

Nucléaire et énergie décarbonée : aujourd'hui, et demain ?

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



Nucléaire et énergie décarbonée : aujourd'hui, et demain ?

1. Introduction

- Situation énergétique actuelle
- Des signaux de relance pour l'énergie nucléaire

2. Comment fonctionne un réacteur nucléaire ?

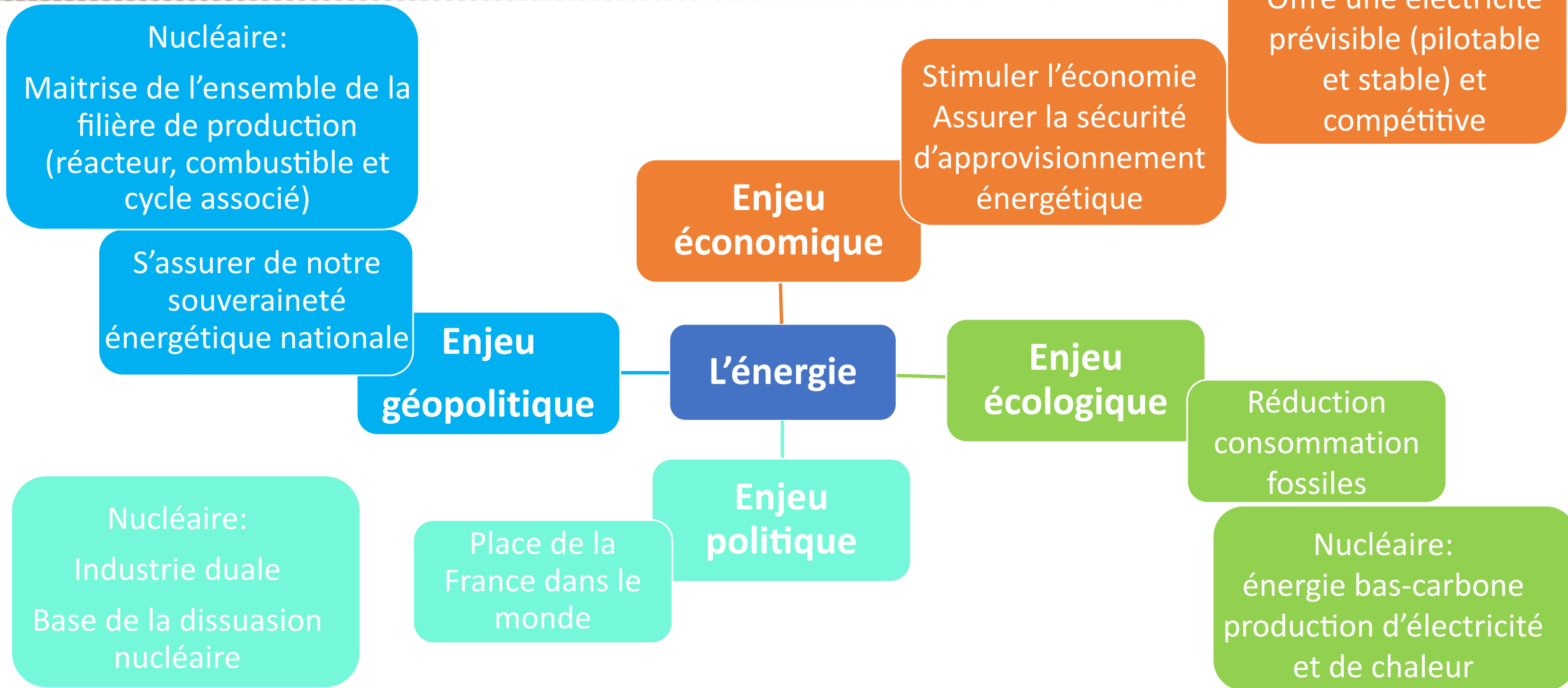
- La fission et la réaction en chaîne
- Le combustible
- La centrale et le réacteur

3. Le futur

- Le futur proche
- Le futur plus lointain
- Les scénarios

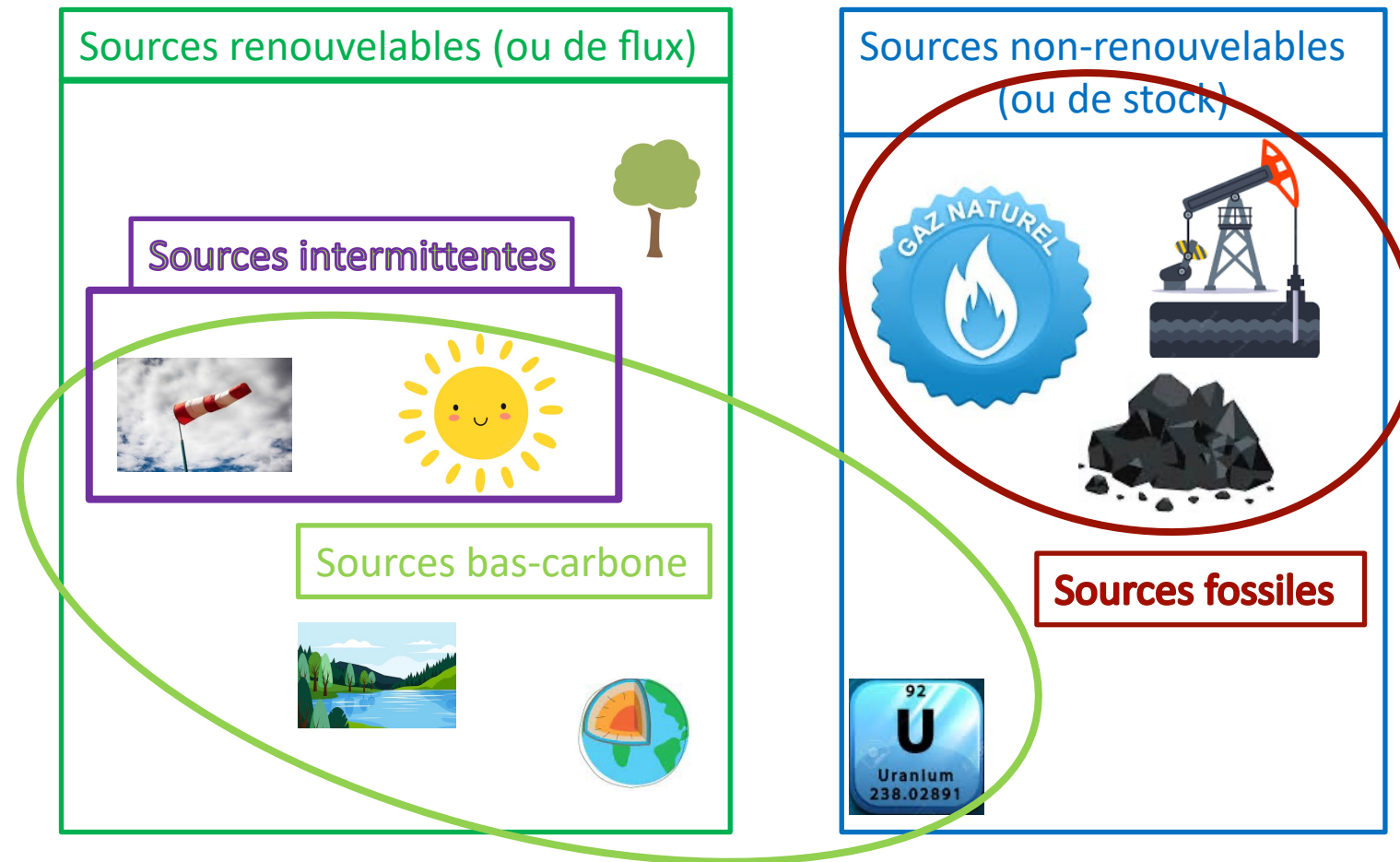
1. Situation énergétique actuelle

L'énergie : Enjeu du XXI^{ème} siècle



Les différentes sources d'énergies

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



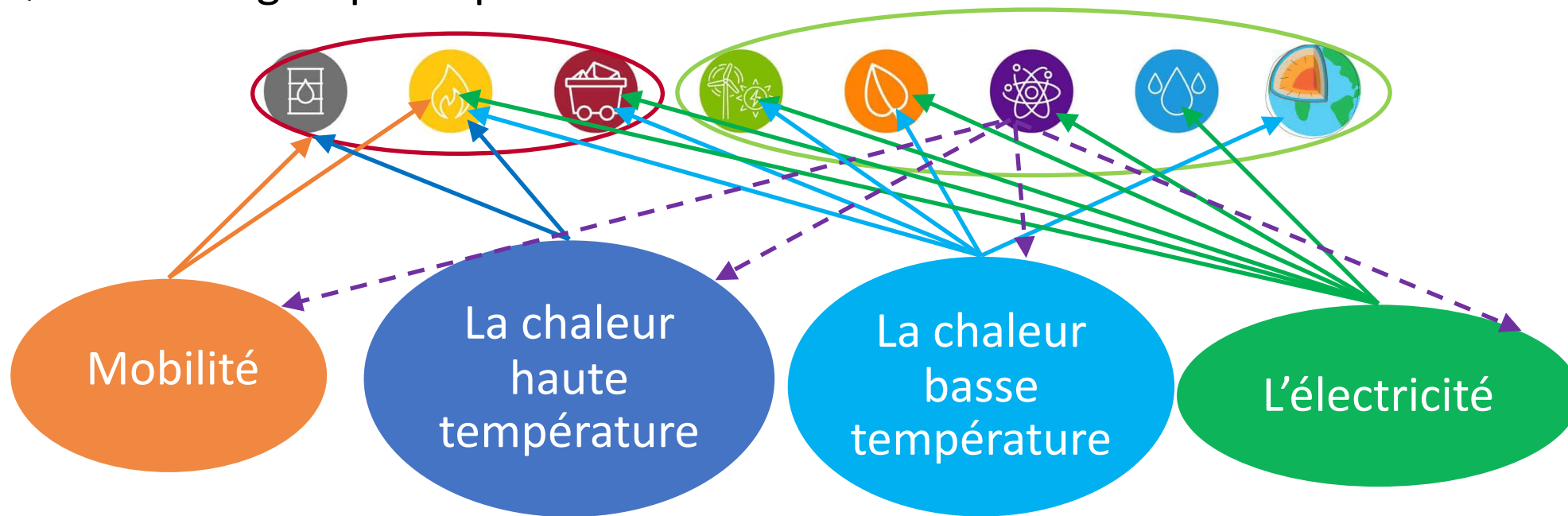
Combustion:
 $C + O_2 \rightarrow CO_2$

La transition énergétique

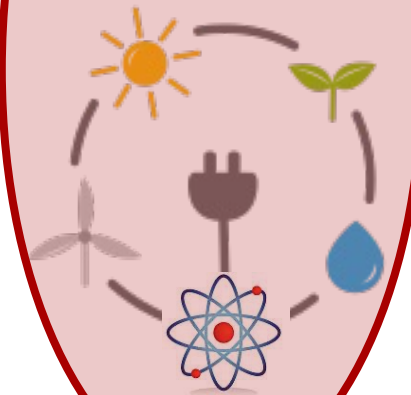
❑ Passer des sources d'énergies fossiles aux sources d'énergies bas carbone.



❑ Quelles énergies pour quels besoins?

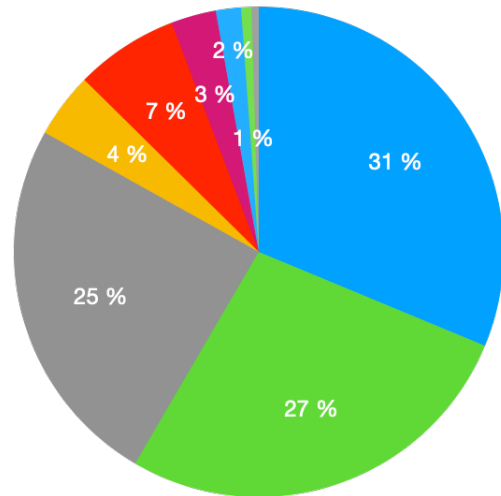


Sources d'électricité bas-carbone ?



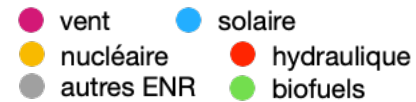
Consommation mondiale d'énergie en 2021

Consommation énergie primaire

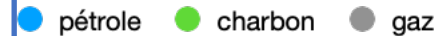


Monde:
165 000 TWh
dont 17% électricité

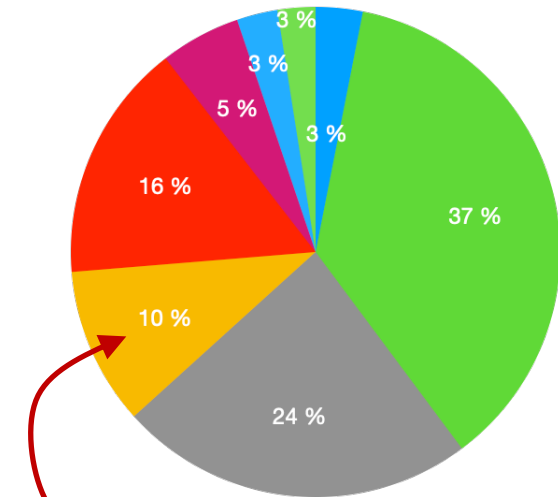
Energies bas-carbone



Energies fossiles



Production électrique



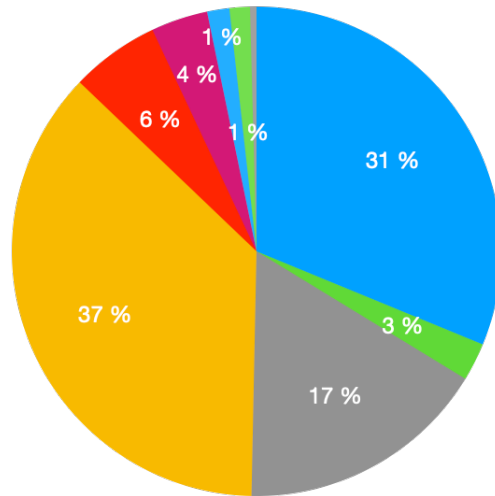
Nucléaire = 2^{ème} source d'électricité bas-carbone

733 millions sans électricité (~ 80% en Afrique subsaharienne)

(source AIE 2022 et Eurostat)

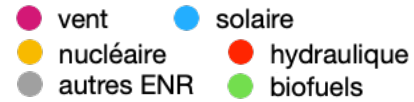
Le cas de la France

Consommation énergie primaire

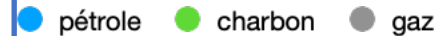


1 618 TWh

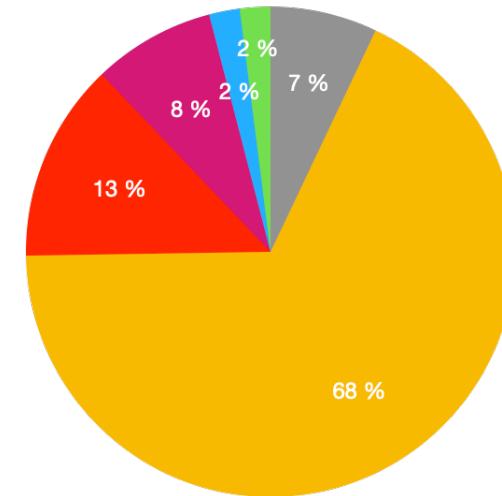
Énergies bas-carbone



Énergies fossiles



Production électrique



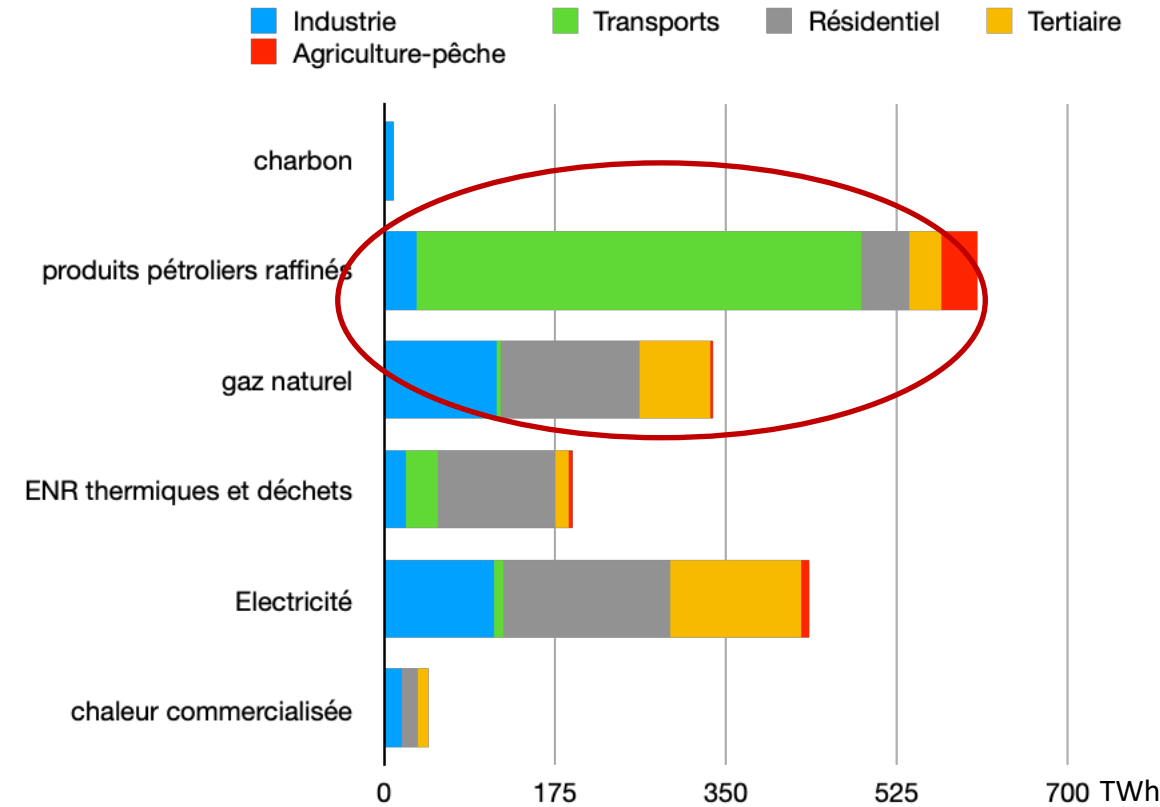
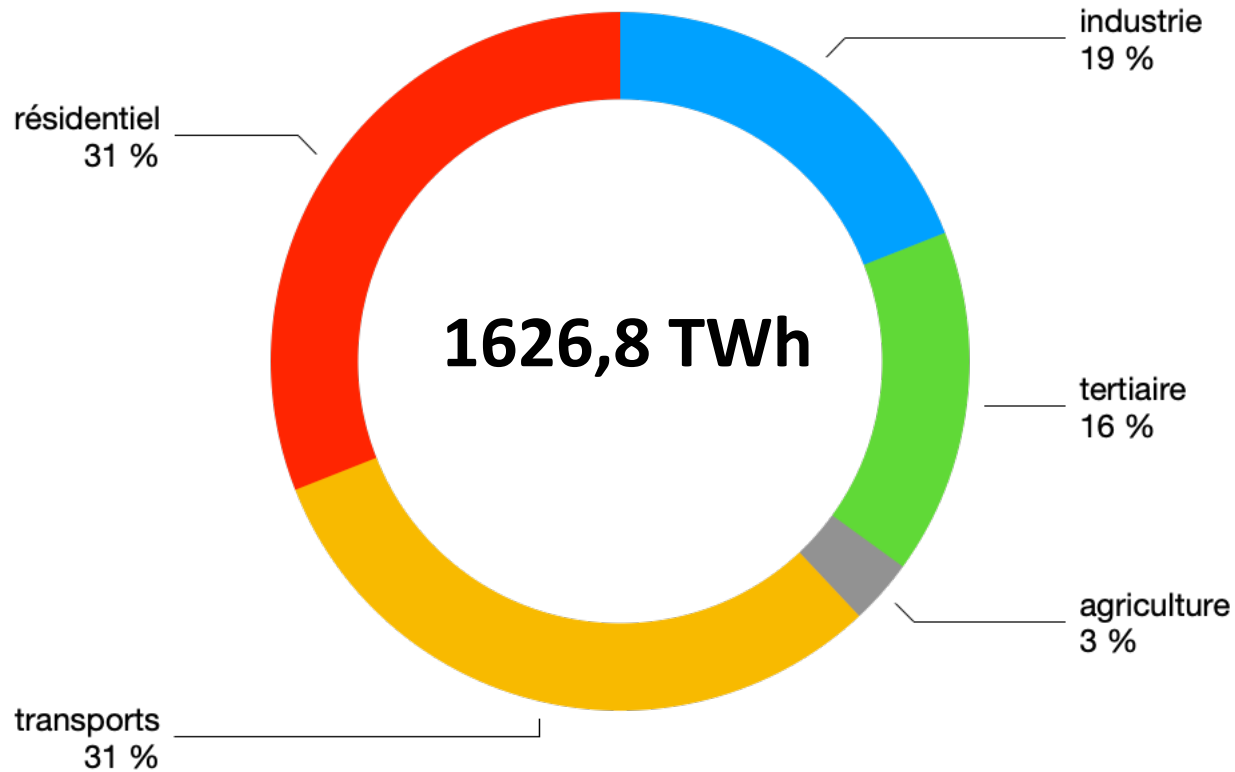
532 TWh

(SDES, Bilan énergétique de la France)

51% d'énergies fossiles consommées

Electricité bas-carbone à + de 90% (grâce à l'énergie nucléaire)

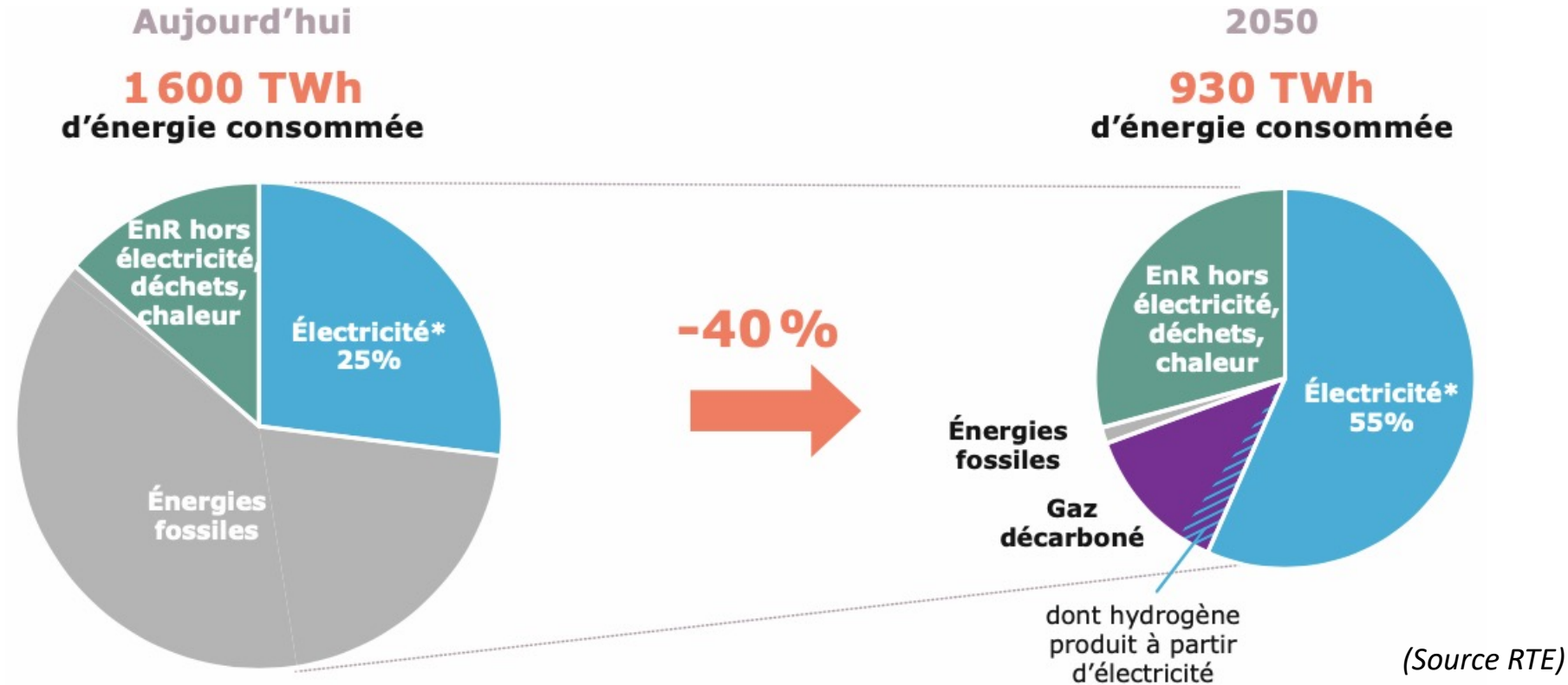
Consommation d'énergie finale par secteur en 2021 en France



Objectif: diminuer les fossiles :

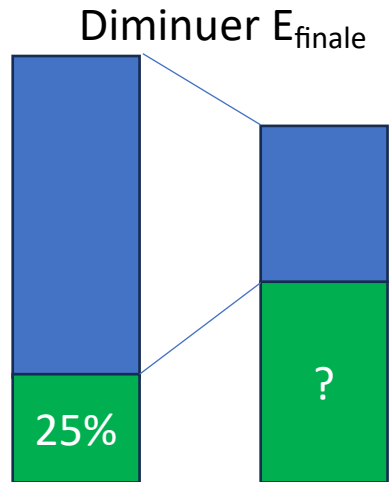
- 1. Diminuer pétrole dans les transports**
- 2. Diminuer le gaz dans l'industrie, chauffage bâtiments**

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



Augmenter l'électricité

**Efficacité
énergétique**

Augmenter les rendements
Améliorer l'existant
Changer de procédés

Sobriété

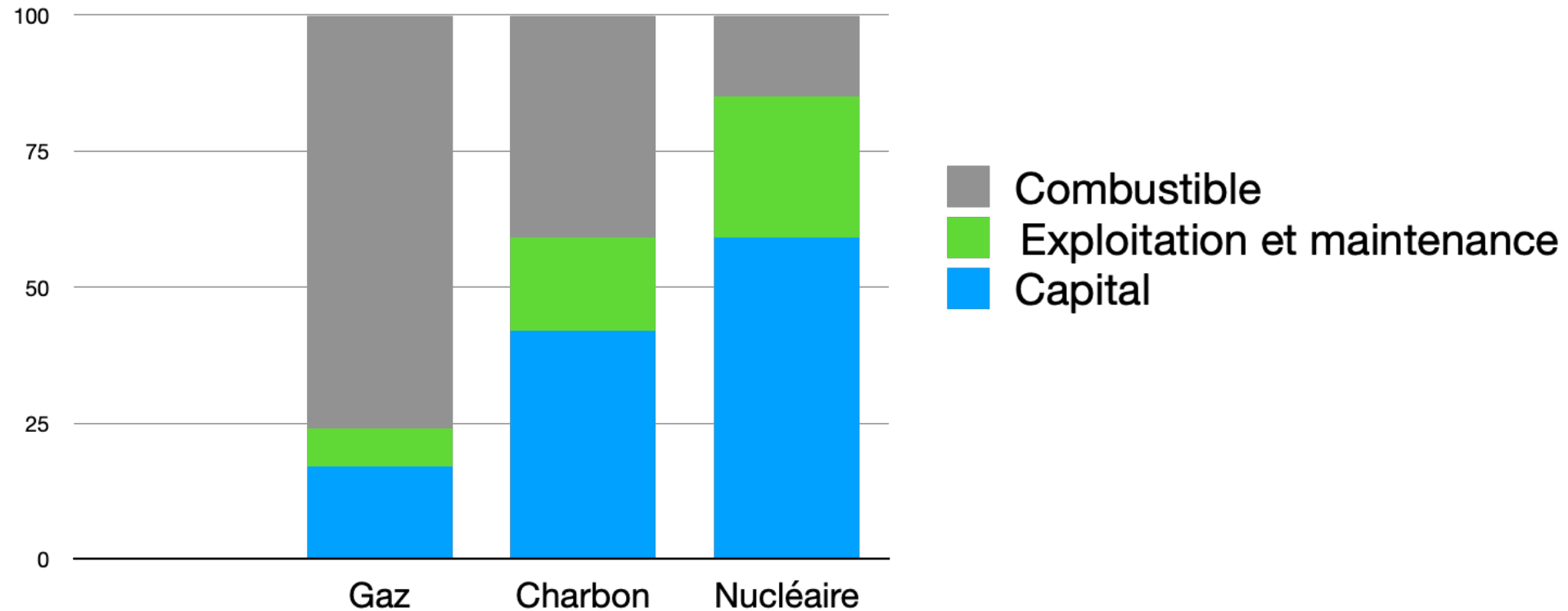
**Décarboner
les usages**

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

Electrification
Production de chaleur bas-carbone

❑ Des signaux de relance pour l'énergie nucléaire

Le coût de l'énergie nucléaire



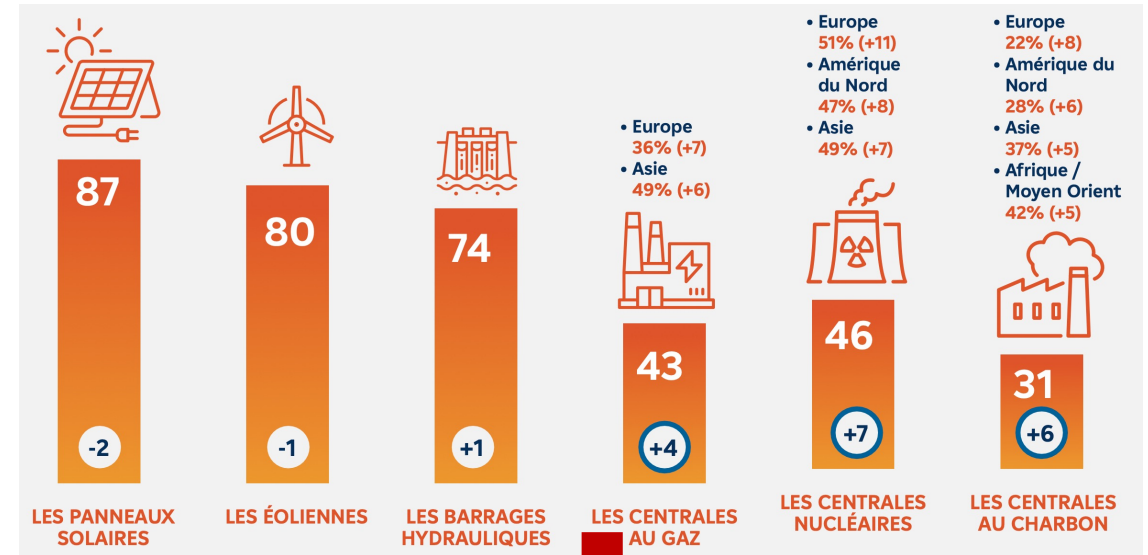
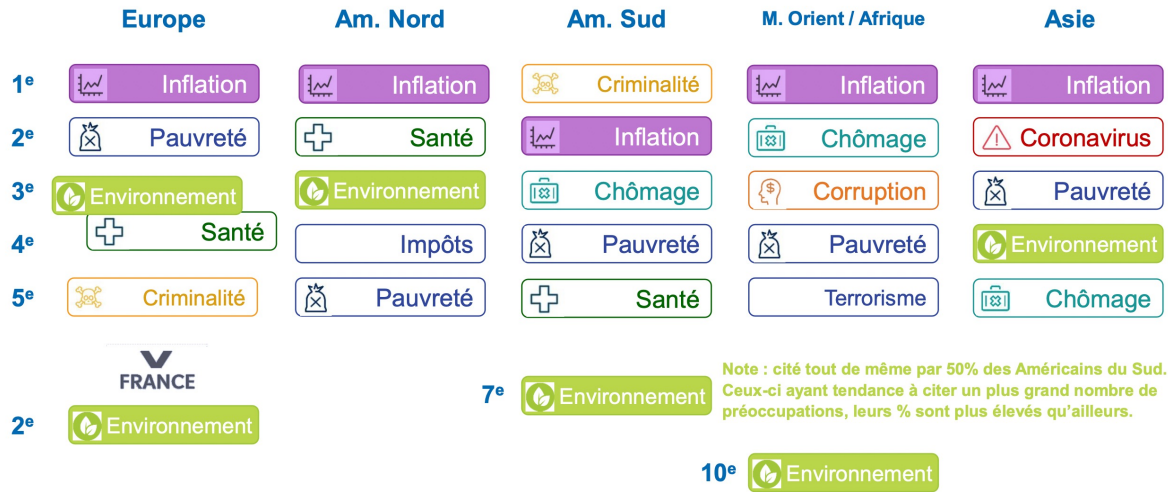
Pour exploiter une centrale, il faut:

- 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

Photo de l'opinion publique mondiale

Quel sujet vous préoccupe le plus ?

Electricité : vous êtes favorable quel mode de production ?



Partout dans le monde, l'environnement est davantage une préoccupation des catégories favorisées

Energie nucléaire : 46 % des personnes en faveur de l'énergie nucléaire (+7 points p/p à 2021)
Europe : +11 points en moyenne.

(Source Obs' COP 2022)

Quelle solution?

50% ₋₁
Une modification de nos
modes de vie

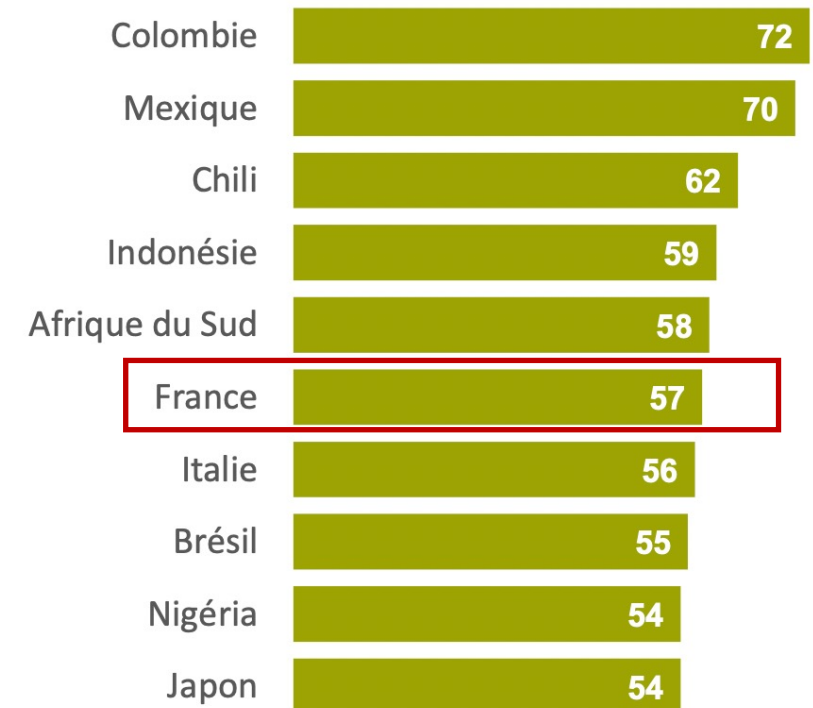
31% =
Le progrès technique
& les innovations

11% ⁺¹
On ne peut pas
le limiter

7% =
Ne sait pas

1% Ne reconnaît pas du tout le
changement climatique

Pays estimant le plus que la solution passe
par un changement de nos modes de vie



Une majorité des Français ne croient pas au progrès technique !!!!!

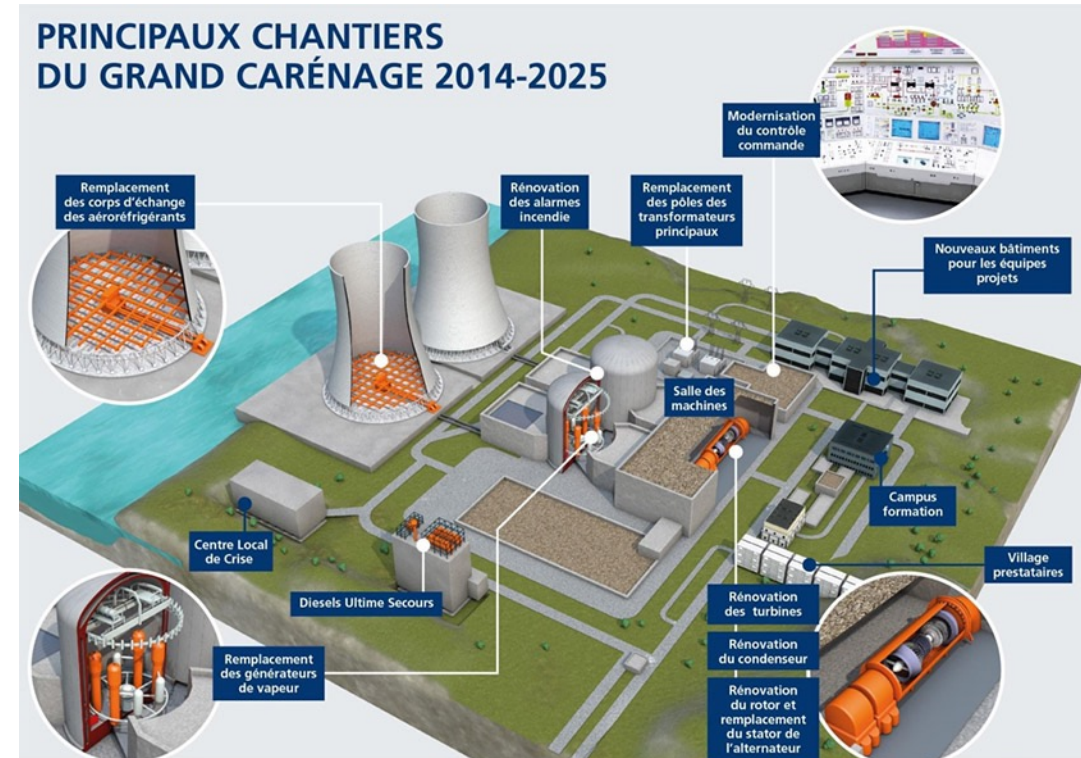
Exploitation à long terme des parcs existants

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^{ème} réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe.

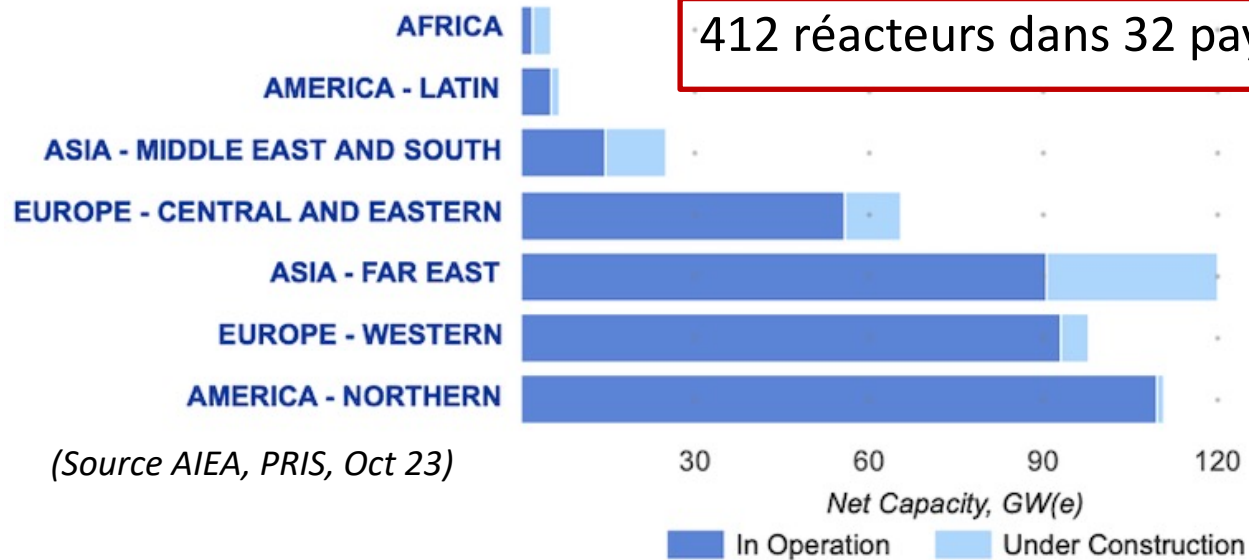
Arrêt sur le grand carénage: programme industriel de renforcement et des installations initié en 2008.

- **Réexamen périodique** = exigé par le code de l'environnement, tous les 10 ans, validé par l'ASN.
- **Remplacement** de matériels, intégration des mesures post-Fukushima et amélioration du niveau de sûreté.
- **Résultat final** : les centrales du parc seront au même niveau de sûreté que l'EPR.



