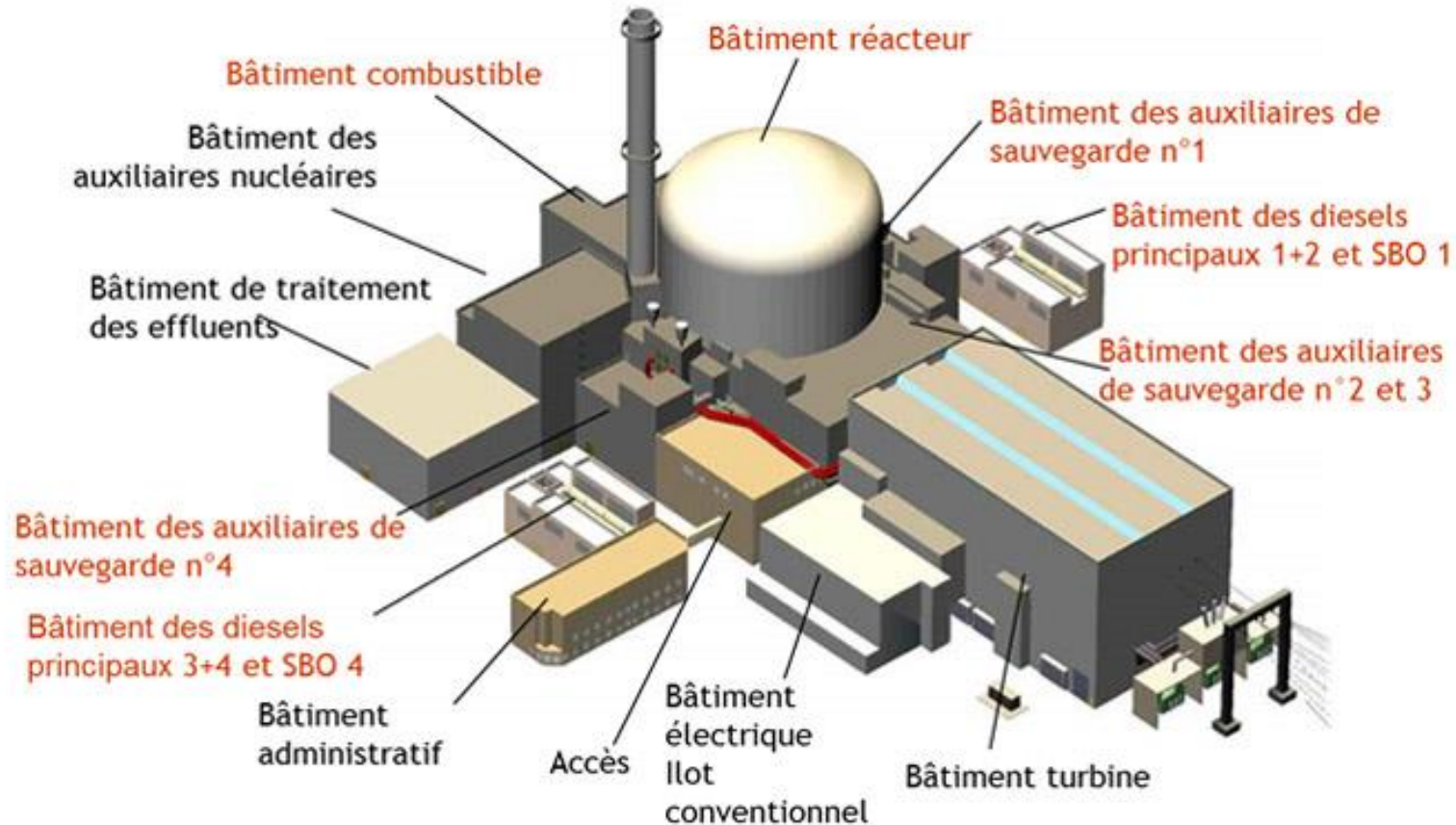
# La génération 3: EPR

- ❑ Projet franco-allemand débuté en 1989.
- ❑ Concept évolutionnaire p/p aux REP français et Konvoi allemand.
- ❑ Puissance = 1650 MWe.
- ❑ Rendement énergétique = 36 % .
- ❑ Une utilisation possible par conception de différents types de combustible (UOX ou MOX à 30%).
- ❑ Longueur du cycle en cœur: 12 à 24 mois.
- ❑ Une durée de vie technique de 60 ans.
- ❑ Des charges d'exploitation réduites (fonctionnement à 91% de disponibilité).
- ❑ Suivi de charge intégré dès la conception: variation de puissance jusqu'à 5%/mn.



