



L'énergie

Enjeux et défis pour l'avenir

Régis BAUDRILLART

Président du groupe régional Sfen Bourgogne-Franche-Comté

IHEDN Bourgogne

28 janvier 2023



Sommaire

Énergie

- Définition
- Les différentes formes d'énergie
- La production et la consommation d'énergie
- Ordres de grandeur

Enjeux

- Satisfaction des besoins
- Économie et souveraineté
- Climatiques : observations, causes et conséquences

Défis

- La neutralité carbone en 2050
- Défi économique et industriel
- La gestion de l'intermittence des énergies renouvelables solaires et éoliennes
- Le nouveau nucléaire (renouvellement du parc nucléaire français, durabilité, nouveaux acteurs)

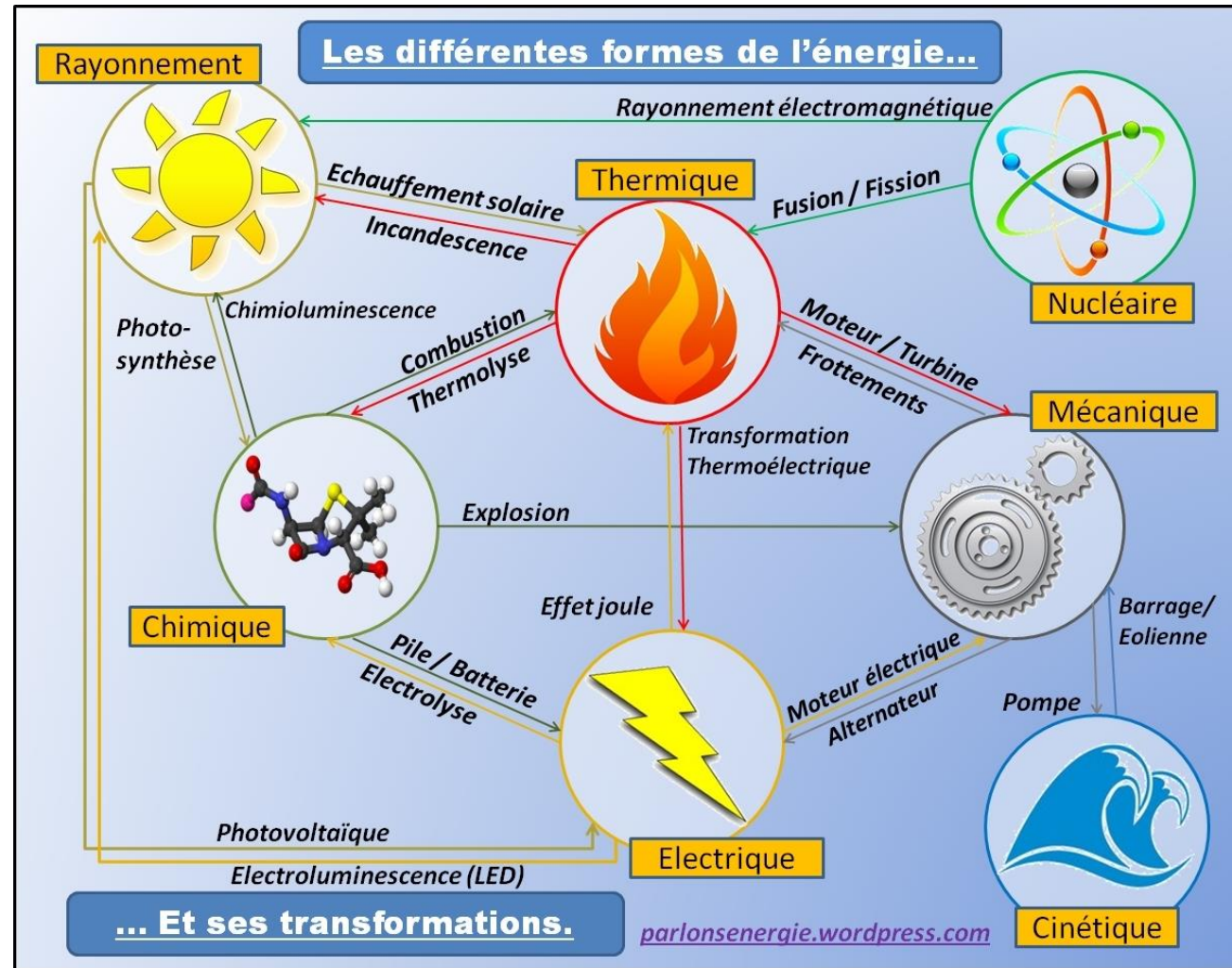
L'énergie



Définition

- Le mot « **énergie** » vient du Grec Ancien « **énergéia** », qui signifie « La force en action ». Ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps.
- Aujourd'hui, **l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations »**. Par exemple, l'énergie c'est ce qui permet de fournir du travail, de produire un mouvement, de modifier la température ou de changer l'état de la matière.
- **Toute action humaine requiert de l'énergie : le fait de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets et même de vivre.**
- **Ne pas confondre énergie et puissance : Puissance = Energie/Temps**
Ex : Le TNT est un explosif très puissant
mais 1 kg de TNT produit 4 fois moins d'énergie qu'1 kg de sucre !

Les différentes formes de l'énergie



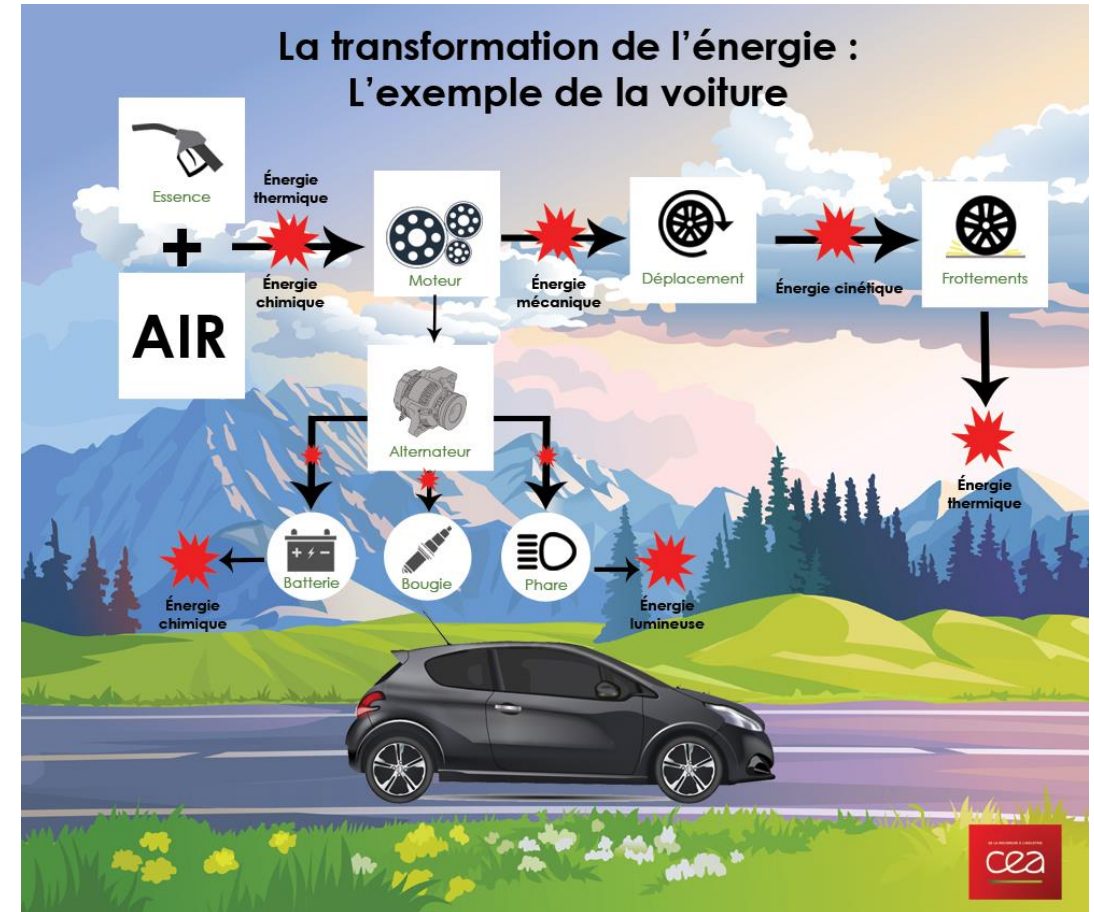
La loi de conservation de l'énergie

« une loi que l'on ne peut pas abroger »

- **L'énergie se conserve.**

La quantité totale d'énergie dans un système donné ne change pas, on ne peut donc ni la créer, ni la détruire.

L'énergie est transmise d'un élément vers un autre, souvent sous une forme différente.



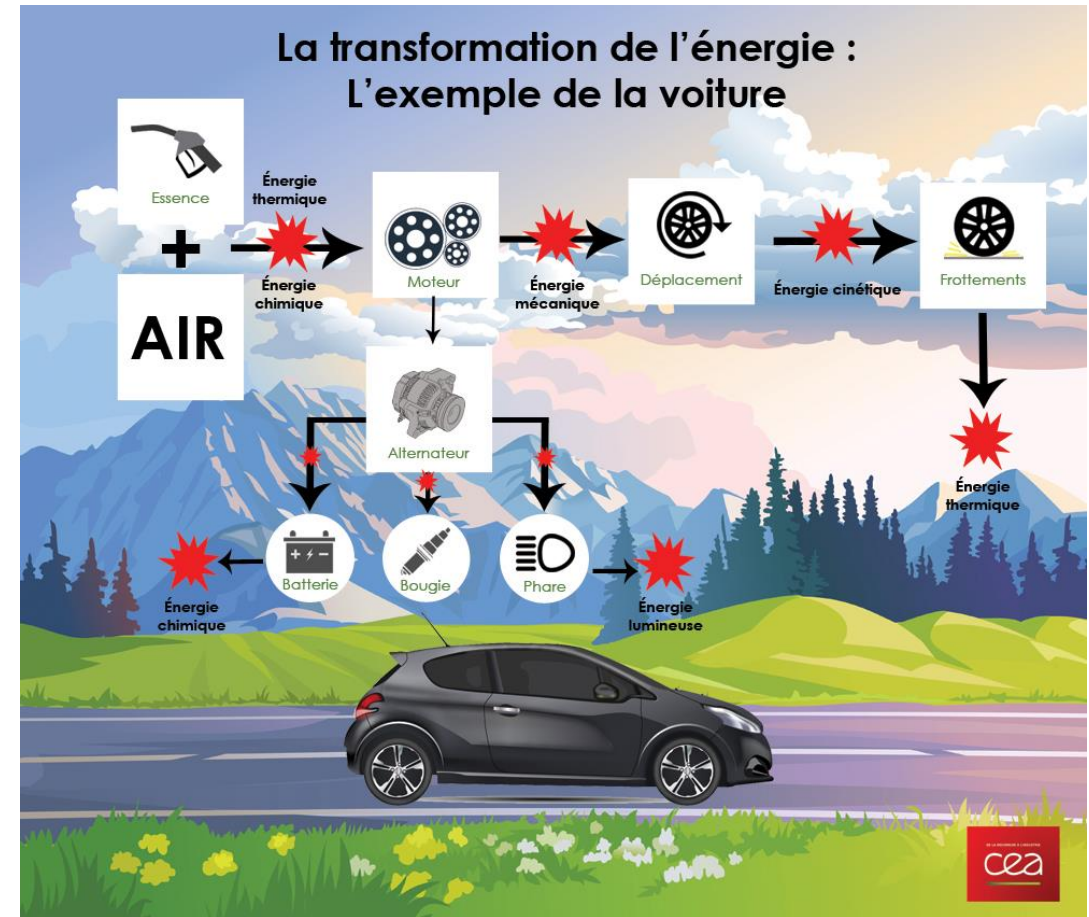
La loi de conservation de l'énergie

« une loi que l'on ne peut pas abroger »