(Source EDF)

Nouveaux programmes de construction



Alliance du Nucléaire
(16 pays européens)

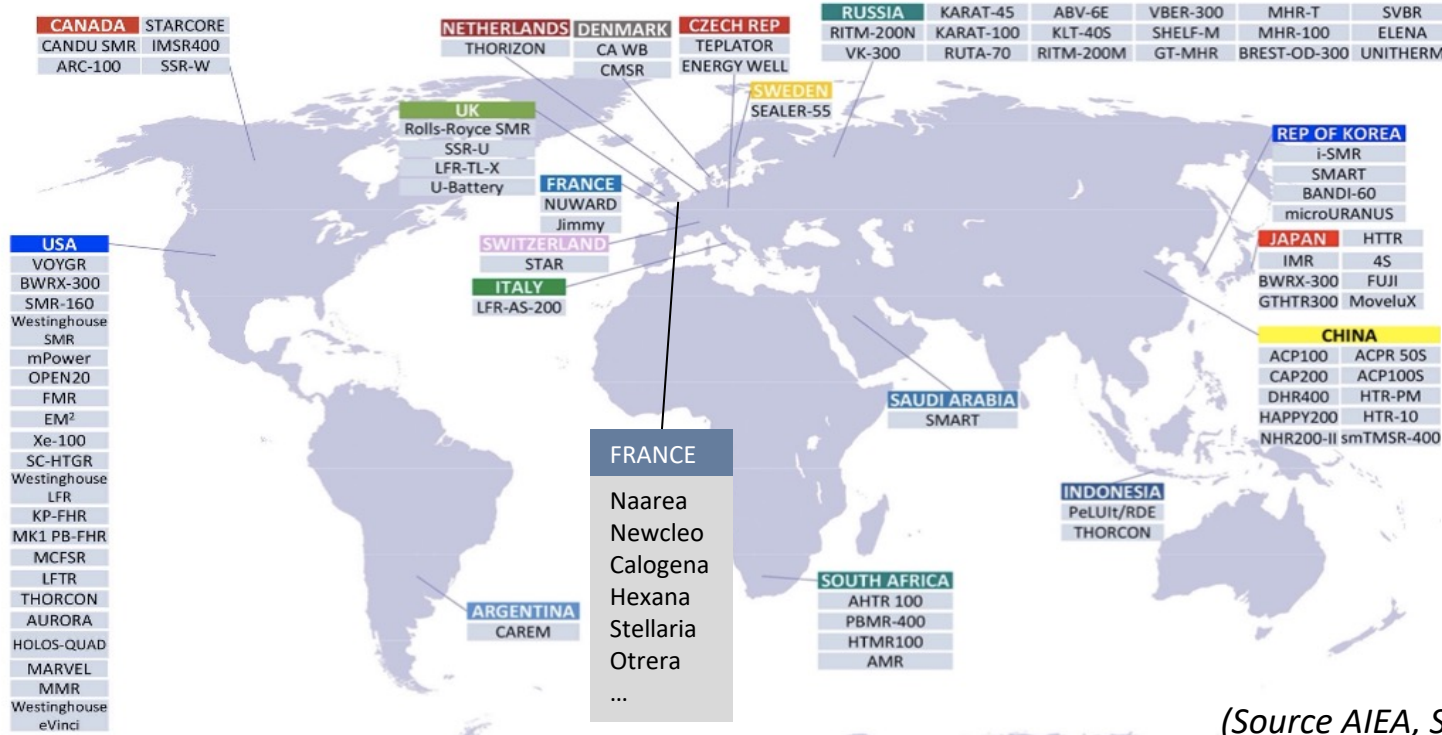
Pays intéressés : France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovénie, Slovaquie Suède.



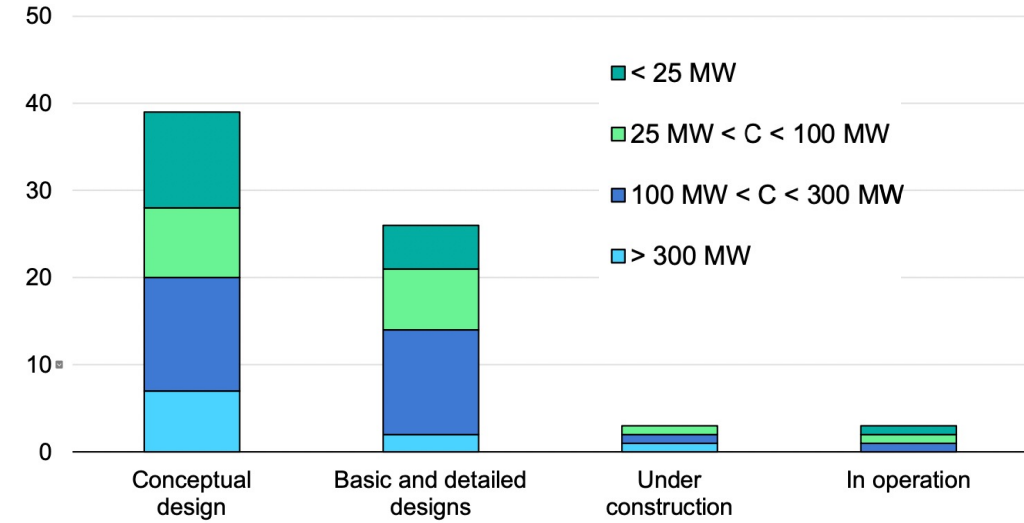
Puissance installée = 370,17 GWe
Production électrique = 2486,8 TWh en 2022

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

Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



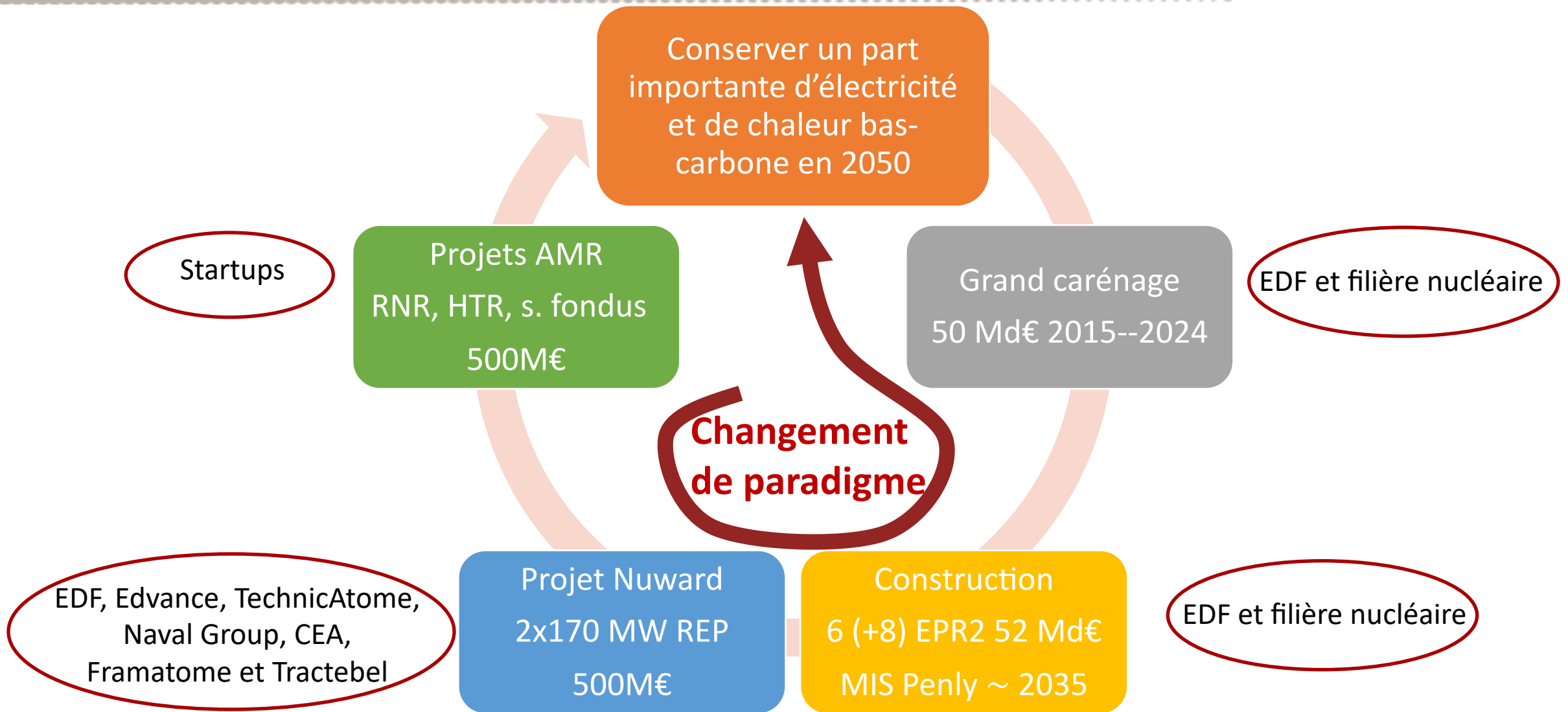
Où en sont-ils?



(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

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

Les 4 grands projets en France



Enjeux filière sur la période 2022-2030

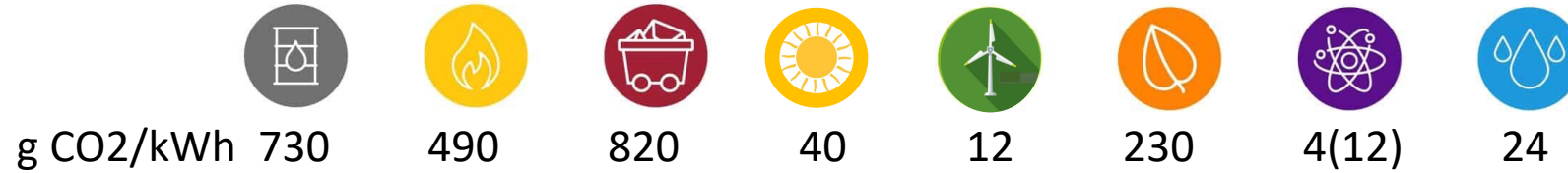
❑ Plusieurs enjeux majeurs :

- La construction de nouveaux réacteurs EPR2 : tous les métiers seront sollicités prioritairement en Normandie, dans les Hauts de France et en AURA et Bourgogne Franche-Comté
- Le grand carénage : toutes les centrales concernées pour 2022- 2030 pour un budget de 4,7 Mds €/an
- Le démantèlement sollicitera les profils construction et exploitation
- Les SMR : les profils recherche et études sont sollicités dans un premier temps puis la construction exploitation
- Autres projets majeurs : le Projet CIGEO (25 Mds euros), la maintenance courante du parc, le projet du futur Porte avions nucléaire, ITER, la jouvence des installations du cycle.



Quels avantages pour la transition énergétique?

☐ L'énergie nucléaire est une énergie bas carbone.



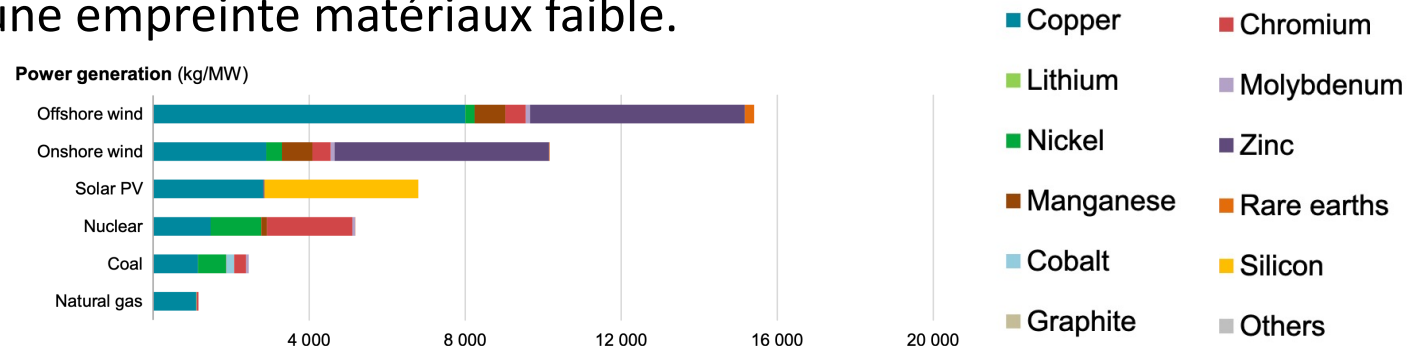
(Source GIEC)

☐ L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée.



(Source Sfen)

☐ L'énergie nucléaire a une empreinte matériaux faible.



(Source IAE, 2021)

Quels inconvénients à l'énergie nucléaire?

Freins dus aux peurs de l'opinion publique :

- Accidents nucléaires,
- Production de déchets radioactifs.

Tchernobyl



Fukushima Dai-ichi

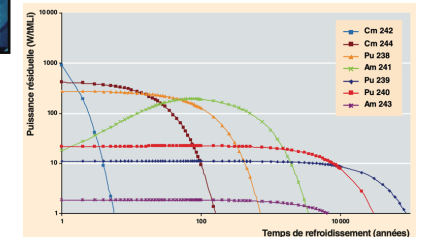


Freins intrinsèques à l'utilisation de l'énergie nucléaire :

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

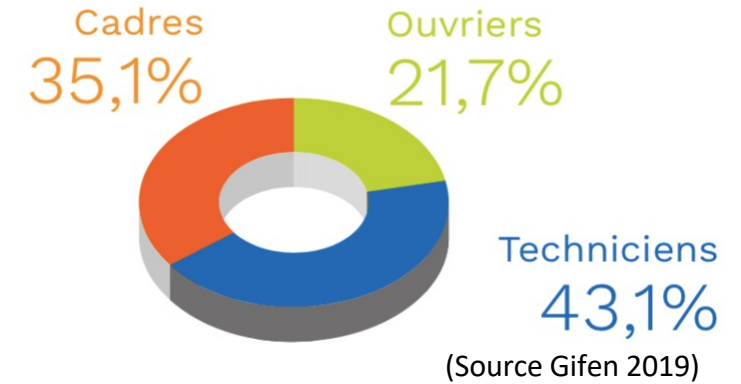


(source Wikipédia, IRSN, TI BN3296, CEA)



L'industrie Nucléaire: une industrie du temps long

Métiers hautement qualifiés



R&D et études



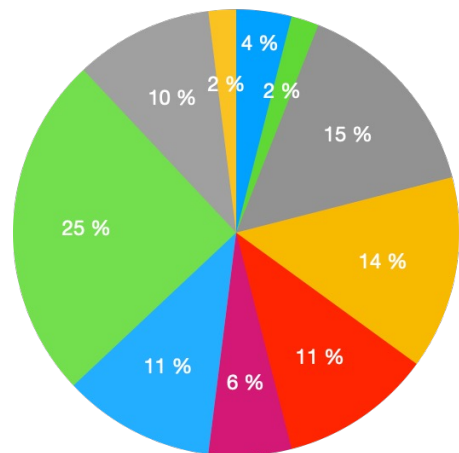
~20 ans

Fabrication et construction



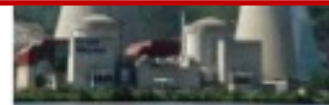
Plus de 100 métiers techniques à haute valeur ajoutée

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

maintenance



Démantèlement



~ 30 ans

Gestion des déchets



Le parc français

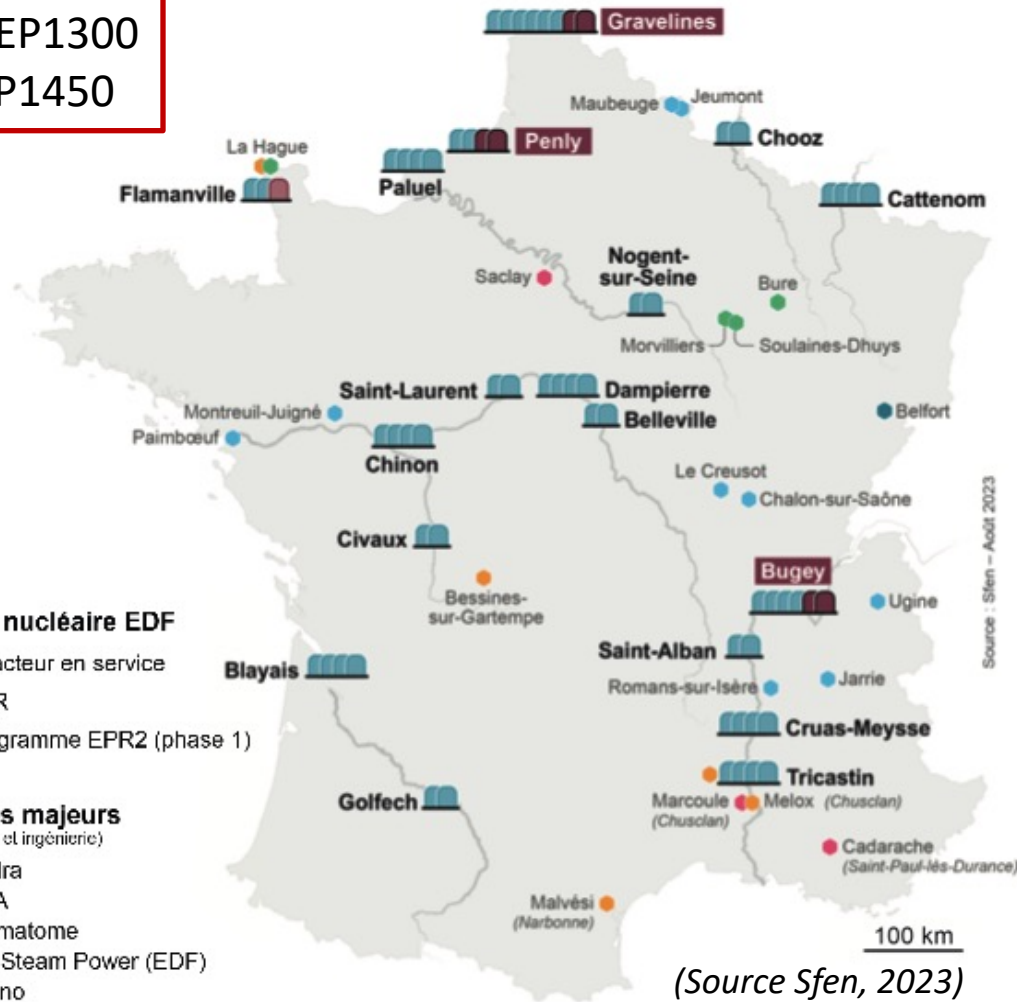
32 REP900
20 REP1300
4 REP1450

Le parc nucléaire EDF

-  Réacteur en service
-  EPR
-  Programme EPR2 (phase 1)

Les sites majeurs
(hors sièges et ingénierie)

-  Andra
-  CEA
-  Framatome
-  GE Steam Power (EDF)
-  Orano



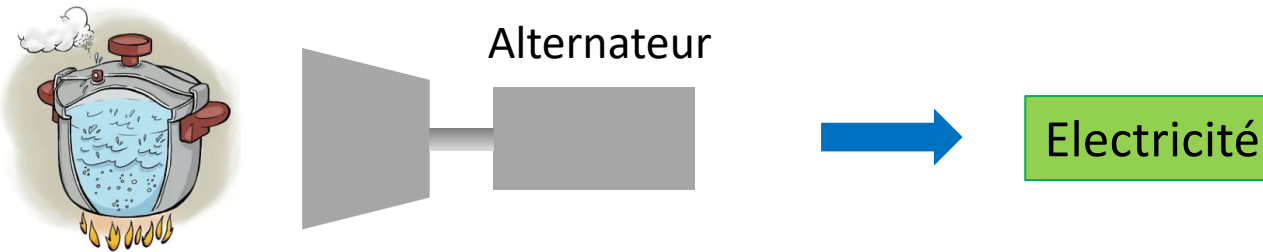
- Parc actuel : 61,4 GWe installé
 - 56 réacteurs REP sur 18 sites.
- En construction:
 - EPR Flamanville (1,65 GWe, MIS prévue 2024).
- En démantèlement: Au 1^{er} juillet 2022,
 - 14 réacteurs nucléaires ont été arrêtés.
- 3^{ème} filière industrielle.
- CA de 47,5 Milliards d'€.**
- 220 000 salariés.**
- 3 000 entreprises, 85% TPE et PME.
- Autorité de sûreté (ASN) et appui technique (IRSN).
- Un syndicat professionnel unique : le GIFEN.
- Plus de 950 M d'euros investis dans la R&D par an.
- 53 % des entreprises présentes à l'international.

2. Comment fonctionne un réacteur nucléaire ?

- a. La fission et la réaction en chaîne**
- b. Le combustible**
- c. La centrale et le réacteur**

Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire?

- ❑ C'est une cocotte-minute!
- ❑ De la vapeur d'eau est créée par la chaleur produite par la réaction de fission nucléaire.
- ❑ Cette vapeur d'eau entraîne un groupe turbo-alternateur qui produit de l'électricité.



- ❑ Dans le cœur d'un réacteur nucléaire : une réaction en chaîne de fission est entretenue.
- ❑ Une filière de réacteur est définie par le triptyque combustible-modérateur-caloporteur caractérisant un choix scientifique et technique de production de chaleur.
- ❑ Filière des réacteurs « à eau pressurisée »: le combustible est un oxyde d'uranium enrichi autour de 3,5 % en uranium-235 tandis que le modérateur et le caloporteur sont de l'eau ordinaire.

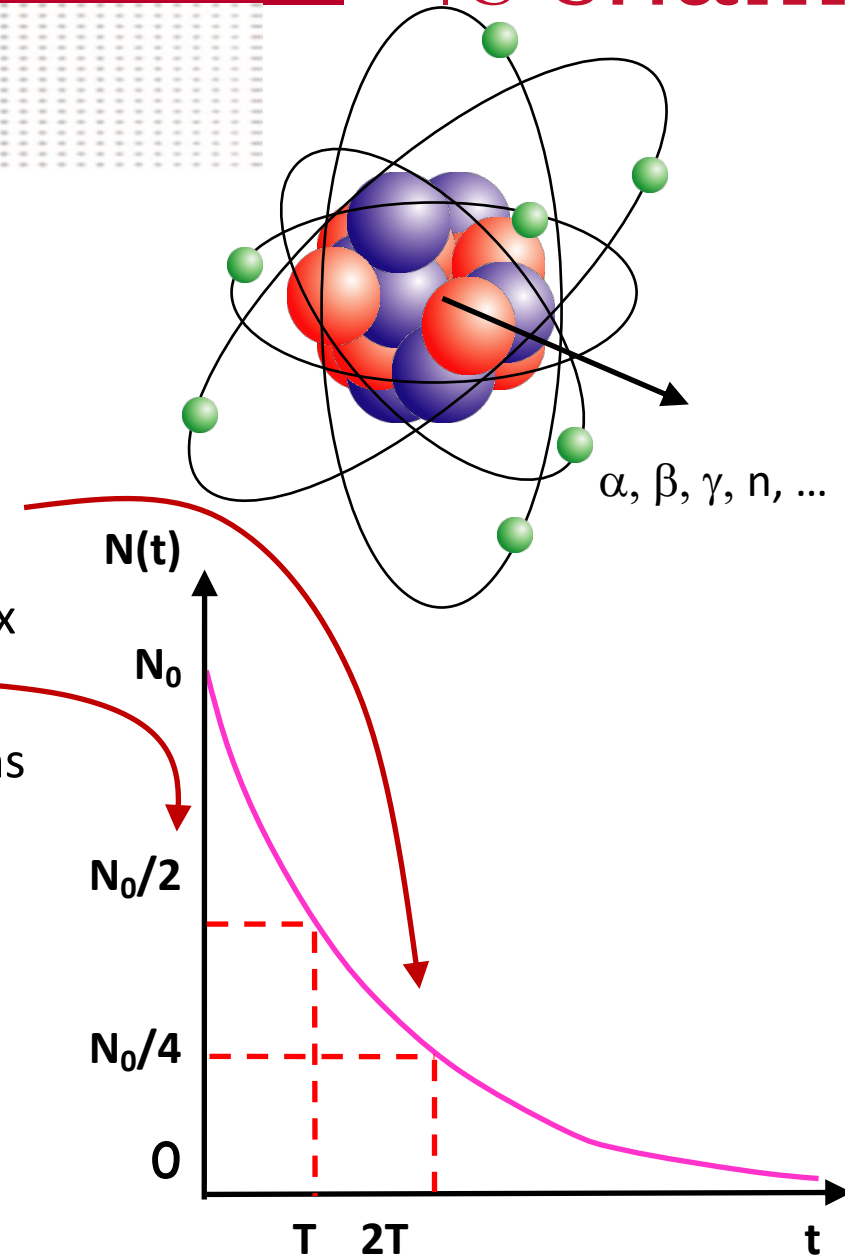
Rappel de radioactivité

- ❑ Un noyau radioactif est un noyau atomique dont la durée de vie est finie.
- ❑ On dit qu'il est instable, car il a de l'énergie en trop.
- ❑ Il tendra spontanément à libérer cette énergie en trop en émettant un rayonnement ionisant (α , β , γ , n , ...) : c'est une désintégration radioactive.
- ❑ Le nombre de noyaux radioactifs diminue spontanément dans le temps.
- ❑ Durée de vie T = durée nécessaire au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs se désintègrent.
- ❑ L'activité d'un ensemble de noyaux radioactifs = nombre de désintégrations pendant une seconde.
- ❑ L'activité décrit le niveau de radioactivité d'un ensemble de noyaux radioactifs :

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

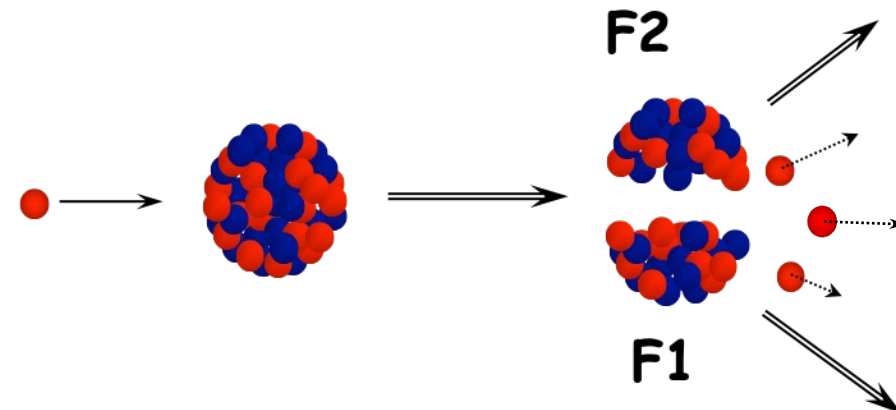
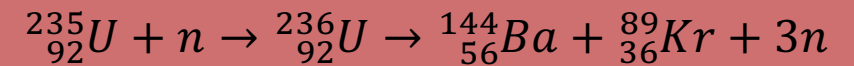
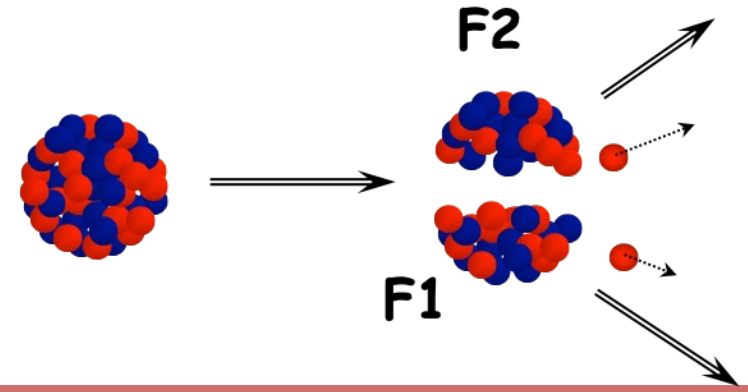
$$A = \lambda N$$

Unité le Bq: 1Bq = 1 désint/s



La réaction de fission

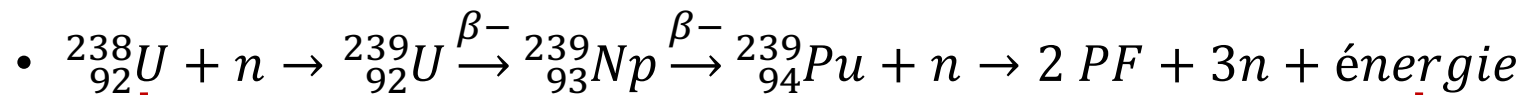
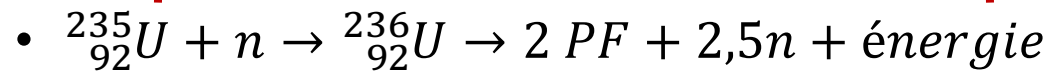
- ❑ La fission nucléaire fait partie des désintégrations radioactives.
- ❑ C'est la coupure d'un noyau lourd en deux noyaux plus petits.
- ❑ Deux réactions distinctes :
 - **fission spontanée**, où le noyau fissionne sans absorption préalable d'une particule, c'est-à-dire sans apport d'énergie.
 - **fission provoquée**, dans laquelle le noyau absorbe une particule (généralement un neutron) et donc une certaine quantité d'énergie qui provoque la fission du noyau ainsi formé.
- ❑ La fission spontanée est un processus rare : il se produit environ une fission spontanée par heure dans un gramme d'uranium 235.
- ❑ Dans la nature, l'uranium-235 = seul noyau lourd fissile.
- ❑ Vitesse du neutron : lent ($v=2200\text{m/s}$) → rapide ($v=20\,000\text{ km/s}$).
- ❑ Grande probabilité de fission pour l'uranium-235 pour neutrons lents.
- ❑ Lors de cette réaction sont émis :
 - 2 produits de fission, des neutrons (2-3) et de l'énergie.
(environ $200\text{ MeV}=3,2\times 10^{-11}\text{J}$).



Les fissions possibles dans un réacteur à eau légère

☐ Deux réactions essentielles :

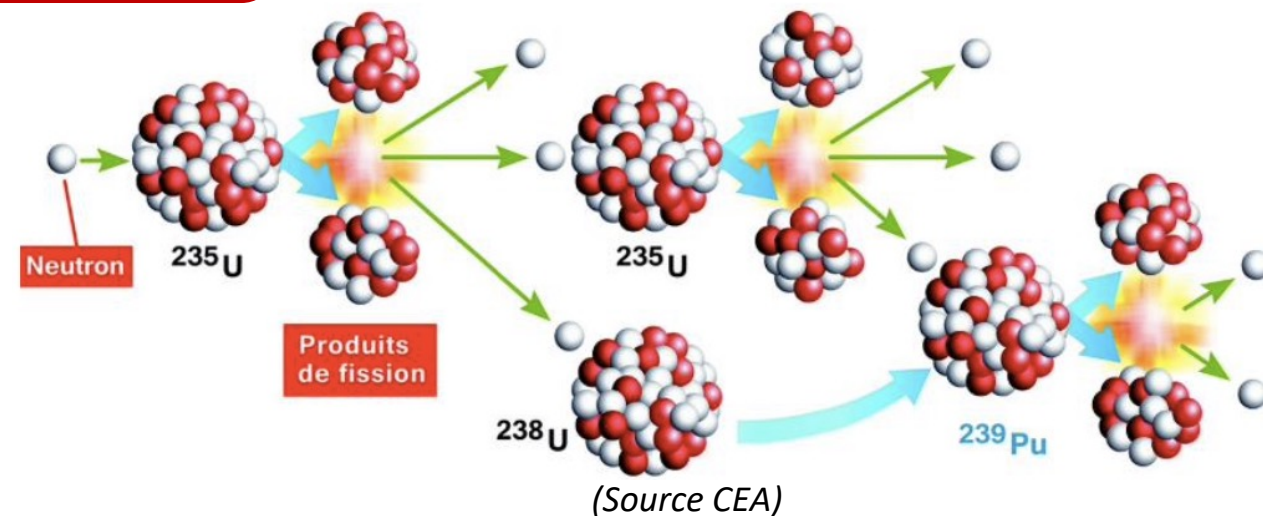
instantané



2-3 jours

☐ Fission du Pu-239 :

→ 30% de l'énergie produite dans un réacteur.



La réaction en chaîne

- Principe réaction en chaîne: les neutrons émis lors d'une fission engendrent les fissions suivantes.

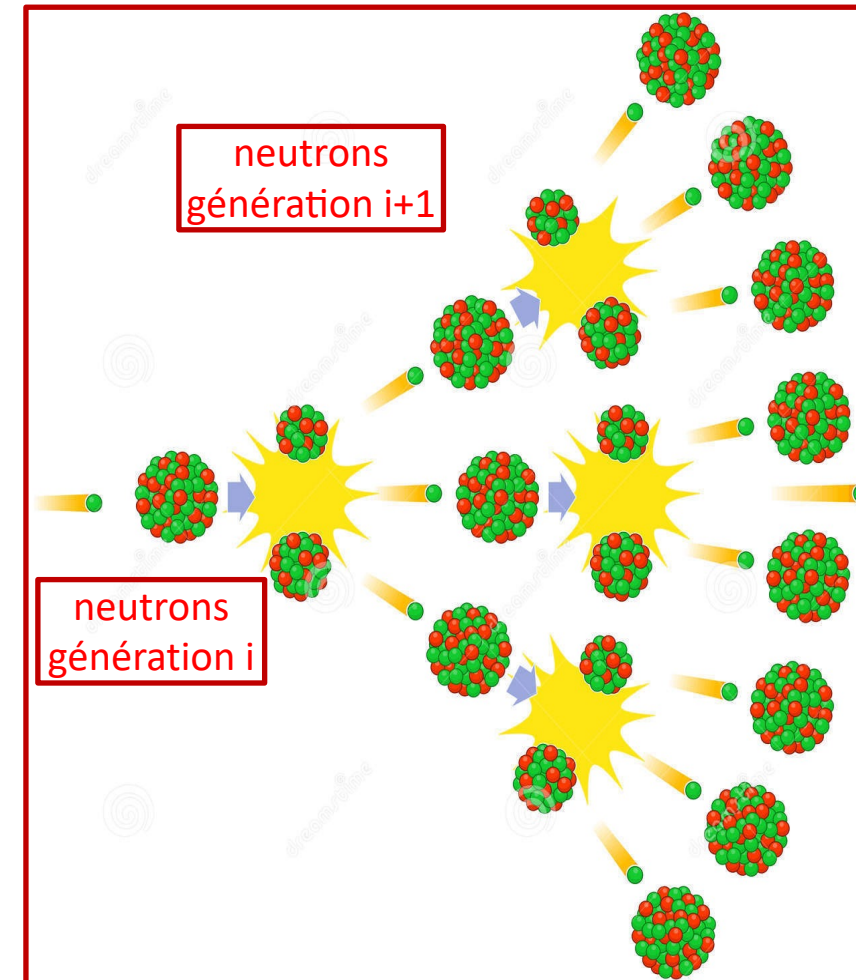
N fissions \rightarrow Nk fissions \rightarrow Nk^2 fissions \rightarrow Nk^3 fissions \rightarrow ...

- k = coefficient de multiplication :

$$k = \frac{\text{nbre neutrons génération } i + 1}{\text{nbre neutrons génération } i} = \frac{N_{\text{fissions}}(i + 1)}{N_{\text{fissions}}(i)}$$

- Le comportement de la réaction en chaîne va dépendre de la valeur du facteur de multiplication k :

- si $k > 1$ la réaction s'emballe, le système est sur-critique,
- si $k < 1$ la réaction s'étouffe, le système est sous-critique,
- si $k = 1$ la réaction s'auto-entretient, le système est critique.



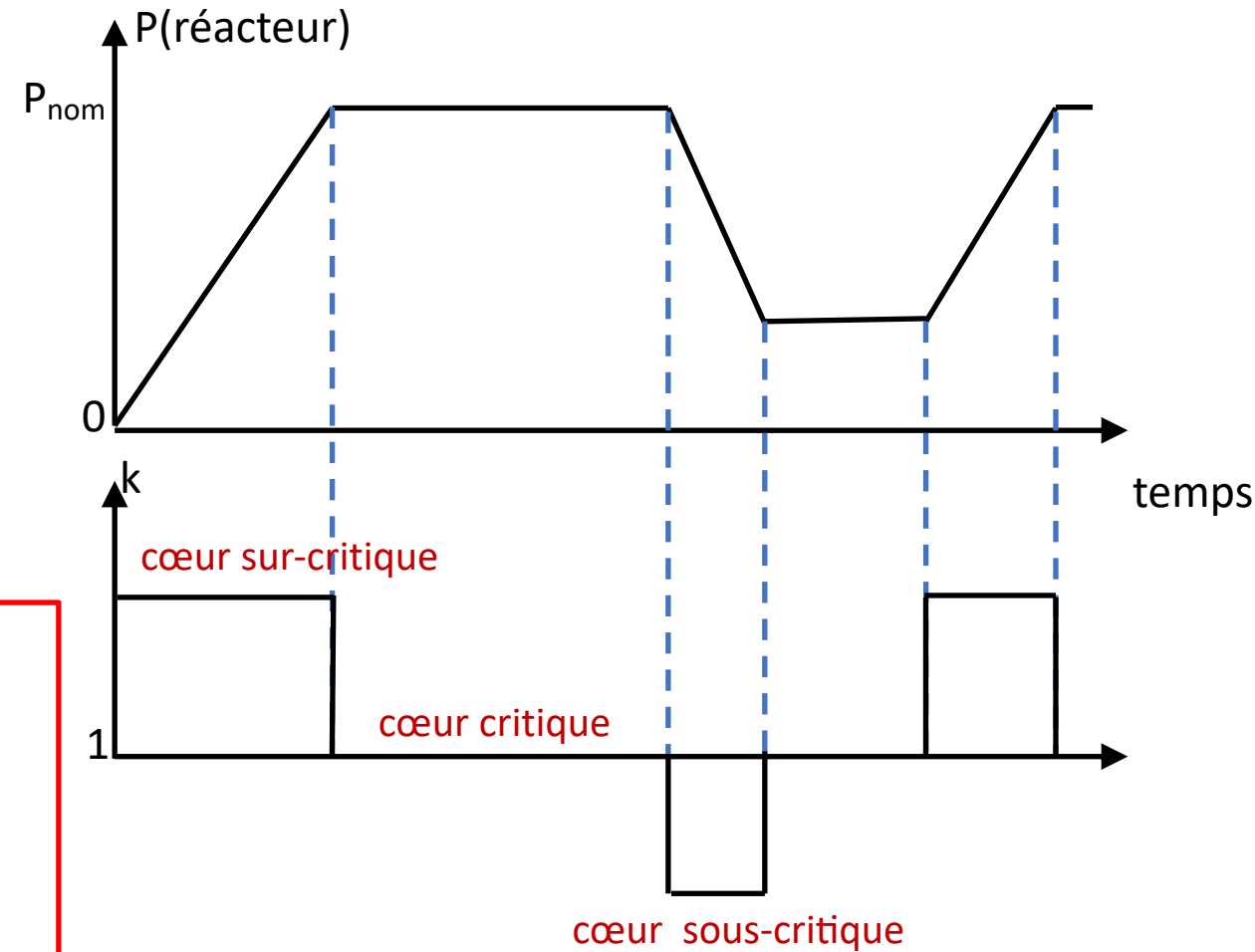
Réacteur critique

Puissance du réacteur
% nbre fissions et donc % nbre de neutrons.

Piloter un réacteur : vérifier que la réaction en chaîne est stable dans le temps quelque que soit les conditions.

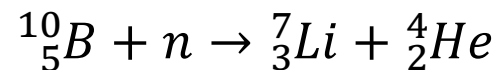
Système critique : $k=1$, dépend de:

- population neutrons et nombre de fission stables
- taille et agencement du réacteur qui permet d'optimiser le rapport surface/volume (fuites/nombre de neutrons)
- choix de tryptique combustible/caloporteur/modérateur



Les moyens des opérateurs

- ❑ Le contrôle de la réaction en chaîne est effectué 24h sur 24h par des équipes d'opérateurs extrêmement bien formés.
- ❑ Ils se basent sur des milliers de capteurs de tout type (pression, température, flux de neutrons...) situés dans tout le bâtiment réacteur.
- ❑ Pour maîtriser la réactivité (on dit maîtriser la réactivité), l'opérateur dispose différents moyens:
 - Faire varier la concentration en bore dans l'eau du circuit primaire (car le bore absorbe les neutrons):



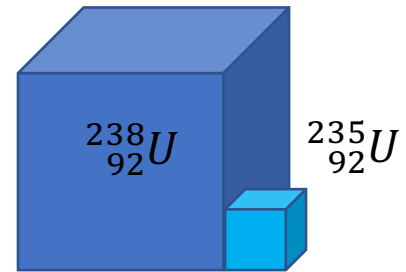
- Les grappes de contrôle qui s'insèrent ou s'extraient du cœur rapidement ou lentement.