(Source EDF)

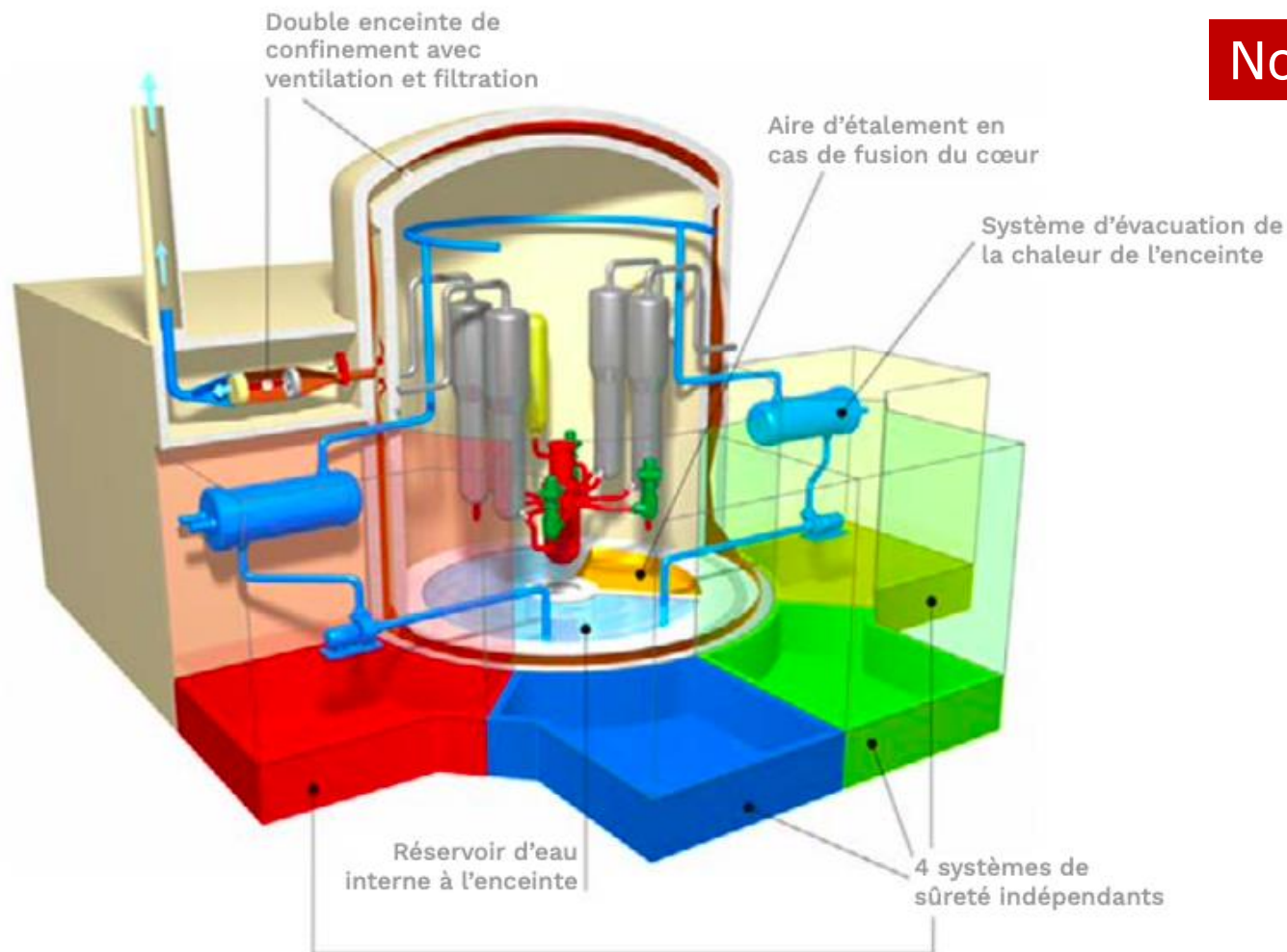
# Objectifs de sûreté EPR



(Source IRSN)