- **L'énergie se conserve.**

La quantité totale d'énergie dans un système donné ne change pas, on ne peut donc ni la créer, ni la détruire.

L'énergie est transmise d'un élément vers un autre, souvent sous une forme différente.

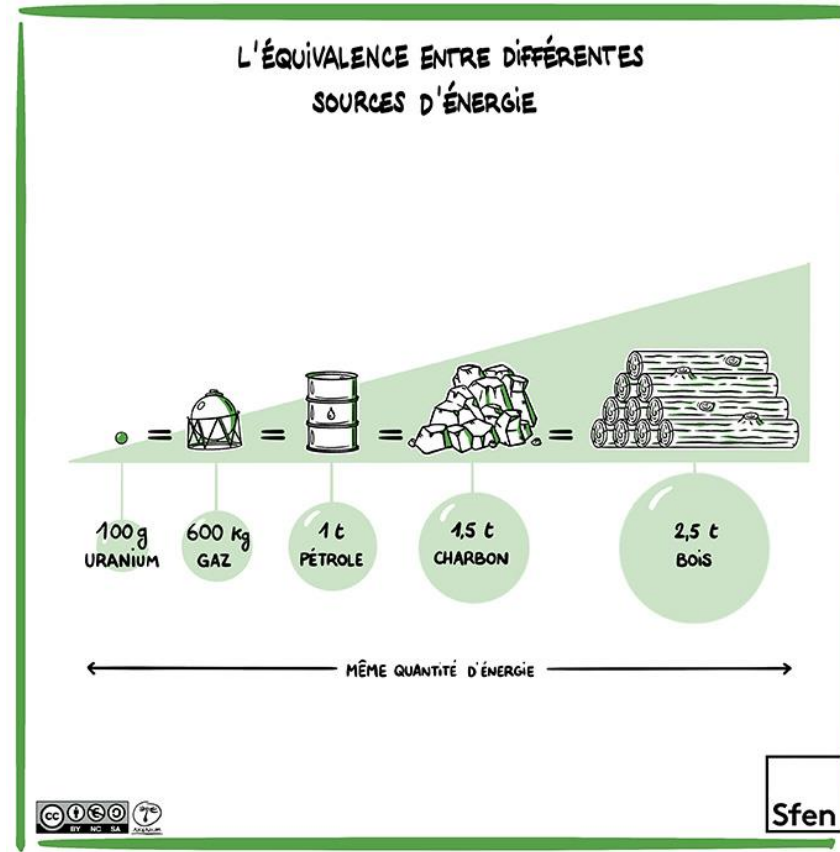


Les différentes unités de l'énergie

- **Le joule (J) = déplacer d'un mètre une force d'un newton**
 - Élever d'un mètre environ 100g sur terre
- **La calorie = élever d'un degré un g d'eau**
 - 1 calorie = 4,18 J
- **Les Wh = maintenir une puissance d'un watt (1 Joule par seconde) pendant une heure**
 - 1 Wh = 3 600 J
- **La tonne équivalent pétrole (tep) = Energie contenue dans une tonne de pétrole**
 - 1 tep = 42 000 000 000 J = 11 600 000 Wh = 11 600 kWh = 11,6 MWh

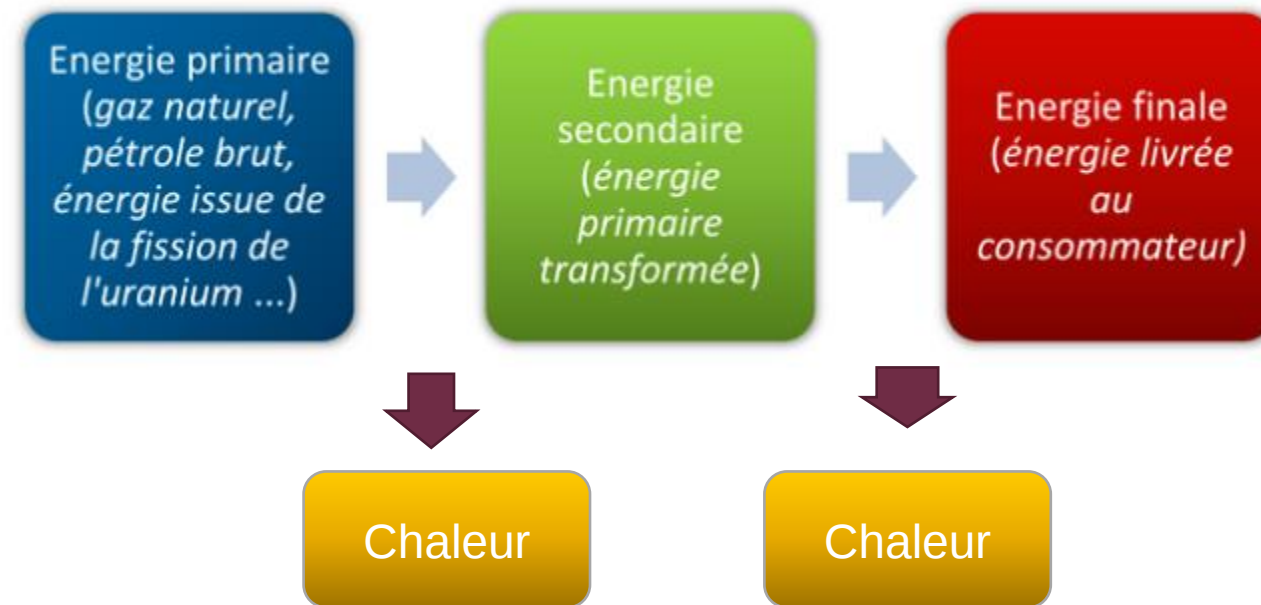
Quelques ordres de grandeur

- Toutes les sources d'énergie ne sont pas équivalentes



Production- Consommation de l'énergie

De l'énergie primaire à l'énergie finale



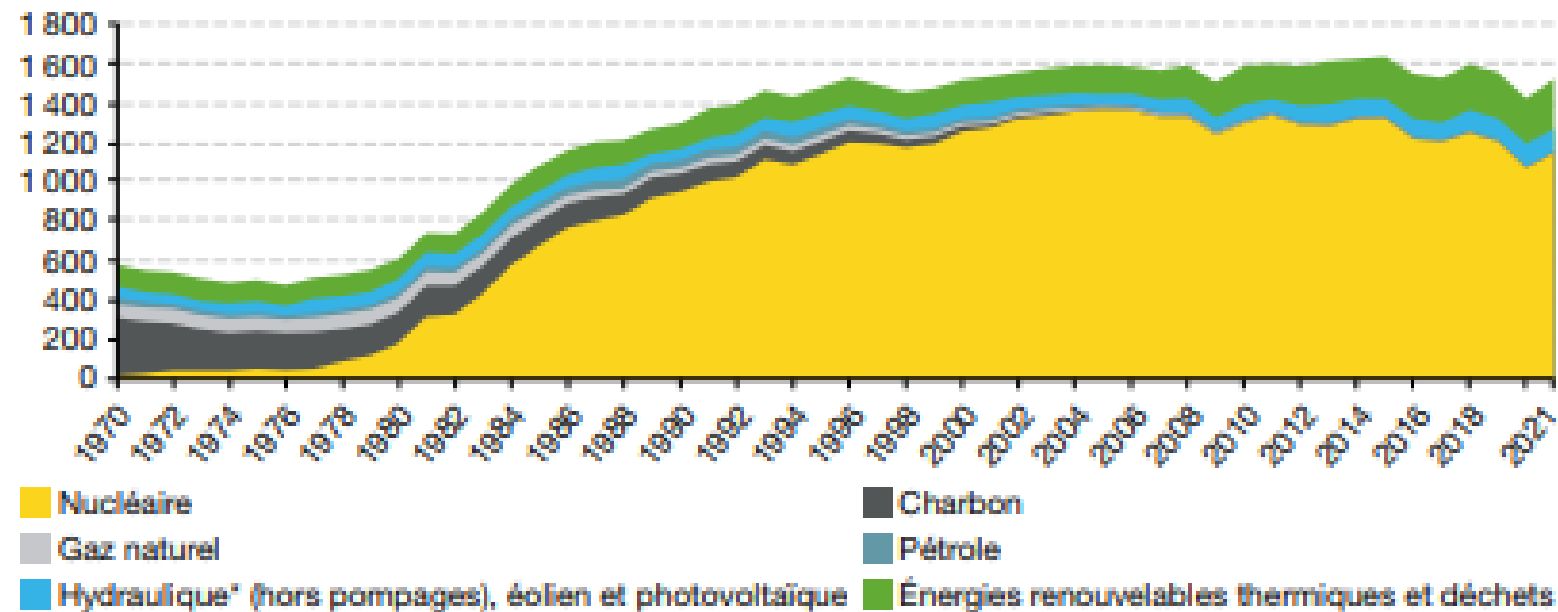
Énergie primaire - France

En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées (Valéry Giscard d'Estaing 1976)