□ Le combustible

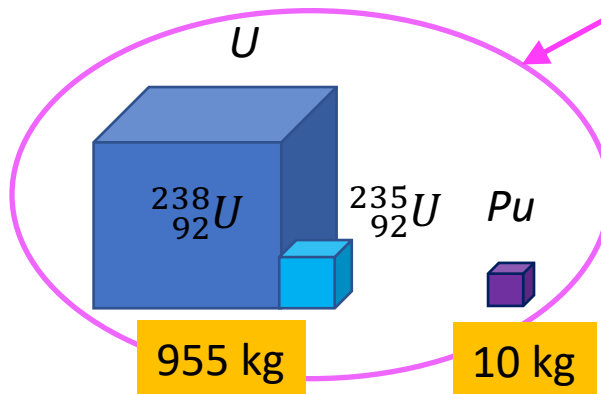
Le combustible

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

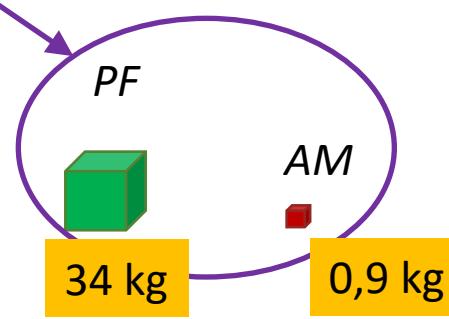


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes

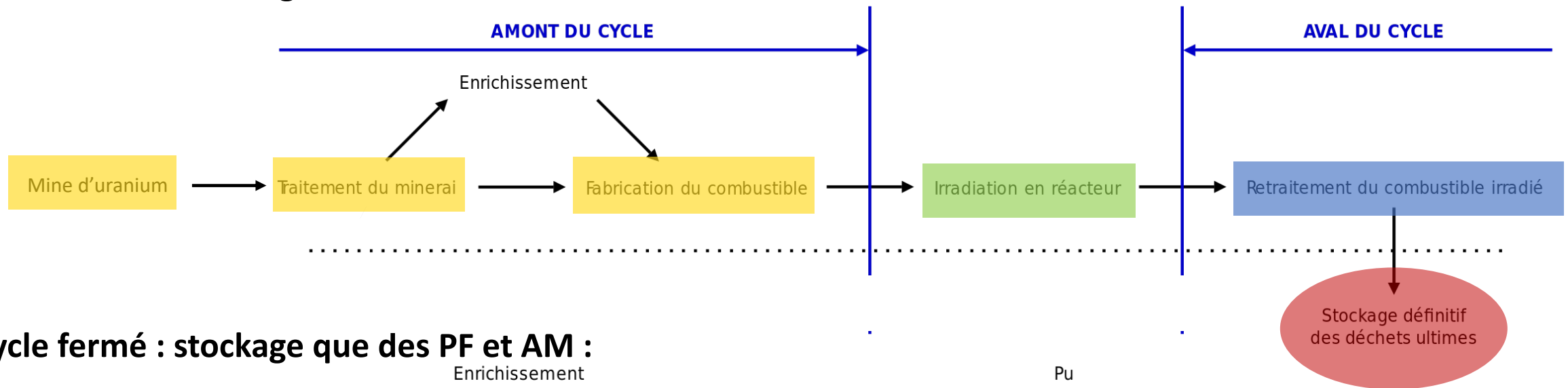


Après passage en cœur :

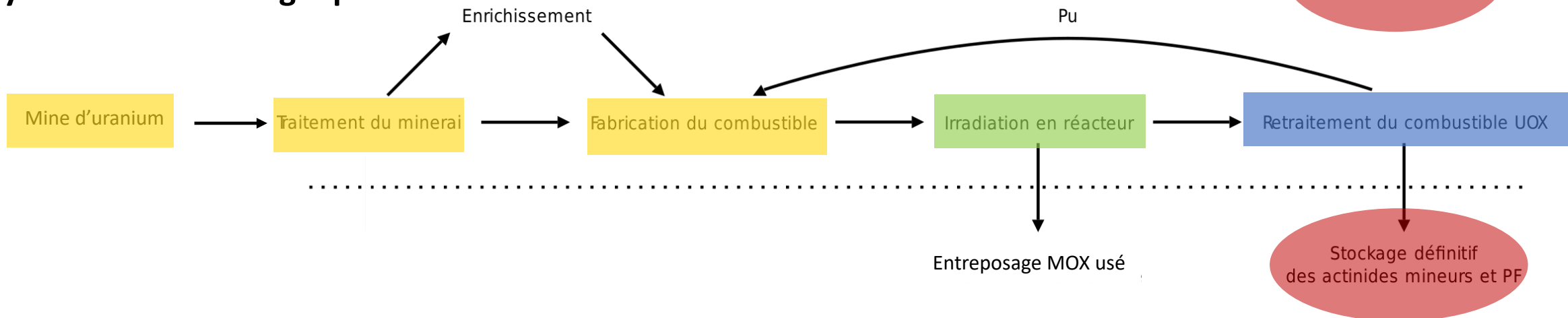
- 95% de l'uranium
- 1% de plutonium
- 4% PF+AM

Amont/Aval et cycle ouvert/fermé

❑ Cycle ouvert : stockage de tout le combustible utilisé :



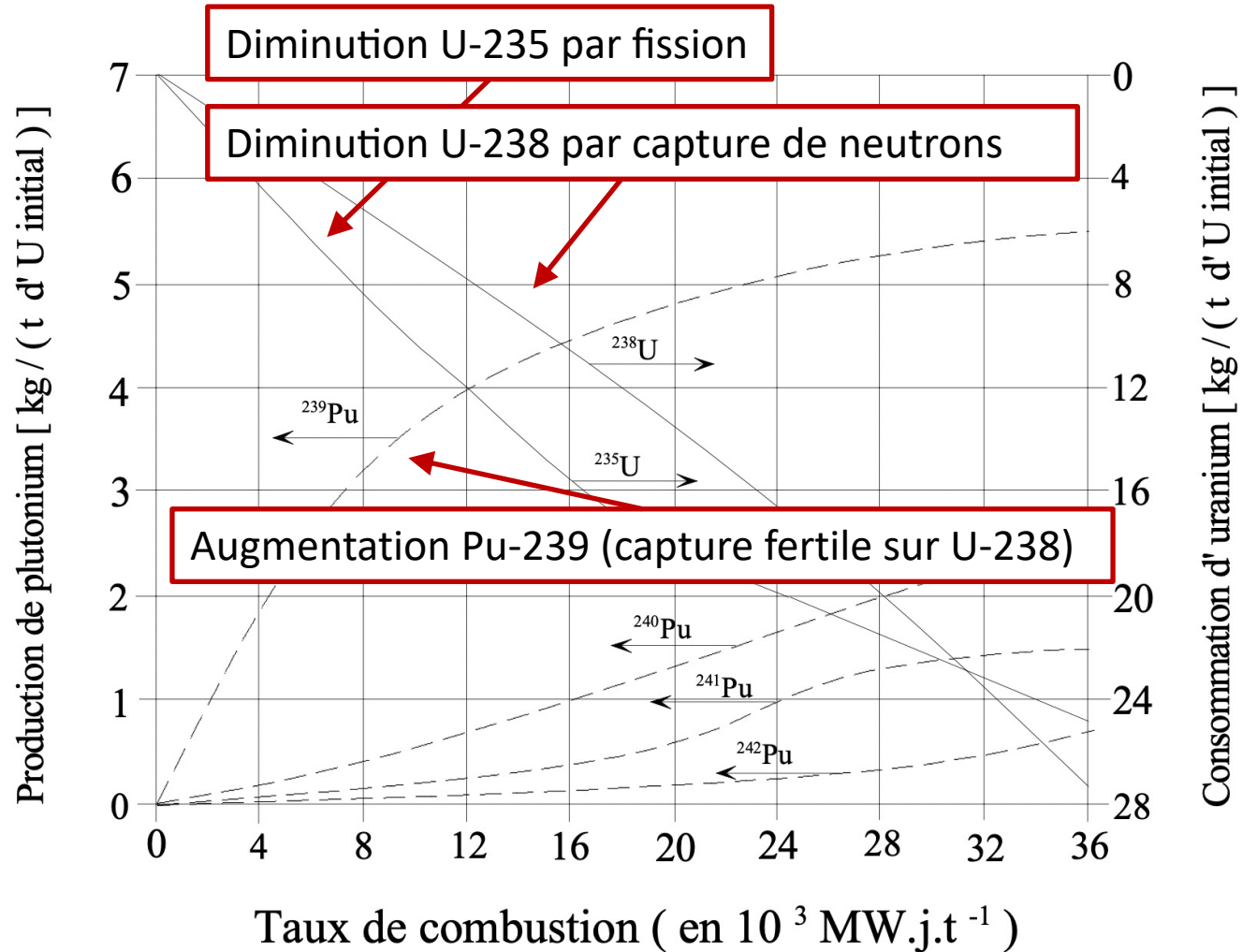
❑ Cycle fermé : stockage que des PF et AM :



Evolution du combustible dans un REP

- ❑ Les captures des neutrons par l'uranium-238 conduisent au plutonium-239.
- ❑ Absorption d'un n thermique par le Pu-239 :
 - Fission : $\sigma_f \sim 750$ barns.
 - Capture stérile pour produire du Pu-240 : $\sigma_c \sim 270$ barns
- ❑ Augmentation des PF dans le combustible:
- ❑ On utilise le **taux de combustion** ou burn-up:

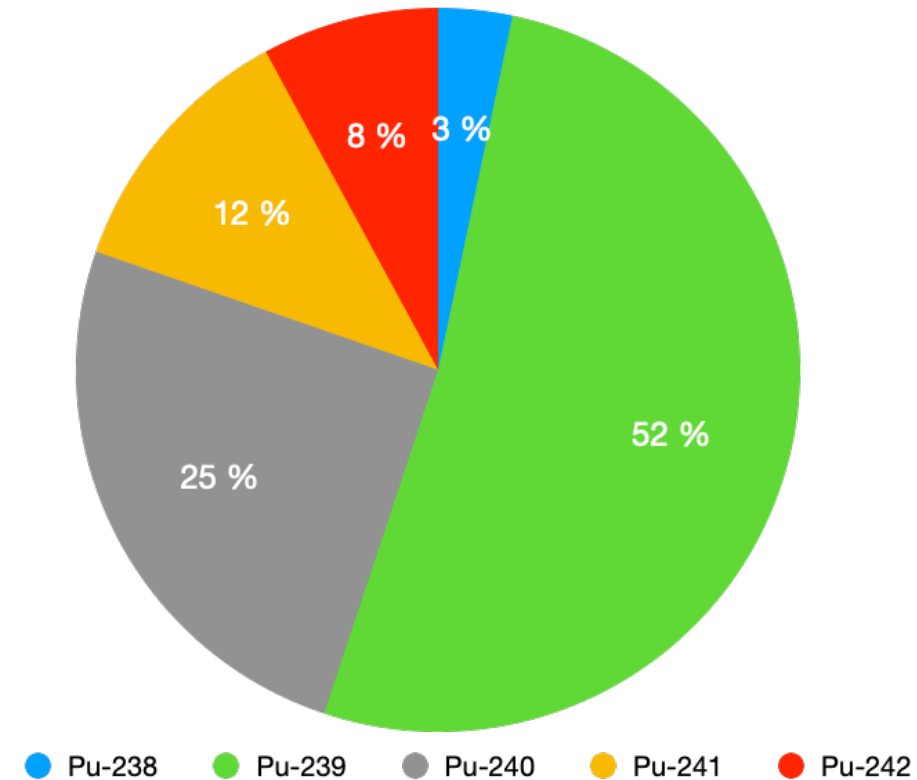
taux de combustion = énergie produite par le combustible par unité de masse initiale des noyaux lourds (uranium, plutonium), exprimé en Mégawatt-jour par tonne.



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

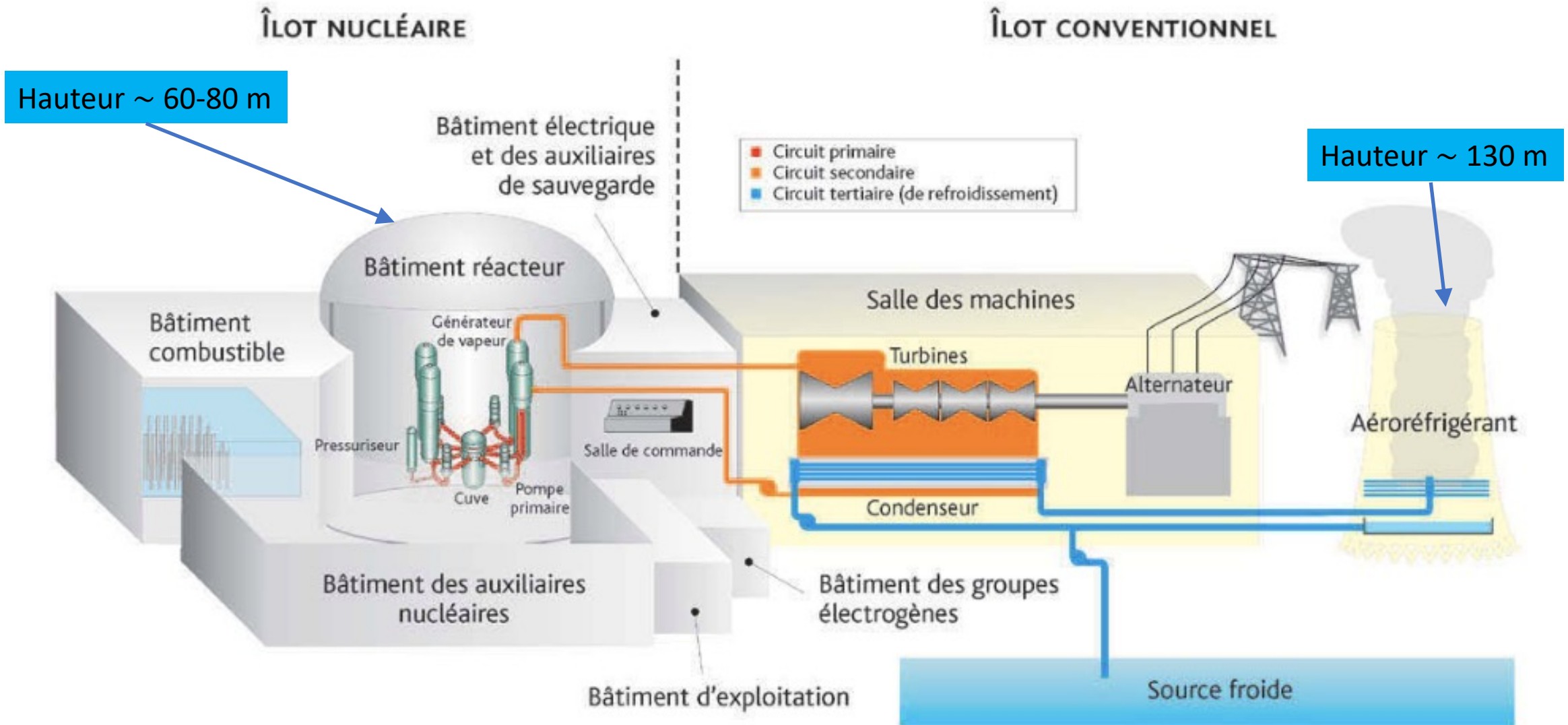


Les deux voies possibles: RNR et RNT

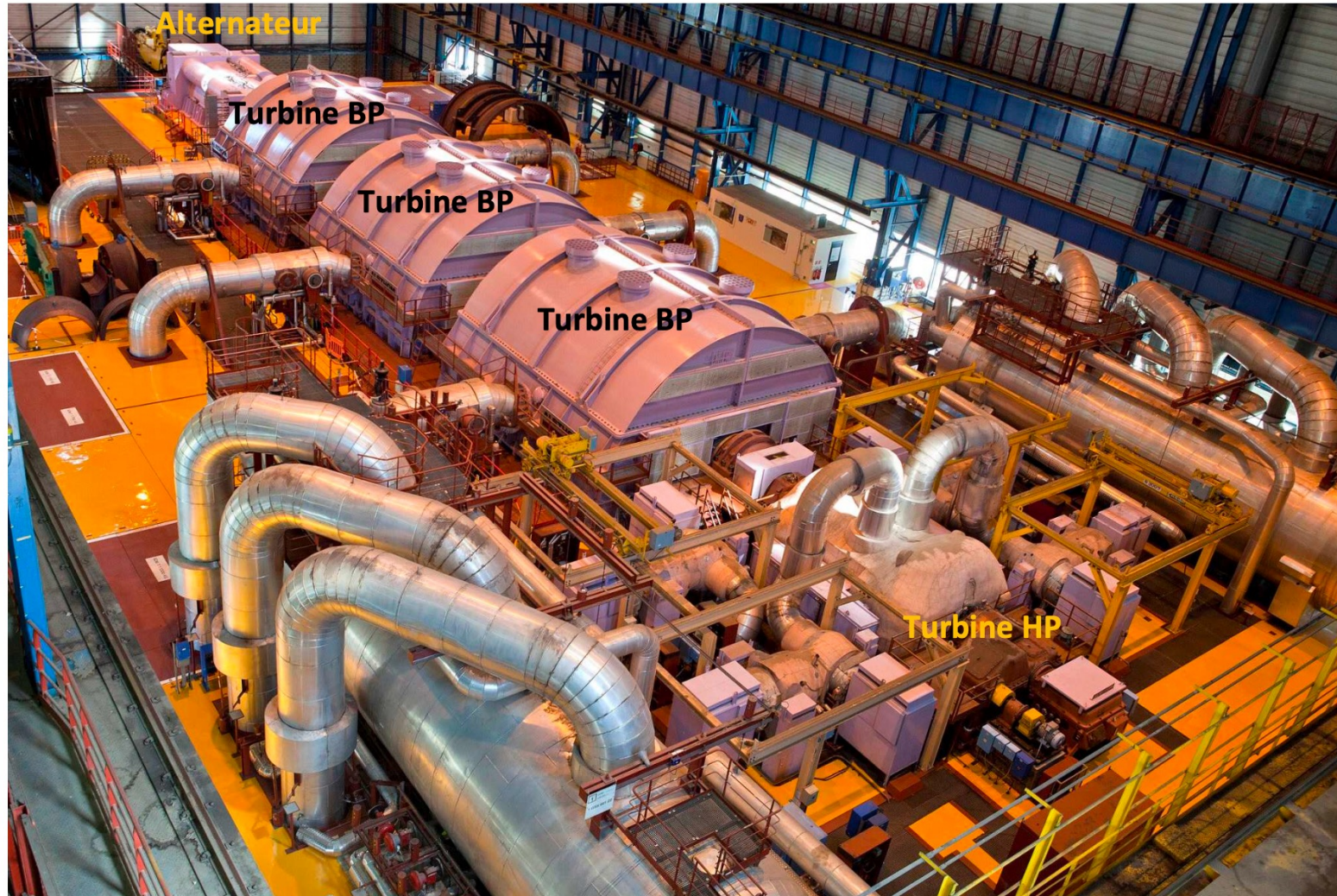
- ❑ La voie de l'uranium enrichi et des neutrons rapides: **les réacteurs à neutrons rapides RNR**: les neutrons sont utilisés directement lorsqu'ils sont produits par la fission.
- ❑ La voie de l'uranium peu enrichi et des neutrons thermiques: **les réacteurs à neutrons thermiques RNT**: les neutrons sont utilisés aux énergies thermiques et doivent donc être ralentis en franchissant les résonnances.
- ❑ Ces deux voies furent développées par la France la première dans Phénix et Superphénix et la seconde dans les REP actuellement en fonctionnement.
- ❑ Ces deux voies peuvent être appelées **filières de réacteurs**.
- ❑ Un cœur de réacteur est composé:
 - un combustible contenant des noyaux fissiles,
 - un fluide caloporteur permettant l'extraction de l'énergie produite par la fission,
 - pour les RNT, un modérateur contenant des noyaux légers destinés au ralentissement des neutrons,
 - des structures métalliques qui permettent la tenue mécanique de l'ensemble et la séparation des différents milieux.

□ La centrale et le réacteur

Vue d'ensemble



Salle des machines

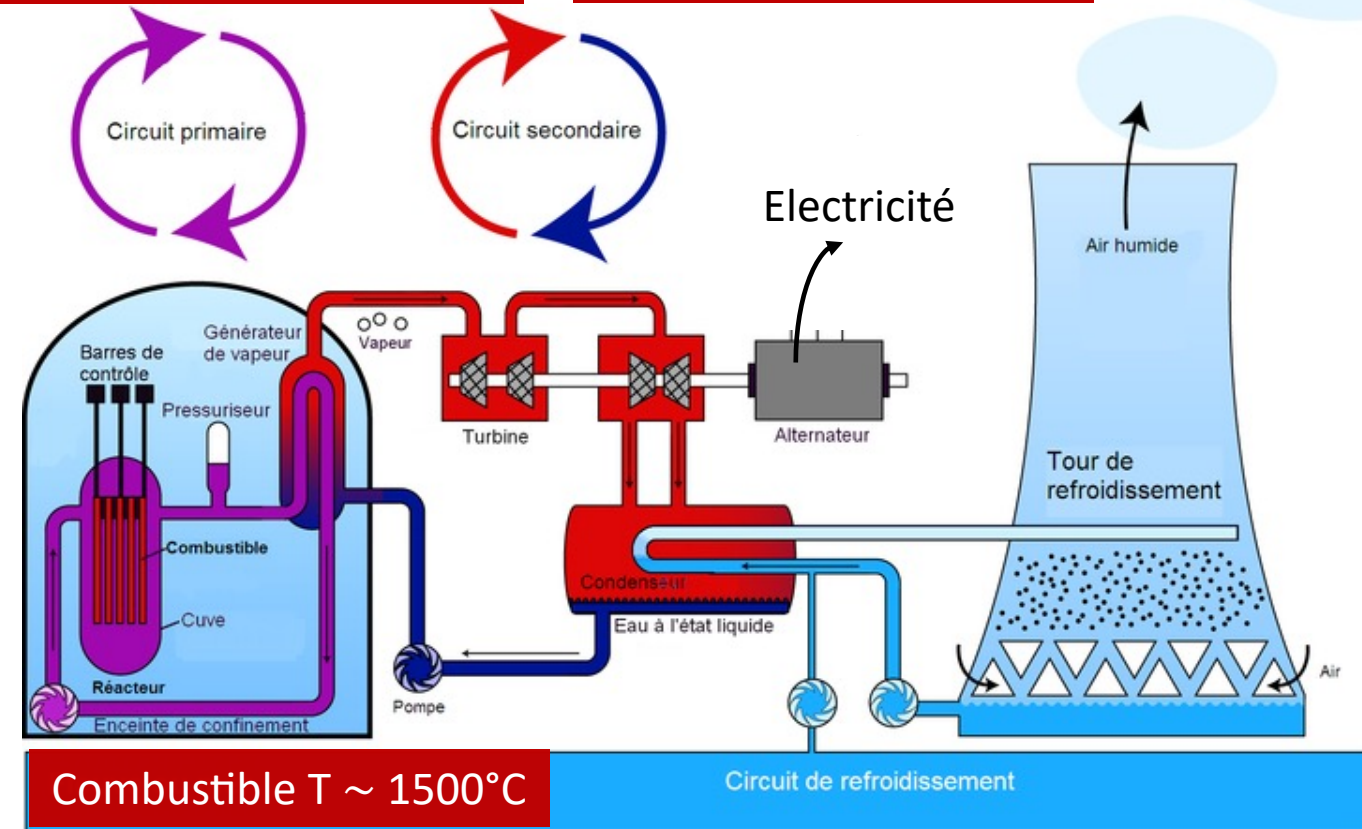


(Source J.F. Noal EDF)

Une centrale nucléaire

Circuit primaire
 Entrée cœur $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Sortie cœur $T \sim 320^\circ\text{C}$
 $P \sim 155$ bars

Circuit secondaire
 Sortie GV $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Condenseur $T \sim 20\text{-}30^\circ\text{C}$
 $P \sim 80$ bars



- ❑ 3 circuits indépendants
- ❑ Beaucoup d'autres systèmes :
 - Contrôle-commande et instrumentation
 - Circuits fluides (purification, borication,...)
 - Circuits électriques
 - Bâtiments (BR, BK, BAN...)
- ❑ Sûreté : 3 fonctions de sûreté
 - Stabilité de la réactivité (criticité)
 - Confinement
 - Refroidissement
- ❑ Basée sur la défense en profondeur
- ❑ 3 barrières de sûreté :
 - La gaine de combustible
 - Le circuit primaire
 - L'enceinte de confinement

Le crayon combustible

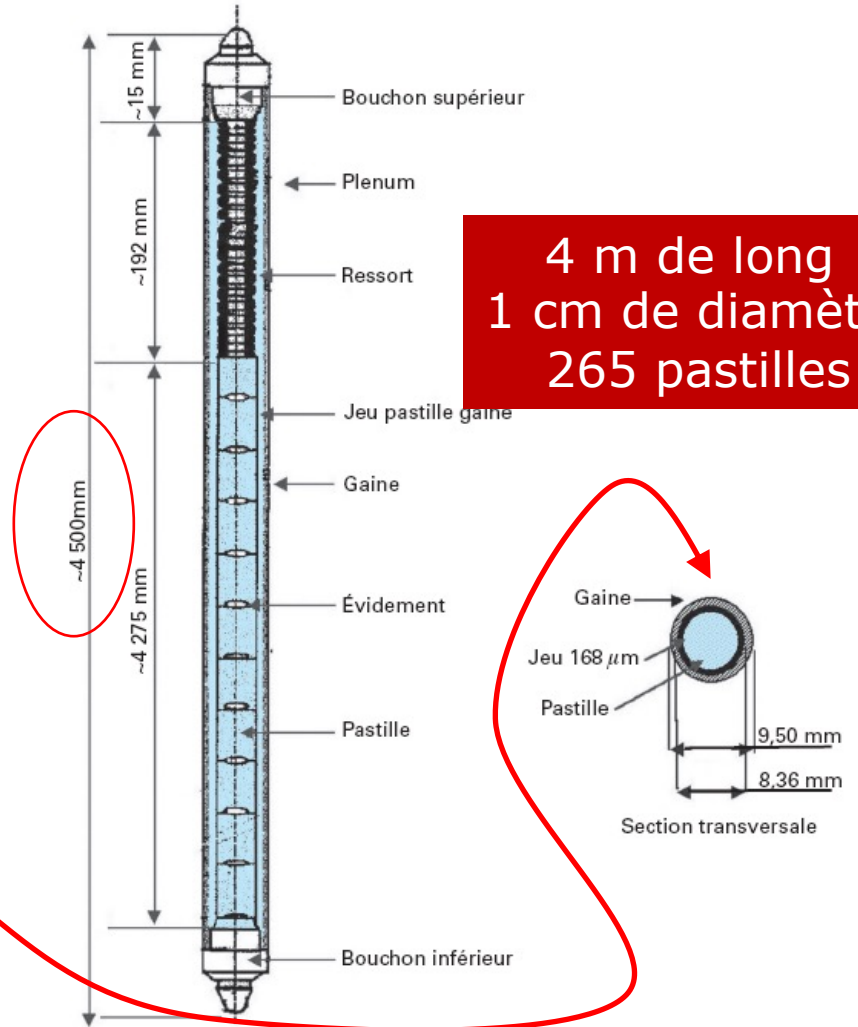


Pastille
7g, avec $h > d$
1 cm de long
1 cm de diamètre



~ 100 tonnes d'U
~ 16 millions de pastilles

1^{ère} barrière de sûreté:
gaines des éléments combustibles
en alliage de zirconium.



4 m de long
1 cm de diamètre
265 pastilles

Assemblage combustible

- ❑ ~ 200 assemblages de 264 crayons
 - Palier 900 : 157;
 - Palier 1300 : 193;
 - Palier N4 : 205;
 - EPR : 241.

- ❑ Poids total : 607 kg – 765 kg

- ❑ Masse totale de combustible = 500 kg

- ❑ Combustible possible:
 - UNE : uranium naturel enrichi UO_2
 - MOX : mélange oxydes UO_2 et PuO_2
 - URE : uranium de retraitement enrichi UO_2 (utilisé par EDF jusqu'en 2013, possible reprise)

(Source CEA, EdF, Areva)



La cuve

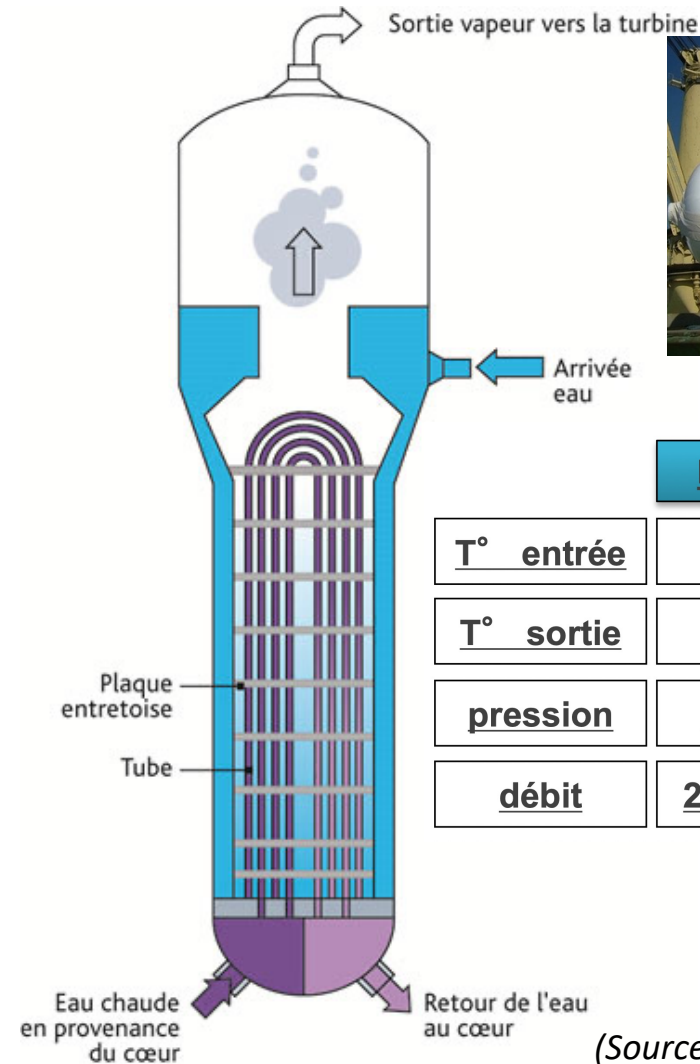
- ❑ La cuve est une enceinte en acier spécialement traité, étanche renfermant le cœur, les structure de support du cœur et les structures de guidage des grappes de contrôle.
- ❑ $H = 13,66 \text{ m}$, $D = 4,95 \text{ m}$, $e = 23 \text{ cm}$



(Source Framatome)

Le Générateur de Vapeur

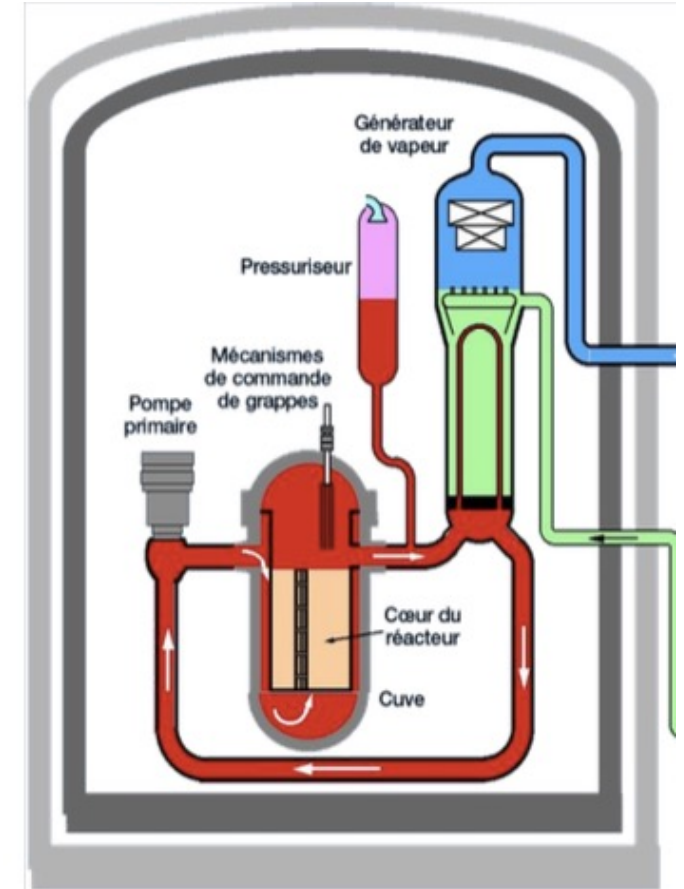
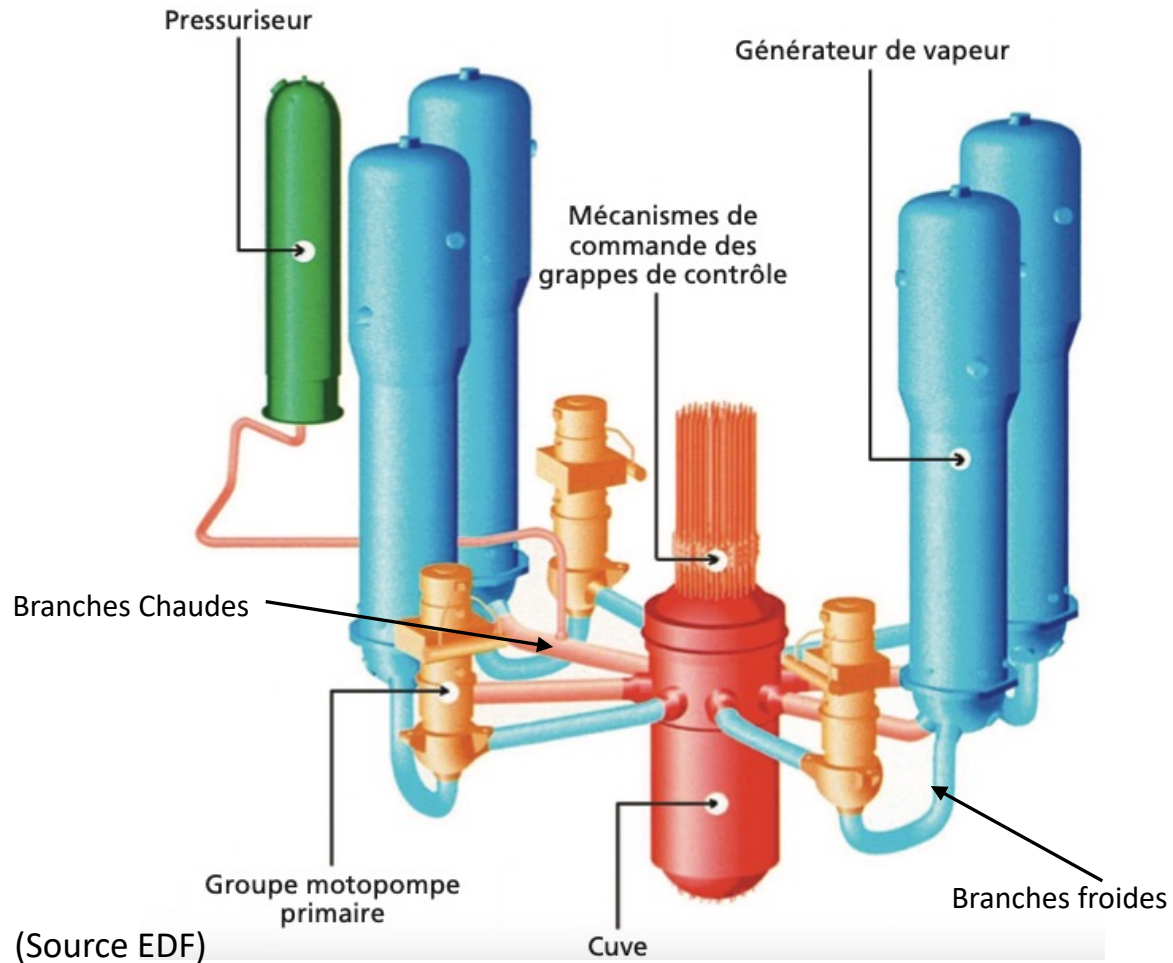
- ❑ Les générateurs de vapeur (GV) = échangeurs de chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire.
- ❑ Dimensions : hauteur ~ 20 m; D ~ 4 m; M ~ 400 t.
- ❑ Faisceau tubulaire = Entre 3500 et 5600 tubes à l'intérieur desquels circule l'eau du circuit primaire (à 320°C et haute pression 155 bars). Surface d'échange ~5 000 m² par GV.
- ❑ L'eau du circuit secondaire circule le long des tubes en se transformant progressivement en vapeur au contact des tubes chauffés par l'eau du circuit primaire.
- ❑ **Rôle** : Produire de la vapeur de bonne qualité pour la turbine.
- ❑ **Sûreté**:
 - Evacuer la chaleur produite par le réacteur → Refroidir le circuit primaire
 - Barrière entre le circuit primaire et le circuit secondaire.



	Primaire	Secondaire
T° entrée	324° C	230° C
T° sortie	289° C	285° C
pression	155 bar	70 bar
débit	22 890 t/h	1934 t/h

(Source IRSN)

Circuit primaire REP



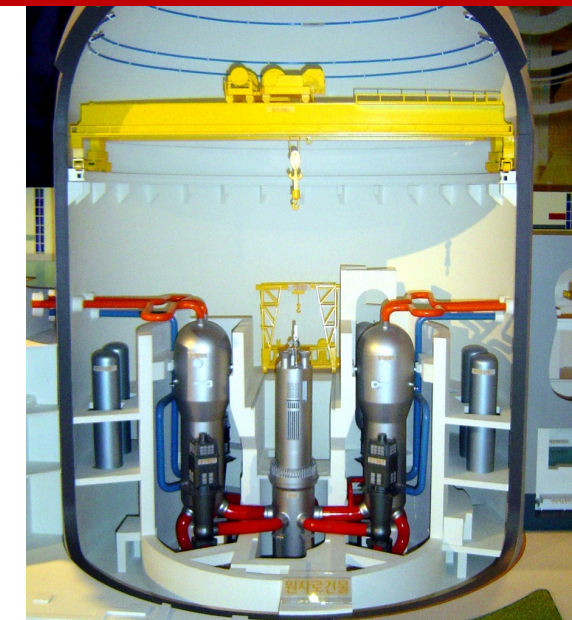
2^{ème} barrière de sûreté :
le circuit primaire principal (CPP)

Enceinte de confinement

- ❑ Bâtiment cylindrique en béton (précontraint, armé), surmonté d'un dôme.
- ❑ Fonction de résister aux accidents (origine interne) aussi bien qu'aux agressions externes.
- ❑ 900 MWe, paroi unique en béton précontraint :
 - $D=37\text{m}$; $H=60\text{m}$ $e=90\text{cm}$; épaisseur dôme= 80cm ; peau métallique de 6 cm .
- ❑ 1300, 1450 MWe : double paroi
 - Paroi interne en béton précontraint : $e=120\text{ cm}$ pour le cylindre et $e=82\text{ cm}$ pour le dôme. Fonction = résister aux conditions de pression et de température internes en assurant une "relative" étanchéité.
 - Paroi externe en béton armé : $e=55\text{ cm}$ pour le cylindre et $e=40\text{ cm}$ pour le dôme. Elle a pour fonction de créer l'espace annulaire et d'apporter la protection nécessaire vis-à-vis des agressions externes.
- ❑ EPR :
 - Deux parois en béton avec un système de confinement dynamique.
 - Peau d'étanchéité métallique dans la paroi interne.