- ☐ Objectifs de sûreté parmi les plus élevés au monde.
- ☐ Réduction de la fréquence de fusion de cœur ( $< 10^{-5}$ ).
- ☐ Réduction des rejets radioactifs.
- ☐ Protection renforcée contre les agressions internes et externes.
- ☐ Réduction des doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs.
- ☐ Approche évolutionnaire par rapport au parc installé pour bénéficier des REX.

# Génération 3: EPR



(Source EDF)

## Nombreuses avancées en matière de sûreté

- ☐ Systèmes de sûreté : quatre voies indépendantes et géographiquement séparées.
- ☐ 4 groupes électrogènes principaux+ 2 groupes électrogènes de technologie différente.
- ☐ Réserve d'eau à l'intérieur du BR.
- ☐ Enceinte de confinement : BR, BK, 2 des 4 bâtiments abritant les systèmes de sauvegarde.
- ☐ Source froide : 4 voies identiques et séparées+ 2 voies diversifiées (technologie différente).
- ☐ Récupérateur de corium.
- ☐ Cuve sans pénétration fond de cuve.

# EPR : Perte d'alimentation électrique

❑ **Systèmes d'urgence redondants** : en cas de perte totale de l'alimentation électrique extérieure :

- **4 générateurs diesel d'urgence** installés dans des bâtiments protégés et distincts du bâtiment réacteur. (autonomie de 72 heures).
- **2 générateurs diesel d'ultime secours (DUS)**. (autonomie de 24 heures).
- **6 batteries pour l'alimentation du contrôle-commande et des équipements essentiels**. (4 batteries avec une autonomie de 2 heures chacune et 2 batteries « accidents graves » d'une autonomie de 24 heures chacune).

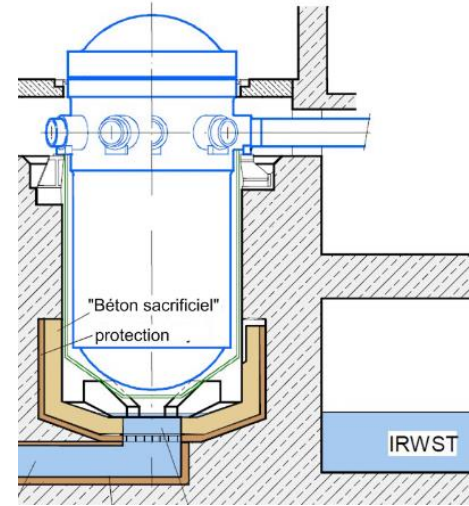
(Source EDF)



# EPR : Perte du refroidissement

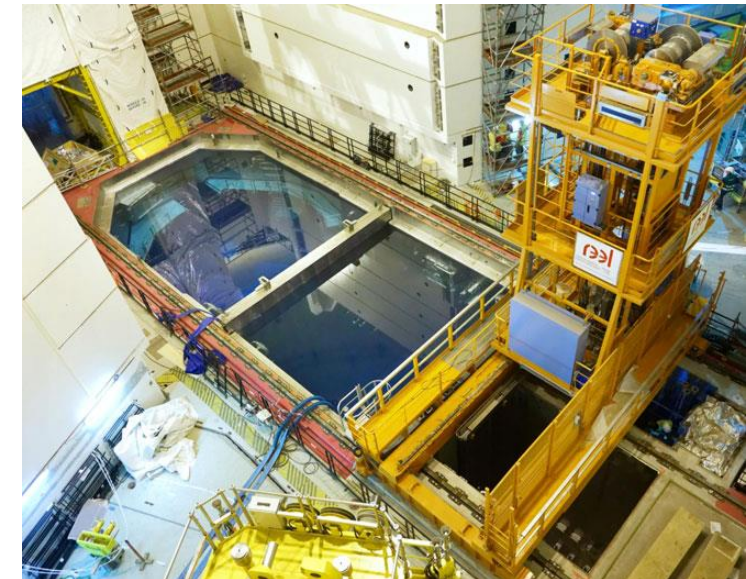
## ❑ Refroidissement du cœur :