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 1 524 TWh en 2021

En TWh



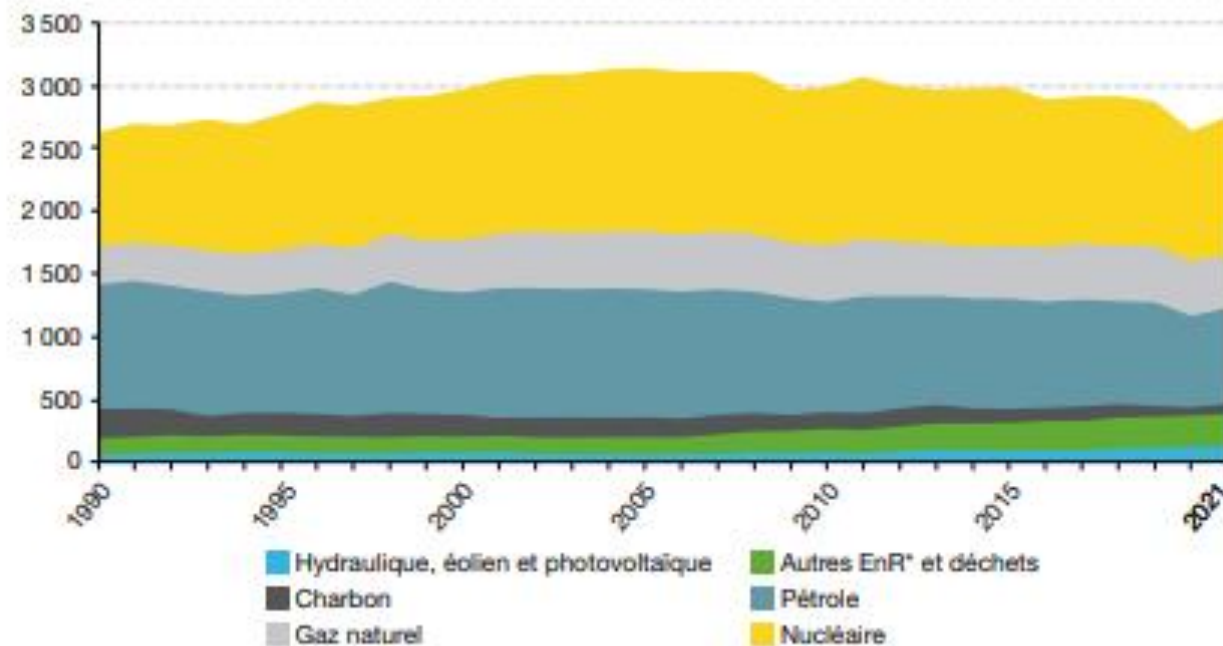
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Énergie primaire France

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE

TOTAL : 2 759 TWh en 2021 (donnée corrigée des variations climatiques)

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



* EnR : énergies renouvelables.

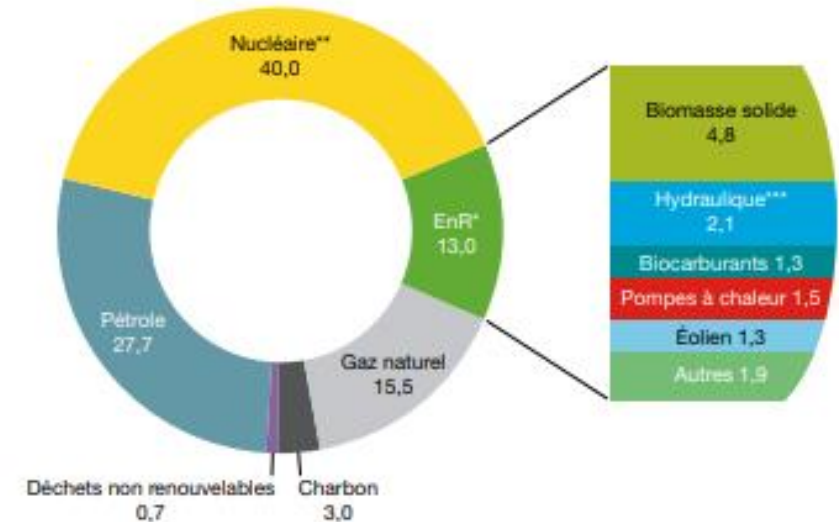
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 2 769 TWh en 2021 (donnée non corrigée des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



* EnR : énergies renouvelables.

** Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale comparée à la production nucléaire.

*** Hydraulique hors pompages.

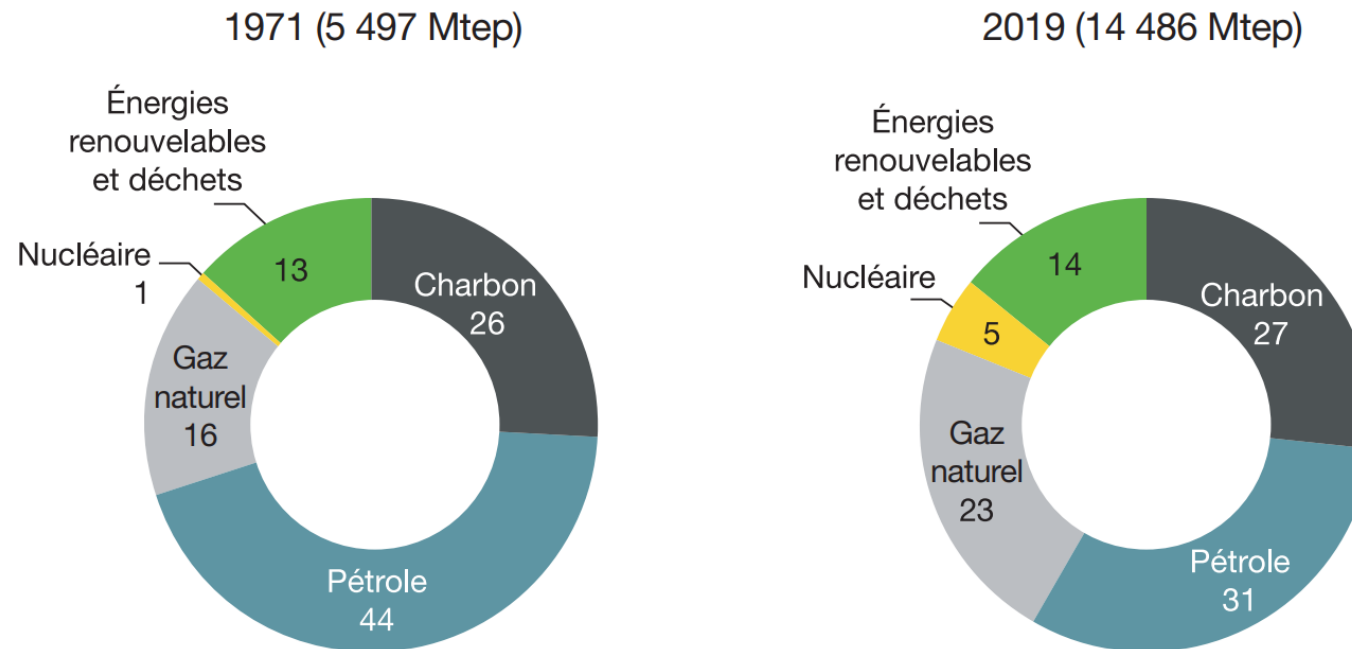
Champ : France entière (y compris DROM).

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

L'énergie primaire dans le monde

MIX ÉNERGÉTIQUE PRIMAIRE DANS LE MONDE

En %



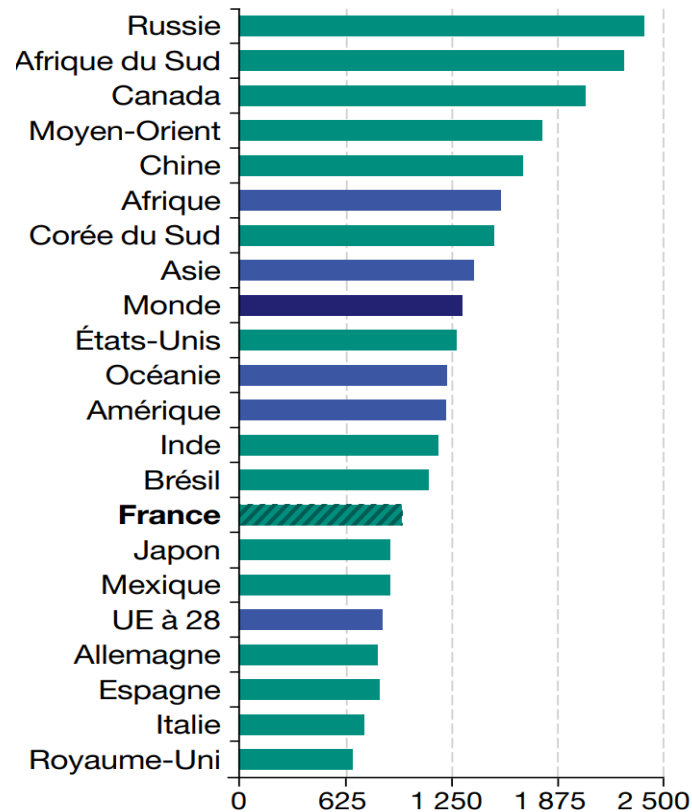
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Consommation d'énergie primaire