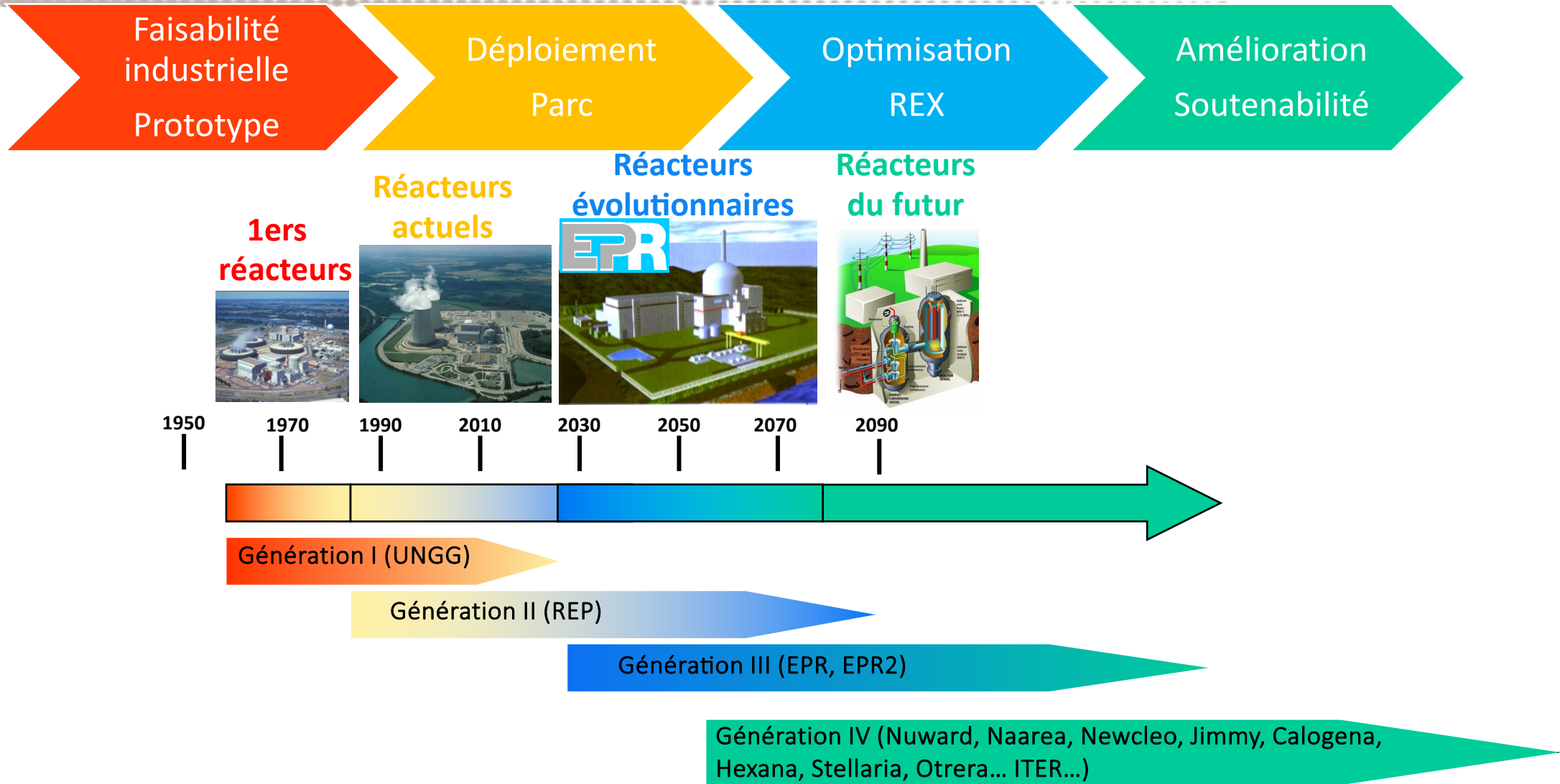
3^{ème} barrière de sûreté
Enceinte de confinement



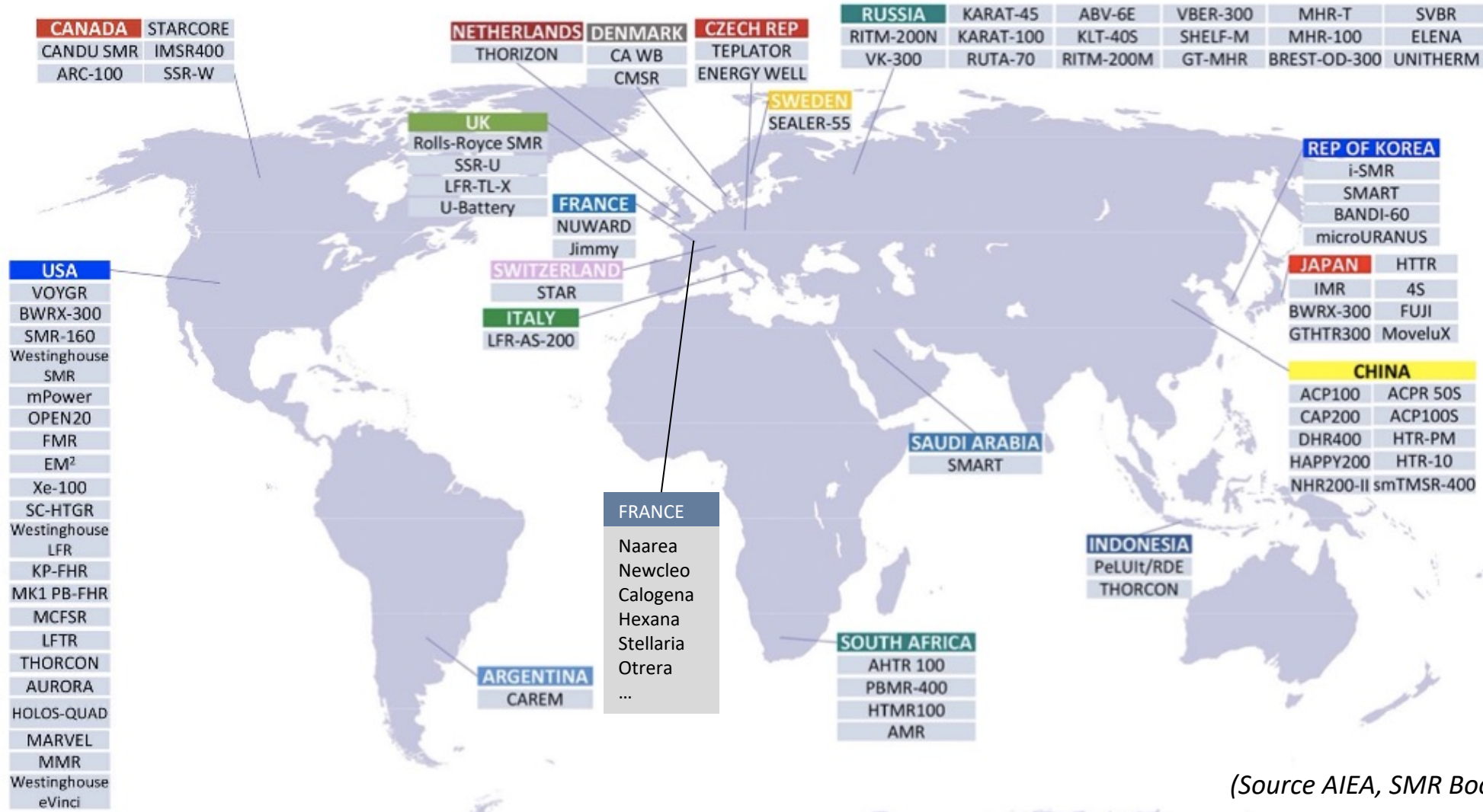
3. Le futur :

- a. Le futur proche**
- b. Le futur plus lointain**
- c. Les scénarios**

Les différentes générations de réacteurs

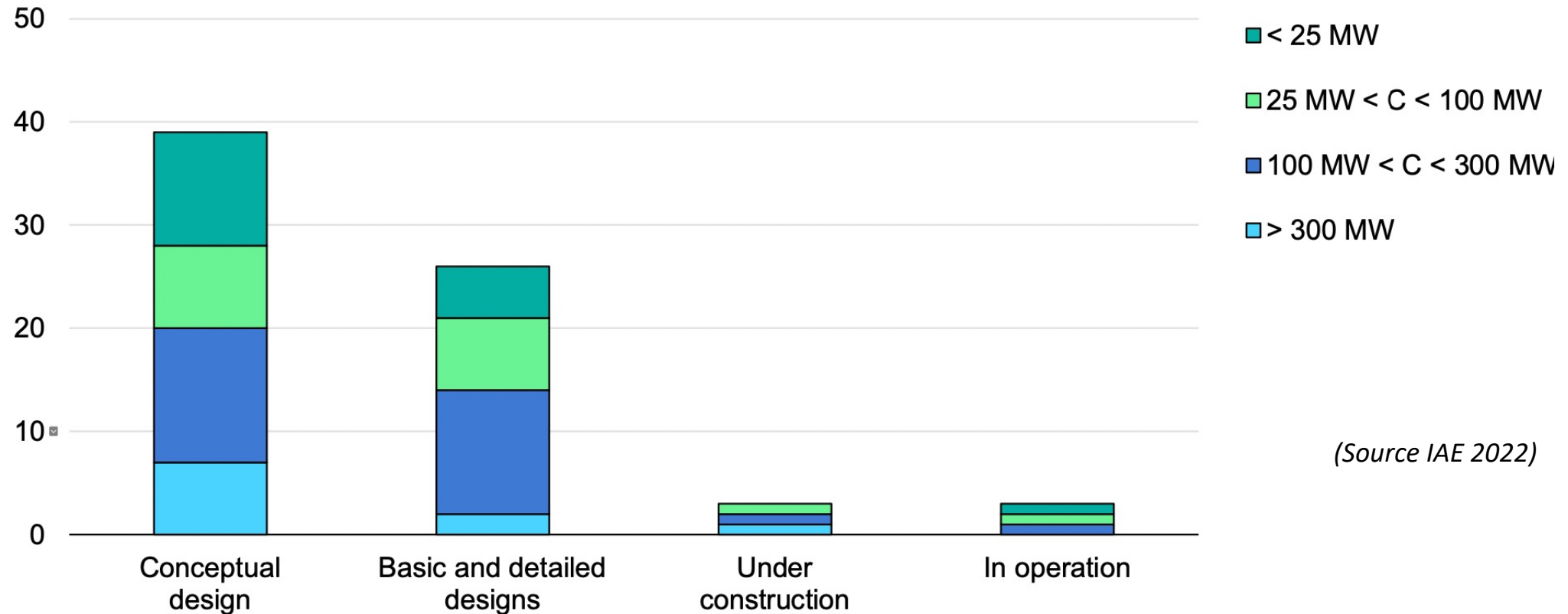


Les projets SMR/AMR dans le monde en 2023



(Source AIEA, SMR Booklet 2022)

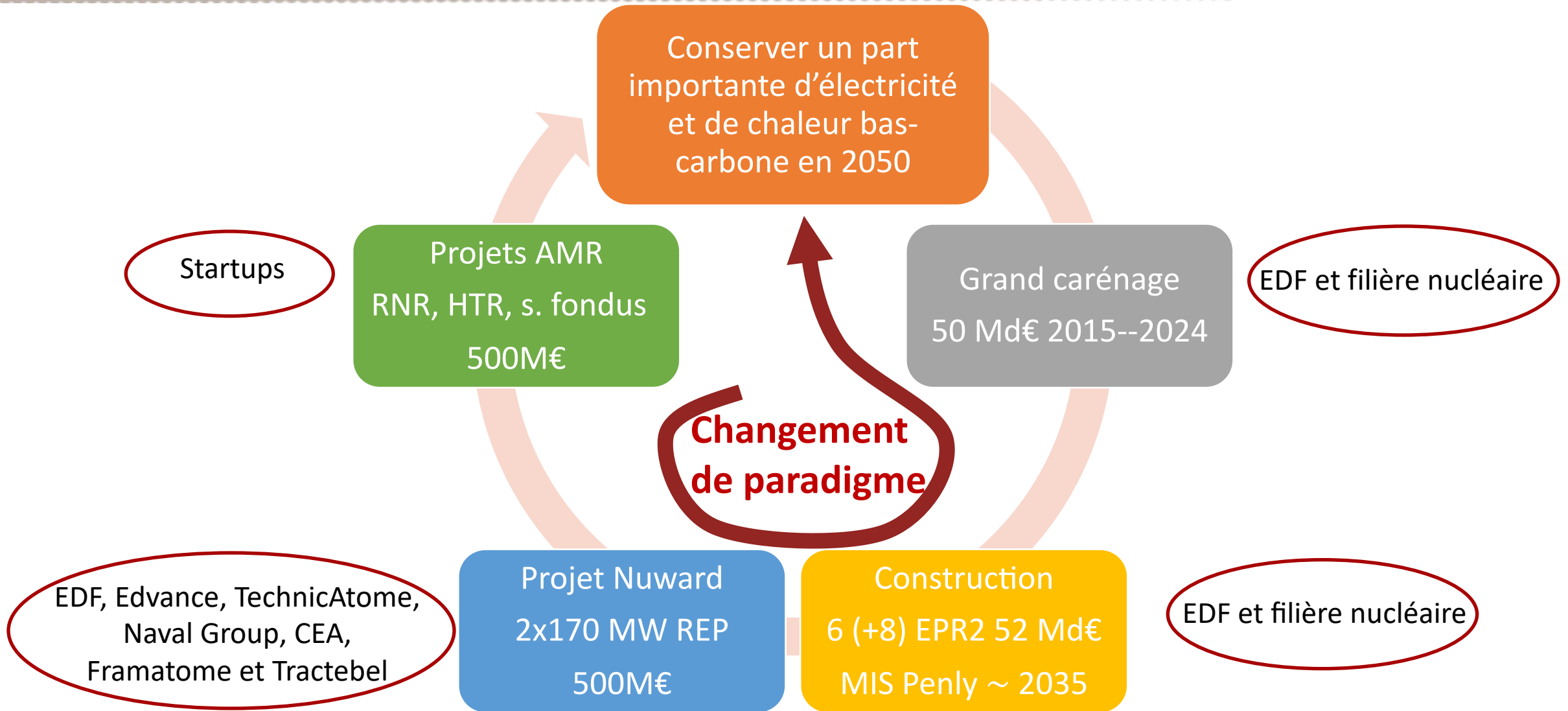
Les SMR/AMR dans le monde : où en sont-ils?



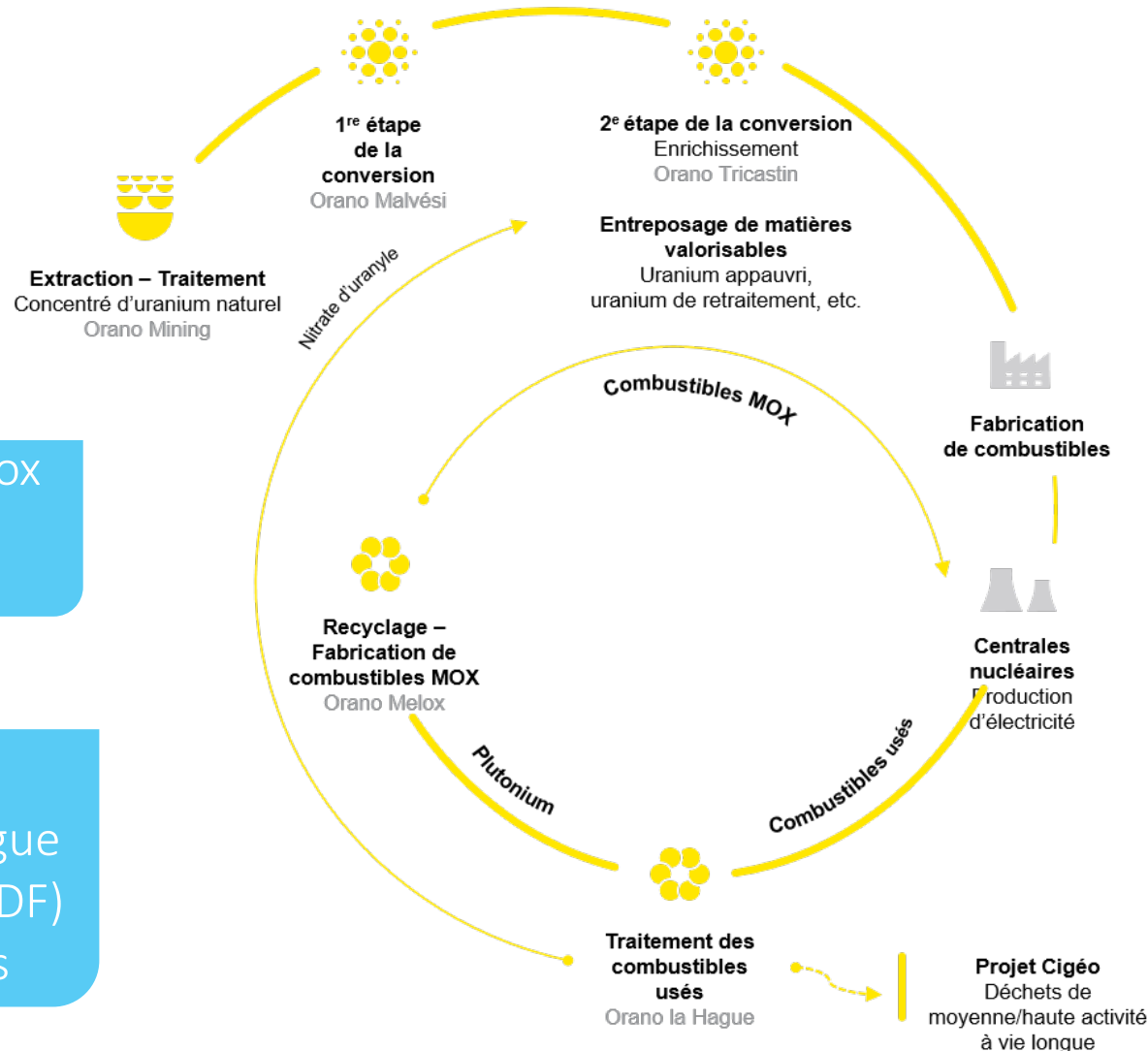
(Source IAE 2022)

Notes: C = electrical capacity.

Les 4 grands projets en France



Les grands projets du cycle



Jouvence
Malvesi 300
millions d'euros

Projet Relançons Melox
mi-2021
84 Millions d'euros

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

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

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

Arrêt sur le grand carénage

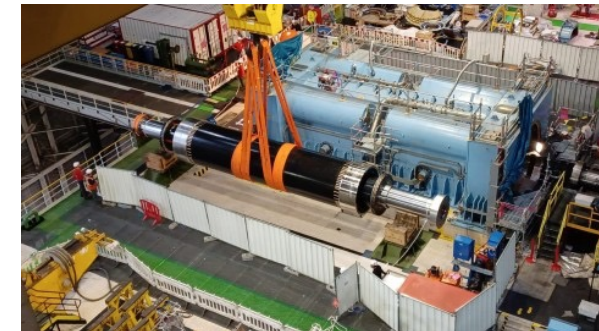
- ❑ La maintenance « normale », réglementée dans un programme général, contrôlé par l'ASN.
- ❑ Réexamen périodique = exigé par le code de l'environnement, tous les 10 ans, validé par l'ASN.
- ❑ Grand Carénage = programme industriel de renforcement et des installations, étudié par EDF depuis 2008.

➔ remplacement de matériels, intégration des mesures post-Fukushima et amélioration du niveau de sûreté.

- ❑ **Niveau d'investissement humain et comparable à la construction.**
- ❑ Période 2022-2030 et un budget d'environ 50 Milliards d'euros.
- ❑ Mise en œuvre comporte des aléas comme tout programme industriel.
- ❑ Résultat final : les centrales du parc seront au même niveau de sûreté que l'EPR.

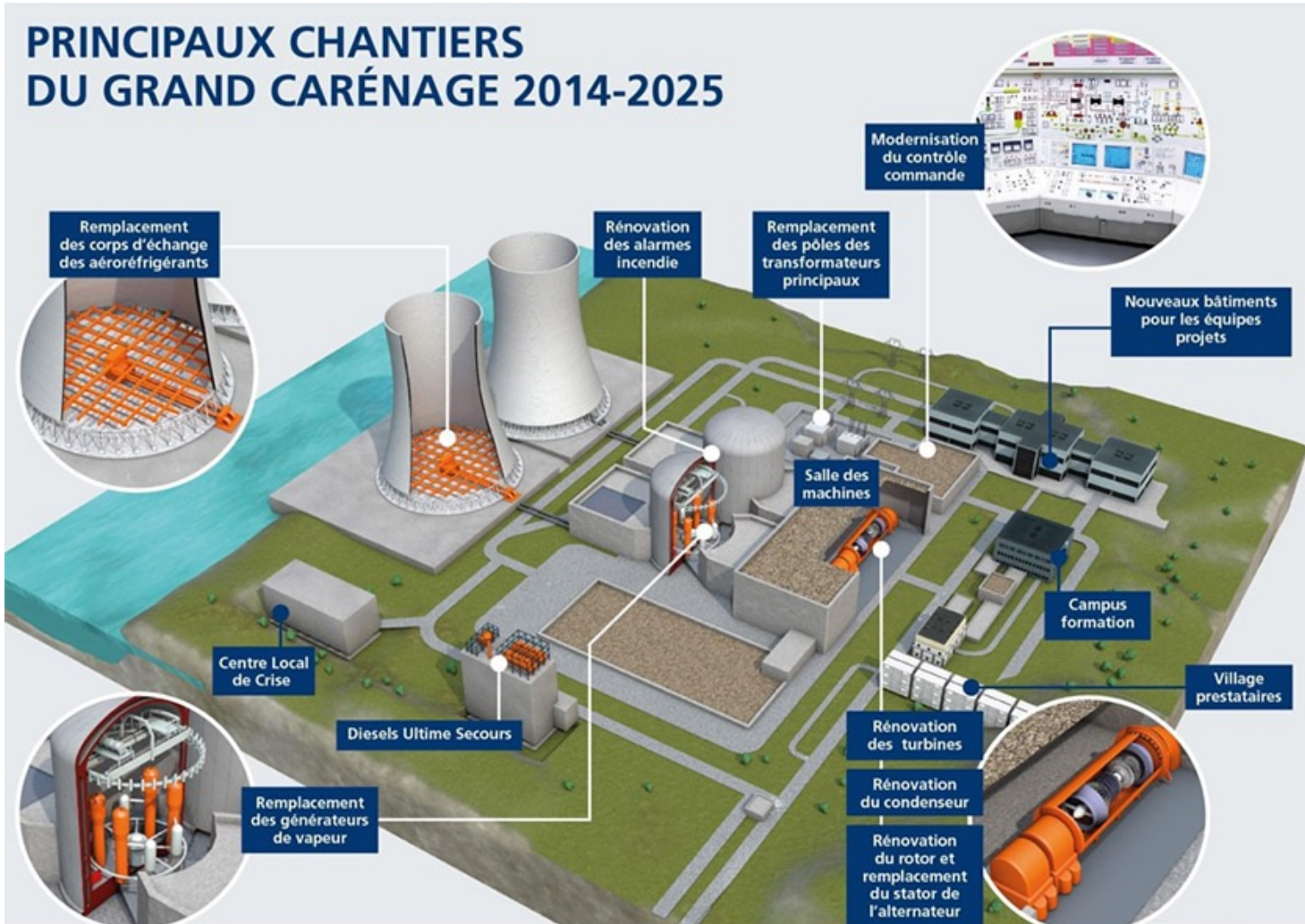


(Source EDF et IRSN)



Liste des chantiers du GC

PRINCIPAUX CHANTIERS DU GRAND CARÉNAGE 2014-2025



(Source EDF)

- Modernisation du contrôle-commande
- Remplacement des GV
- Remplacement du corps d'échange des aéroréfrigérants
- Rénovation groupe turbo-alternateur
- Rénovation condenseur
- Ajout Diesel Ultime secours
- Ajout centre local de crise...
- Exemple: 30 tranches du palier 900 MW sur 34 dont le GV a été changé.

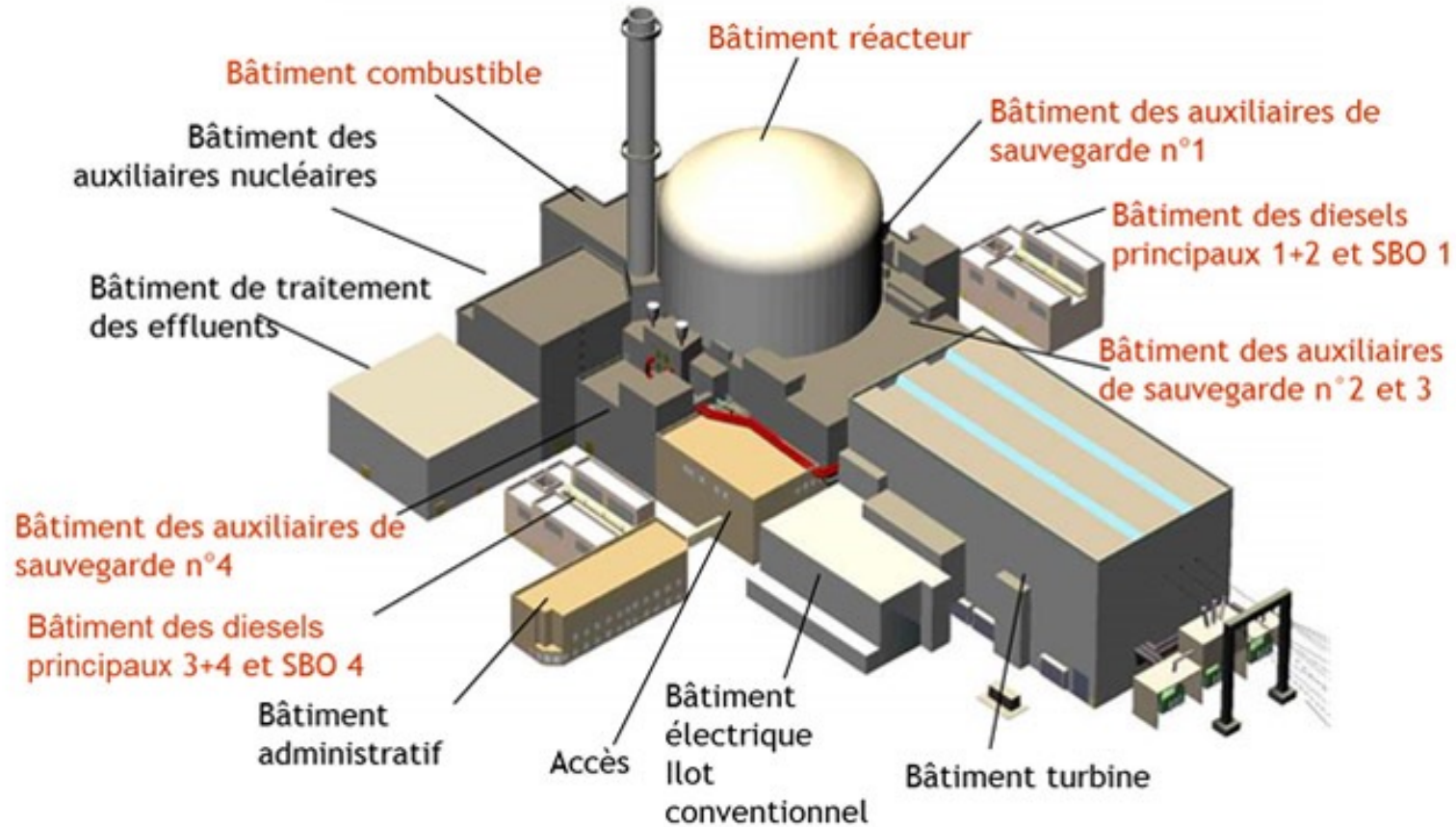
La génération 3: EPR

- ❑ 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)

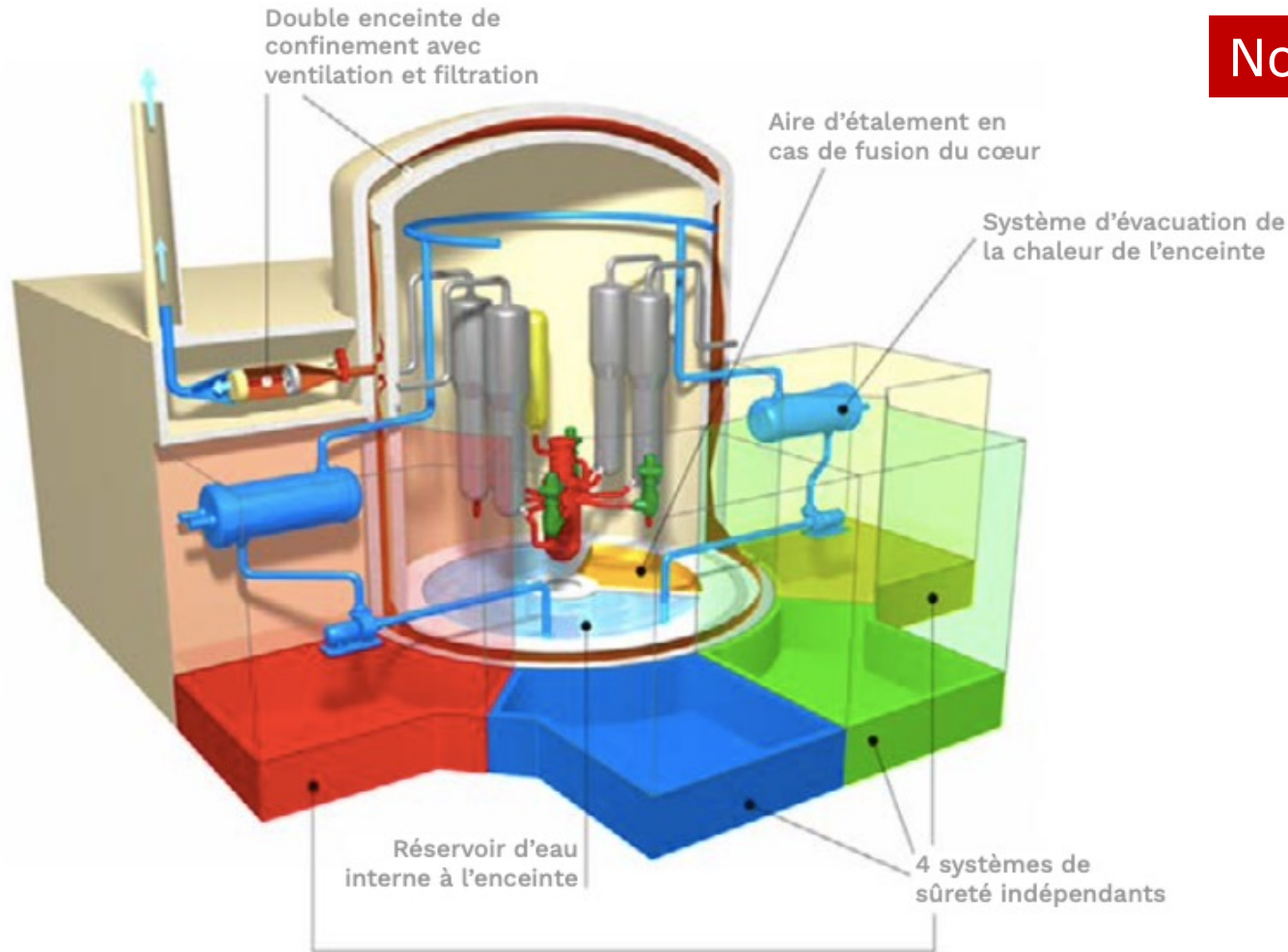
Objectifs de sûreté EPR



(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).



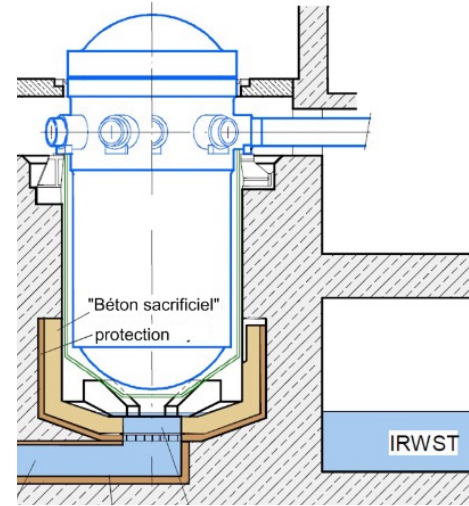
(Source EDF)



EPR : Perte du refroidissement

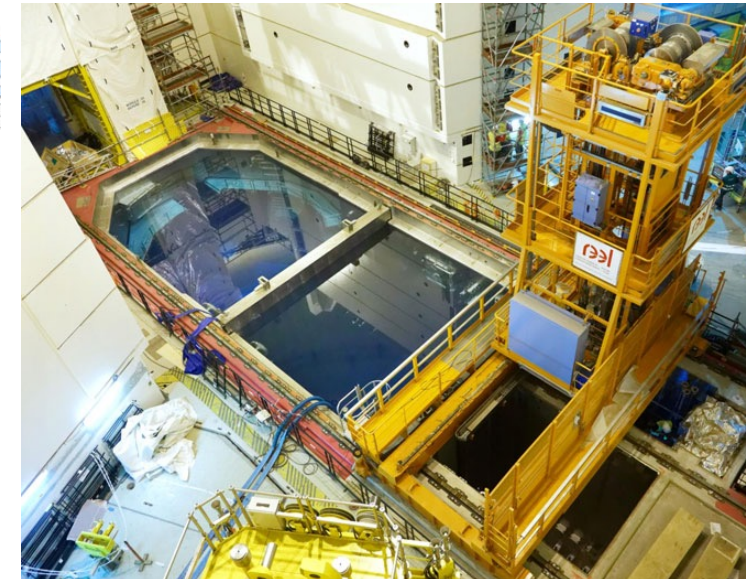
❑ Refroidissement du cœur :

- 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).



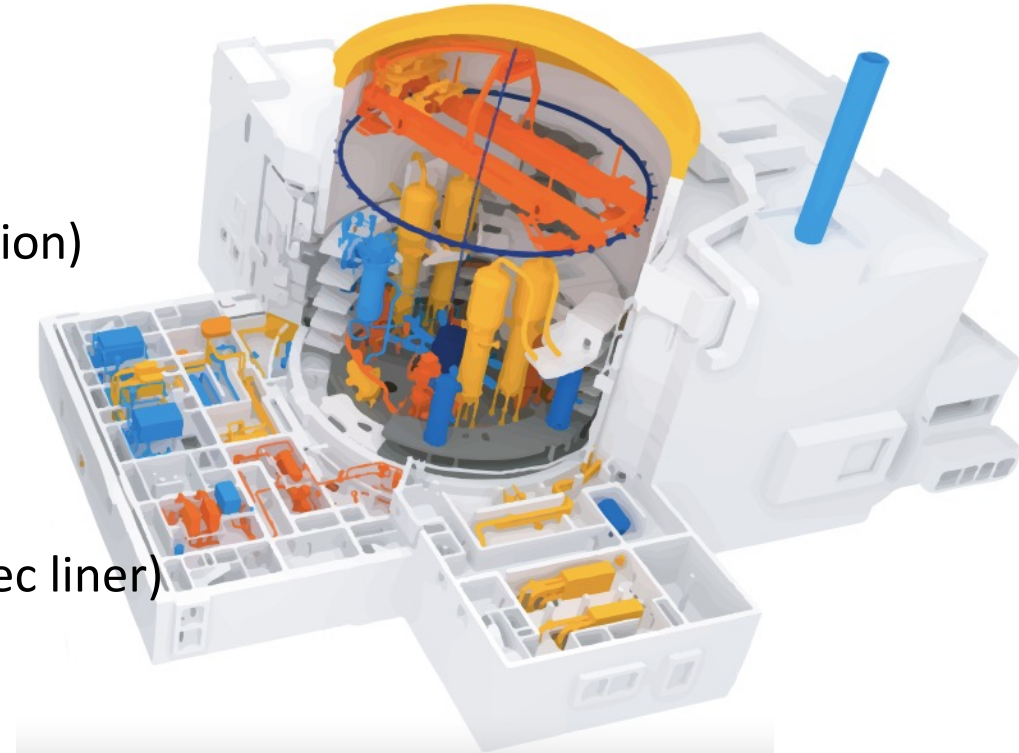
❑ Refroidissement piscine :

- 2 systèmes de refroidissement redondants + 1 dispositif diversifié.

L'EPR2

- ❑ Version optimisée de l'EPR.
- ❑ L'EPR2 conserve les atouts de l'EPR :
 - Puissance = 1650 MWe
 - Utilisation en UO2 ou MOX (30%)
 - hautes normes de sûreté (post Fukushima intégré à la conception)
 - Suivi de charge exigé plus important pour compenser les ENR
- ❑ Prise en compte du REX des EPR dans le monde et du parc :
 - design simplifié : meilleure constructibilité (simple enceinte avec liner)
 - 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

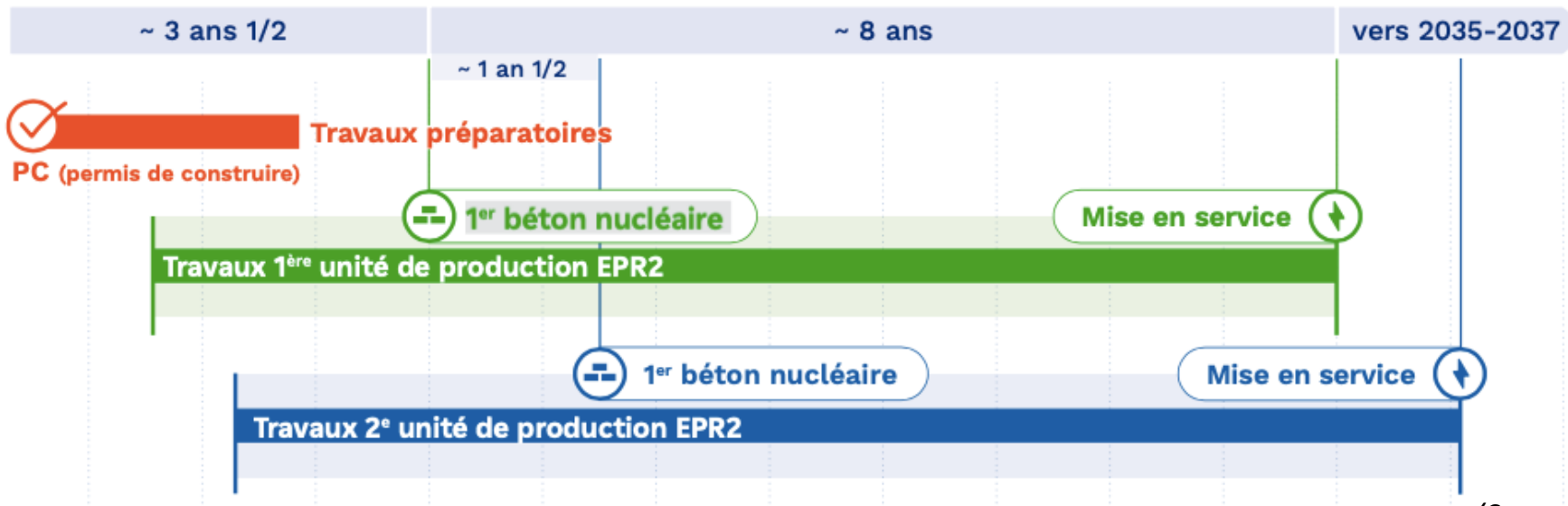
(Source Dossier EPR2, EDF CNDP)



Le planning

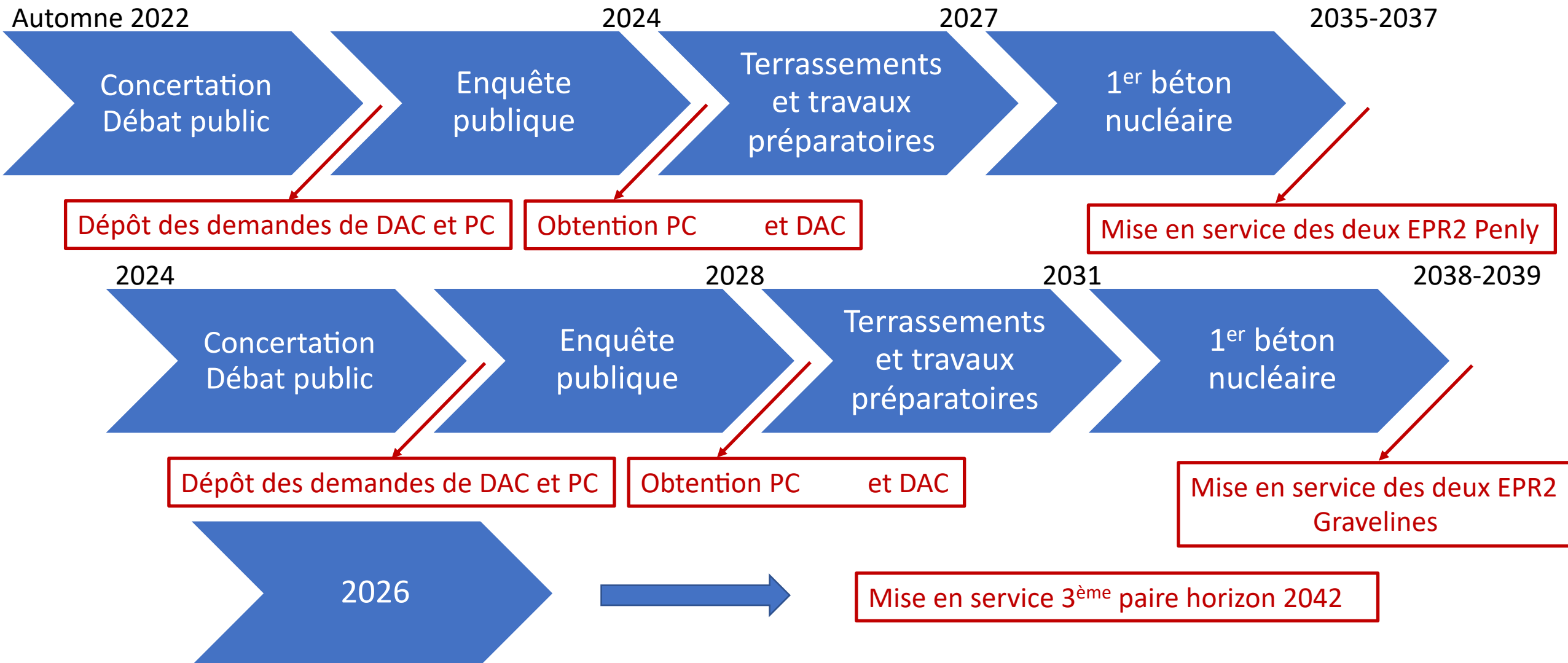
- ❑ Programme de 3 paires de réacteurs avec une option de 4 autres.
- ❑ Cout 6 paires = 51,7 milliards d'euros
- ❑ 18 mois entre deux réacteurs d'une même paire et 4 ans entre chaque paires.
- ❑ Construction 1 réacteur = 94 mois

PLANNING PRÉVISIONNEL DU CHANTIER



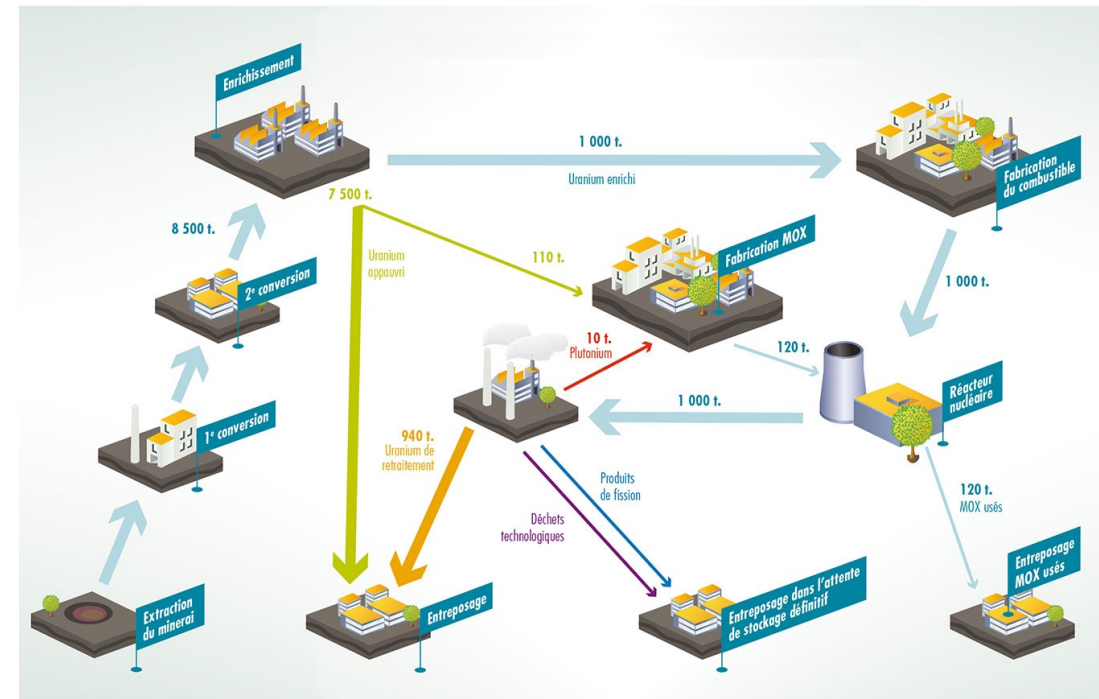
(Source Dossier EPR2/CNDP)

Le planning des trois paires EPR2



Flux de matières et déchets nucléaires

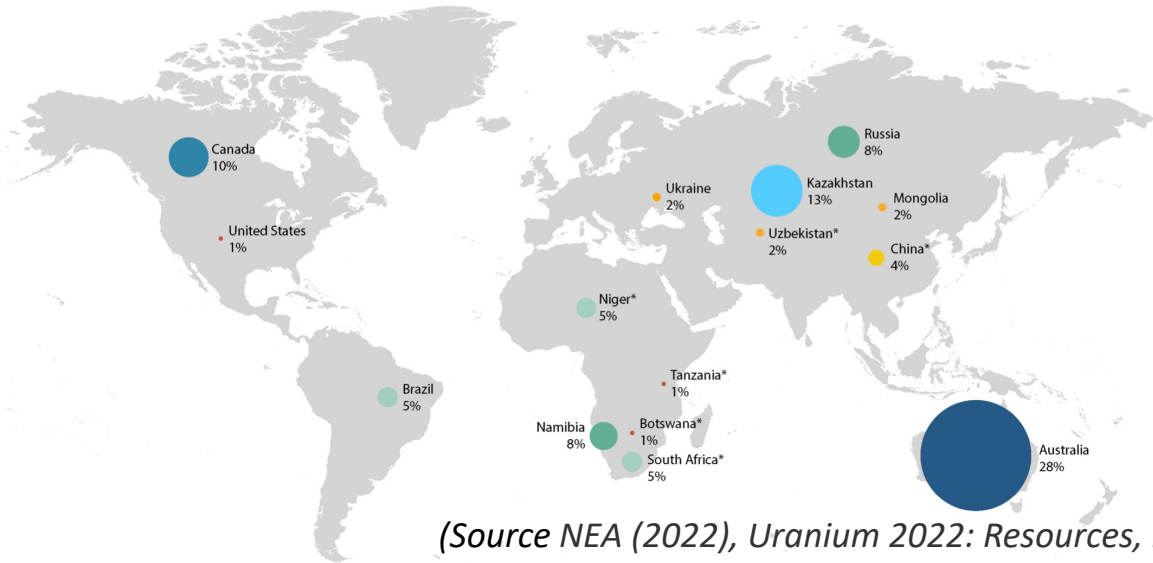
- ❑ Production annuelle de 400 TWh (= production annuelle du parc nucléaire français).
- ❑ 22 REP 900MWe chargés à 30% MOX.
- ❑ Combustible oxyde mélange : U-238 + 8-10 % Pu (moitié Pu-239).
- ❑ MOX \approx 10% de la puissance totale du parc.
- ❑ Le mono-recyclage du Pu \approx depuis 1980.
- ❑ Economie sur l'uranium naturel \approx 20% p/p cycle ouvert.
- ❑ Déchets finaux sans Pu \approx 99,54% du Pu récupéré.
- ❑ Entreposage des combustibles usés UO₂ stabilisé \approx 11 900 t fin 2019.
- ❑ Entreposage du combustible usé MOX qui augmente (130 t/an). Fin 2019 \approx 2 270 t.