- 4 réservoirs d'accumulation pressurisés pour le système RIS (injection de sécurité).
- 1 réservoir de stockage d'eau (en bas du BR) qui alimente les 4 voies des systèmes d'injection à moyenne et basse pression.



## ❑ Refroidissement des GV :

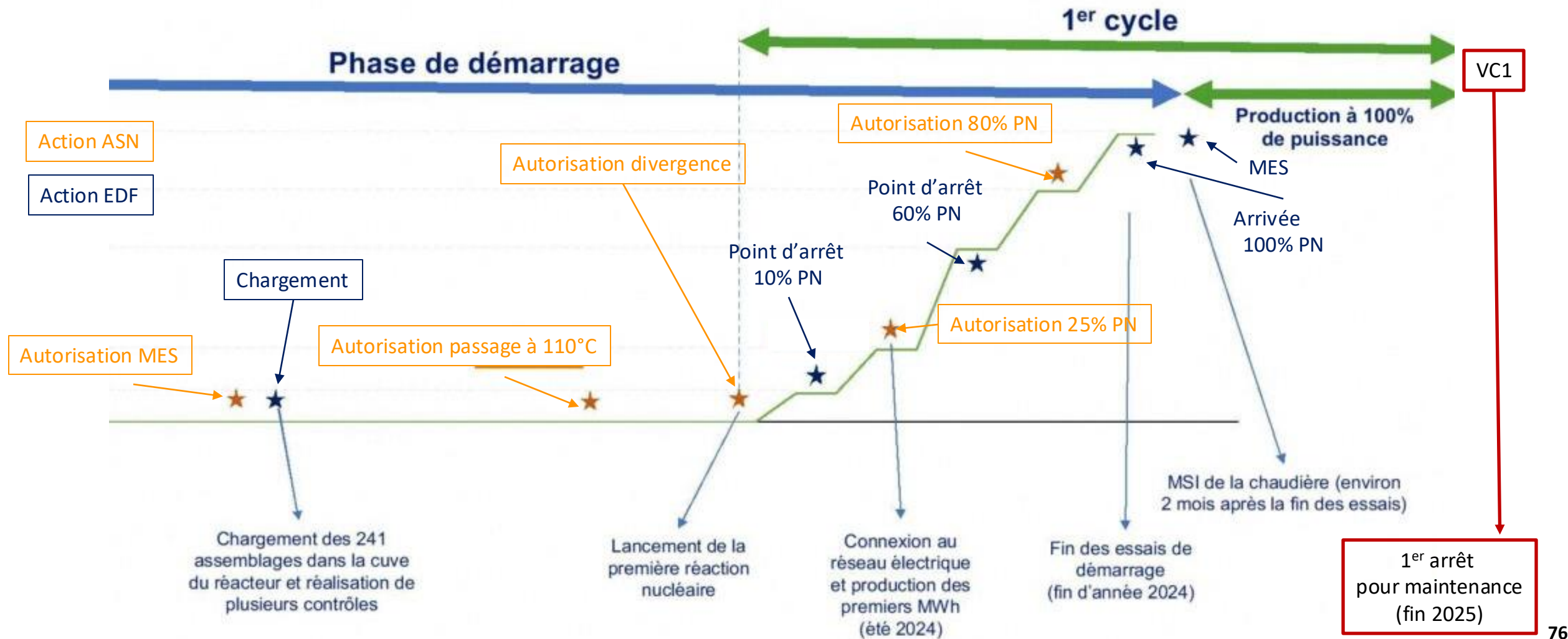
- 4 voies pour le système de secours d'alimentation en eau des GV (chacune assure 50% de la fonction).
- 1 réservoir d'eau dans les 4 bâtiments de sauvegarde (alimenté par la citerne destinée à prévenir les incendies).