INDICATEURS D'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE EN 2019

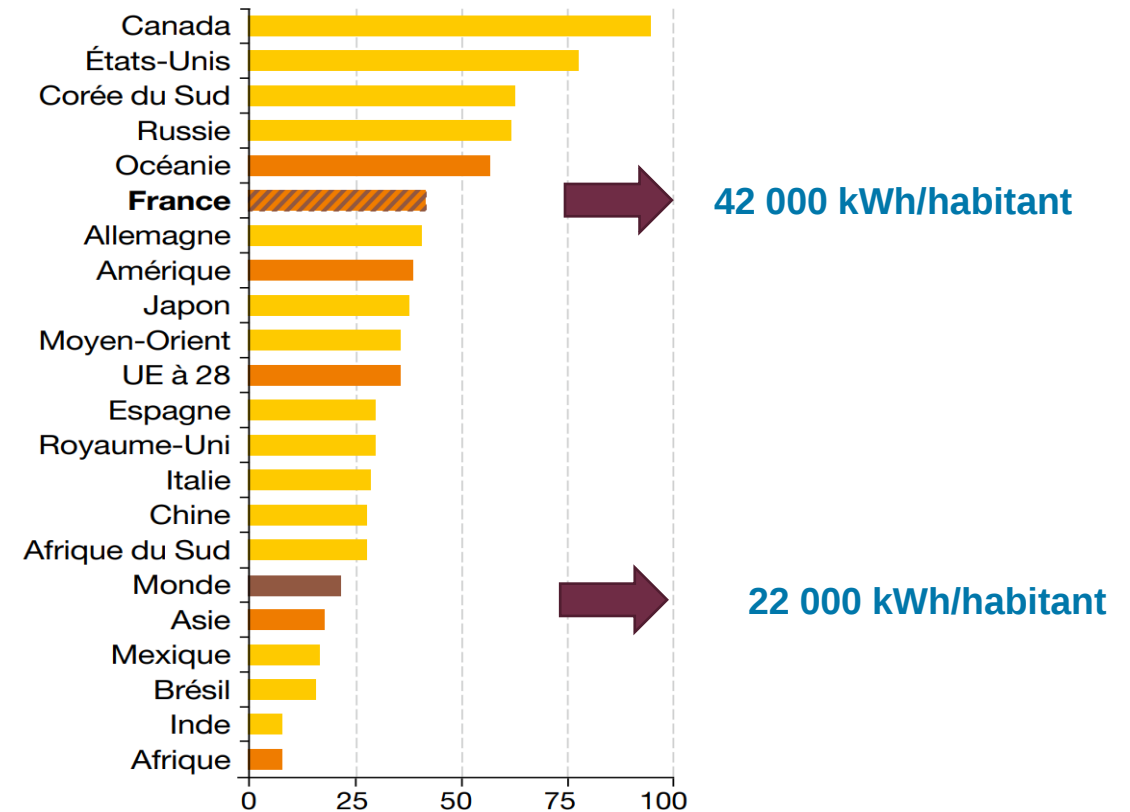
Consommation primaire d'énergie/PIB

En MWh/M US\$ 2015 ppa*



Consommation primaire d'énergie/population

En MWh/habitant



* Millions de US\$₂₀₁₅, Parité de pouvoir d'achat.

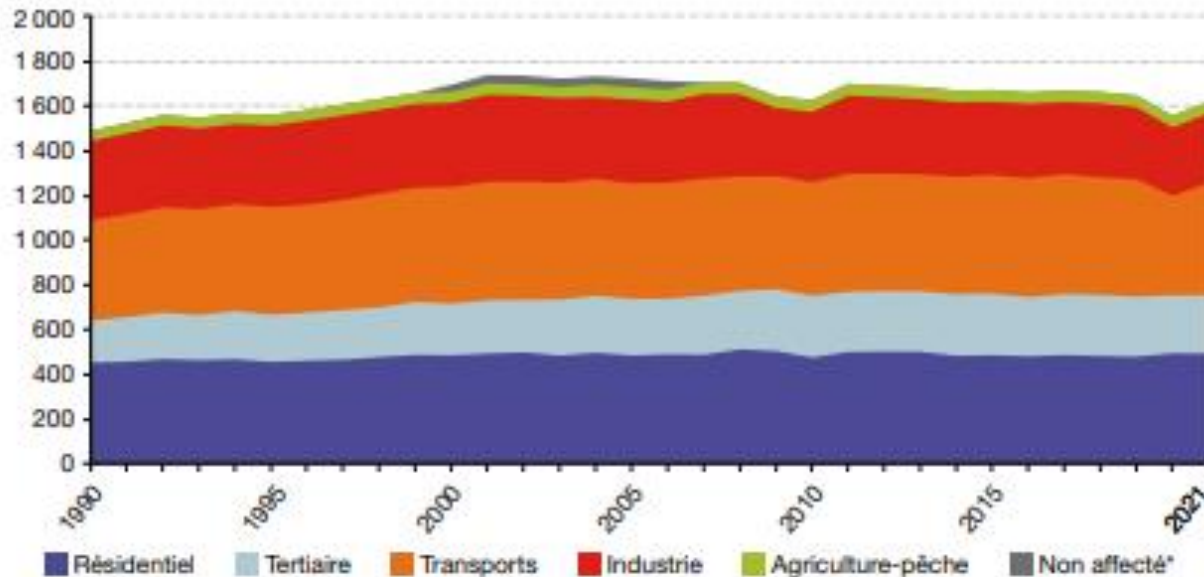
Source : calculs SDES, d'après les données de l'AIE

Énergie finale France

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR

TOTAL : 1 618 TWh en 2021 (donnée corrigée des variations climatiques)

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



* La répartition de la chaleur par secteur consommateur n'est pas disponible entre 2000 et 2006.

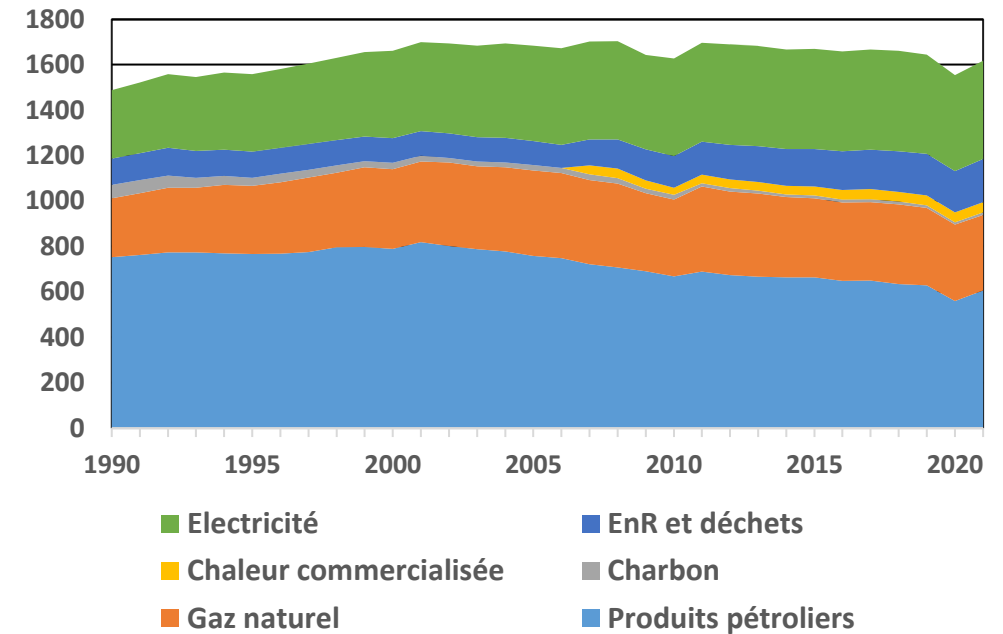
Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine.

À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR ÉNERGIE

En TWh (données corrigées des variations climatiques)



Hors agriculture-pêche de 1990 à 2005 et non affecté

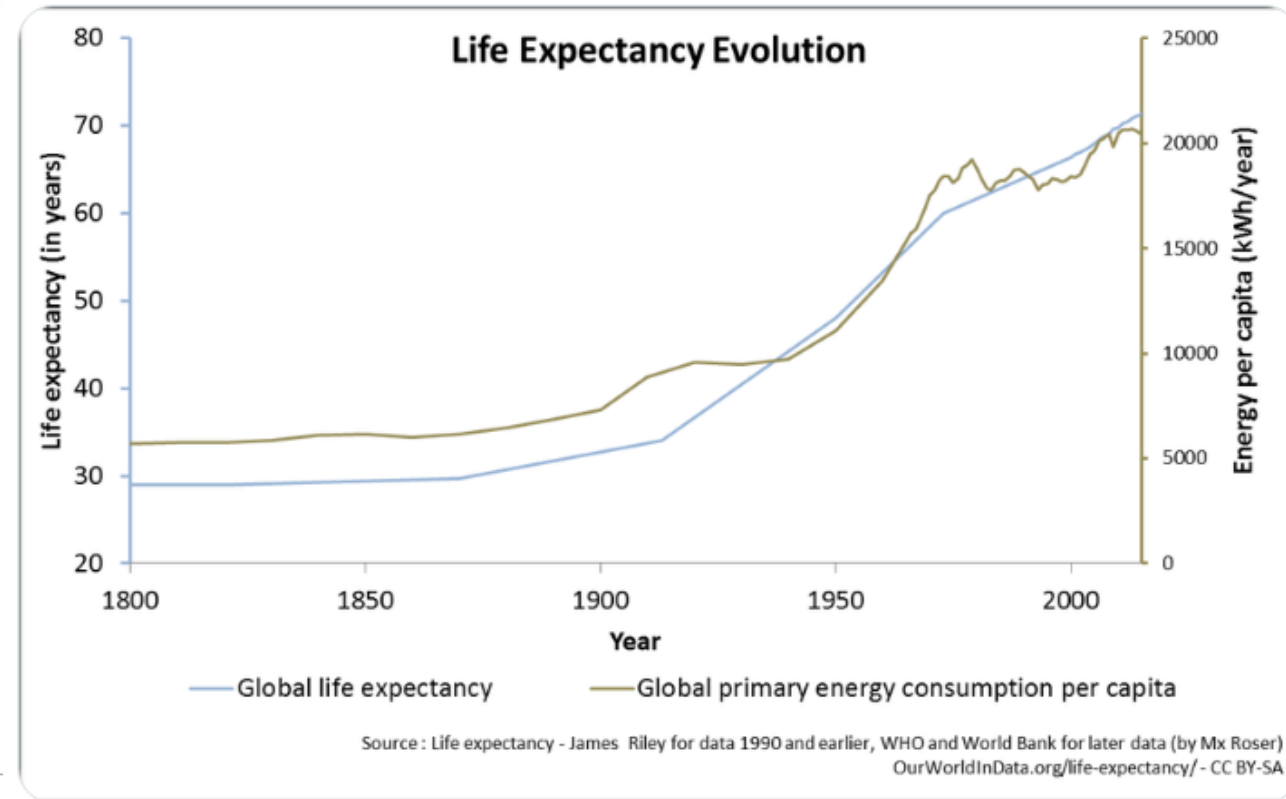
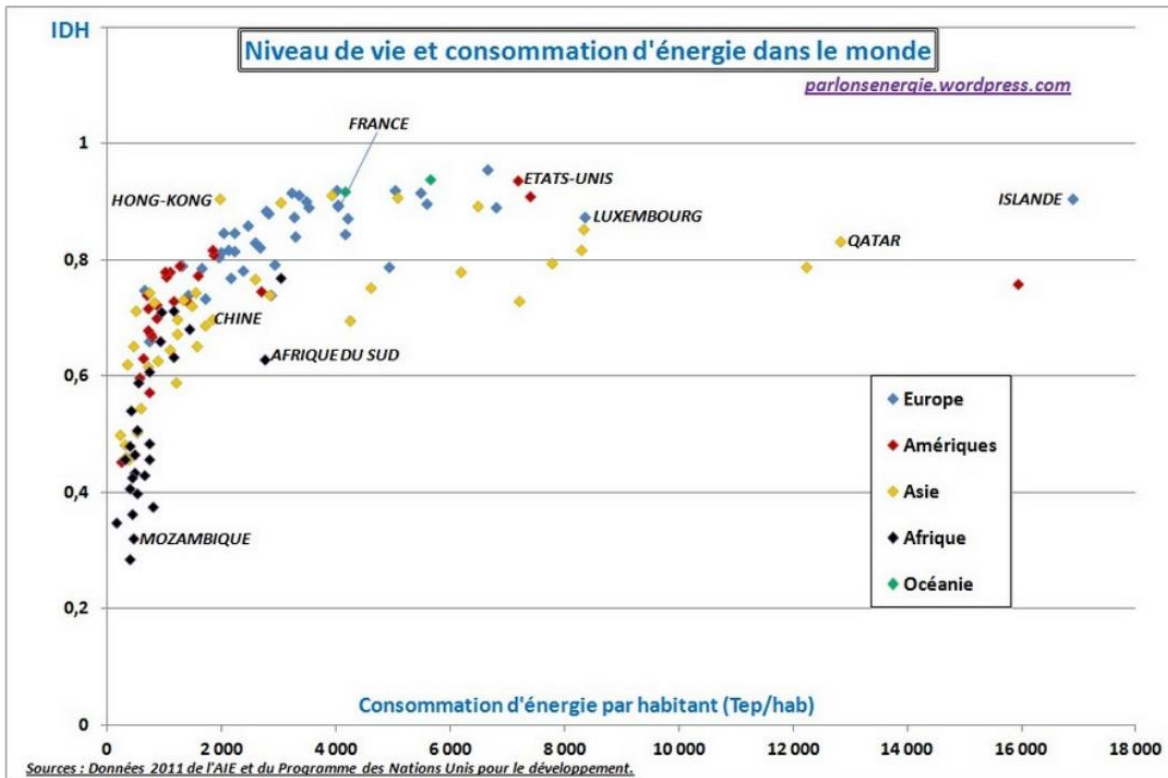
Source : Reconstitution R. Baudrillart à partir du Bilan énergétique de la France