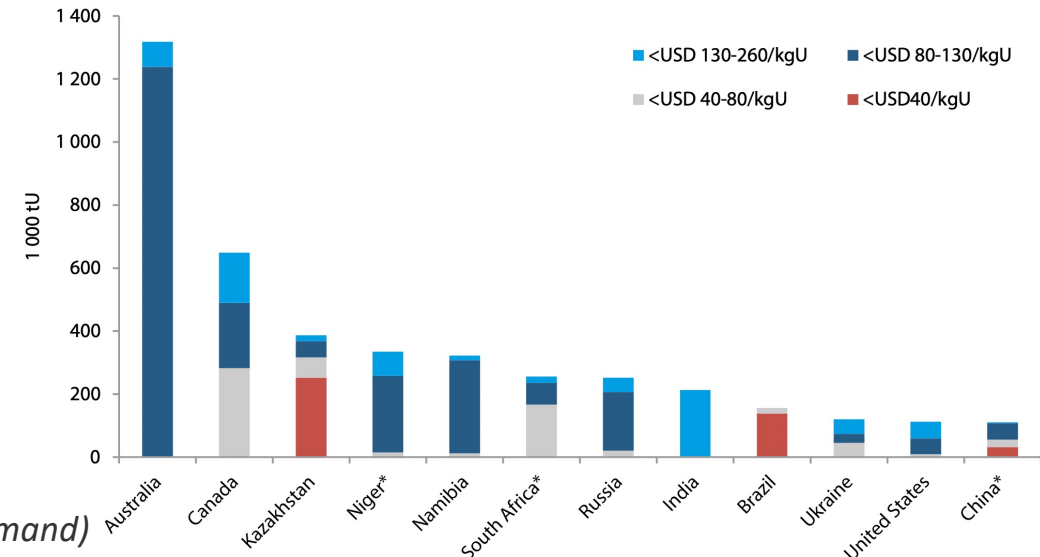
(Source : chiffres Andra 2021)

Ressources en uranium

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



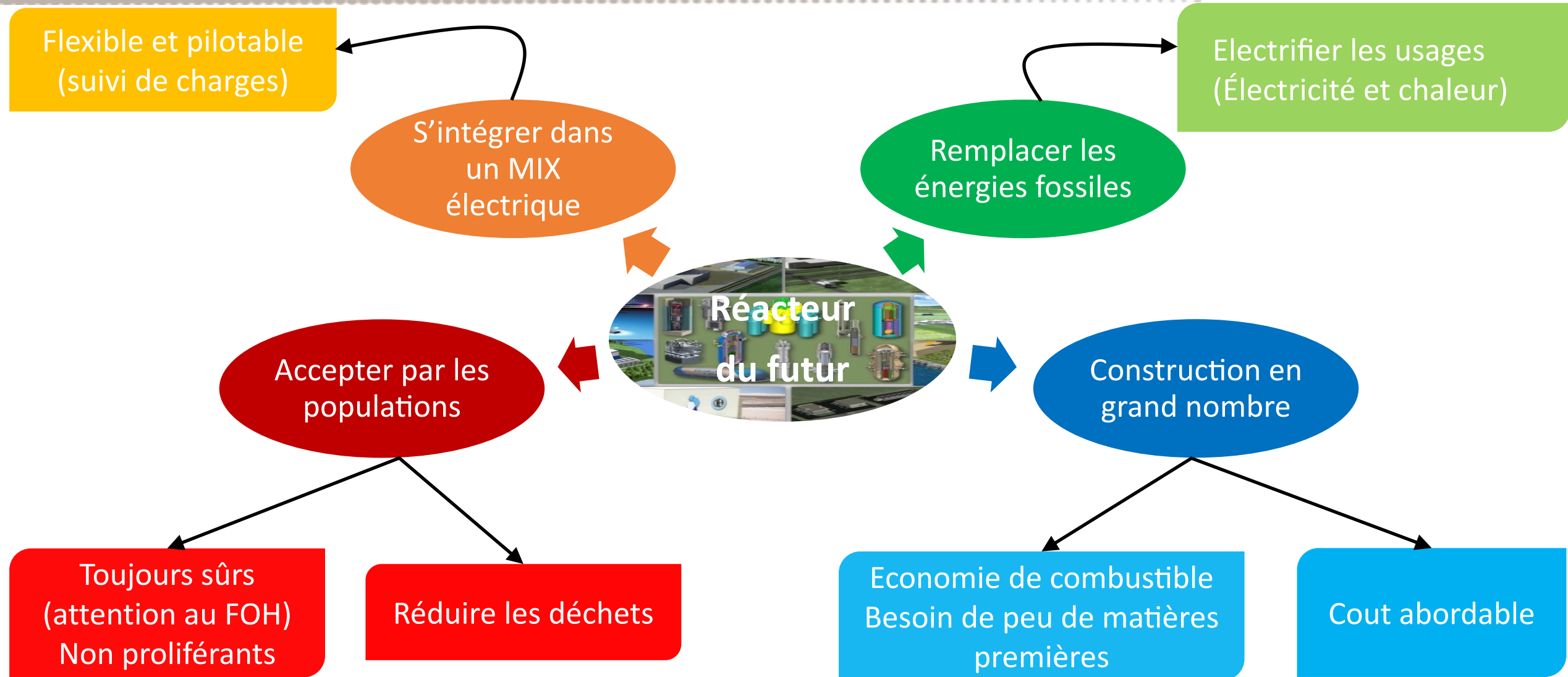
Répartition des ressources conventionnelles d'uranium récupérables raisonnablement



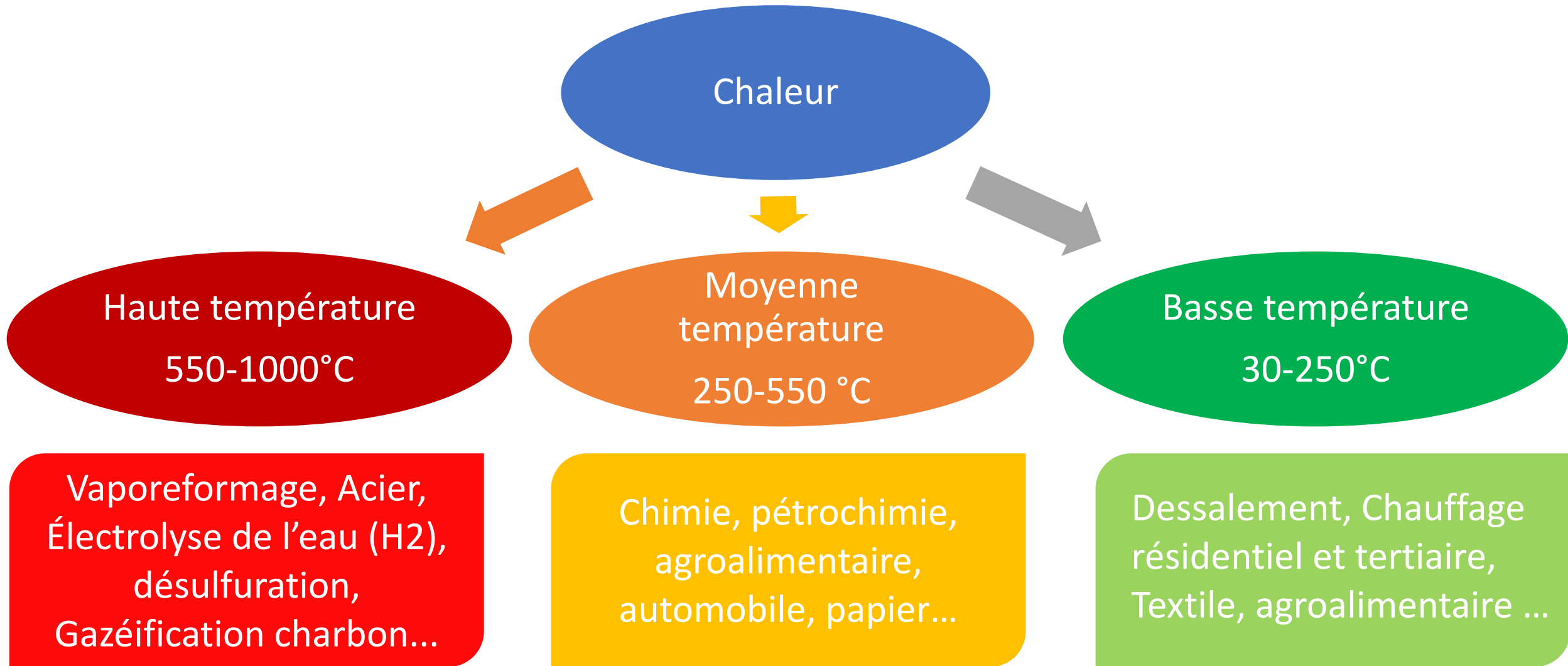
- Consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 tonnes par an)
- Bonne répartition des ressources conventionnelles -> permet facilement la diversification des fournisseurs
- Possibilité de stocks importants (à la différence des hydrocarbures l'uranium est non inflammable et très peu radioactif) : 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)

b. Le futur plus lointain

A quoi doit répondre un réacteur du futur?



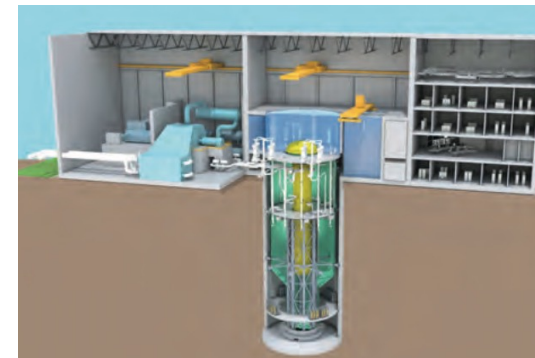
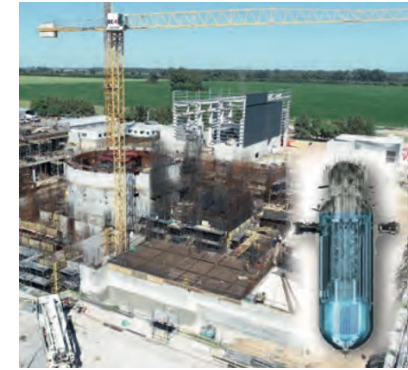
Le marché de la chaleur



Concepts du futur (SMR/AMR)

- ❑ Les concepts de réacteurs du futur sont tous à des stades de réflexion.
- ❑ Faible puissance (50-300 MWe) dont le coût < 1 milliard d'euros.
- ❑ Environ 70 concepts dont la moitié sont des REP et 1/3 des HTR.
- ❑ Trois piliers : modularité, effet de série et simplification.
- ❑ La plupart des concepts ont été pensés dans les années 60-70.
- ❑ Faire plus petit (SMR/PRM) ou faire autrement (AMR).
- ❑ Grâce aux développements technologiques, ils pourraient revenir sur le devant de la scène.

- ❑ 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 : MSR, RNR
 - Brûleur des déchets: MSR, RNR



(Source AIEA)

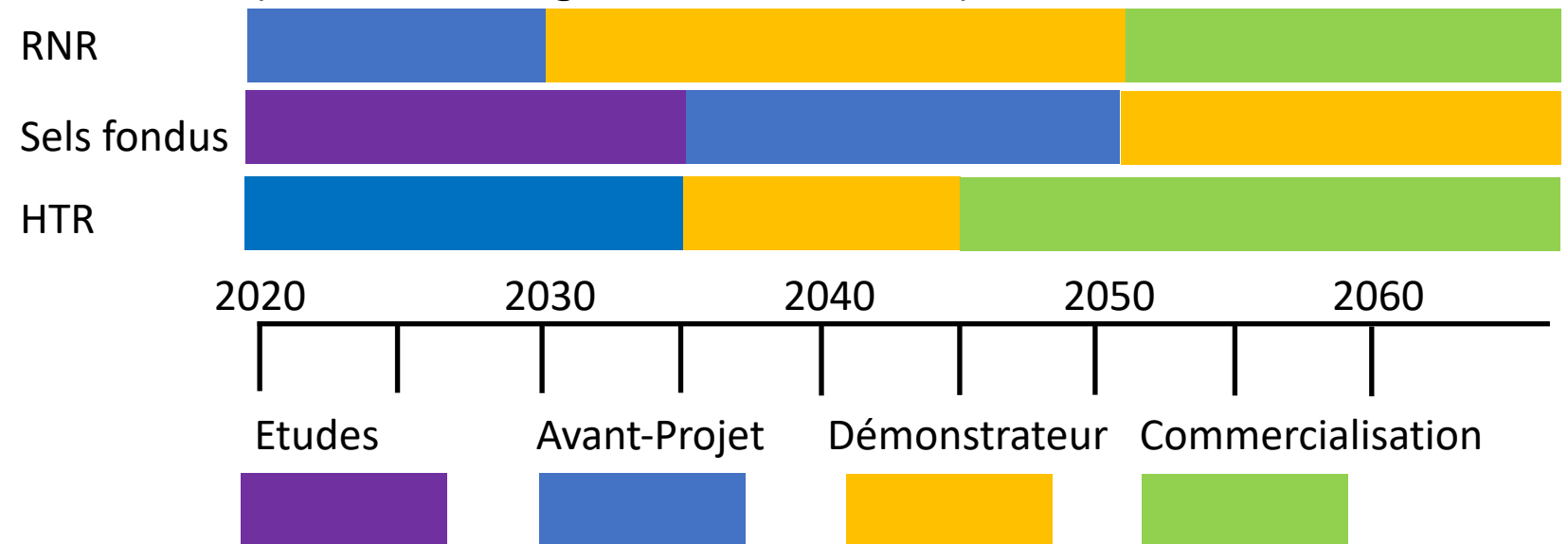
Du concept à l'industrialisation : Quel planning peut-on espérer?

❑ Pour les générations Gen3 : environ 10-15 ans

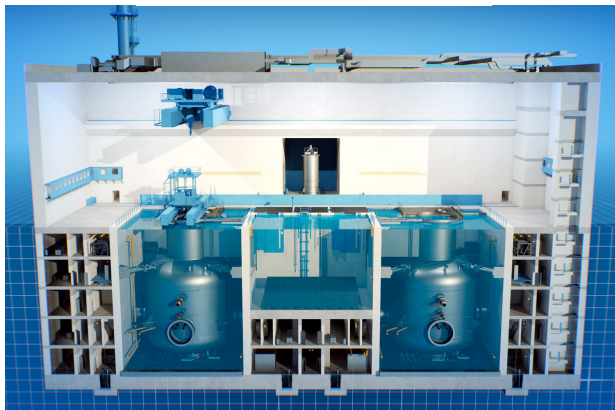
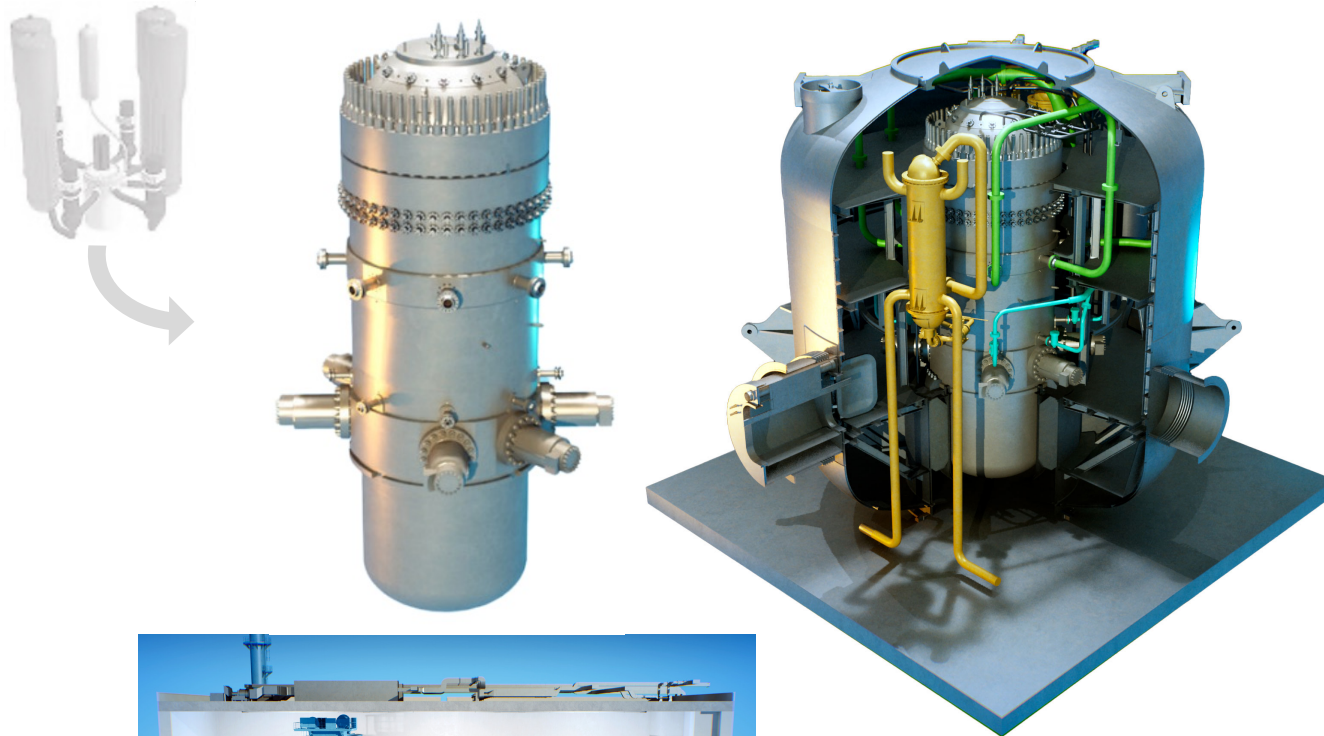
- Procédures administratives (Licensing, Permis de construire, débat public...)
- Construction + Essais + MIS

❑ 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



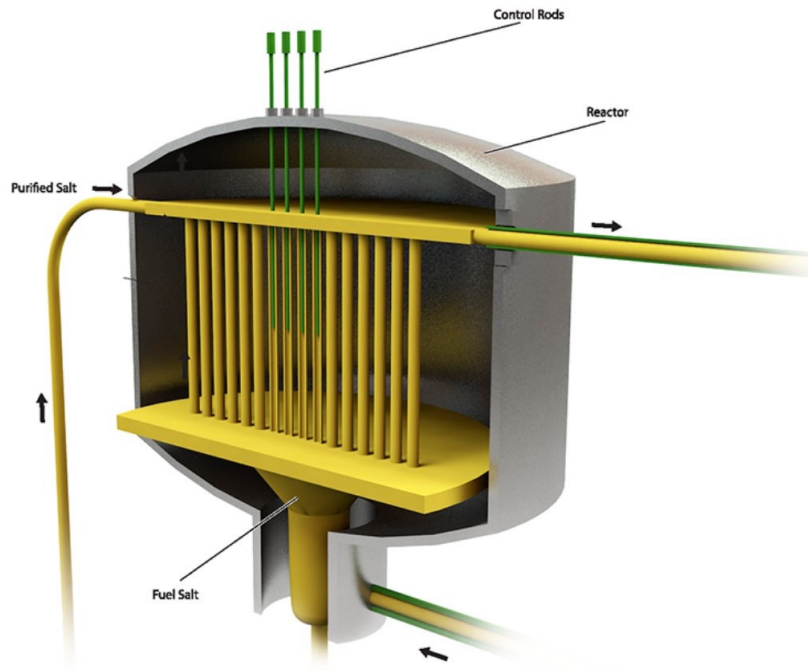
Projet Nuward



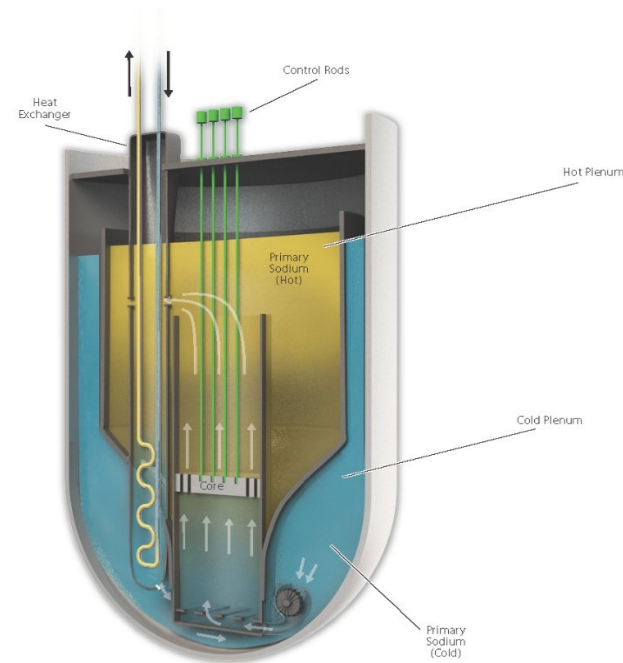
(Source EDF)

- ❑ Ilot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170 MWe + une piscine d'entreposage
- ❑ Cuve : H = 15 m, D = 4 m
- ❑ Enceinte métallique dans un bassin d'eau : (H = 18m, D = 15m)
- ❑ Générateurs de vapeur à plaques. (1^{ère} fois)
- ❑ Mécanismes de commande de grappes immergés.
- ❑ Système de sûreté passive.
- ❑ GV et pressuriseur dans la cuve.
- ❑ 60% du bâtiment enterré.
- ❑ Cible : 1^{er} béton du prototype en France en 2030.
- ❑ Dossier d'Options de Sûreté (DOS) à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) déposé en juin 2023.
- ❑ Cible principale : remplacement des centrales à charbon (plus de 3000 centrales à remplacer dans les 30 ans.)
- ❑ Cogénération: production de chaleur (150-250°C).

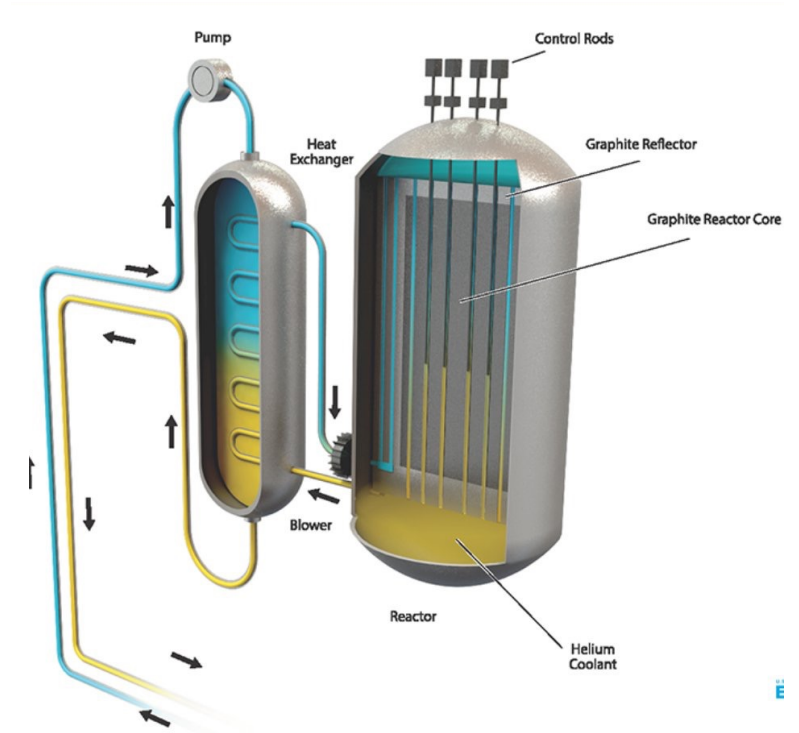
Les concepts disruptifs



Réacteurs à sels fondus

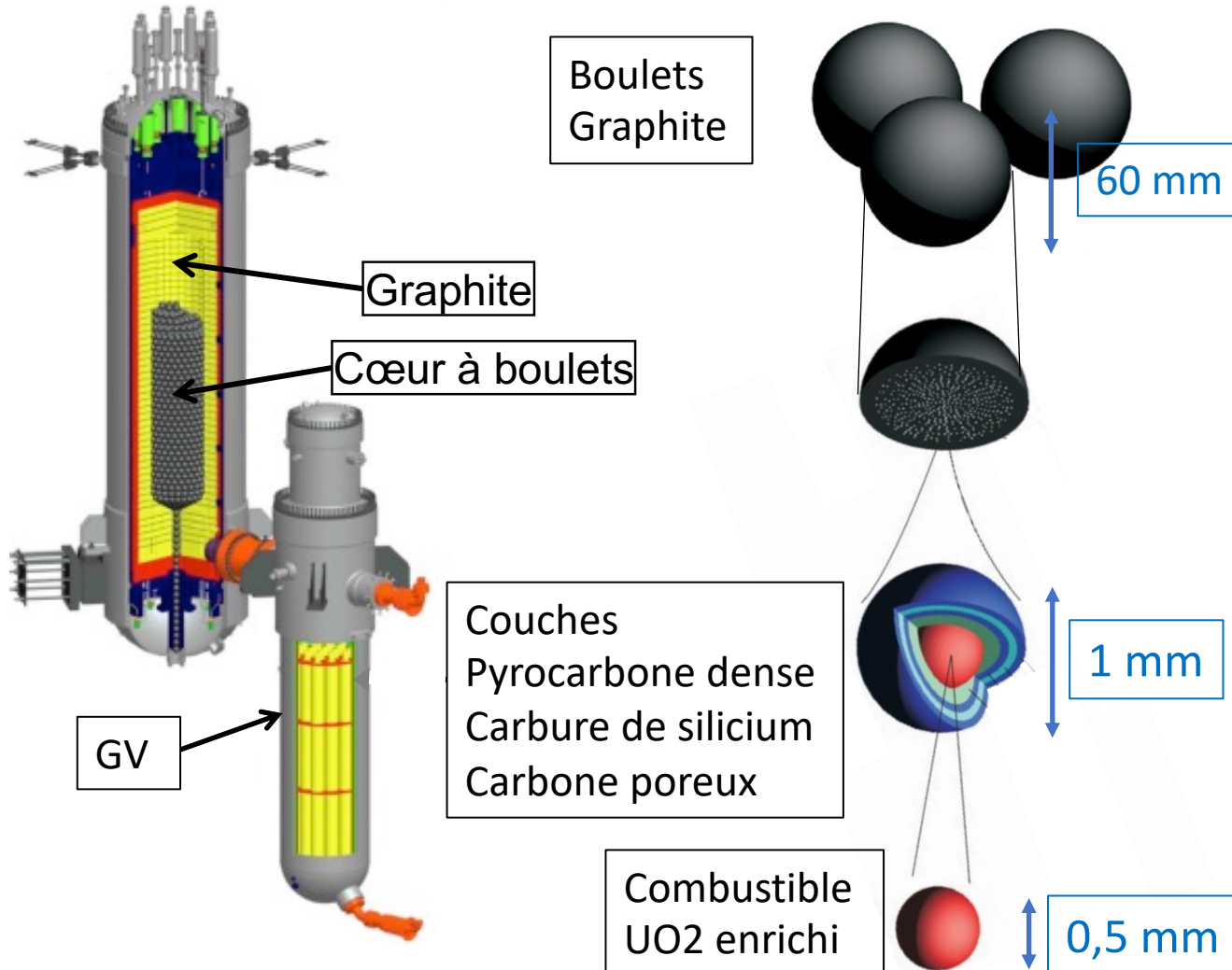


Réacteurs à neutrons rapides



Réacteurs à haute température

Réacteur à haute température

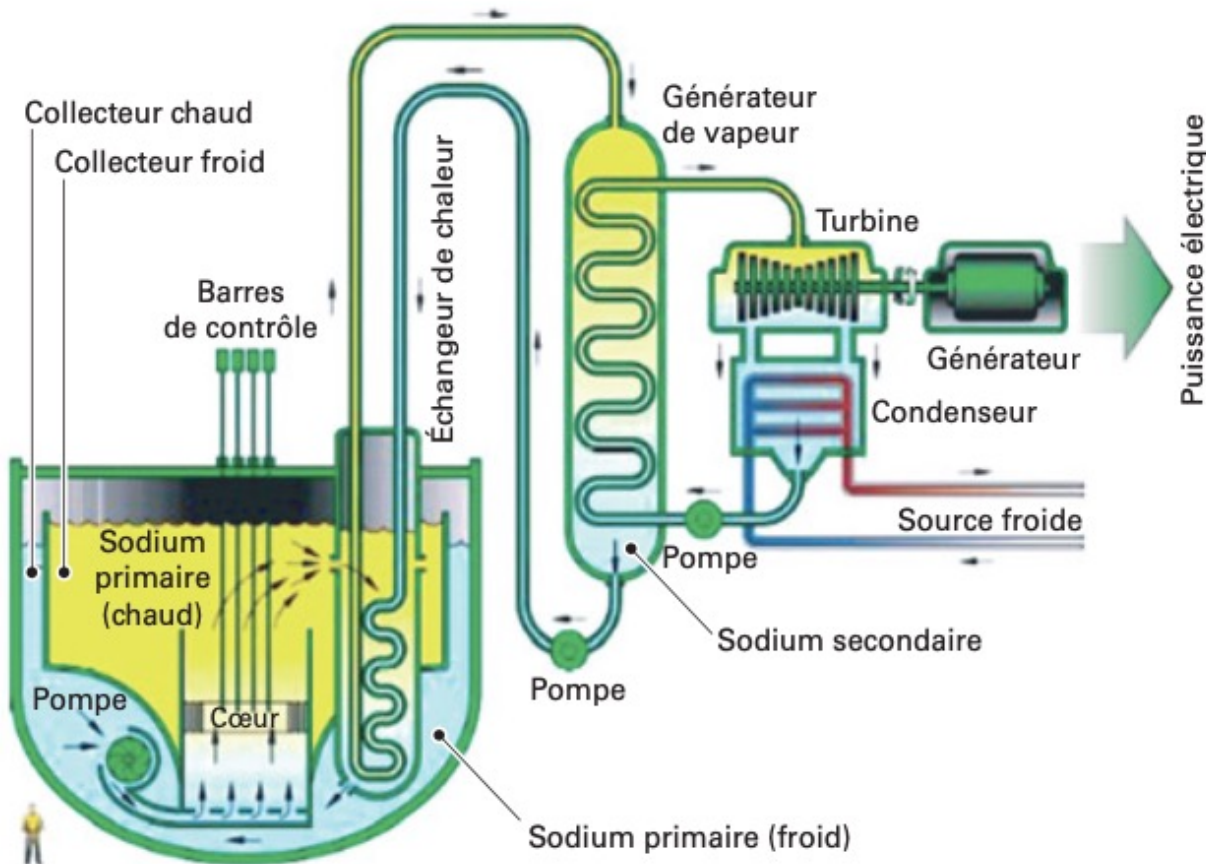


- ❑ Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- ❑ 1^{er} réacteur DRAGON en UK (1964-1977).
- ❑ Caloporteur : gaz inerte (hélium) (pas de problème de chimie et de radioactivité) à haute température.
- ❑ Modérateur : graphite (supporte $T > 2500^{\circ}\text{C}$)
- ❑ Rendement élevé ($\sim 50\%$) : augmentation de la T° .
- ❑ Combustible céramique sphérique de $D < 1\text{mm}$ (TRISO) (sûreté).
- ❑ Haute température produite autour de 600°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, Calogena, (...?)

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

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

Réacteur à neutrons rapides

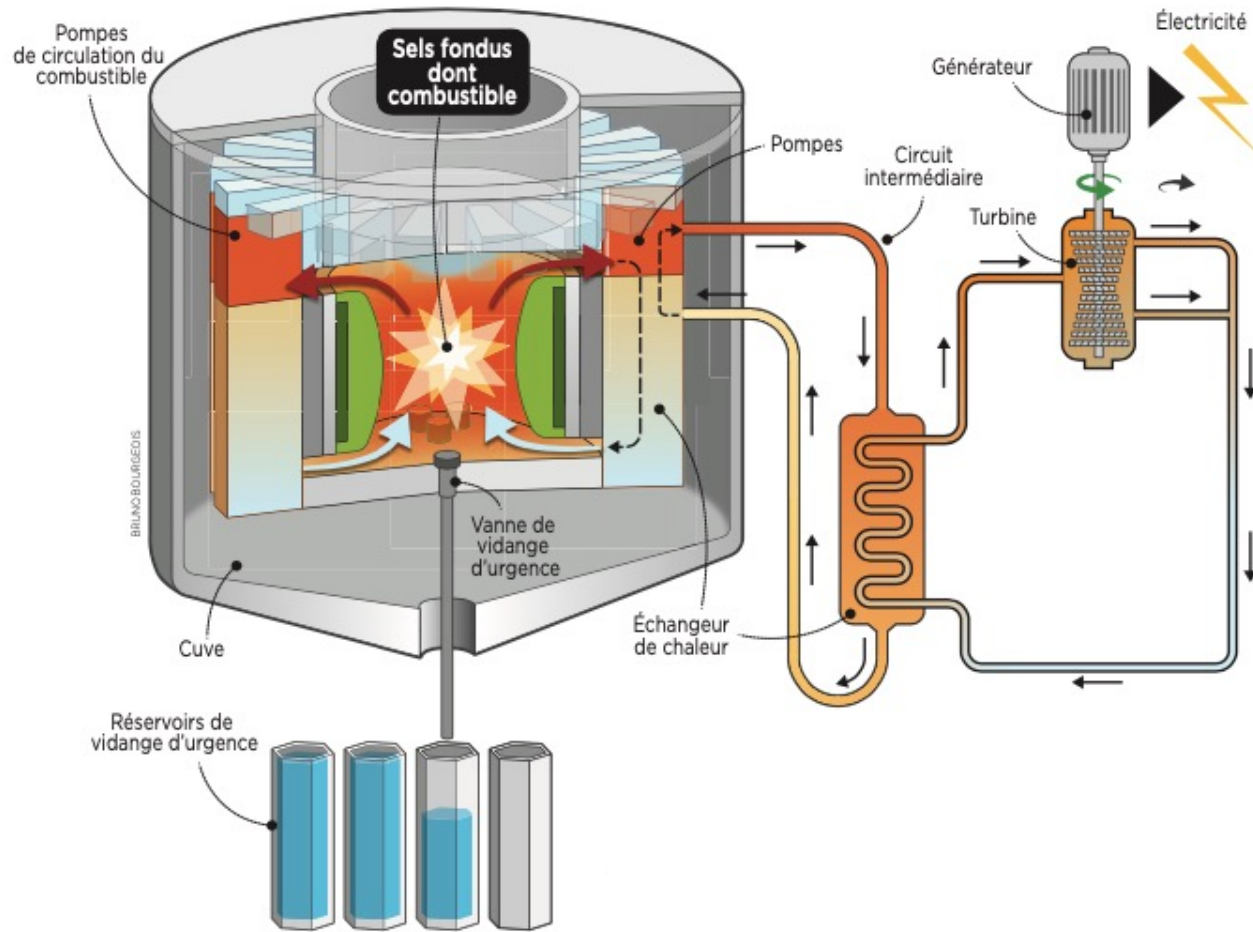


(Source Techniques de l'ingénieur, dossier BN3230)

- ❑ Combustible : mélange UO_2 - PuO_2 (15-20% de Pu)
- ❑ Pas de modérateur (neutrons rapides)
- ❑ Caloporteur: sodium liquide (autres options comme Pb)
- ❑ Capables de fabriquer autant de matière fissile qu'ils n'en consomment : utilisation U-238.
- ❑ Augmentation d'un facteur entre 50-100 environ l'énergie que l'on peut tirer de l'uranium par rapport aux réacteurs actuels.
- ❑ Deux RNR construits en France : Superphenix et Phenix.
- ❑ En 2020, trois réacteurs à neutrons rapides en exploitation : les réacteurs russes [Beloyarsk-3 \(BN-600\)](#) et [Beloyarsk-4 \(BN-800\)](#) et le [CEFR](#) chinois.
- ❑ Inconvénients: cout élevé+ sureté liée au sodium
- ❑ Start-up en France : Newcleo (avec du plomb liquide) (30 et 200 MWe), Hexana (avec du Na liquide) (300 MWe).

Puissance électrique

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 Pres)
- Il faut un prototype construit.
- Deux start-up en France avec sel chlorure et n rapides : Naarea (40 MWe) et Stellaria (CEA).
- Chine: 1^{er} prototype au thorium mis en service: TMSR-LF1

Avantages et Verrous de la filière sels fondus

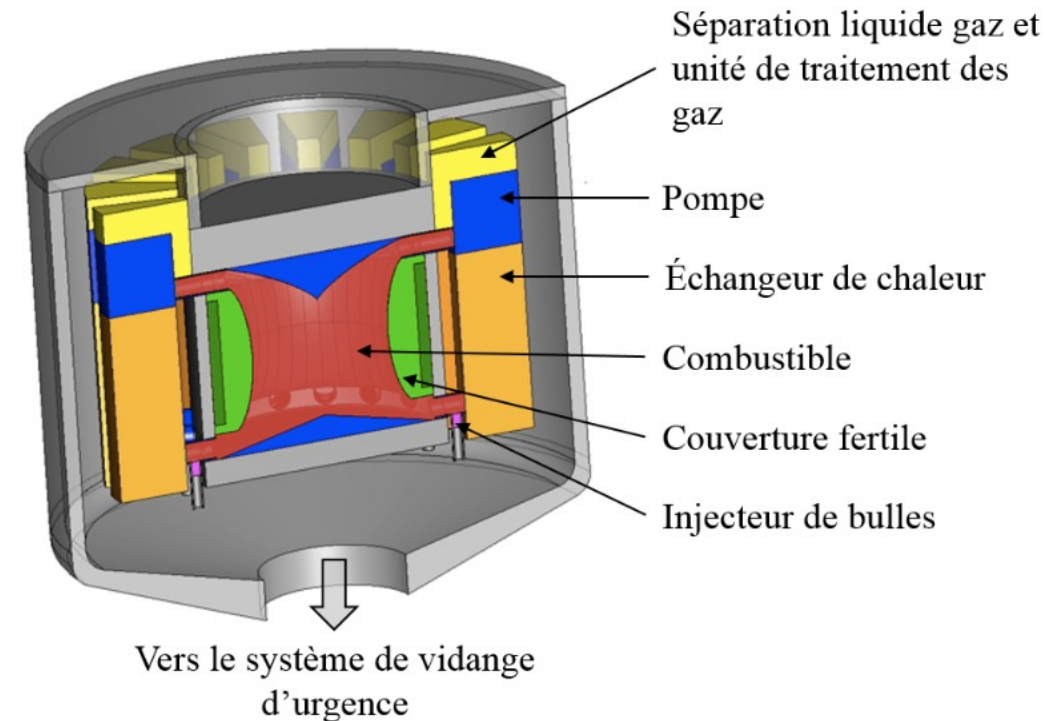
□ Avantages : Répond à une préoccupation de l'opinion sur la gestion des déchets et de matières radioactives:

- 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 transmutation

- Recycler des noyaux en réacteur pour les faire disparaître par réaction nucléaire.
- Les transuraniens (au-delà de l'uranium)** : Formés par capture neutronique et décroissance radioactive :
 - **élimination par réaction de fission**
- Les produits de fission à vie longue (PF-VL)** : Formés par fission, (décroissance (β) et/ou capture neutronique)
 - **élimination par capture vers un isotope stable**
- Rappel: loi de 2006 : la transmutation ne se positionne qu'en option complémentaire d'un stockage.