## ❑ Refroidissement piscine :

- 2 systèmes de refroidissement redondants + 1 dispositif diversifié.

# Planning de démarrage de l'EPR de Flamanville



# L'EPR2

- ❑ Version optimisée de l'EPR.
- ❑ L'EPR2 conserve les atouts de l'EPR :
  - Puissance = 1650 MWe
  - Utilisation en UO<sub>2</sub> ou MOX (30%)
  - hautes normes de sûreté (post Fukushima intégré à la cor
  - Suivi de charge exigé plus important pour compenser les EI
- ❑ Prise en compte du REX des EPR dans le monde et du parc :
  - design simplifié : meilleure constructibilité (simple enceint
  - Outils numériques utilisés (maquette numérique 3D et 4D
  - Travail en entreprise étendue
  - Standardisation et réduction des catalogues des équipements
  - Suppression du « two-room concept » de l'EPR : abandon de l'entrée dans le BR en production
  - Trois trains de sauvegarde au lieu de 4 sur l'EPR : abandon de la maintenance en marche

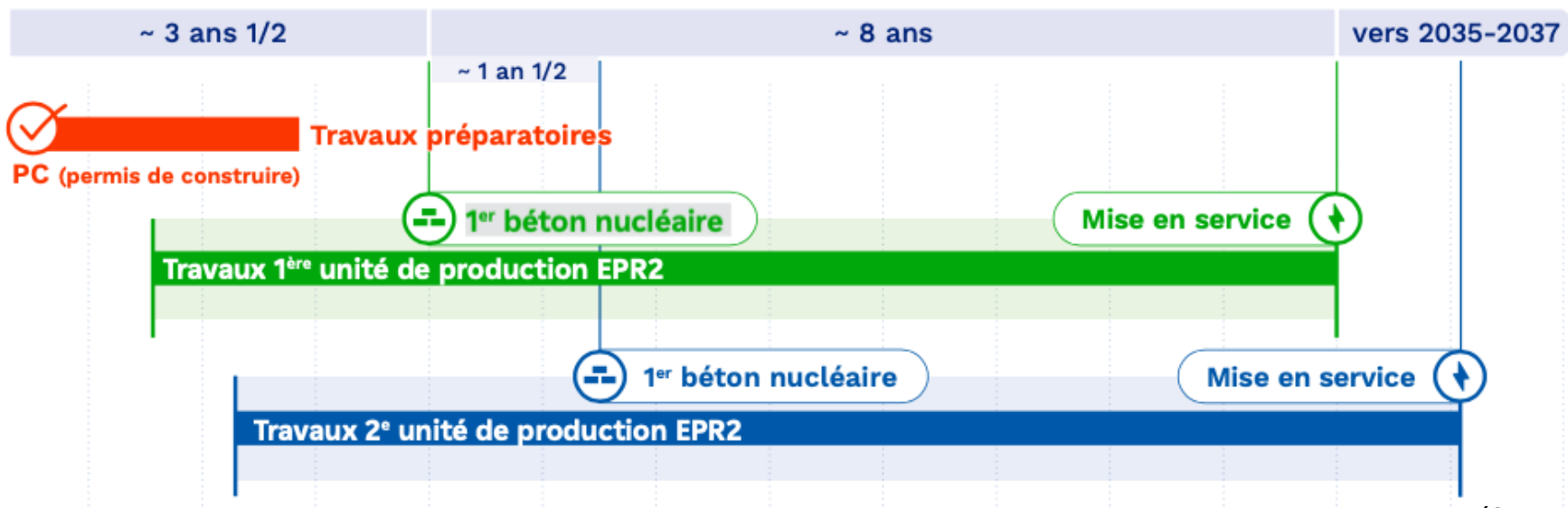
(Source Dossier EPR2, EDF CNDP)