- **Les enjeux**



- **Enjeu satisfaction des besoins**

Niveau de vie et espérance de vie



L'énergie humaine

- **Besoin énergétiques quotidiens : 2 à 3 kWh/jour en moyenne**

puissance moyennée sur la journée → ~ 83 à ~ 125 Watt

Métabolisme du corps humain → ~ 60 à 65 Watt

Il reste → **20 à 60 Watt** utilisables



100 W (jambes)



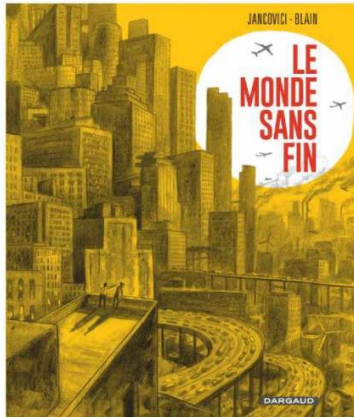
10 W (bras)

Énergie et équivalence travail humain



Travailleur de force : 10 à 100 kWh/an

Source :



*consommation mondiale d'énergie primaire
en 2019*

22 000 kWh/hab.



200 esclaves virtuels



Des esclaves travaillant dans une mine, dans le film Spartacus (1960)

Quelques équivalences



1 l d'essence 10 kWh



Énergie mécanique de 3
à 4 kWh

Coût : 1,8 à 2 euros



Énergie mécanique de 3
à 4 kWh soit 10 à 100 j
de travail de force

Coût au SMIC : de 800 à 8000 €



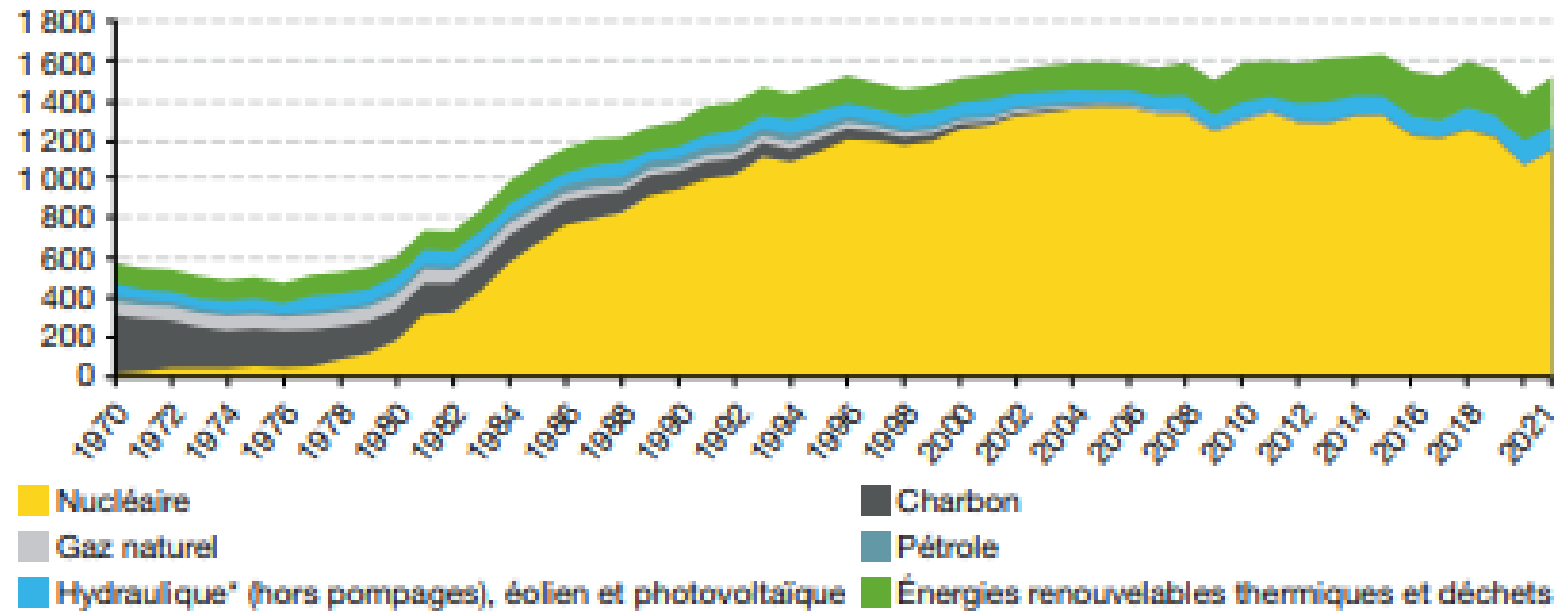