1	H																	2	He																
3	Li	4	Be											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne										
11	Na	12	Mg											13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar										
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba	Ln	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	
87	Fr	88	Ra	An	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Uun																	
lanthanides				57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu		
actinides				89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr		

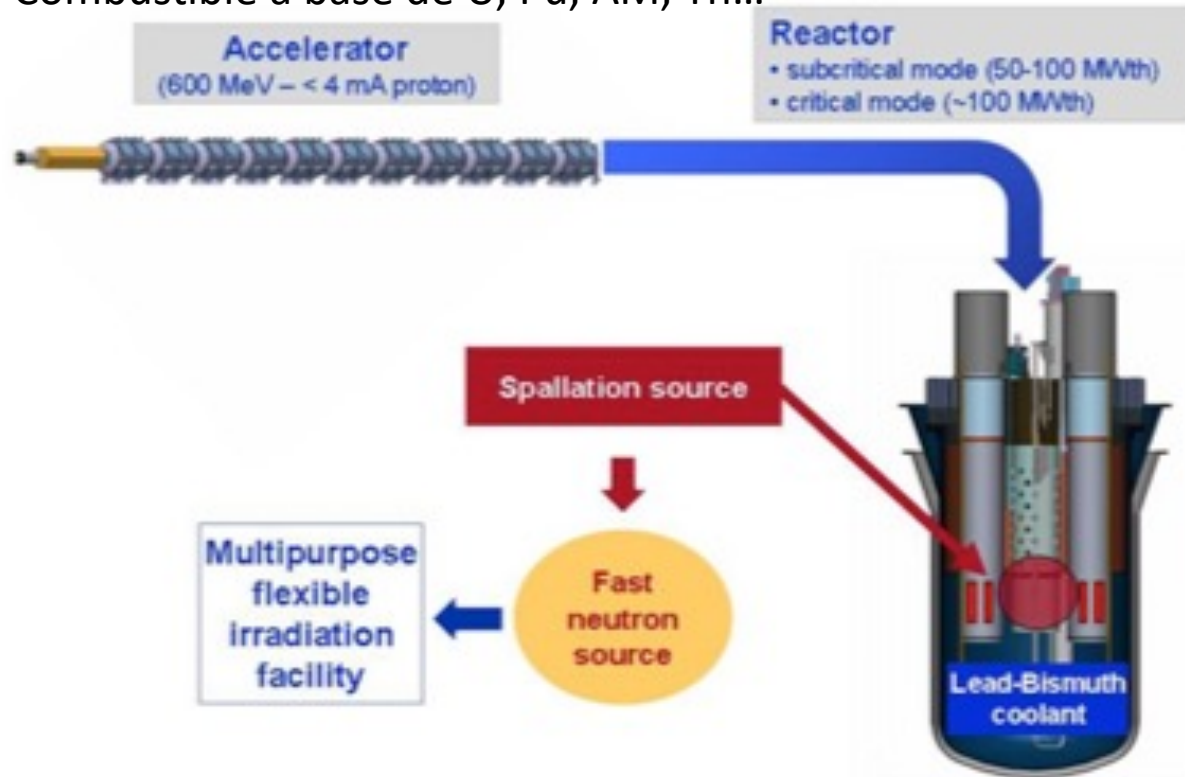
noyaux lourds
 produits d'activation

produits de fission
 produits de fission et d'activation

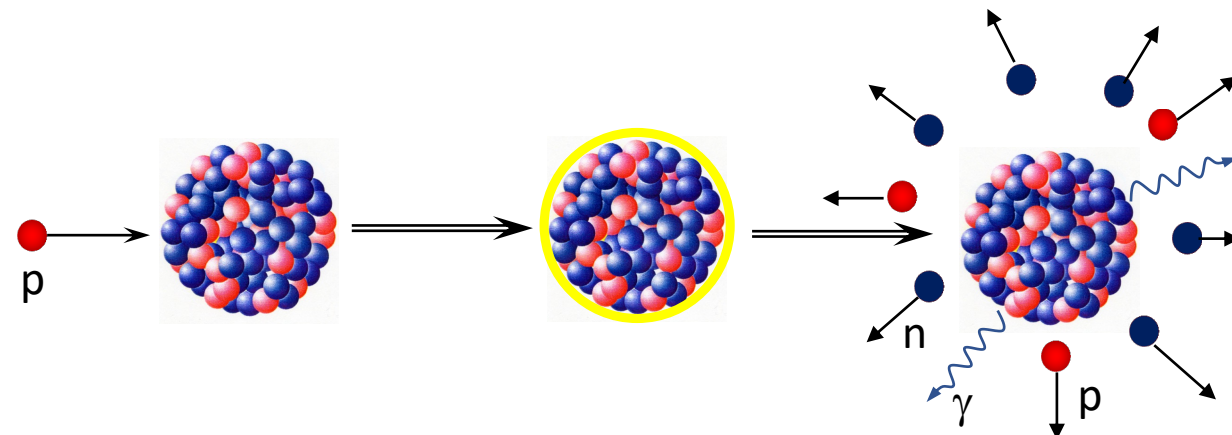
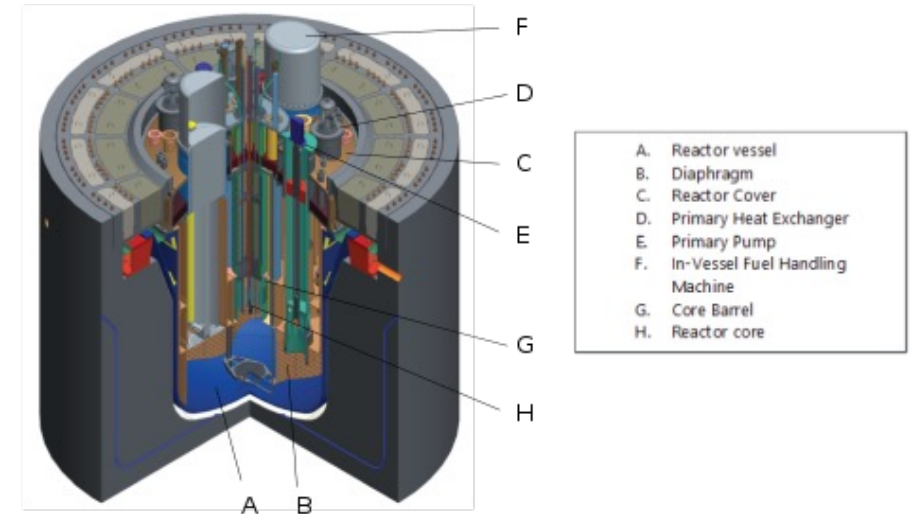
radionucléides à vie longue

Myrrha

- ❑ Réacteur sous-critique piloté par un accélérateur de particules
- ❑ La réaction de spallation produit les neutrons : $p + \text{Pb} \rightarrow X + n + \dots$
- ❑ Caloporteur : eutectique Plomb-Bismuth
- ❑ Combustible à base de U, Pu, AM, Th...

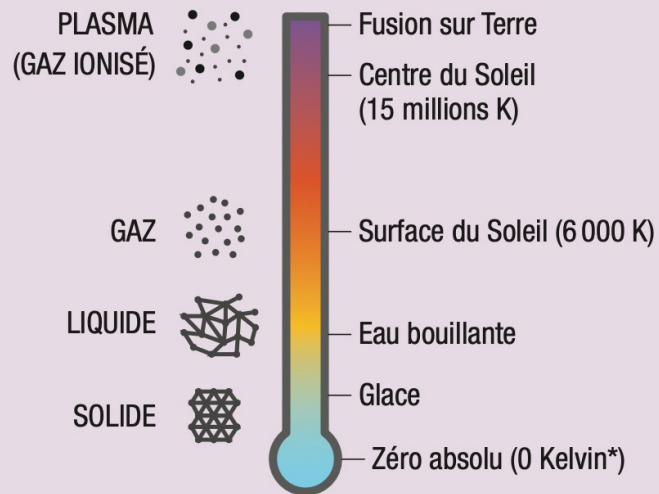


(source MYRRHA)



Des connaissances de physique pour la fusion

Le plasma est le quatrième état de la matière, extrêmement chaud

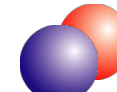


* 1 Kelvin (K) = - 273,15 °C

(Source CEA)

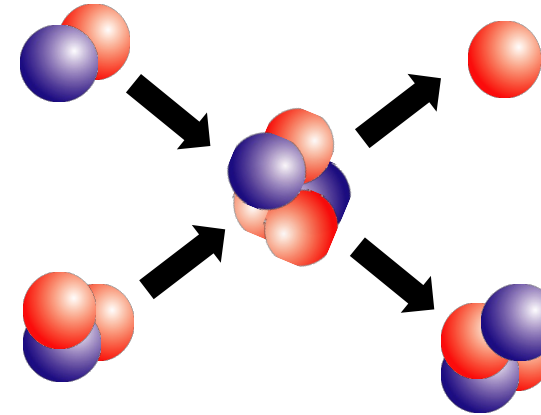
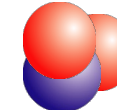
croûte terrestre
et dans les
océans

deutérium



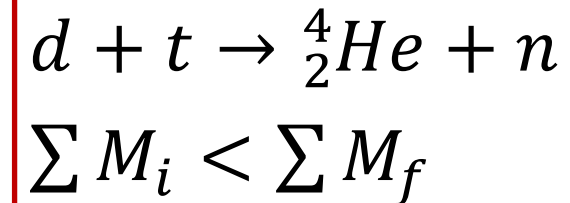
Réaction n+Li

tritium



neutron
 $E_c = 14 \text{ MeV}$

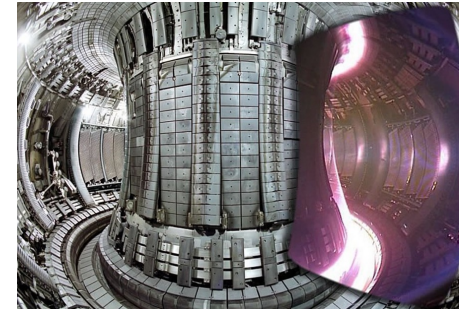
hélium-4
 $E_c = 3,5 \text{ MeV}$



Equivalence entre fission et fusion :

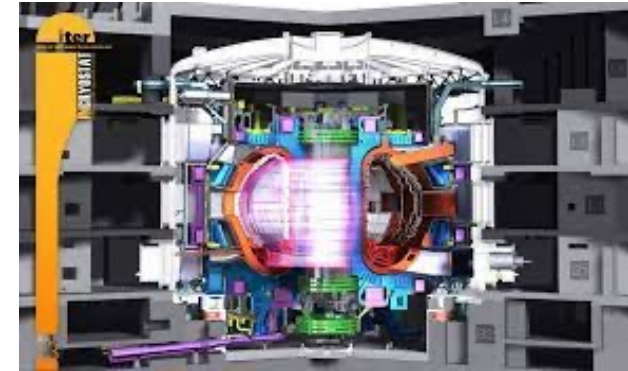
- 200 MeV par fission d'uranium-235
- 18 MeV par fusion de deutérium - tritium

La fusion : ses avantages



❑ Production d'énergie : ses avantages

- Elle produit 4 fois plus d'énergie qu'une réaction de fission et 4 millions de plus que la combustion des énergies fossiles,
- Elle ne produit pas de CO_2 ,
- Elle ne produit pas de déchets hautement radioactifs (l'hélium-4 est un gaz inerte non toxique),
- Elle s'arrête toute seule dès que les conditions de température et de pression ne sont pas réunies,
- Elle dispose de ressources importantes,
- Elle ne permet pas la prolifération.



❑ Deux technologies :

- La fusion par confinement magnétique. C'est le principe d'ITER.
- La fusion par confinement inertielle qui utilise des lasers très puissants. C'est le principe du National Ignition Facility et du laser Mégajoule.



Le confinement magnétique

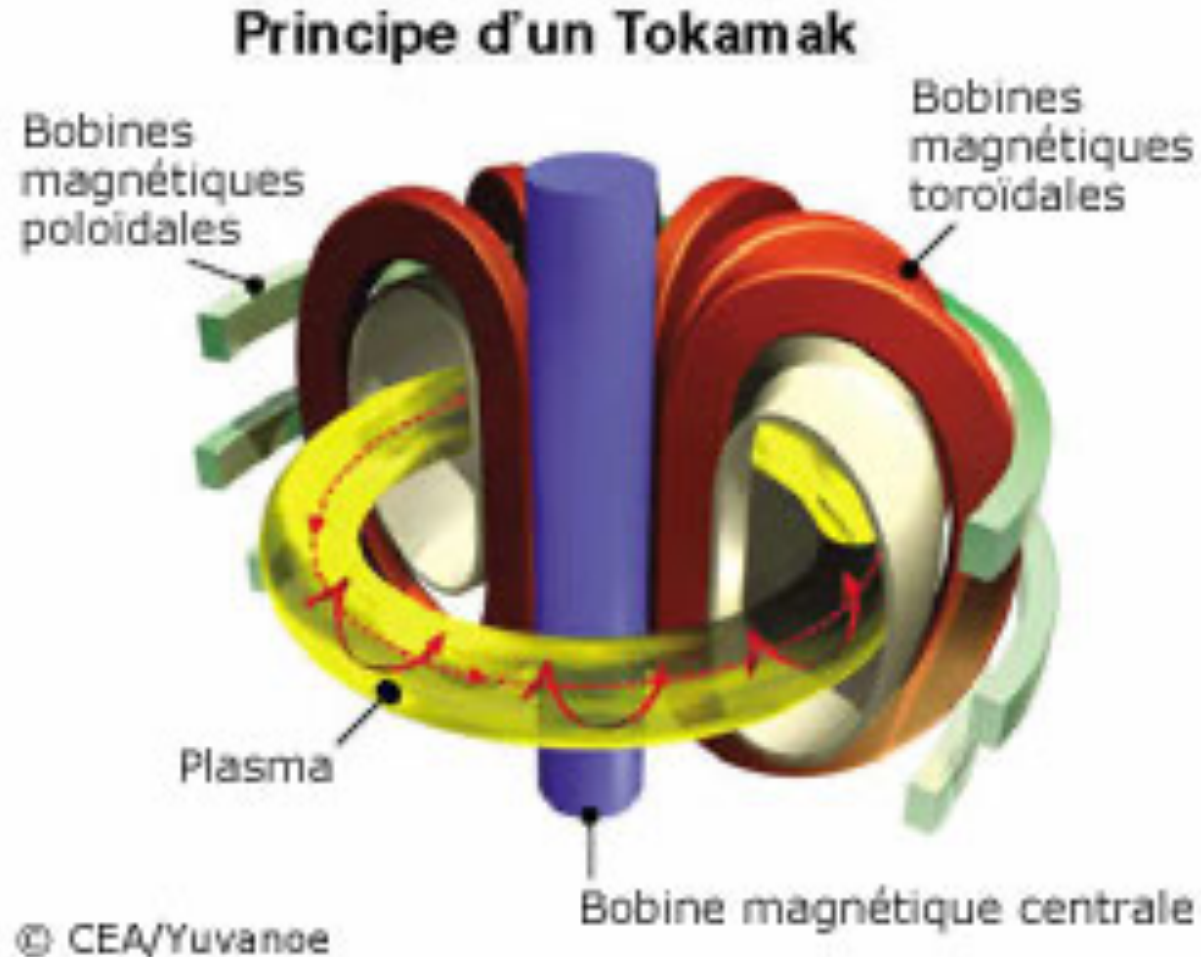
(Source : CEA)

- ❑ Un gaz soumis à des températures extrêmes : de l'ordre de 150 à 300 millions de degrés (Soleil elle atteint 15 millions de degrés).

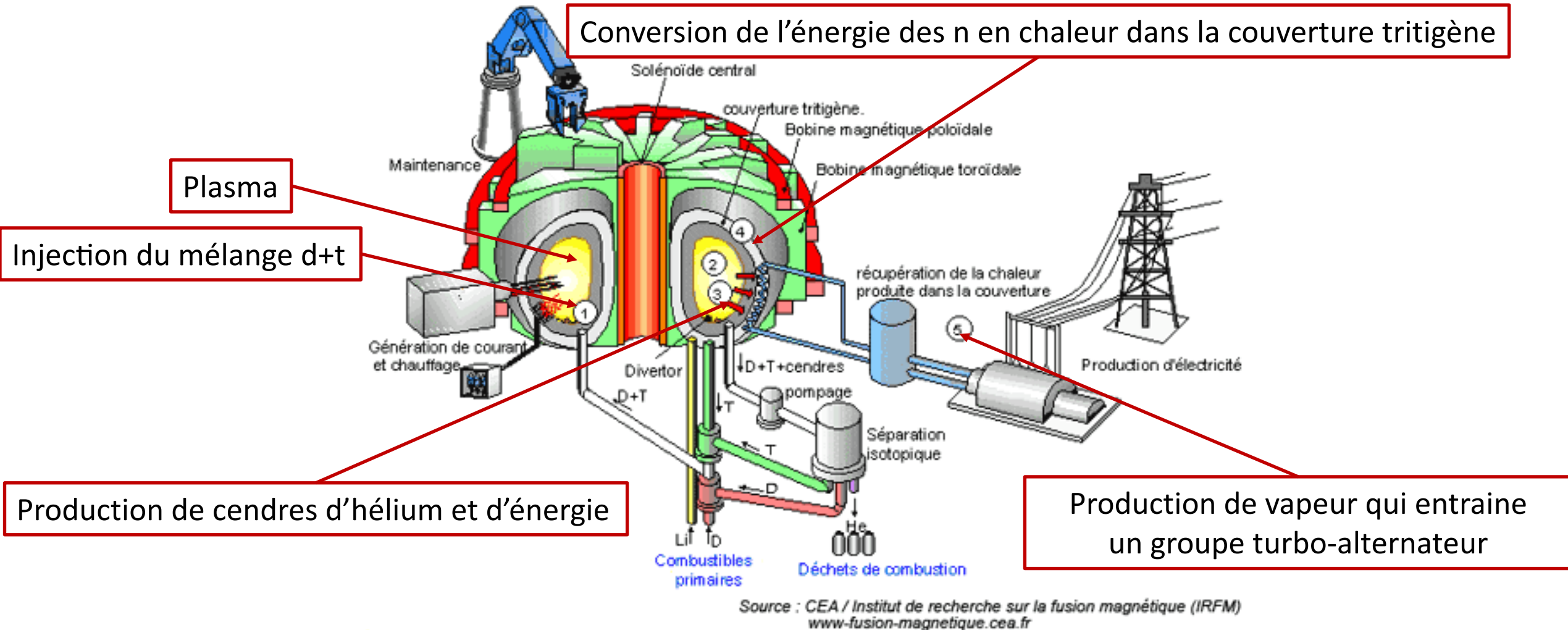


Transformation en plasma =
Gaz « chargé » (séparation e- et noyaux)

- ❑ Des champs magnétiques puissants pour le confinement.
- ❑ La densité du plasma est très faible :
~ $10^{20}/\text{m}^3$ (densité proche du vide)
- ❑ Le temps de confinement doit être assez long.



Production de l'électricité

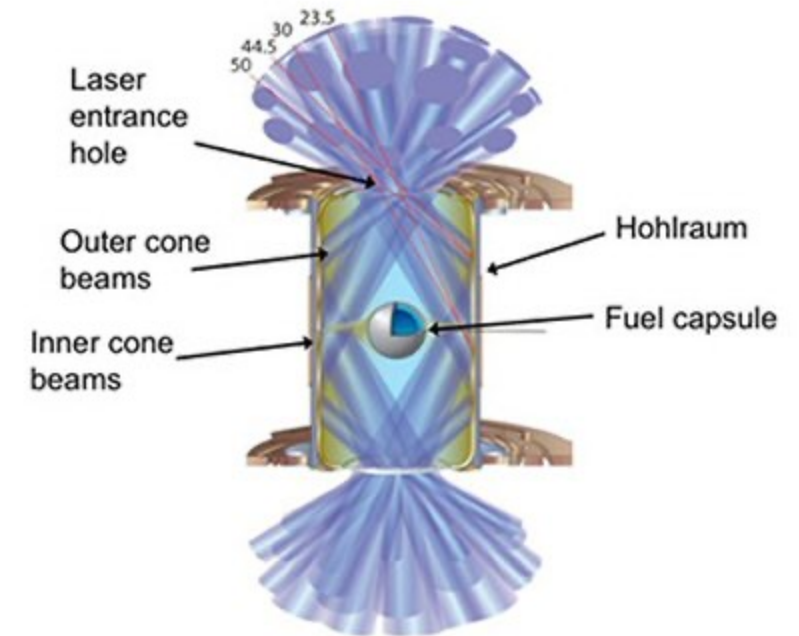
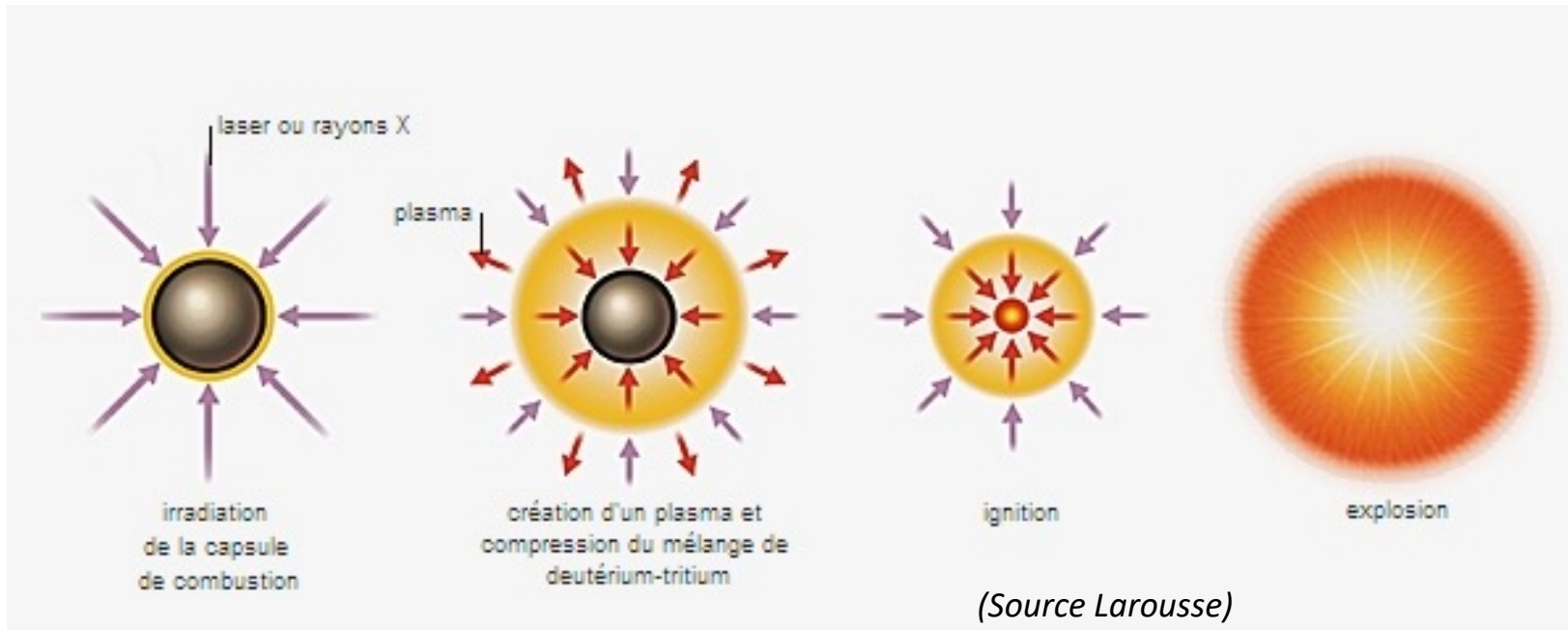


Les grandes étapes d'ITER

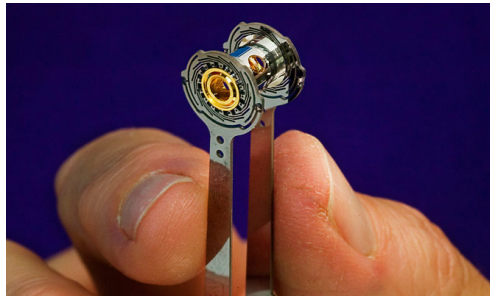
- ❑ 2005 : Choix du site de Saint-Paul-lez-Durance (Cadarache, Bouches-du-Rhône)
- ❑ 2006 : Signature de l'Accord ITER
- ❑ 2007 : Création d'ITER Organization
- ❑ 2007-2007 : Préparation de la plateforme (déboisement, nivellement)
- ❑ 2010-2014 : Fondations du Complexe tokamak
- ❑ 2012 : Un décret officiel autorise ITER Organization à créer l'INB ITER
- ❑ 2014-2023 : Construction du Bâtiment tokamak
- ❑ 2010-2023 : Construction de l'installation ITER et des bâtiments auxiliaires nécessaires au Premier Plasma
- ❑ 2008-2025 : Fabrication des principaux éléments et systèmes pour le Premier Plasma
- ❑ 2015-2025 : Transport (via l'Itinéraire ITER) et livraison sur site des éléments



La fusion par confinement inertiel



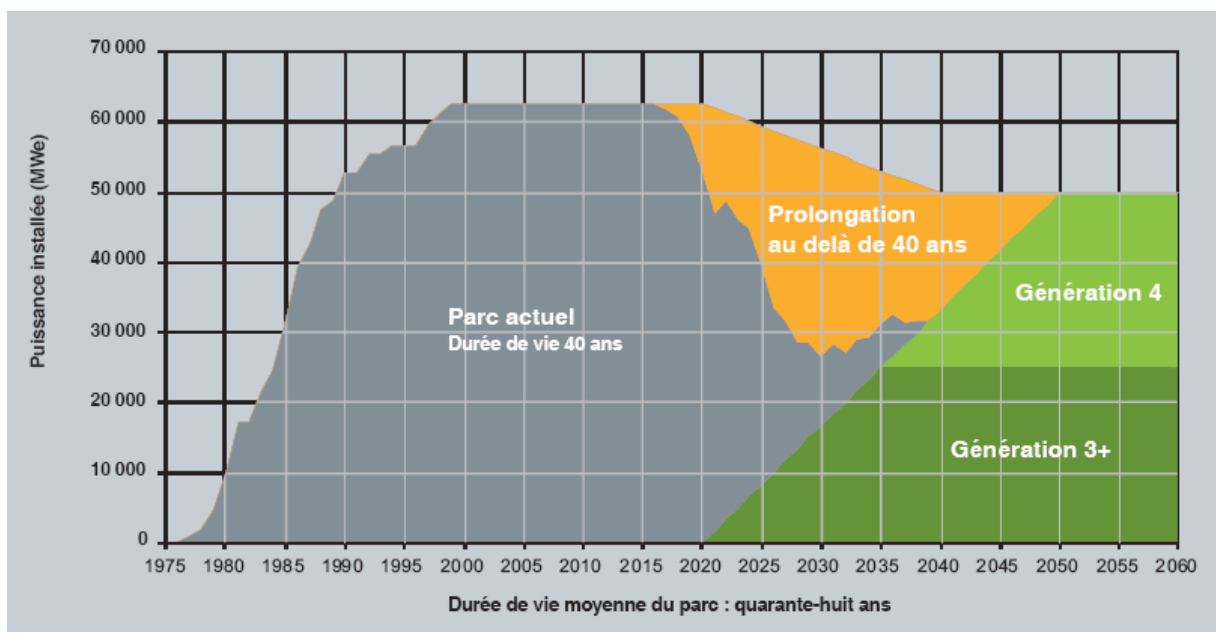
(Source NIF)



□ Les scénarios

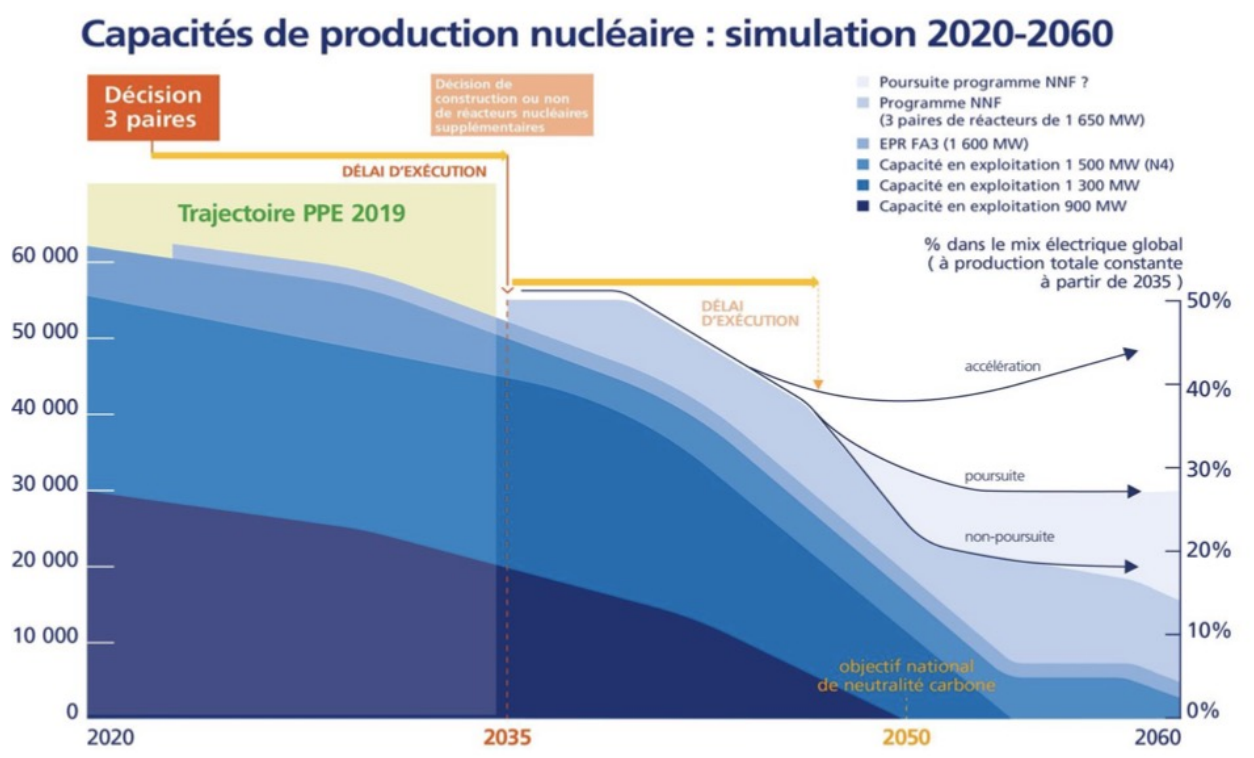
Calendrier de renouvellement du parc nucléaire français

Stratégie initiale (~1980)



Hypothèse:
renouvellement de 500 000 MW sur
30 ans, rythme de 1600 MW/an.

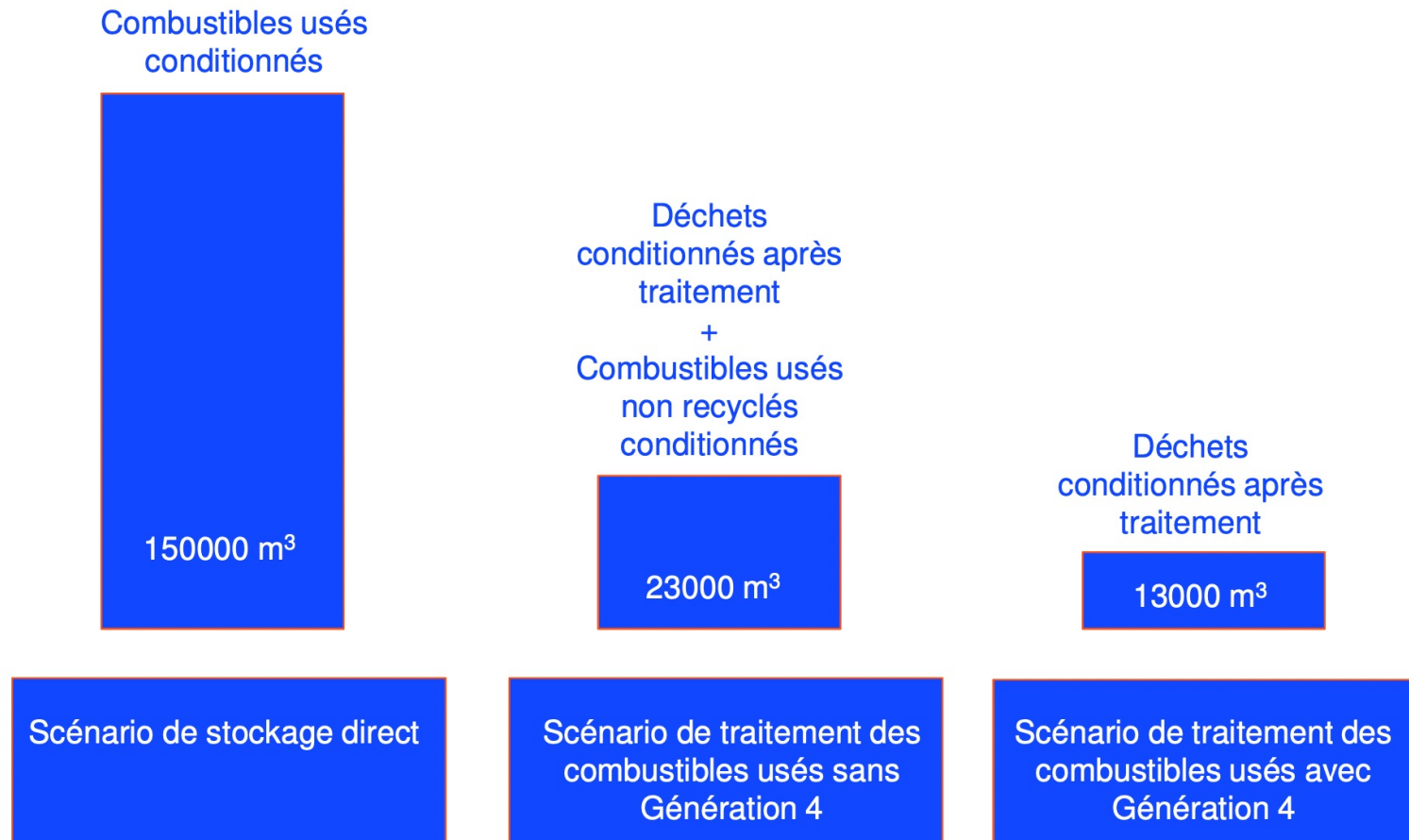
Stratégie aujourd'hui?



(Source RTE)

Scénarios sur les déchets produits

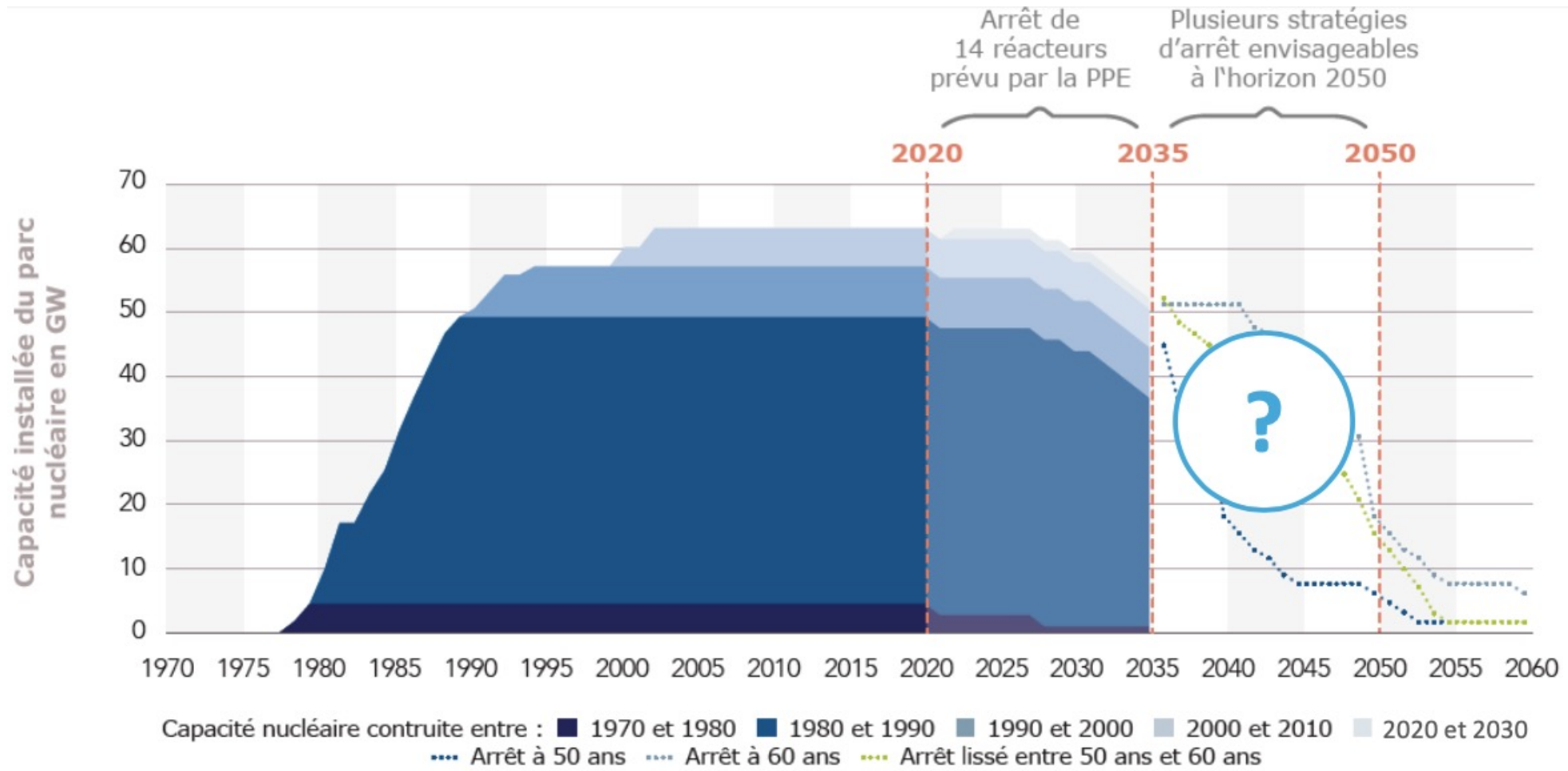
Ordre de grandeur des volumes de colis de déchets ultimes MAVL et HAVL pour le stockage



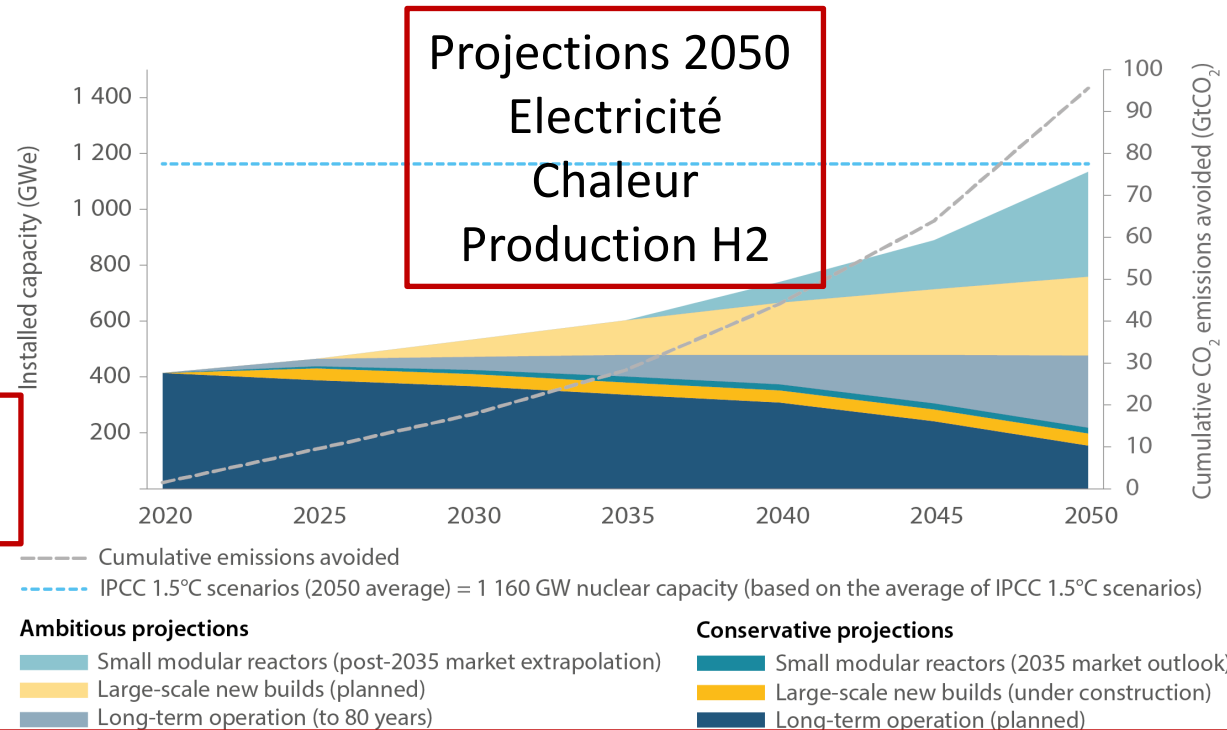
D'après données ANDRA, inventaire relatif au parc existant avec une hypothèse de durée de vie des réacteurs de 40 ans

(Source EDF, Orano d'après données ANDRA)

Et si on arrêtait le nucléaire de fission ?



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.

Acceptation de l'énergie nucléaire: Conclusion

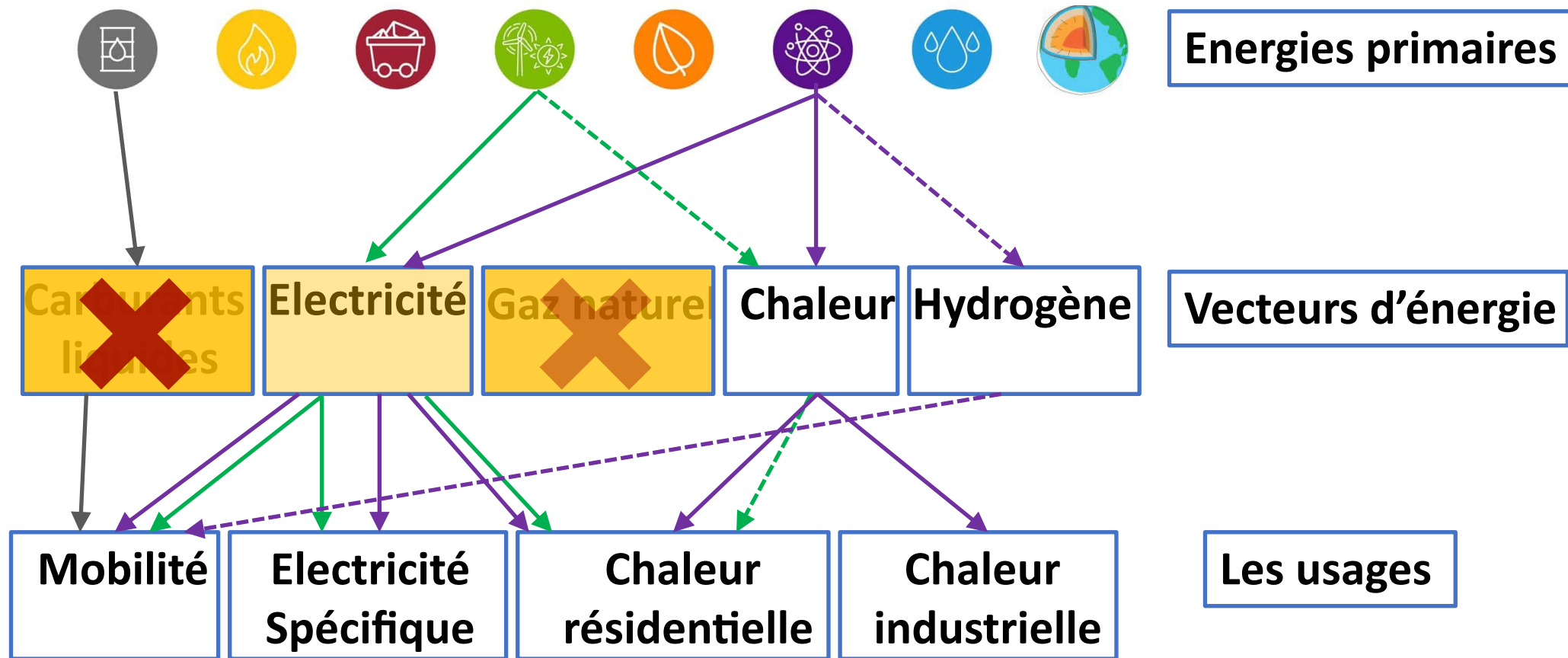
- ❑ Dans un monde de plus en plus électrique et numérique, la consommation électrique croît.
- ❑ Enjeux de souveraineté énergétique et de réindustrialisation, contraints par la lutte contre le réchauffement climatique.
 - ➔ Energie nucléaire incontournable
- ❑ Les bénéfices sont connus : énergie abondante, pas chère, bas-carbone et moyens de production pilotables.
- ❑ Les inconvénients (déchets et accidents) sont traités avec responsabilité et sérieux et donc maîtrisés.
- ❑ Le développement dépend de l'acceptation de l'opinion, de plus en plus sensibles à la préservation de l'environnement et au risque nul.
 - ➔ le nucléaire de demain devra être extrêmement sûr et durable
- ❑ Renouveau du nucléaire en France et en Europe :
 - ➔ changement de paradigme dans les politiques publiques (énergétique, industrielle et de l'éducation).
- ❑ La formation doit revenir au centre de l'industrie et de la société.