# Le planning

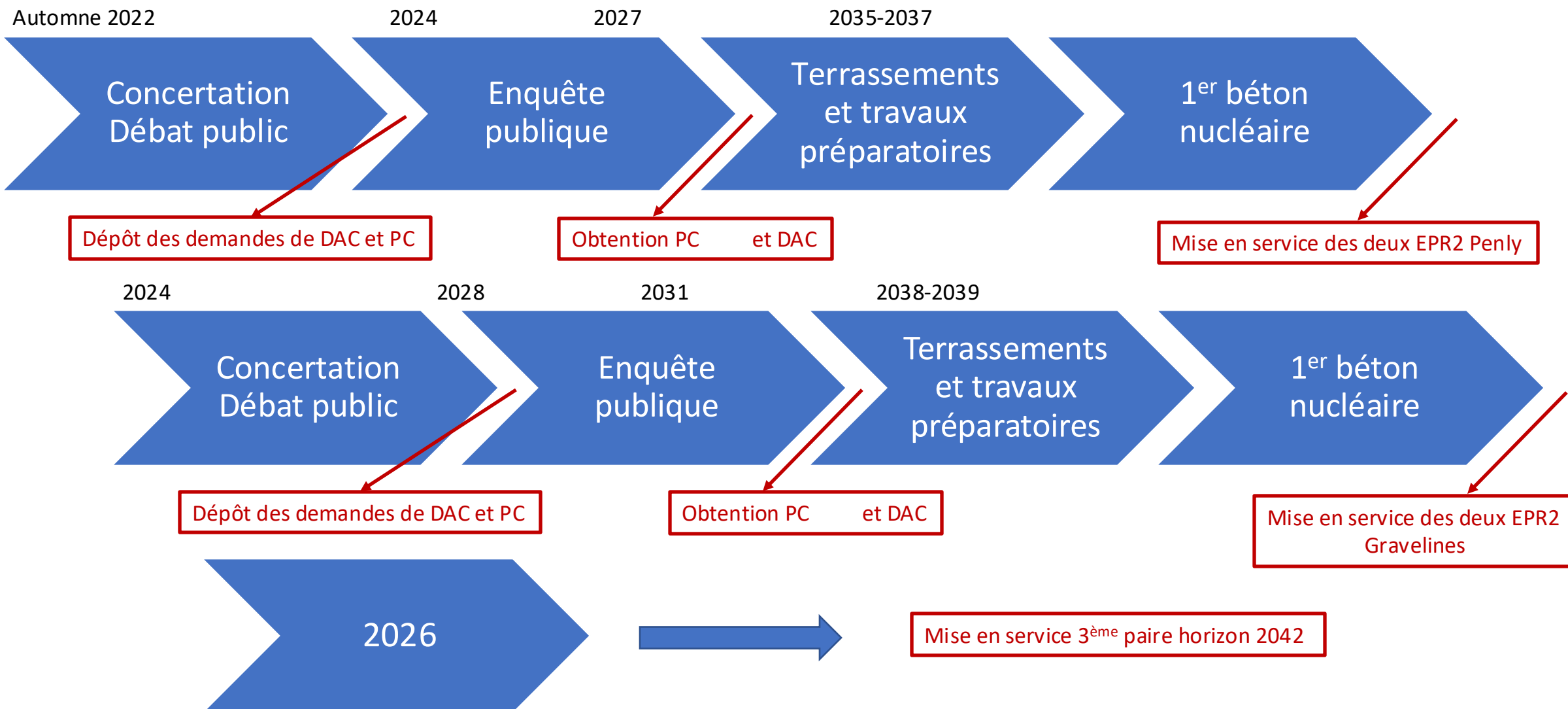
- ❑ Programme de 3 paires de réacteurs avec une option de 4 autres.
- ❑ 18 mois entre deux réacteurs d'une même paire et 4 ans entre chaque paires.
- ❑ Construction 1 réacteur = 94 mois