- **Enjeu économie et souveraineté**

Rappel sur la production française d'énergie primaire

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 1 524 TWh en 2021

En TWh

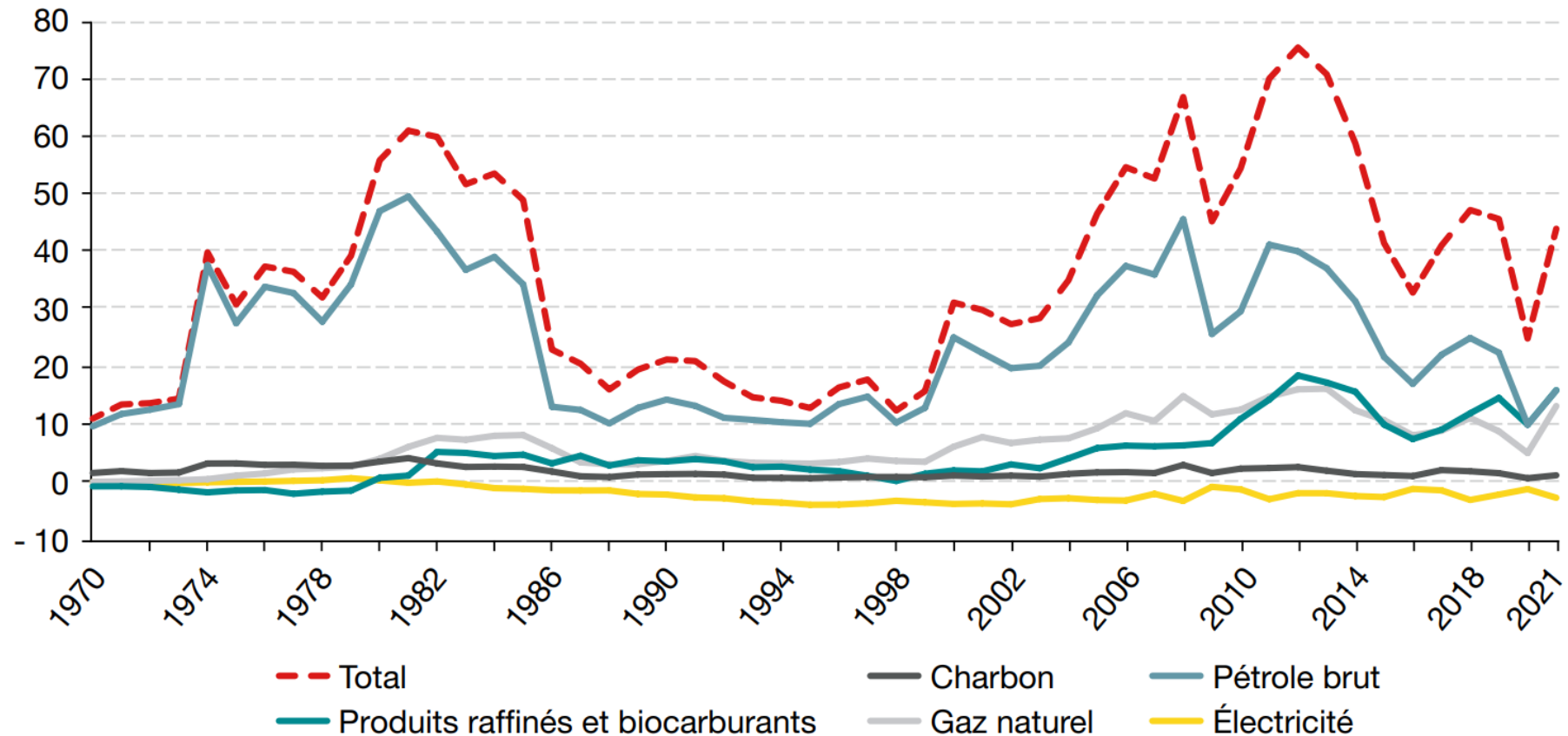


Très peu
d'hydrocarbure et
de charbon en
France

La facture énergétique

FACTURE ÉNERGÉTIQUE PAR TYPE D'ÉNERGIE

En milliards d'euros 2021



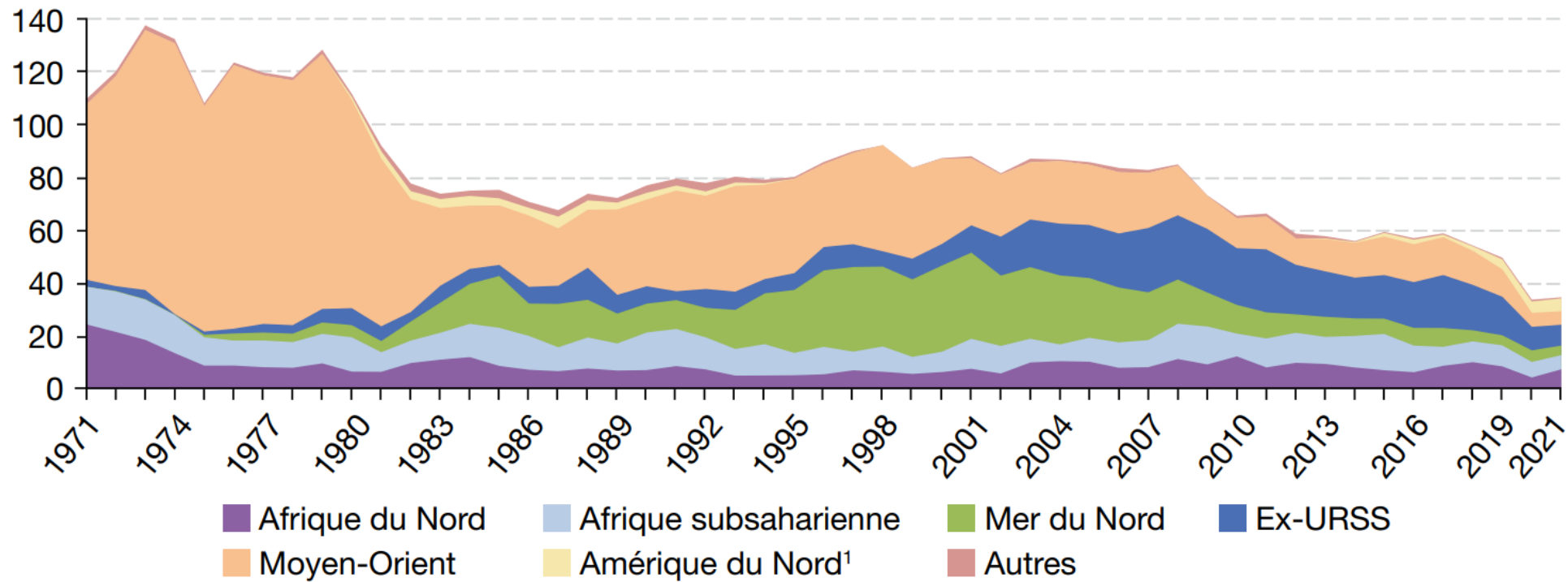
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Origine des importations (1/3)

IMPORTATIONS DE PÉTROLE BRUT* PAR ORIGINE

TOTAL : 34,7 Mtep en 2021, soit 404 TWh

En Mtep



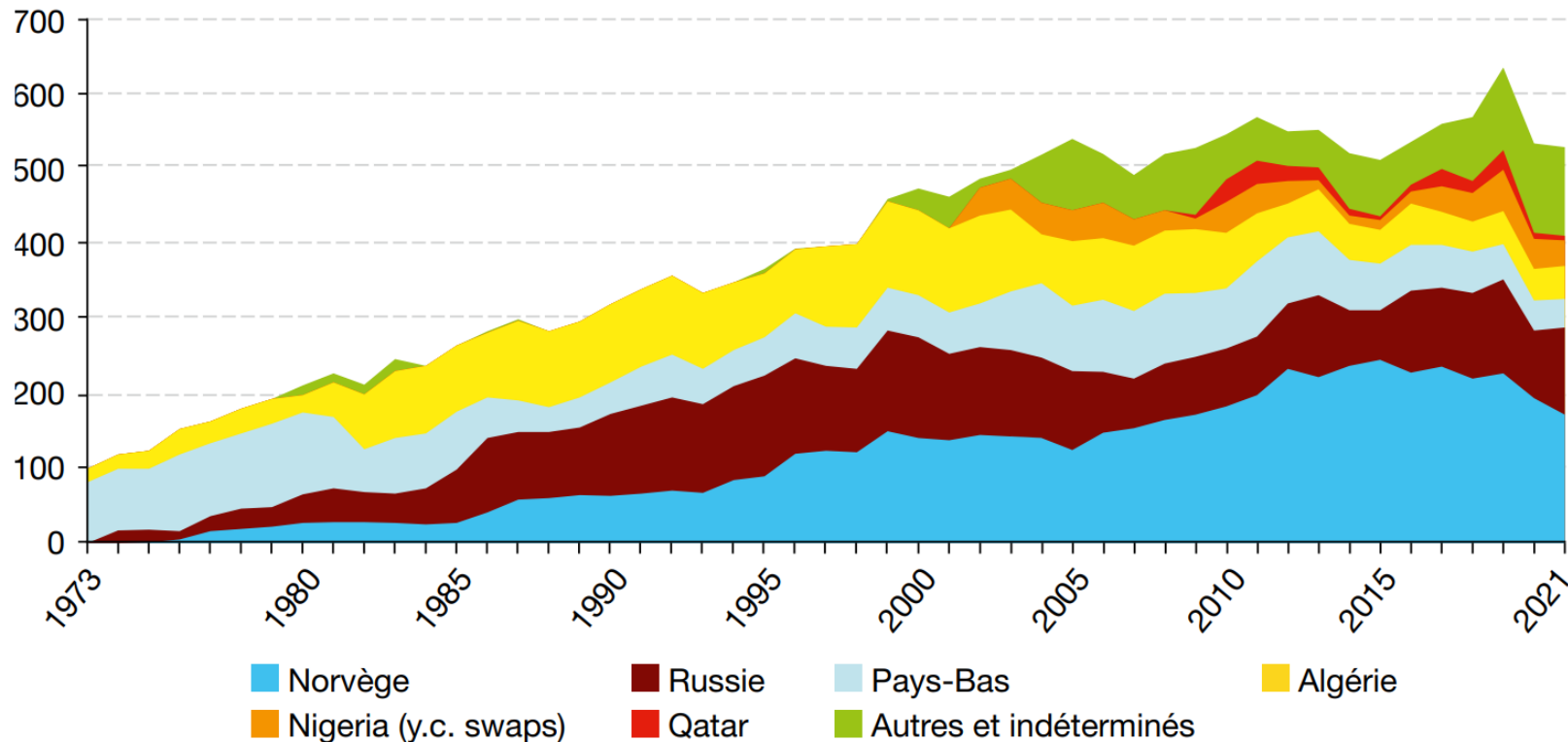
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Origine des importations (2/3)

IMPORTATIONS DE GAZ NATUREL PAR PAYS D'ORIGINE

TOTAL : 526 TWh PCS en 2021

En TWh PCS¹



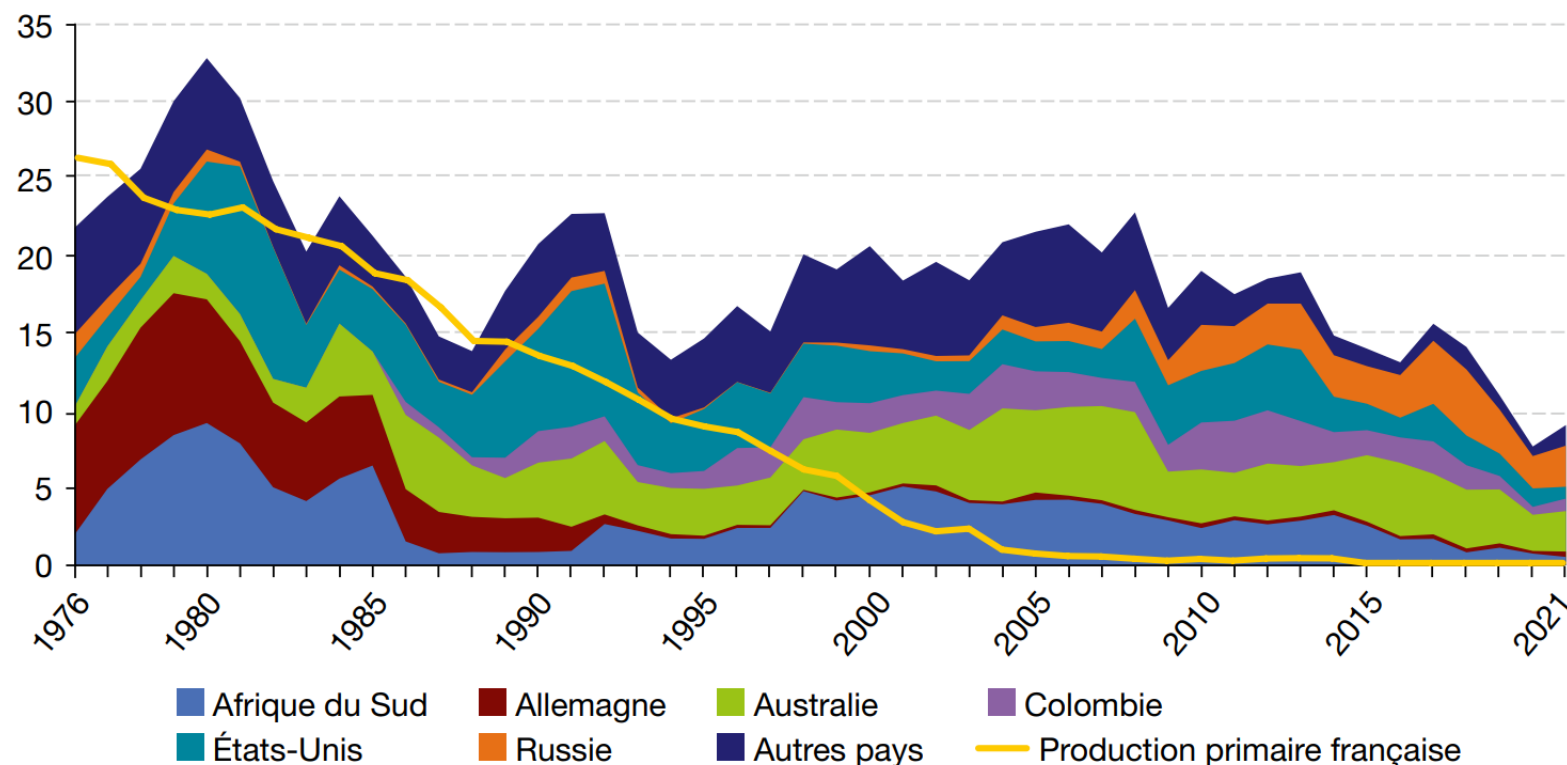
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Origine des importations 3/3