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 de votre attention.

Les énergies primaires, les vecteurs et les usages

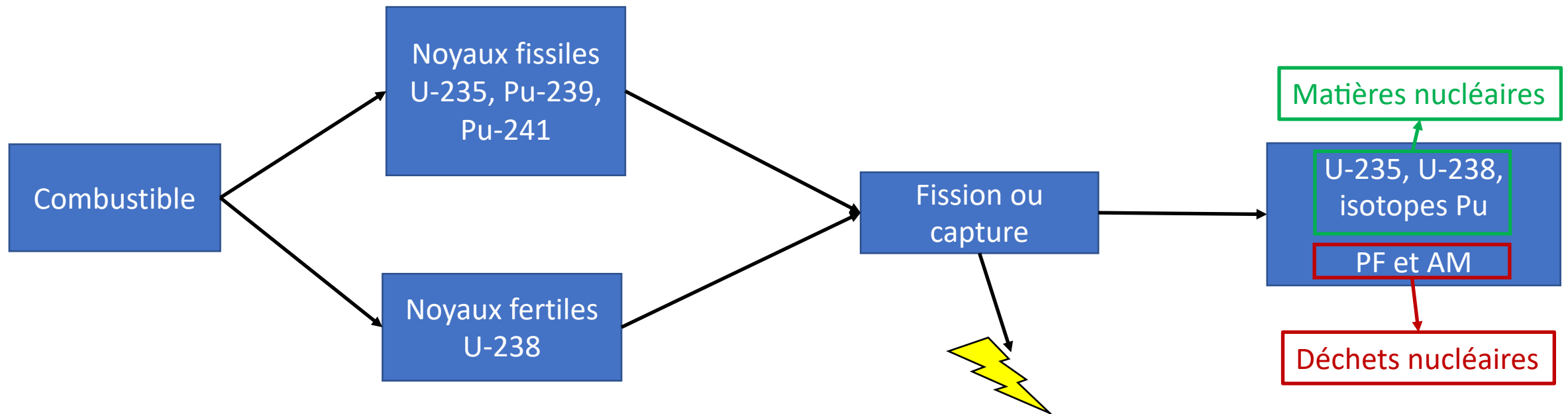


(D'après Académie des technologies)

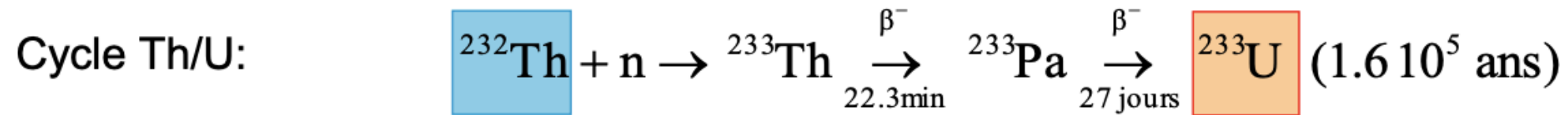
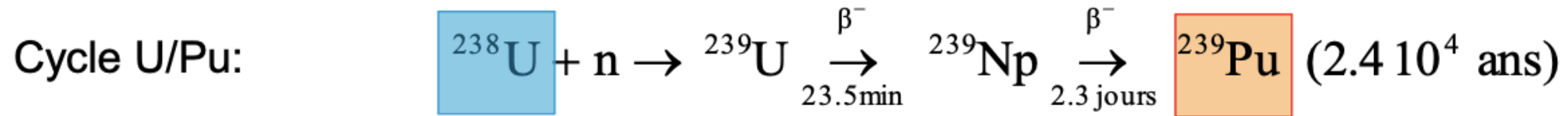
L'évolution du combustible

□ Dans un cœur de réacteur à eau légère :

- **Départ:** le combustible est composé de noyaux fissiles (uranium-235) et noyaux fertiles (uranium-238, thorium-232).
- **Déchargement :** noyaux fissiles et fertiles (uranium et plutonium), produits de fission et actinides mineurs.



Intérêt des noyaux fertiles



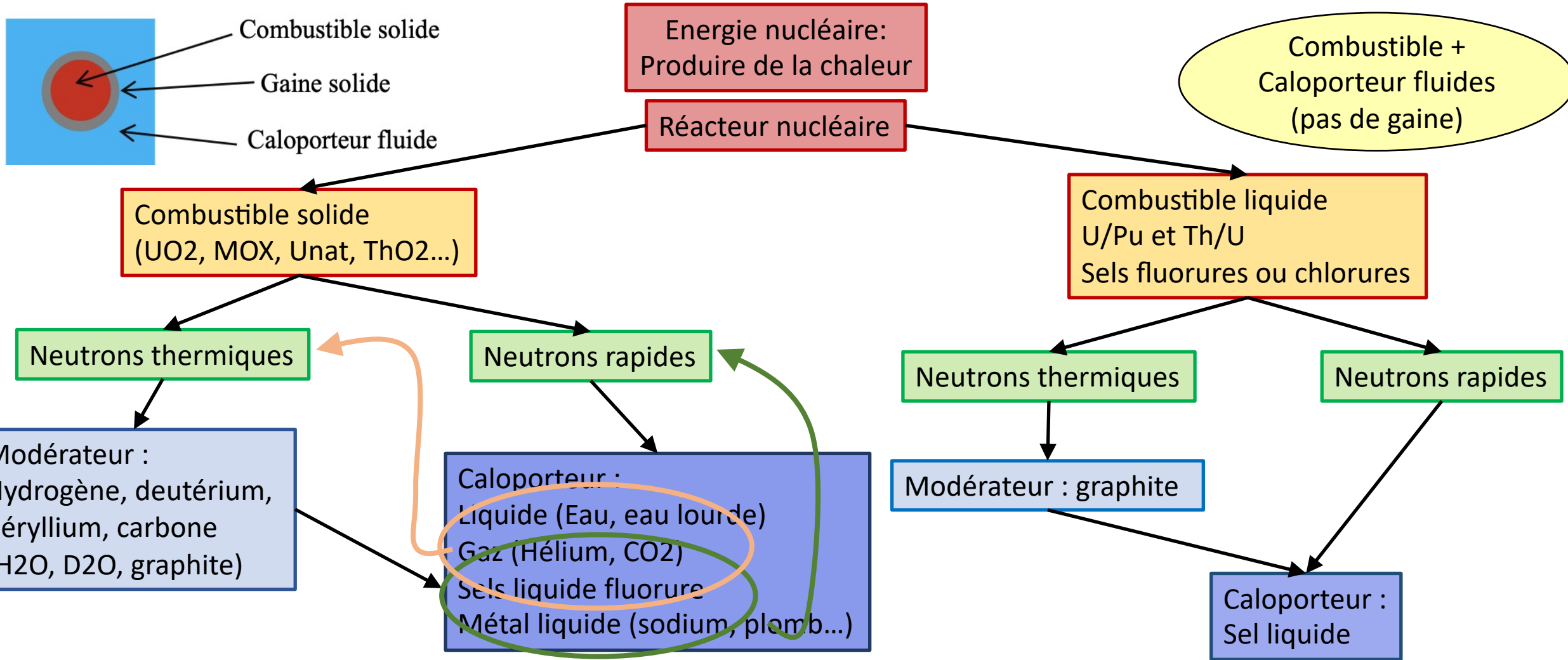
Noyau fertile

Noyau fissile

- ❑ Le Pu est produit (régénéré) par capture de neutrons sur l' ^{238}U : **masse de Pu = cte**
- ❑ L' ^{238}U est consommé : ~ 1 tonne / (Gwe.an)
- ❑ Utilisation du minerai d'uranium $\sim 100\%$
- ❑ Attention $^{233}_{91}\text{Pa}$: grande absorber de n et donc diminue production de $^{233}_{92}\text{U}$.

Vers les réacteurs
Iso ou surgénérateurs.

Les multiples filières de réacteurs

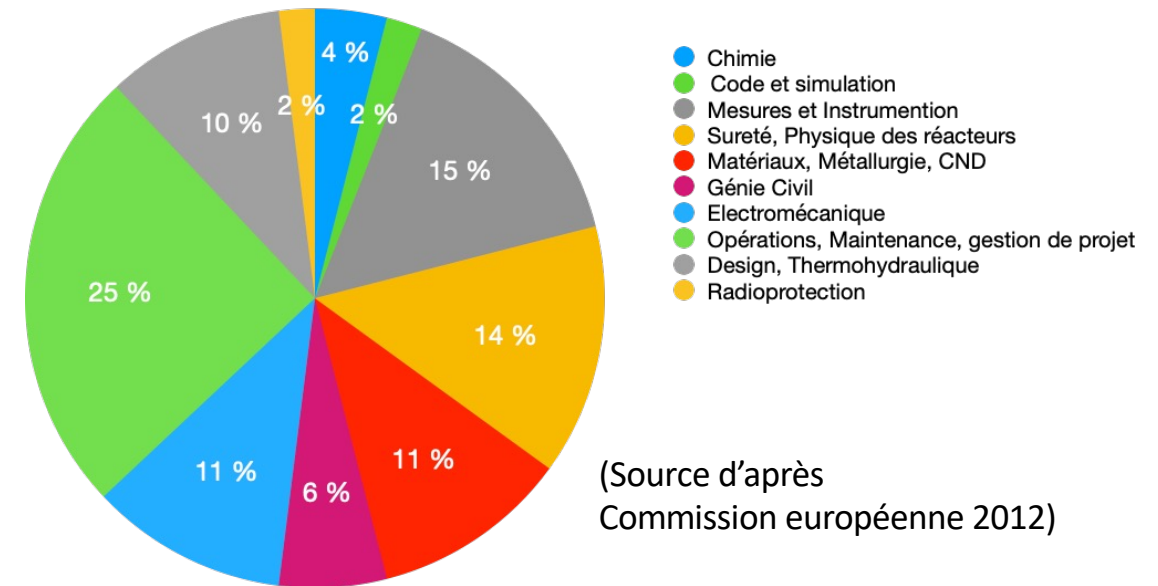
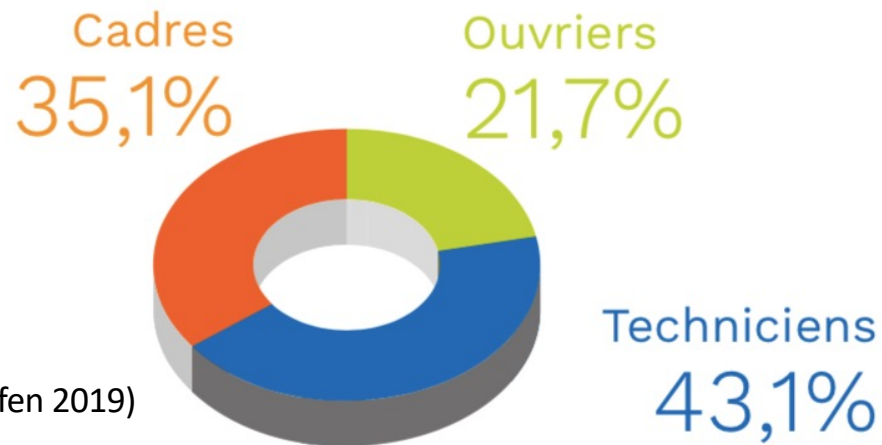


L'industrie nucléaire en France

Cycle industriel de la production électrique d'origine nucléaire: long et technique



Répartition des emplois par statut pour l'ensemble des entreprises



Les barres de commande

❑ Les barres (grappes) de commande :

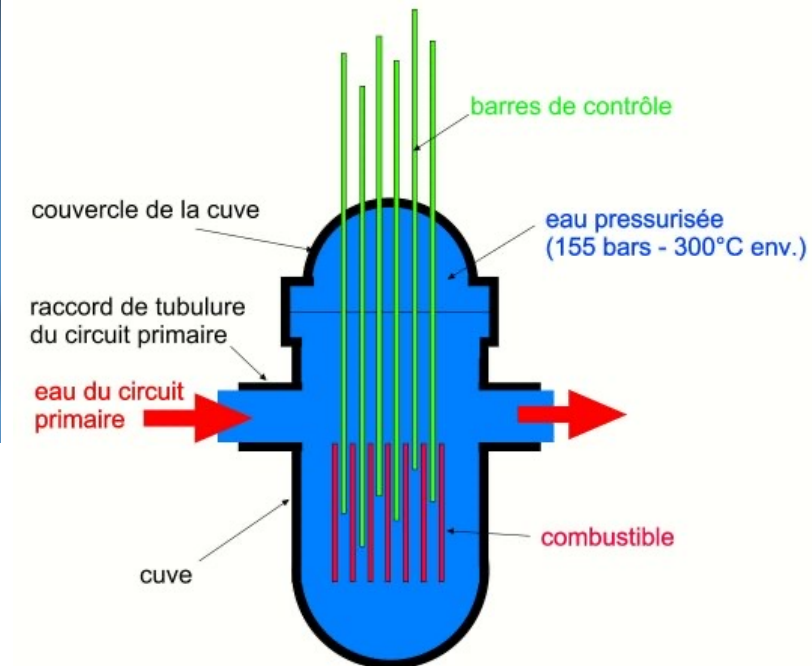
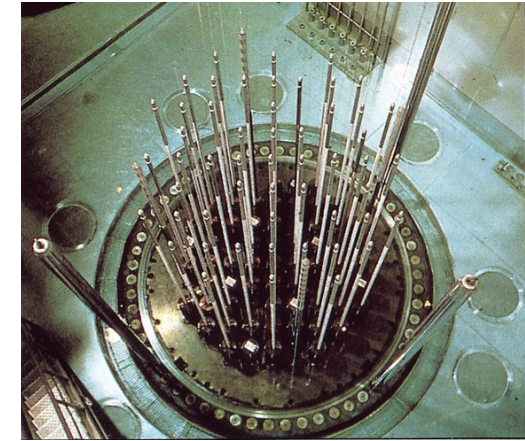
- utilisées pour les fonctions de sûreté (arrêt automatique du réacteur) et de pilotage,
- parfois partiellement ou totalement pour la fonction de compensation (compenser l'appauvrissement du combustible).

❑ Elles permettent une variation rapide de la réactivité :

- absorbants mobiles commandé depuis la salle de commande
- barres cylindriques, croix, plaques...
- mélange de noyaux absorbants: bore, cadmium, hafnium...
- nombre lié à la puissance du réacteur

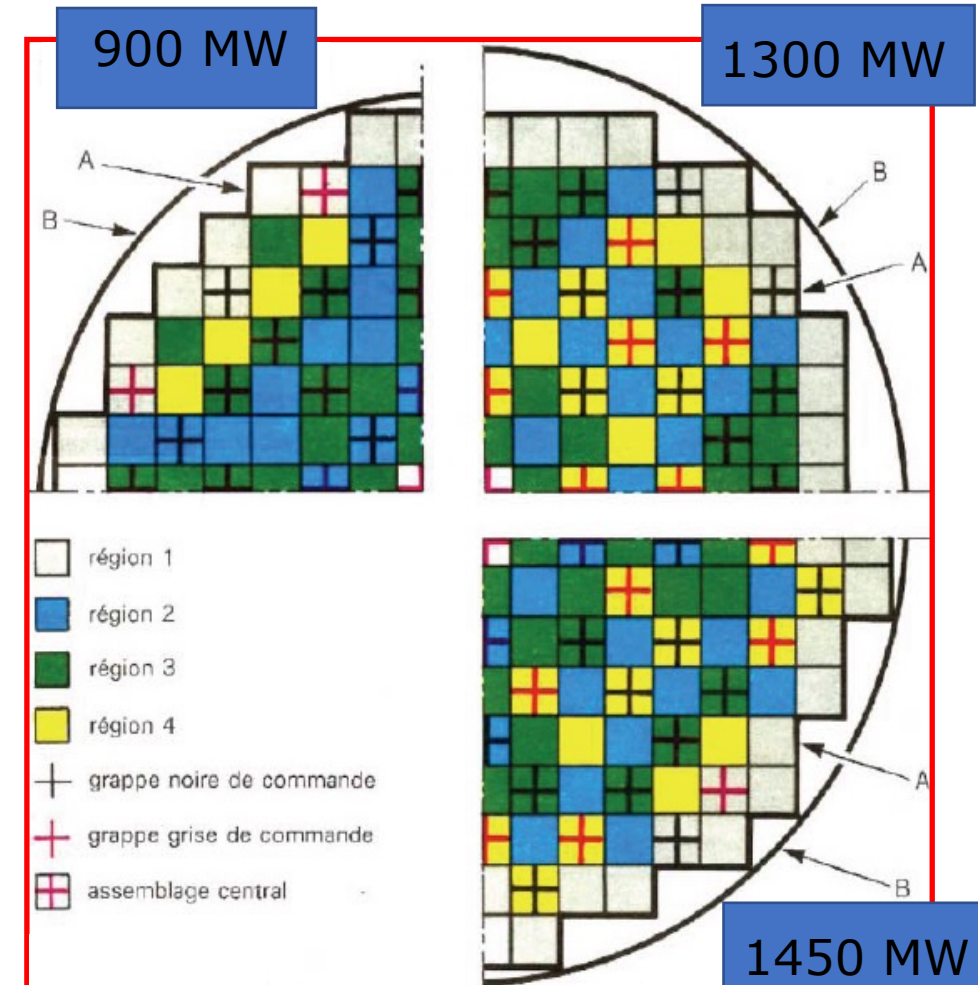
❑ Le dispositif d'arrêt d'urgence du réacteur ((AAR) est automatique :

- en cas de dépassement des certaines valeurs.
- en cas de situations non conformes.



Situation REP français

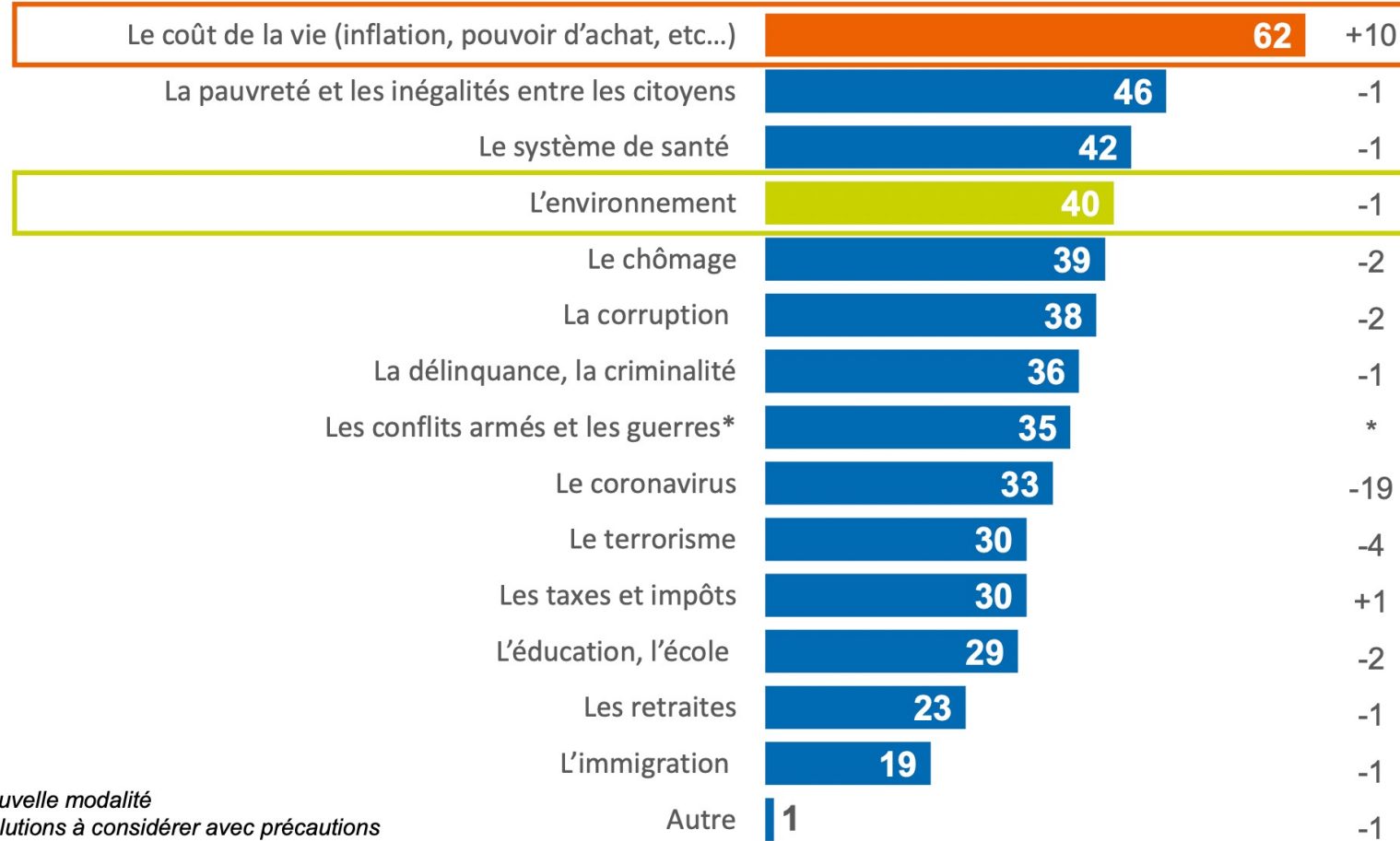
- ❑ Assemblages de crayons absorbants dans le réseau des crayons combustibles d'un assemblage.
- ❑ Répartis en damier dans la région centrale du cœur; leur constitution est adaptée à leur fonction :
 - grappes noires très absorbantes : arrêt du réacteur
 - grappes grises moins absorbantes: pilotage du réacteur
- ❑ 53 pour les 900 MW, 61 pour les 1300 MW et 73 pour les 1450 MW
- ❑ Permet le suivi de charge: pilotage en mode G



(d'après Techniques de l'ingénieur, BN3090)

Quel sujet vous préoccupe? Réponse globale

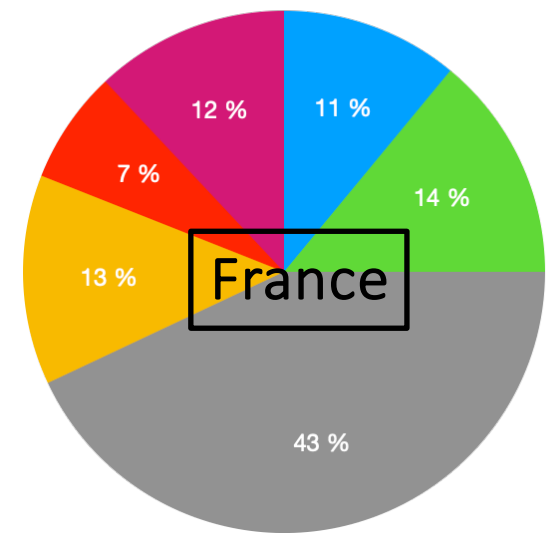
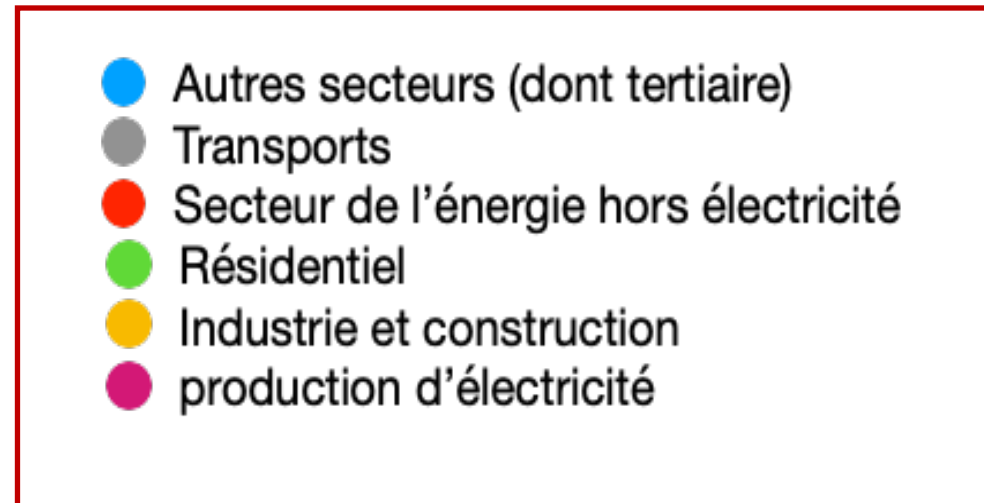
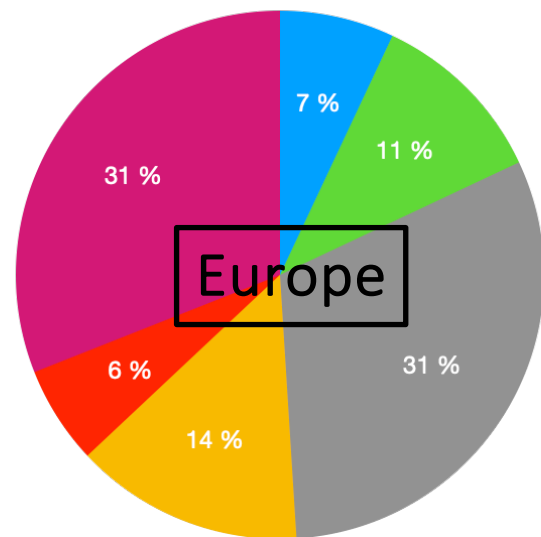
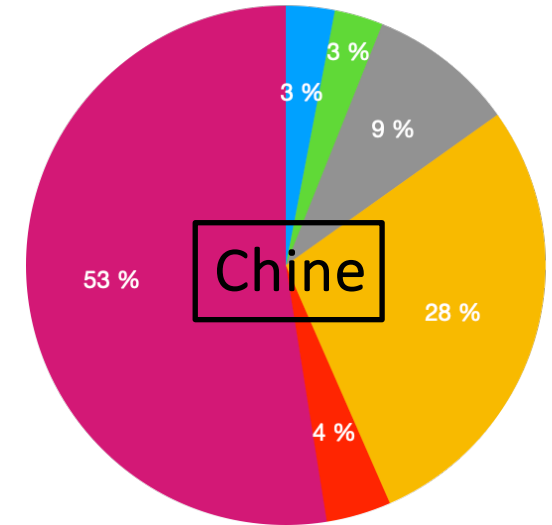
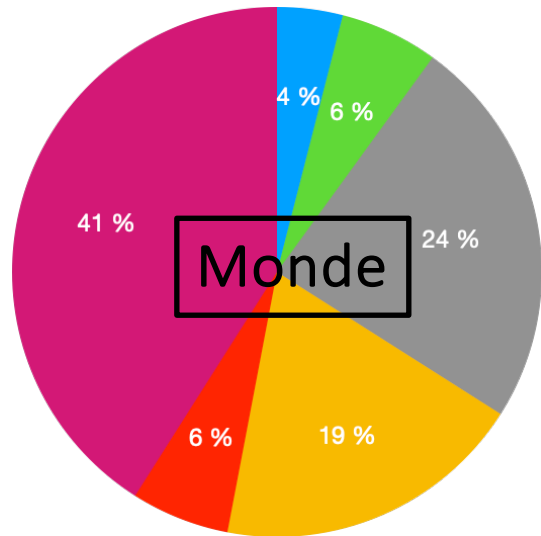
Q. Parmi cette liste, quels sont les sujets qui vous préoccupent le plus ?



Nouvelle modalité

Évolutions à considérer avec précautions

Répartition sectorielle émission de CO2 en 2021



(Source : AIE, 2020)

Quels leviers d'optimisation possibles?

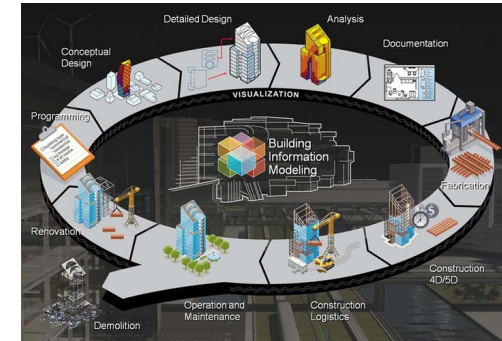


❑ Améliorer la constructibilité :

- grâce au REX de l'EPR de Flamanville (exemple: simplification du design génie civil)
- Instaurer un dialogue entre tous les acteurs (exemple: planning chantier conçu avec industriels du GC)
- Un planning optimisée entre les différents métiers (digitalisation du design et maquettes 3D et 4D)

❑ Optimiser la fabrication des équipements :

- Standardiser au maximum
- Chercher autant que faire se peut la modularité
- Utiliser la préfabrication en usine (exemple: tuyauterie)
- S'assurer de la qualité des procédés de fabrication



❑ Mettre au cœur des chantiers l'excellence opérationnelle :

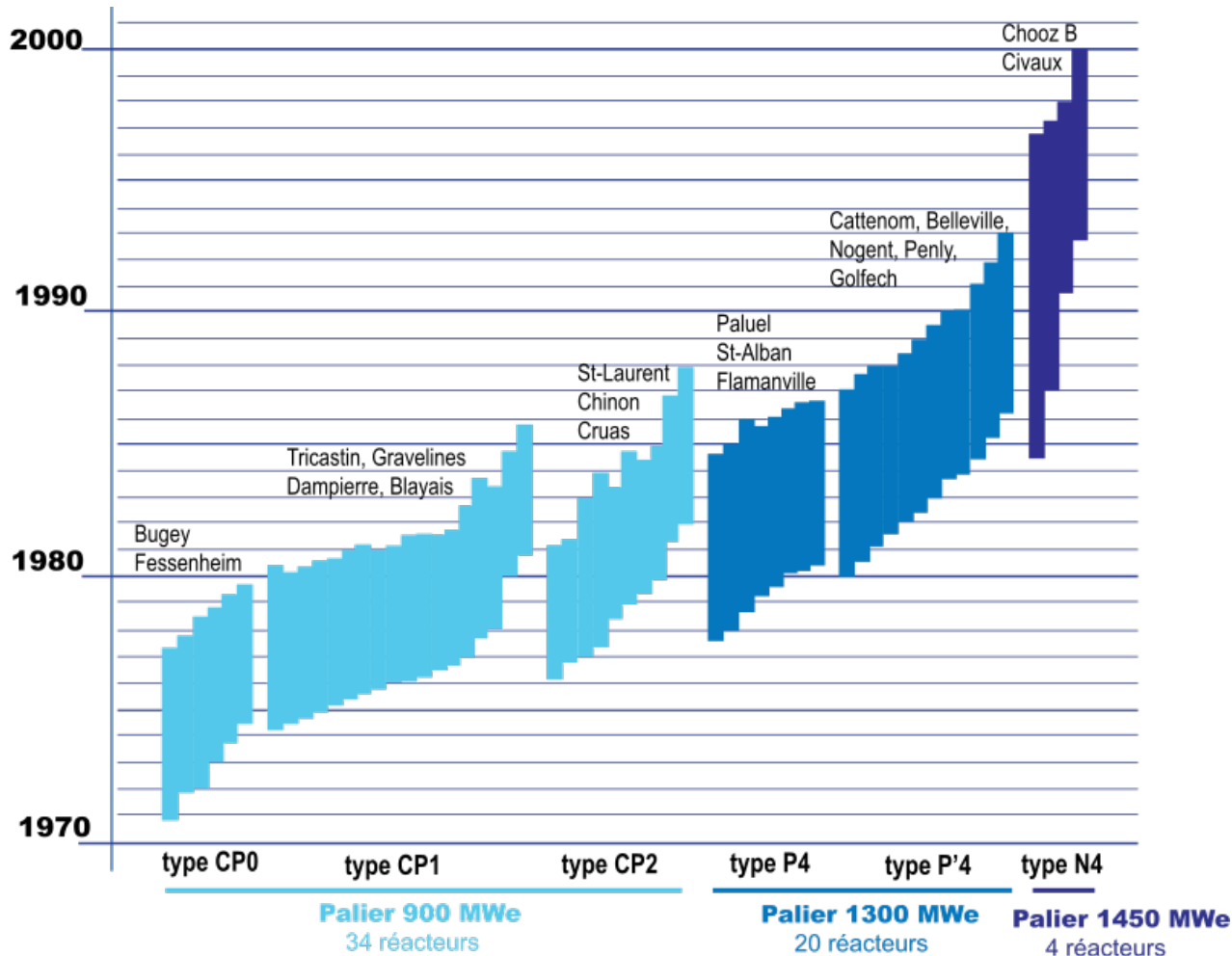
- Simplifier les exigences pour l'intervenant
- Mettre la priorité sur le geste technique bien fait du 1^{er} coup.
- Prise en compte des manutentions complexes et faisabilité de la maintenance dès la conception.



Quelques ordres de grandeur

1 homme (70kg)	7000 Bq (dont ~4500 Bq dûs au potassium-40 de os, le reste est dû au carbone-14)
1 kg de café	1000 Bq
1 litre d'eau de pluie	0.3 à 1 Bq
1 litre d'eau de mer	10 Bq
1 kg de sol granitique	8000 Bq
1 kg d'engrais (phosphate)	5000 Bq
1 kg de minerai d'uranium	25 millions Bq
1 Source radioactive médicale	100 000 milliards Bq
1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés	10 000 milliards Bq

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.

Futur et enjeux de la filière nucléaire

❑ Plusieurs importants projets : penser le présent et le futur

- Le grand carénage, jouvence usines du cycle
- Mise en service de l'EPR de Flamanville
- Construction des 6 (+8) EPR2
- Cigéo
- Projets de SMR/AMR
- Démantèlement des anciennes installations
- le projet du futur Porte avions nucléaire
- ITER

❑ 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



(Crédits photo Gifen)

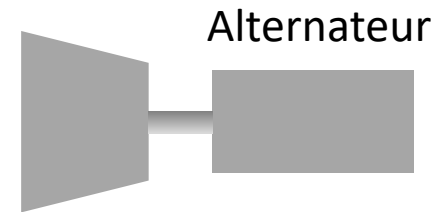
L'électricité

❑ 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.



Electricité



Alternateur



Electricité



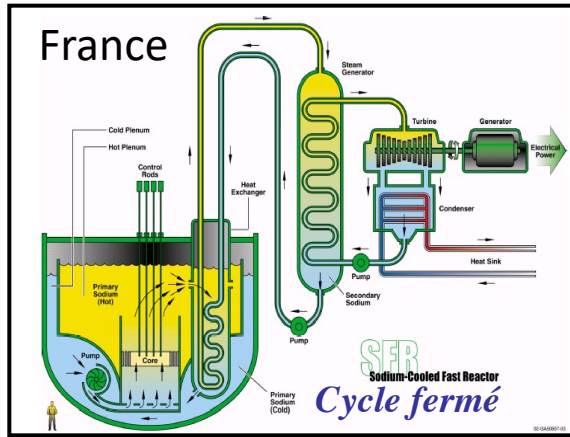
Electricité

Forum GenIV

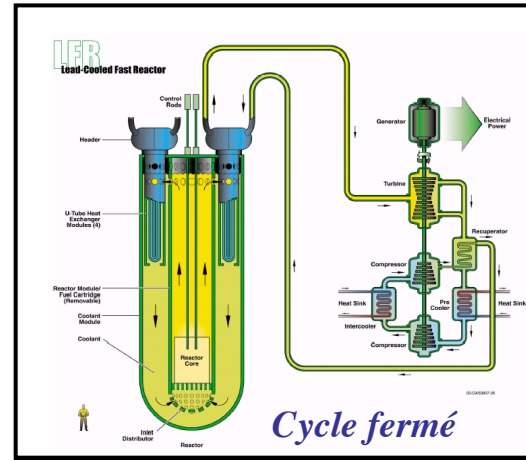
- ❑ Créé en 2001.
- ❑ 13 pays (Argentine, Australie, Brésil, Canada, Chine, France, Japon, Corée, Russie, Afrique du Sud, Suisse, Royaume-Uni et États-Unis), ainsi que l'Euratom - représentant les 27 membres de l'Union européenne.
- ❑ Accord de coopération pour développer la recherche nécessaire pour tester la faisabilité et les performances des systèmes nucléaires de quatrième génération.
- ❑ Il s'agit de développer pas seulement le réacteur mais aussi la fabrication du combustible, le retraitement et les installations de stockage
- ❑ Déploiement industriel d'ici 2030
- ❑ Le GIF a sélectionné six technologies de réacteurs :
 - le réacteur rapide refroidi au gaz (GFR),
 - le réacteur rapide refroidi au plomb (LFR),
 - le réacteur à sels fondus (MSR),
 - le réacteur rapide refroidi au sodium (SFR) ,
 - le réacteur refroidi à l'eau supercritique (SCWR),
 - le réacteur à très haute température (VHTR).



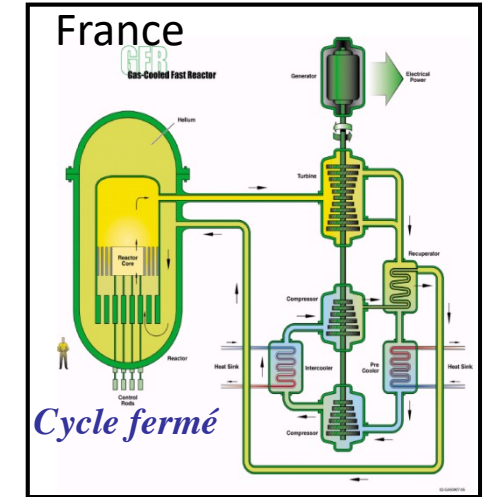
6 concepts innovants



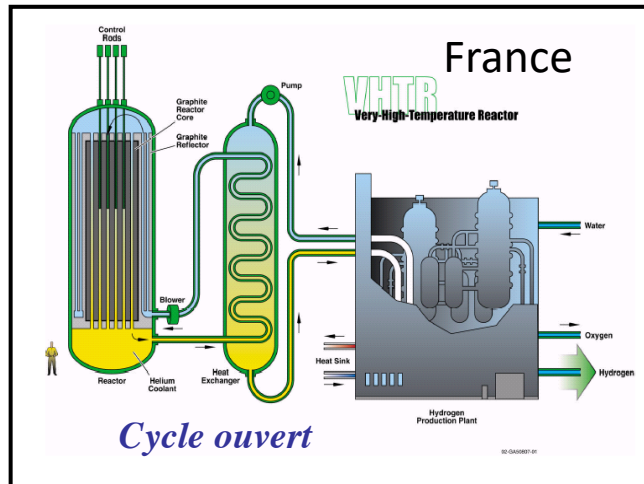
Rapide Sodium



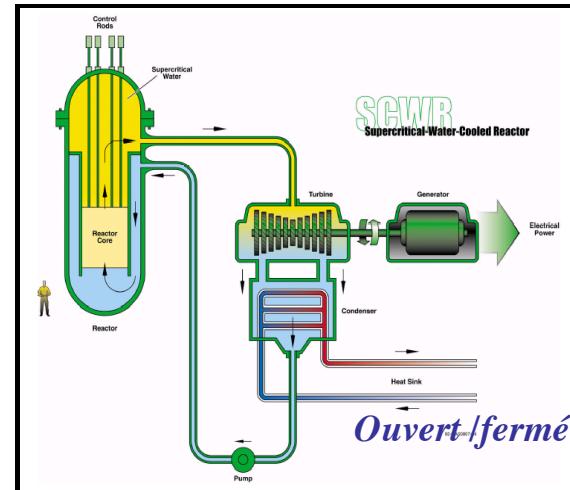
Rapide Plomb



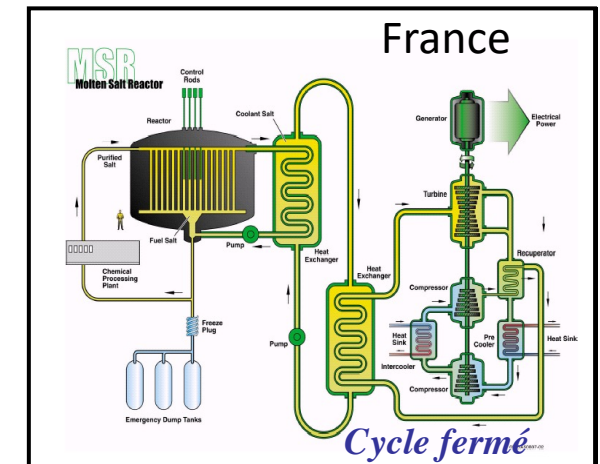
Rapide Gaz



Très Haute Température



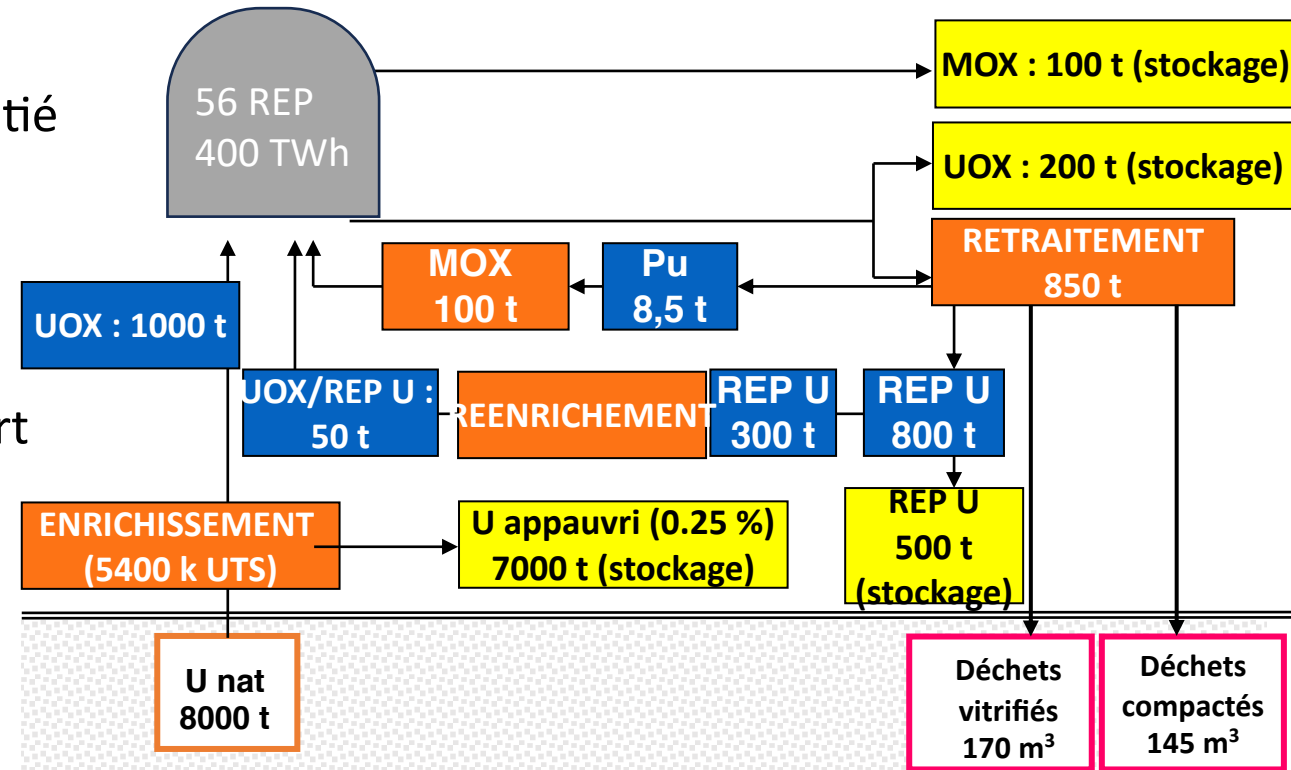
Eau Supercritique



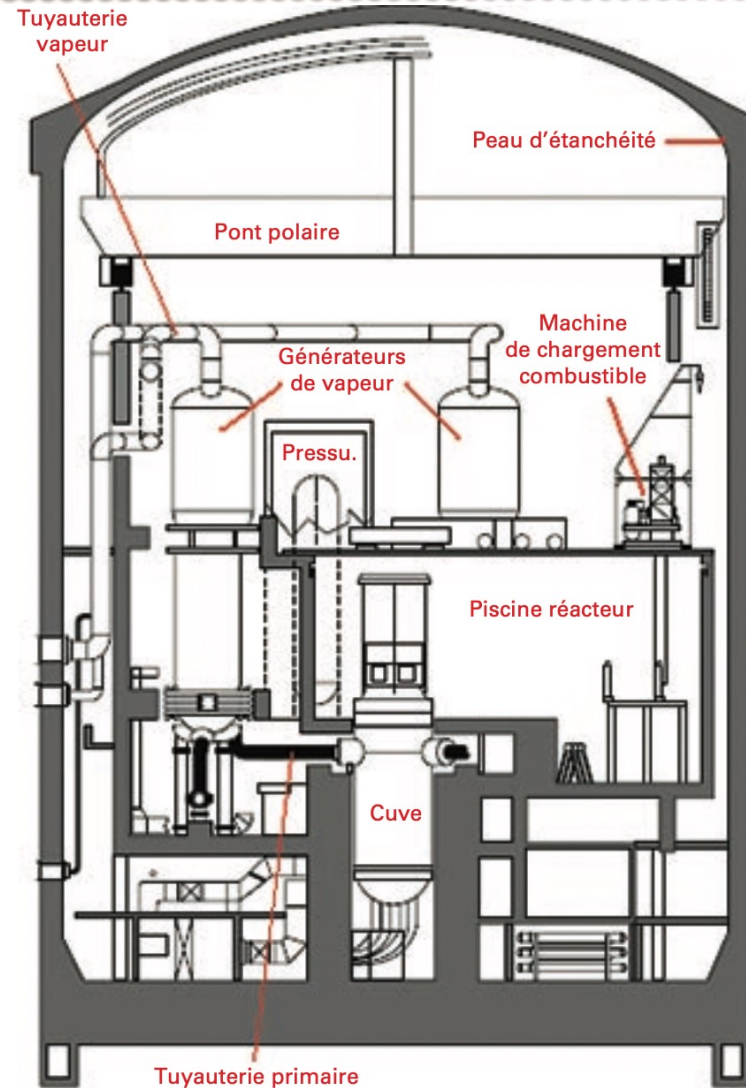
Sels Fondus

Flux de matières et déchets nucléaires

- ❑ Production annuelle de 400 TWh (= production annuelle du parc nucléaire français).
- ❑ 22 REP 900MWe chargés à 30% MOX
- ❑ Combustible oxyde mélange : U-238 + 8-10 % Pu (moitié Pu-239)
- ❑ MOX \approx 10% de la puissance totale du parc
- ❑ Le mono-recyclage du Pu \approx 1980 :
- ❑ Economie sur l'uranium naturel \approx 20% p/p cycle ouvert
- ❑ Déchets finaux sans Pu \approx 99,54% du Pu récupéré
- ❑ Entreposage des combustibles usés UO₂ stabilisé \approx 11 900 t fin 2019
- ❑ Entreposage du combustible usé MOX qui augmente (130 t/an). Fin 2019 \approx 2 270 t.