## PLANNING PRÉVISIONNEL DU CHANTIER



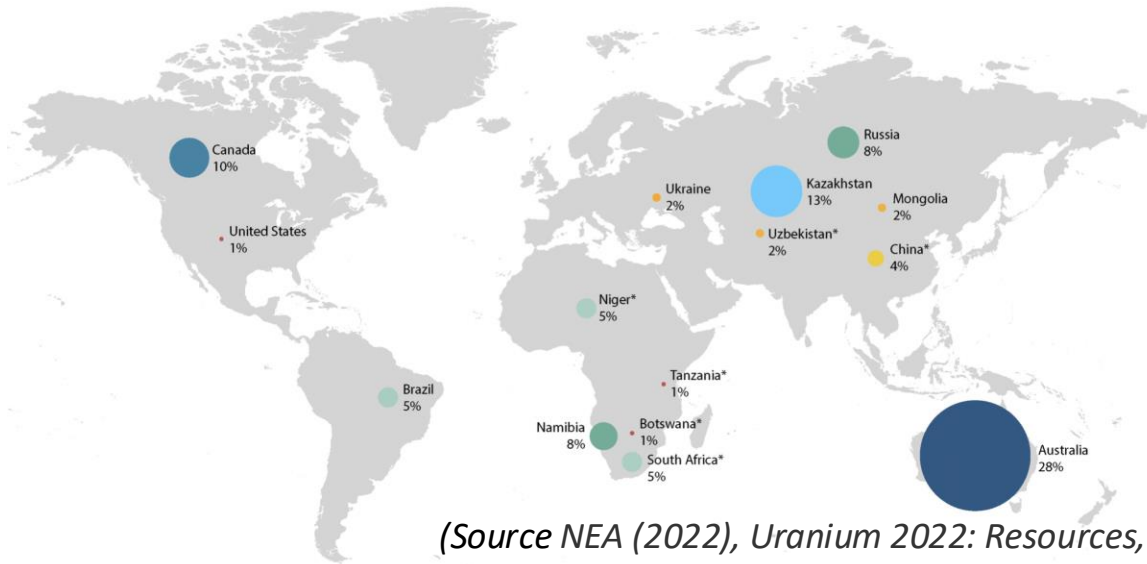
(Source Dossier EPR2/CNDP)