IMPORTATIONS DE CHARBON¹ PAR PAYS D'ORIGINE ET PRODUCTION PRIMAIRE FRANÇAISE

TOTAL : 9,1 Mt en 2021, soit 69,9 TWh

En Mt



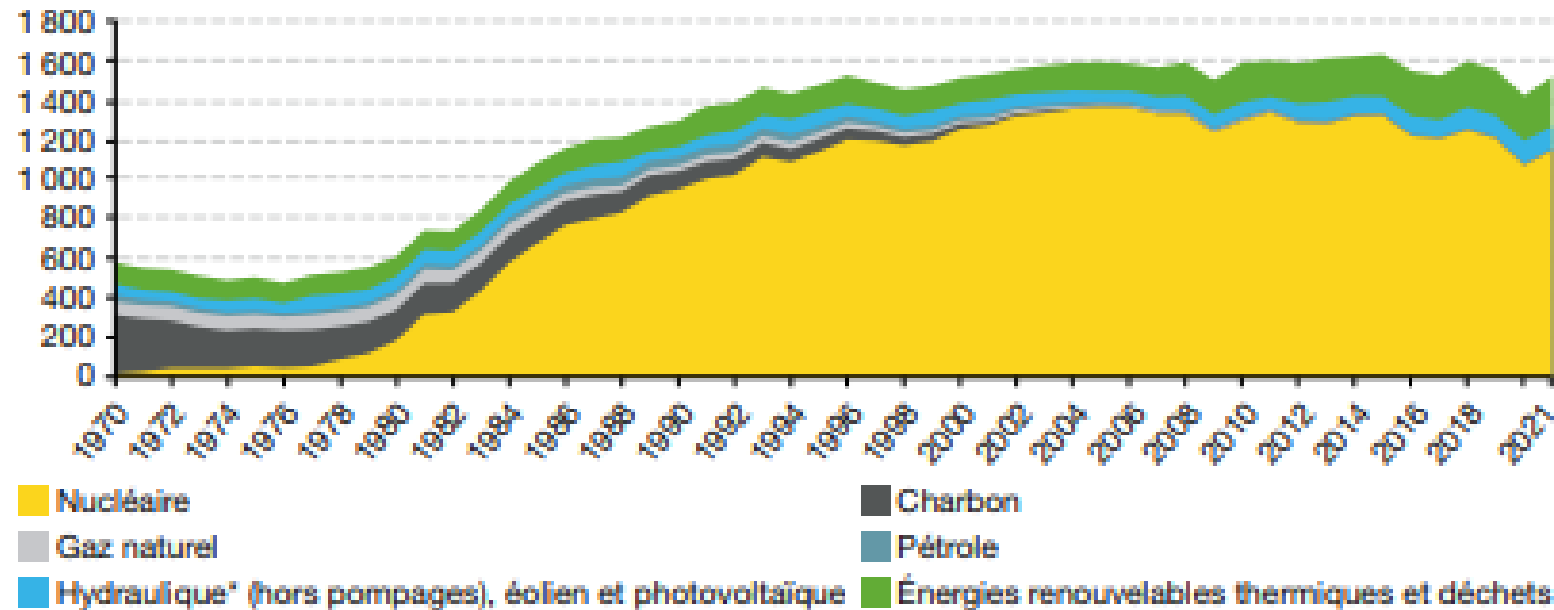
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Rappel sur la production française d'énergie primaire

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 1 524 TWh en 2021

En TWh

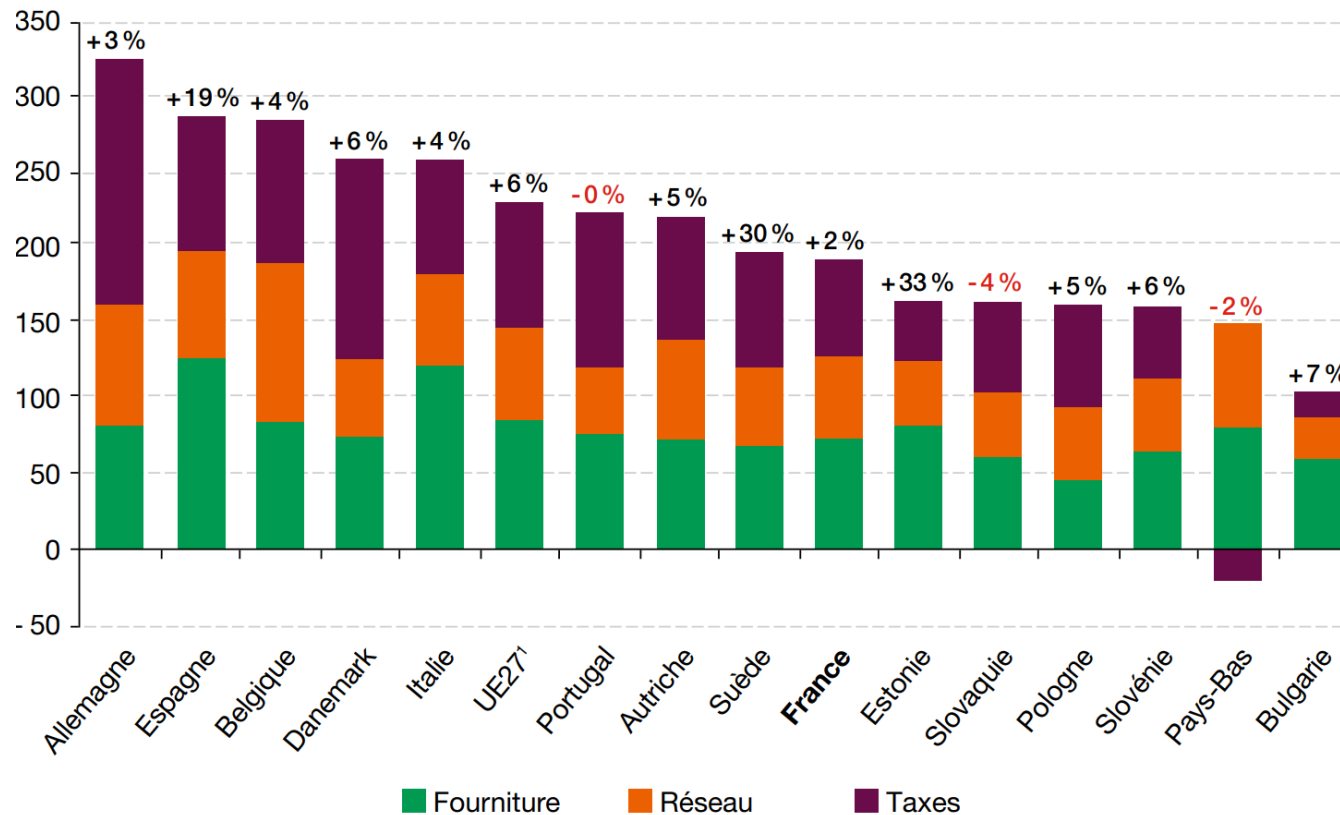


La production d'énergie primaire est essentiellement destinée à fournir de l'électricité

Coût de l'électricité pour les ménages

PRIX TTC DE L'ÉLECTRICITÉ À USAGE DOMESTIQUE DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2021

En euros courants par MWh



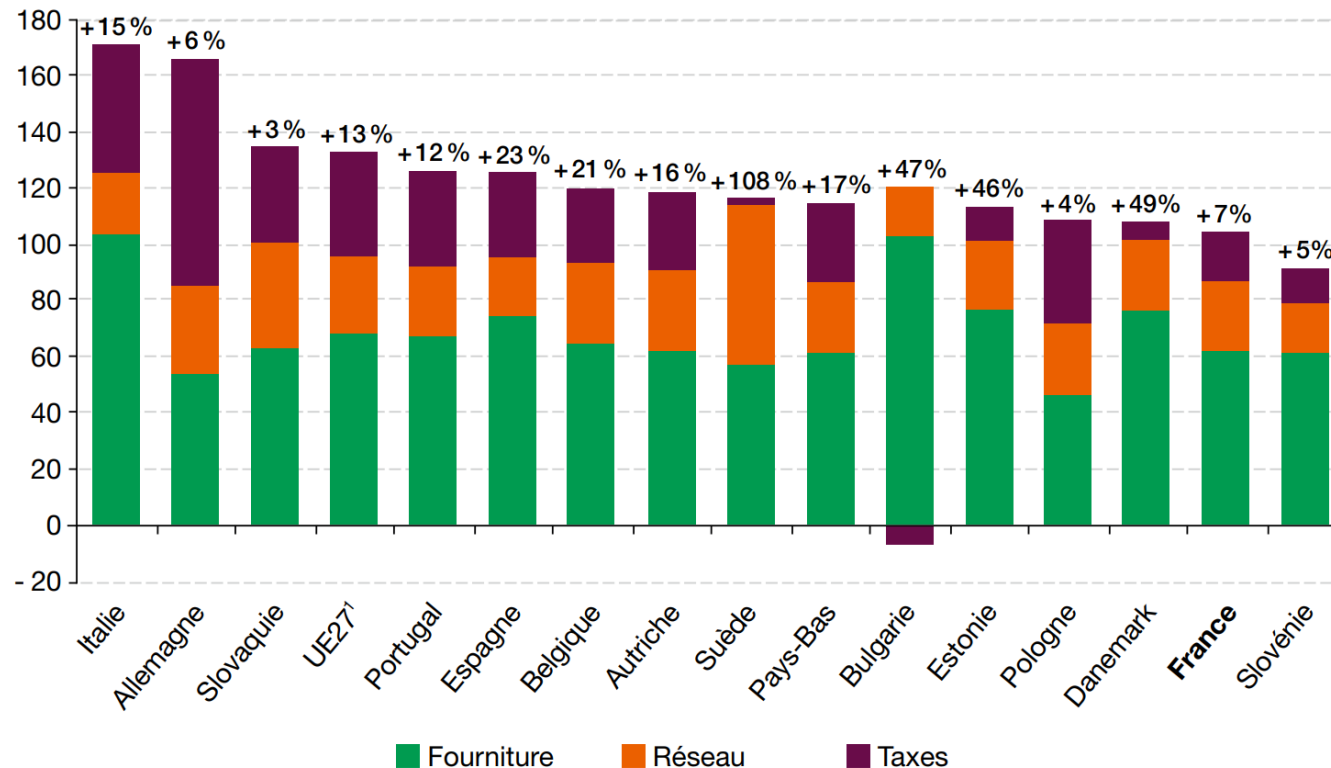
En 2021, le prix en France est environ 50% moins élevé qu'en Allemagne