Aménagement général du BR de Fessenheim

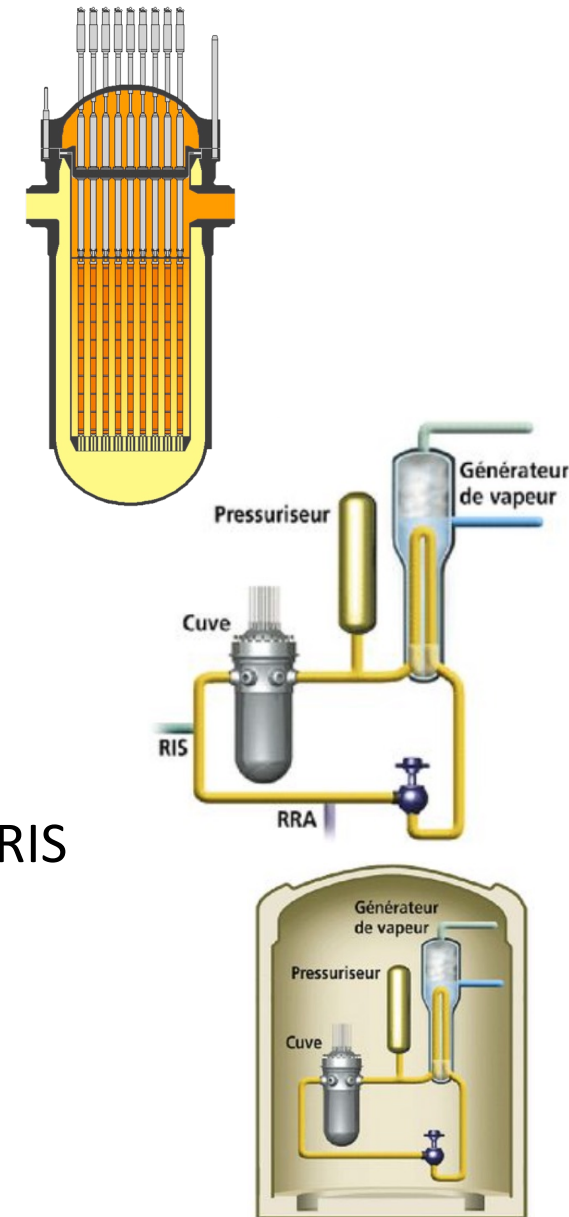


(Source Techniques de l'ingénieur dossier BN3296)

Les trois fonctions essentielles de la sûreté nucléaire pour un réacteur nucléaire

□ La sûreté nucléaire repose sur le maintien de trois fonctions :

1. **Contrôle** de la réaction en chaîne, et donc de la puissance produite :
 - Barres de contrôle
 - Concentration en bore (absorbeur de neutrons)
2. **Refroidissement** du combustible, évacuer la puissance résiduelle:
 - fonctionnement normal : évacuation par les GV
 - À l'arrêt du réacteur : circuit de réfrigération RRA
 - En situation incidentelle/accidentelle : circuit d'injection de sécurité RIS
3. **Confinement** des produits radioactifs.
 - trois barrières: gaine de combustible, circuit primaire, enceinte de confinement.



Les systèmes auxiliaires

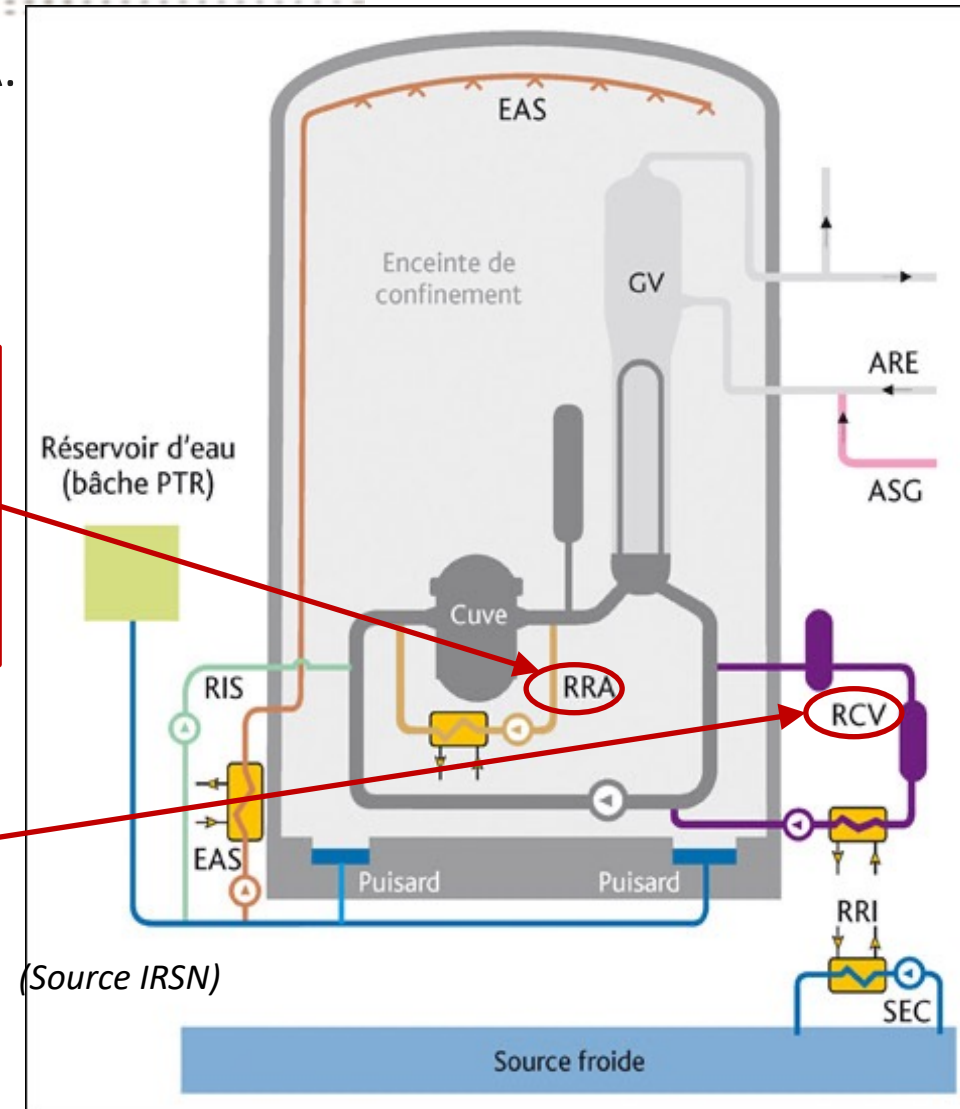
- ❑ Deux circuits auxiliaires sont rattachés au circuit primaire: RCV et RRA.
- ❑ Fonctionnement normal, mise à l'arrêt ou redémarrage,
- ❑ Contribuent aux trois fonctions de sûreté.

RCV = circuit de contrôle chimique et volumétrique du réacteur

- Ajuster la concentration du bore dans l'eau du circuit primaire
- Ajuster la masse d'eau dans le circuit primaire ;
- Ajuster la chimie du circuit primaire (pH, impuretés).

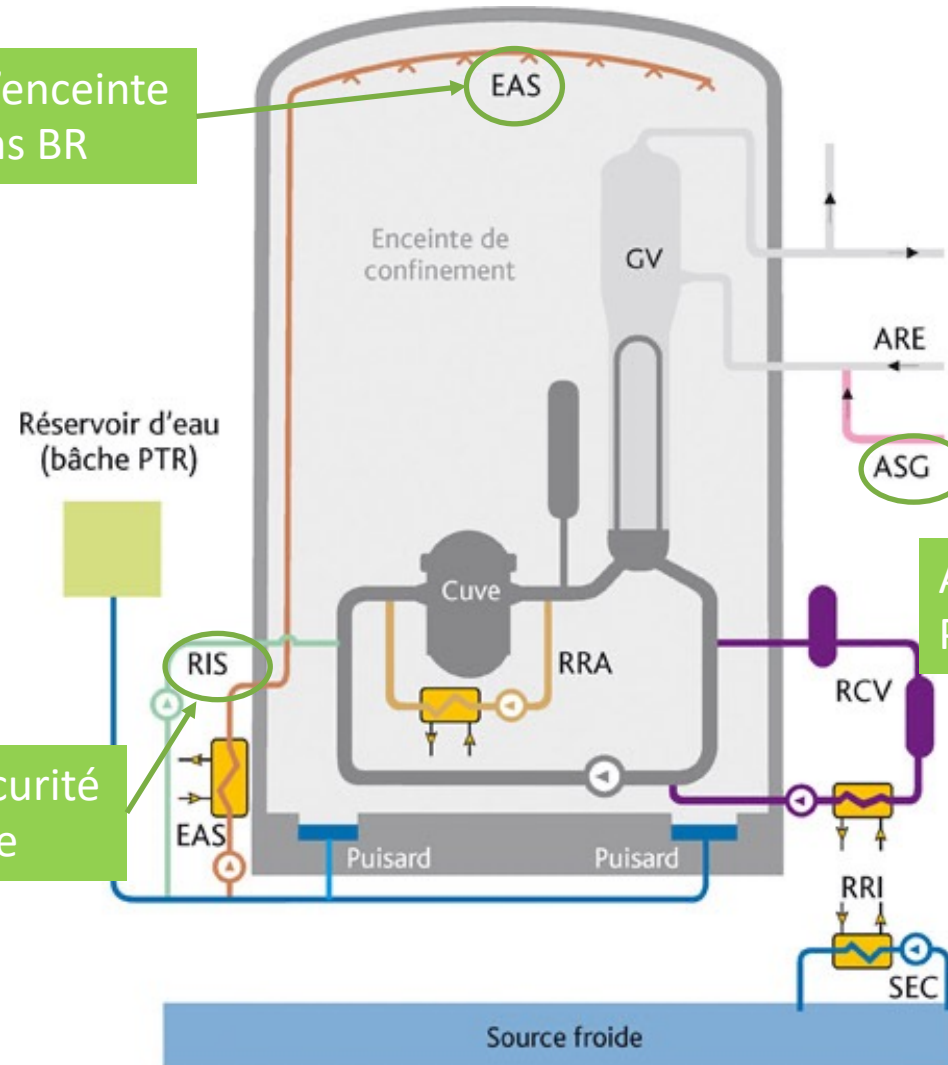
RRA = circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt

- Evacuer la chaleur résiduelle produite par le combustible;
- Refroidir les divers équipements du circuit primaire.



Rôle des systèmes de sauvegarde

EAS= circuit d'aspersion de l'enceinte
Permet de baisser P et T dans BR

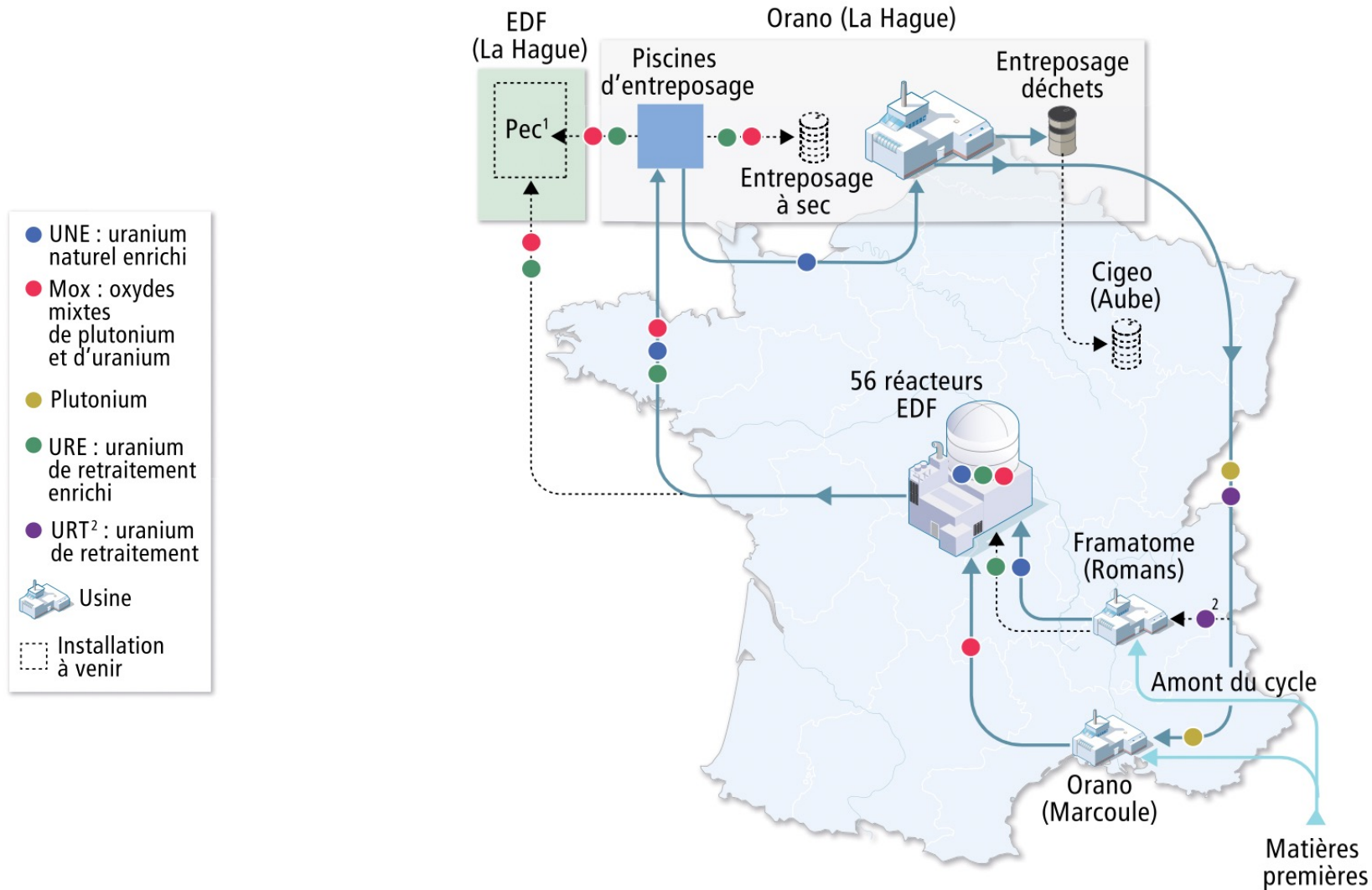


ASG = circuit d'alimentation de secours des GV
Prend le relais de ARE si défaillance.

RIS = système d'injection de sécurité
Permet d'injecter de l'eau borée

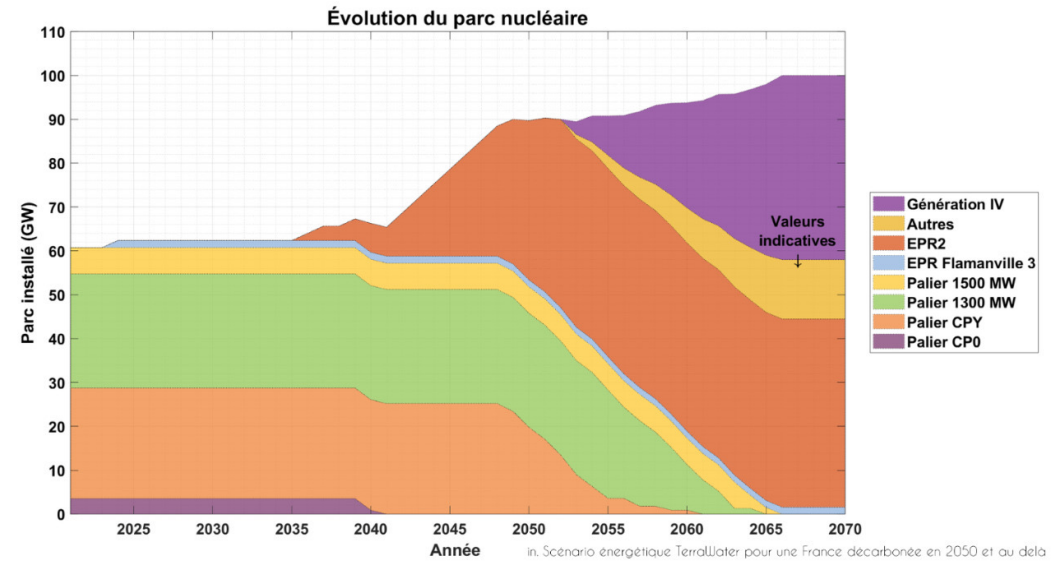
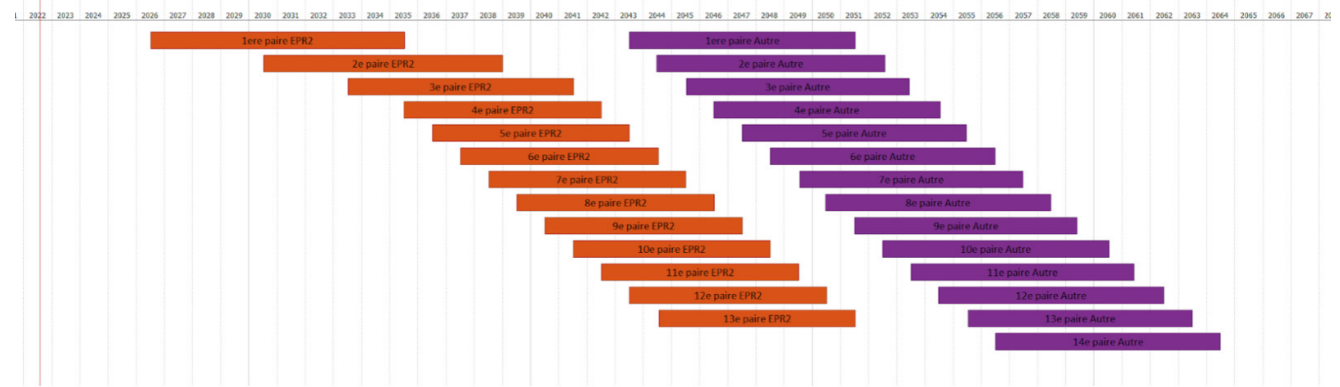
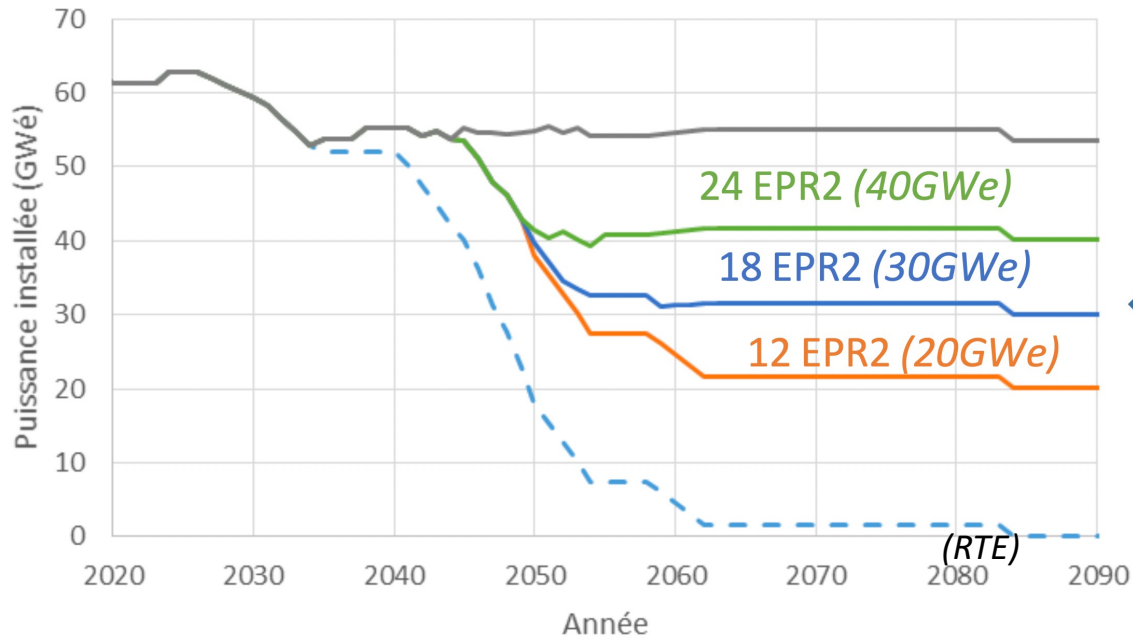
(D'après IRSN)

Résumé cycle du combustible



(Source IRSN)

Les différents scénarios avec EPR2 et plus



(Voix du nucléaire)

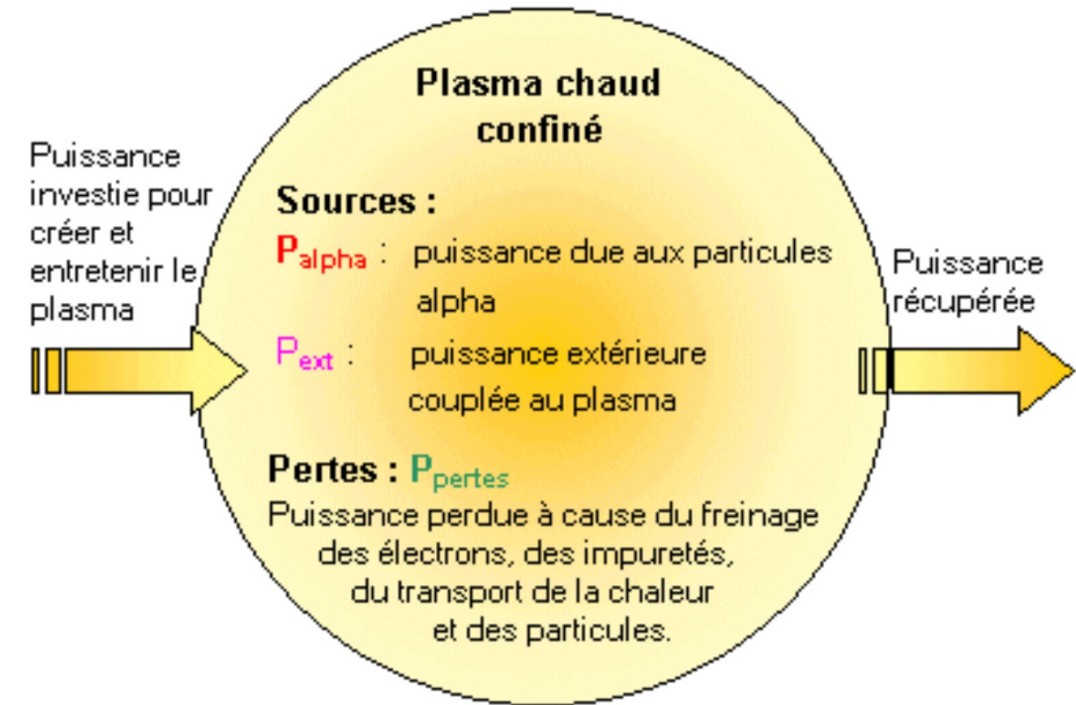
Bilan d'énergie d'un plasma

► Le bilan

La variation temporelle de l'énergie du plasma W peut donc s'écrire : $dW/dt = P_{\alpha} + P_{\text{extérieure}} - P_{\text{pertes}}$

Rappel : seules les particules alpha cèdent leur énergie au plasma, le reste de la puissance fusion est dissipée dans les composants entourant le plasma.

Si le terme sources est supérieur au terme pertes ($dW/dt > 0$), le plasma gagne de l'énergie, dans le cas contraire ($dW/dt < 0$), il en perd. Si les sources compensent exactement les pertes ($dW/dt = 0$), le plasma est stationnaire. A partir de là, on peut définir plusieurs quantités utiles.



(Source CEA)

La physique des plasmas

- ❑ Bilan énergétique du plasma : sources d'énergie qui alimentent le plasma et pertes d'énergie qui le refroidissent.
- ❑ bilan équilibré (sources compensent pertes) = plasma stationnaire (pas de variation dans le temps)

$$\longrightarrow dW/dt = P_{\alpha} + P_{\text{extérieure}} - P_{\text{pertes}} = 0$$

- ❑ Les sources d'énergie : P_{fusion} et $P_{\text{extérieure}}$
 - $P_{\text{fusion}} = P_{\alpha} + P_{\text{neutrons}}$
- ❑ Les pertes d'énergie (importantes) : P_{pertes}
 - Déplacement des particules et de la chaleur du centre vers l'extérieur.
 - D'autres phénomènes (pertes par rayonnement, pertes dues aux impuretés...).
- ❑ Critère de Lawson : paramètres physiques du plasma

Paramètres physiques du plasma:

- Le temps de confinement de l'énergie t_E
- Le facteur d'amplification Q

Critère de Lawson : relation entre efficacité du confinement, densité et température du plasma.

$$n_e \cdot T \cdot t_E > 3 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

Conf. magnétique

d faible et t_E longs
(champ magnétique)

Conf. inertiel

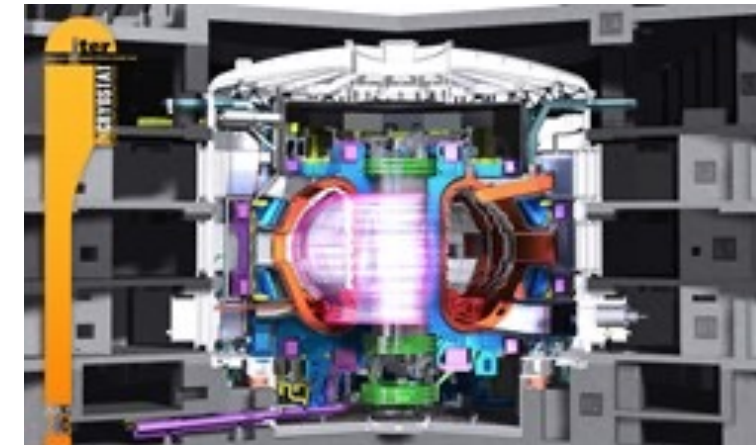
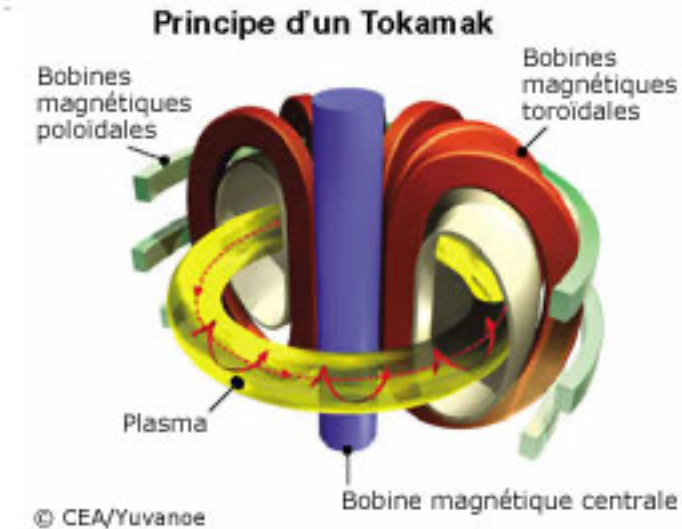
d élevée (laser) et t_E court.

Le facteur Q

- $Q = 0$ Dans la phase transitoire d'échauffement, il n'y a pas de fusion, donc pas d'énergie produite ;
- $Q < 1$ Démarrage des réactions de fusion : Lorsque la température et le confinement atteignent les valeurs critiques, quelques noyaux finissent par se rencontrer avec suffisamment d'énergie pour fusionner, mais l'énergie produite ne compense pas l'énergie rayonnée (qui correspond au refroidissement naturel).
Exemple : 50 MW de chauffage produisent 60 MW de chaleur, soit 10 MW liés à la fusion : $Q = 0,2$;
- $Q = 1$, le *breakeven* : les réactions de fusion produisent autant d'énergie qu'elles en consomment. Malheureusement, il faut toujours chauffer le plasma car 80 % environ de l'énergie rayonnée par la fusion traverse le plasma et ne contribue pas à son maintien en température. Techniquement, c'est un point arbitraire qui n'est pas relié à un phénomène physique. Il est cependant souvent utilisé comme objectif à atteindre ;
- $Q = 5$: les réactions de fusion contribuent autant au chauffage du plasma que le chauffage externe ;
- $Q = 20$: la qualité de la réaction (température/confinement) est proche de $Q = \infty$, mais si on arrête le chauffage externe, le plasma refroidit rapidement et les réactions s'arrêtent en quelques secondes ;
- $Q = \infty$, l'allumage (*ignition* en anglais) : 100 % de l'énergie nécessaire pour maintenir la température du plasma est issue des réactions de fusion. La conséquence directe est qu'il devient possible d'arrêter de chauffer le plasma et de continuer à observer les réactions de fusion.

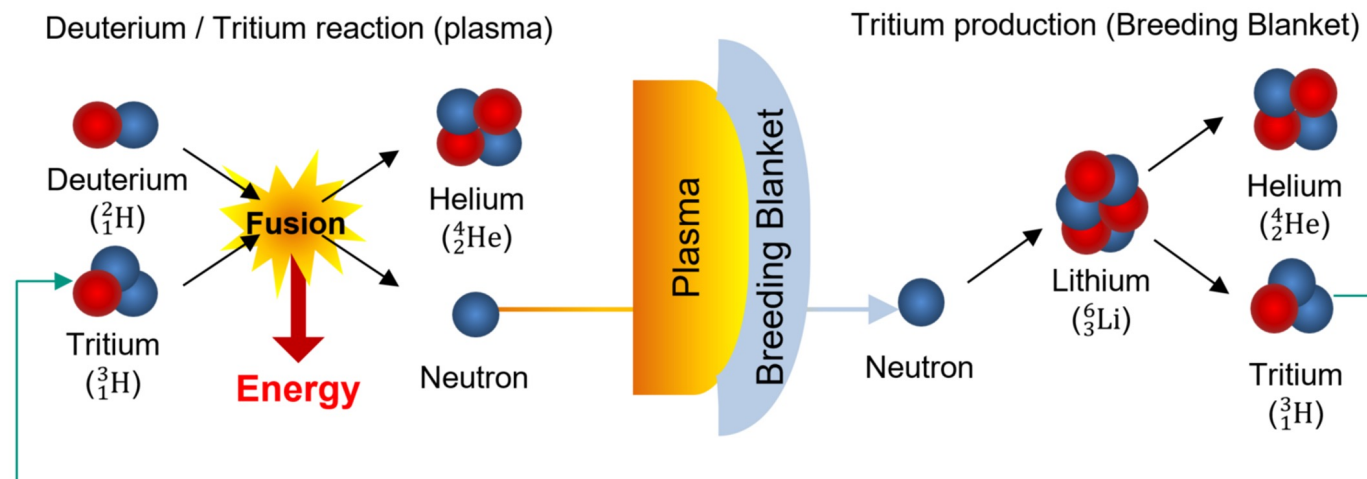
La fusion par confinement magnétique

- ❑ Principe : Chauffer un gaz pour créer un plasma, qui est confiné par un puissant champ magnétique.
- ❑ Prototype Iter (Réacteur thermonucléaire expérimental international), puis la construction d'un prototype industriel, Demo, à l'horizon 2040.
- ❑ Le projet ITER permettra aux scientifiques d'étudier, pour la première fois, la physique d'un plasma en combustion, chauffé par des réactions de fusion internes et entretenu pendant des temps "longs" (supérieurs à 300 secondes) grâce à un confinement magnétique (tokamak).
- ❑ Pour que le plasma confiné produise plus d'énergie qu'il n'en faut pour le chauffer, il faut qu'il soit assez chaud, assez dense et confiné suffisamment longtemps.



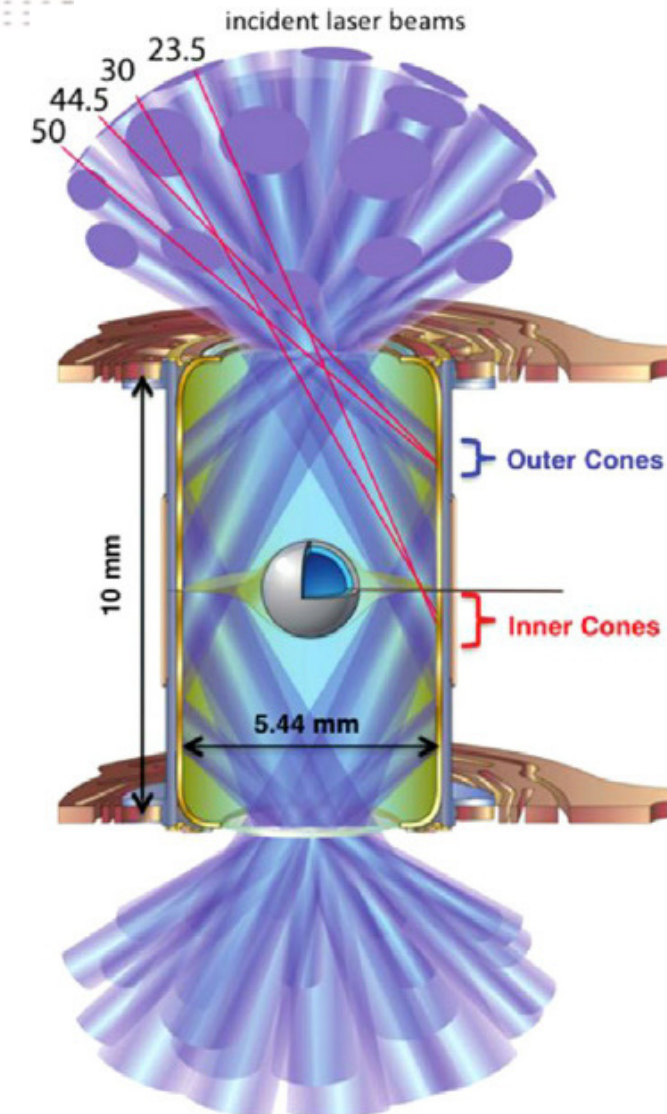
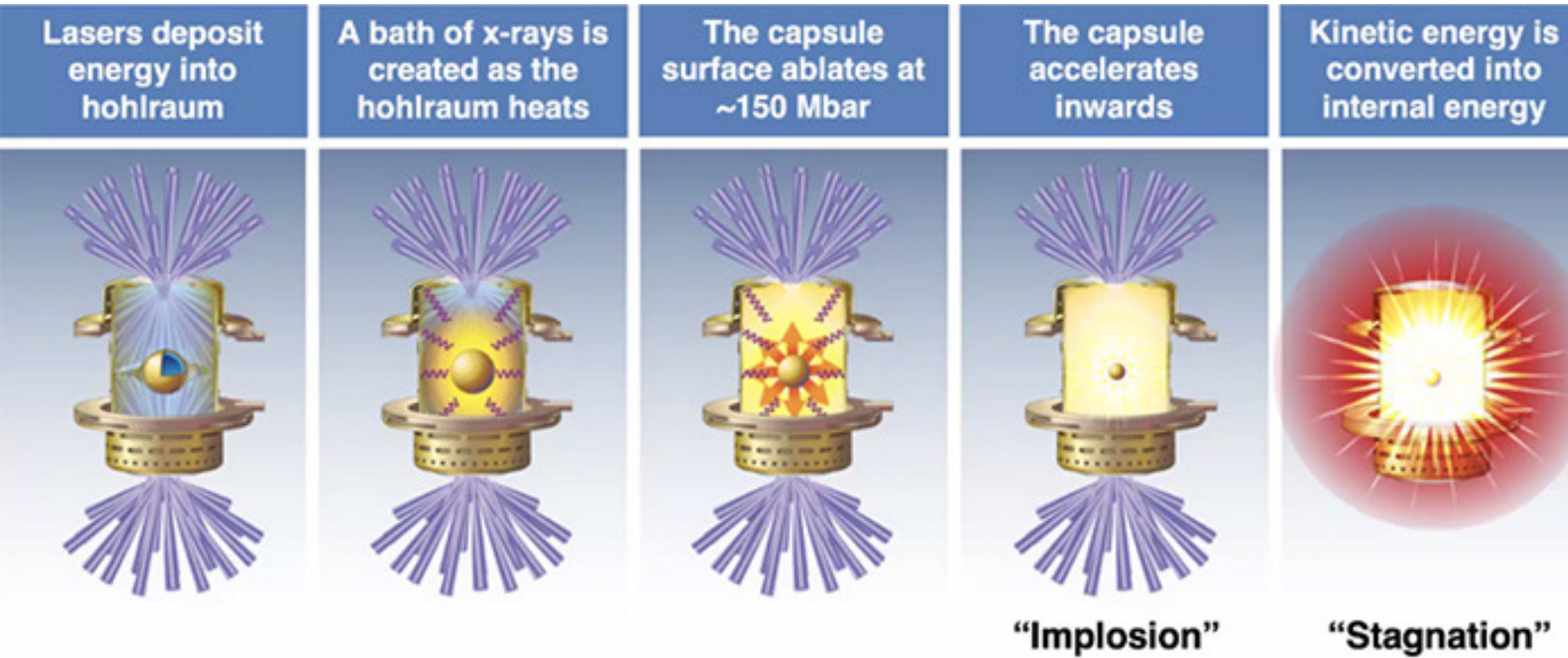
Les ressources

- ❑ Les combustibles envisagés pour la fusion nucléaire sont le deutérium et le tritium, tous deux isotopes de l'hydrogène.
- ❑ Le deutérium est présent en grande quantité dans la croûte terrestre et dans les océans.
- ❑ Le tritium, il n'existe pas à l'état naturel sur Terre. L'idée est de le produire directement dans les futurs réacteurs à fusion nucléaire en faisant interagir les neutrons résultats de la fusion avec du lithium.
- ❑ Le lithium se trouve en grande quantité dans la croûte terrestre et permettrait une exploitation de la fusion pendant plus de 1000 ans. Le lithium est également présent dans les océans et si dans le futur nous parvenons à l'extraire, alors la production d'énergie par fusion nucléaire sera théoriquement possible pendant des millions d'années.



(Source Greg de Temmerman)

La fusion par confinement inertiel



(Source NIF)