# Le planning des trois paires EPR2



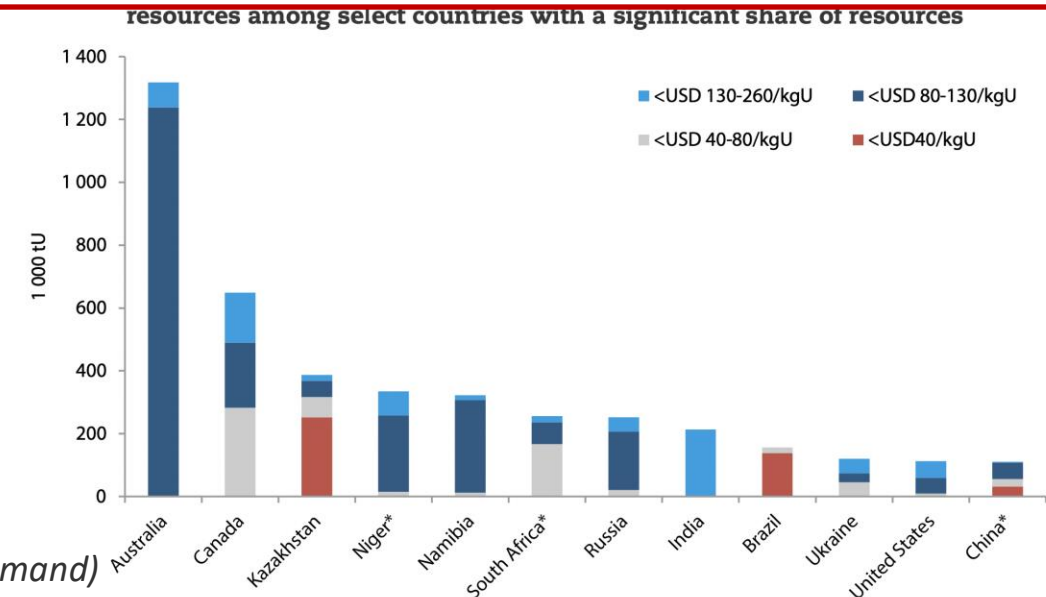
# Ressources en uranium

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



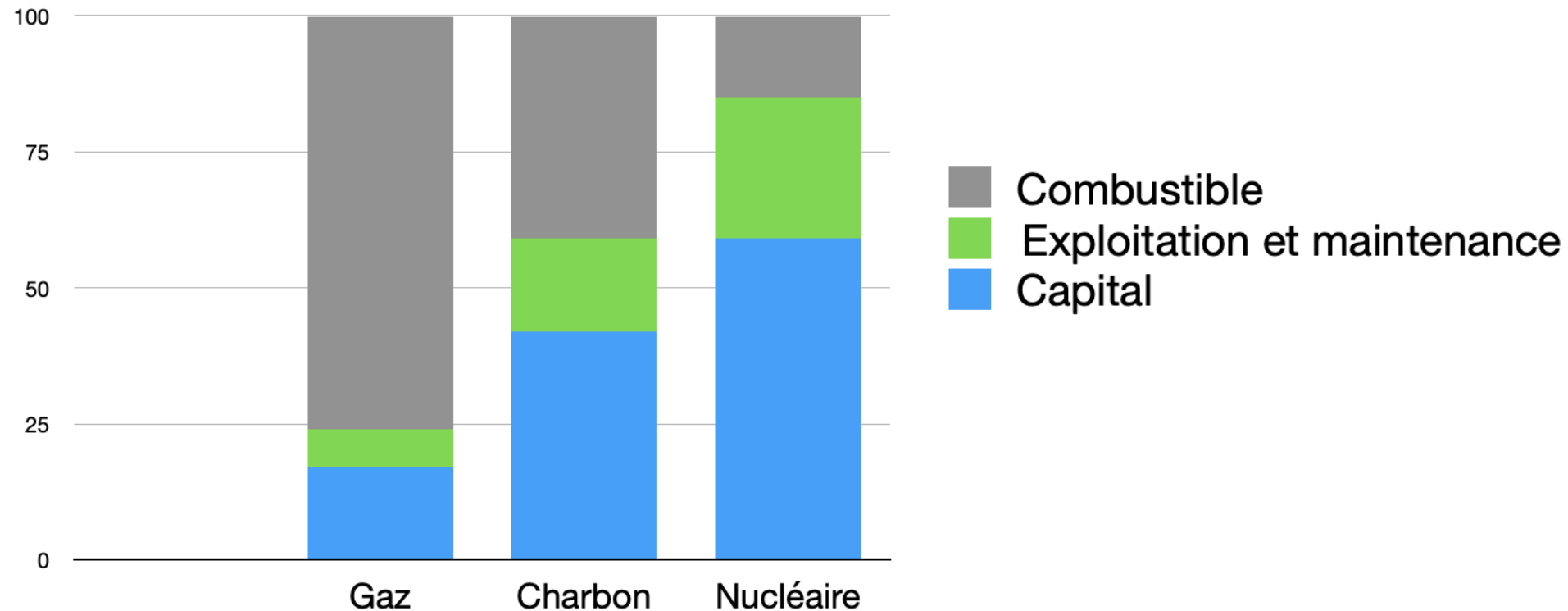
(Source NEA (2022), Uranium 2022: Resources, Production and Demand)

Répartition des ressources conventionnelles d'uranium récupérables  
raisonnablement



- Consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 tonnes par an)
- Bonne répartition des ressources conventionnelles -> permet facilement la diversification des fournisseurs
- Possibilité de stocks importants (à la différence des hydrocarbures l'uranium est non inflammable et très peu radioactif) : environ 10 ans pour la production française.
- Recyclage combustible utilisé : réduit les besoins en uranium naturel (10 % de l'électricité nucléaire française est produite à partir de matières recyclées)

# Le coût de l'énergie nucléaire



**Pour exploiter une centrale, il faut:**

- un investissement lourd au départ (cout de la sureté nucléaire)
- peu de combustible
- de nombreux métiers à tous les niveaux et à haute valeur ajoutée