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Coût de l'électricité pour les entreprises

PRIX HORS TVA DE L'ÉLECTRICITÉ POUR LES ENTREPRISES DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2021

En euros courants par MWh



**En 2021, le prix en France
était quasiment le plus faible
: un atout pour la
compétitivité des entreprises**

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

Évolution du prix de l'électricité

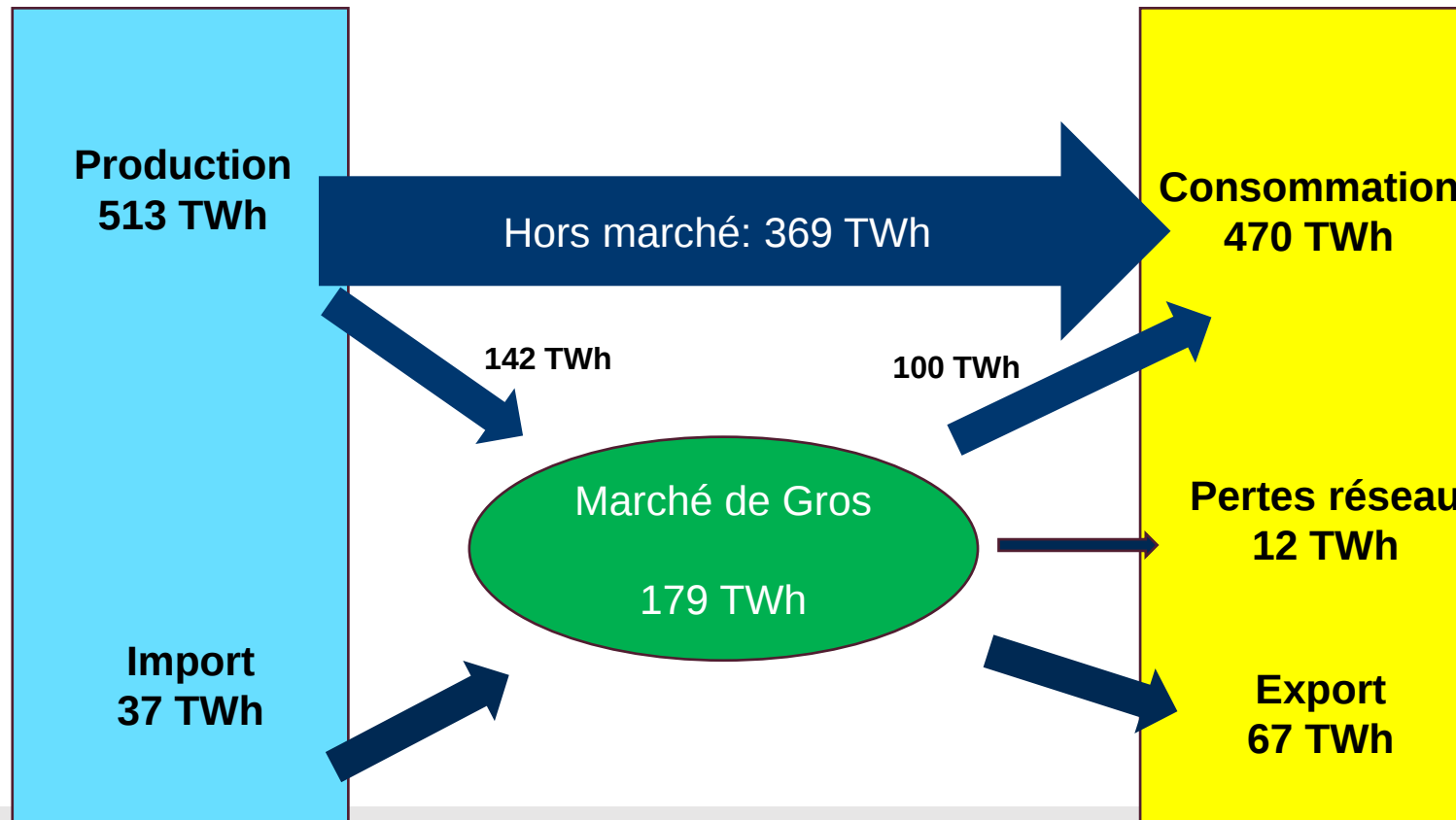
- **Facteurs contribuant au prix de l'électricité**
 - Le coût de production, de stockage, d'approvisionnement et de commercialisation
 - Les coûts d'acheminement
 - Les taxes : contribution au service public de l'électricité (CSPE), contribution tarifaire d'acheminement (CTA), taxe sur la valeur ajoutée (TVA)
 - Le prix du gaz (une partie de l'électricité produite et importée provient de centrales à gaz)
 - Le coût des quotas de CO2
- **Facteurs contribuant à la hausse des prix**
 - L'augmentation du prix du gaz et le risque d'un arrêt des importations de gaz russe (les marchés anticipent la baisse des livraisons de la Russie)
 - La production réduite d'énergie nucléaire (arrêt de réacteurs après la découverte de corrosion, calendrier des maintenances retardé par la crise sanitaire)
 - Reprise de l'activité post Covid19

Marché de gros de l'électricité

environ 1/3 des injections se fait via le spot

Injection
549 TWh

Soutirage
549 TWh



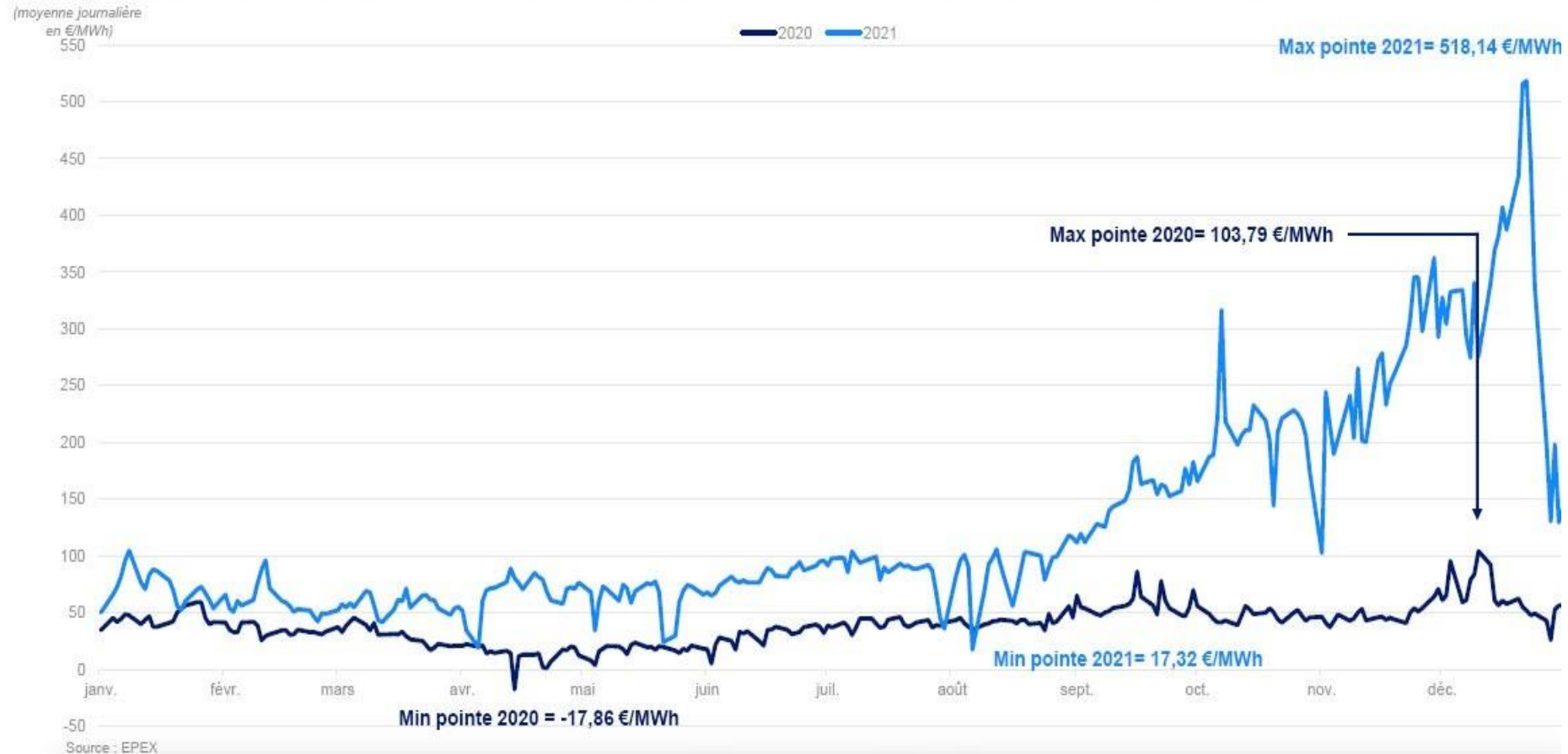
Évolution du prix de gros

- 50 €/MWh début 2021
- 222 €/MWh en décembre 2021
- Jusqu'à 700€/MWh à l'été 2022

Source : J. PERCEBOIS Le marché de l'électricité en France 16 mars 2022

Évolution des prix de l'électricité

FRANCE : PRIX DE MARCHÉ SPOT EN POINTE DE L'ÉLECTRICITÉ



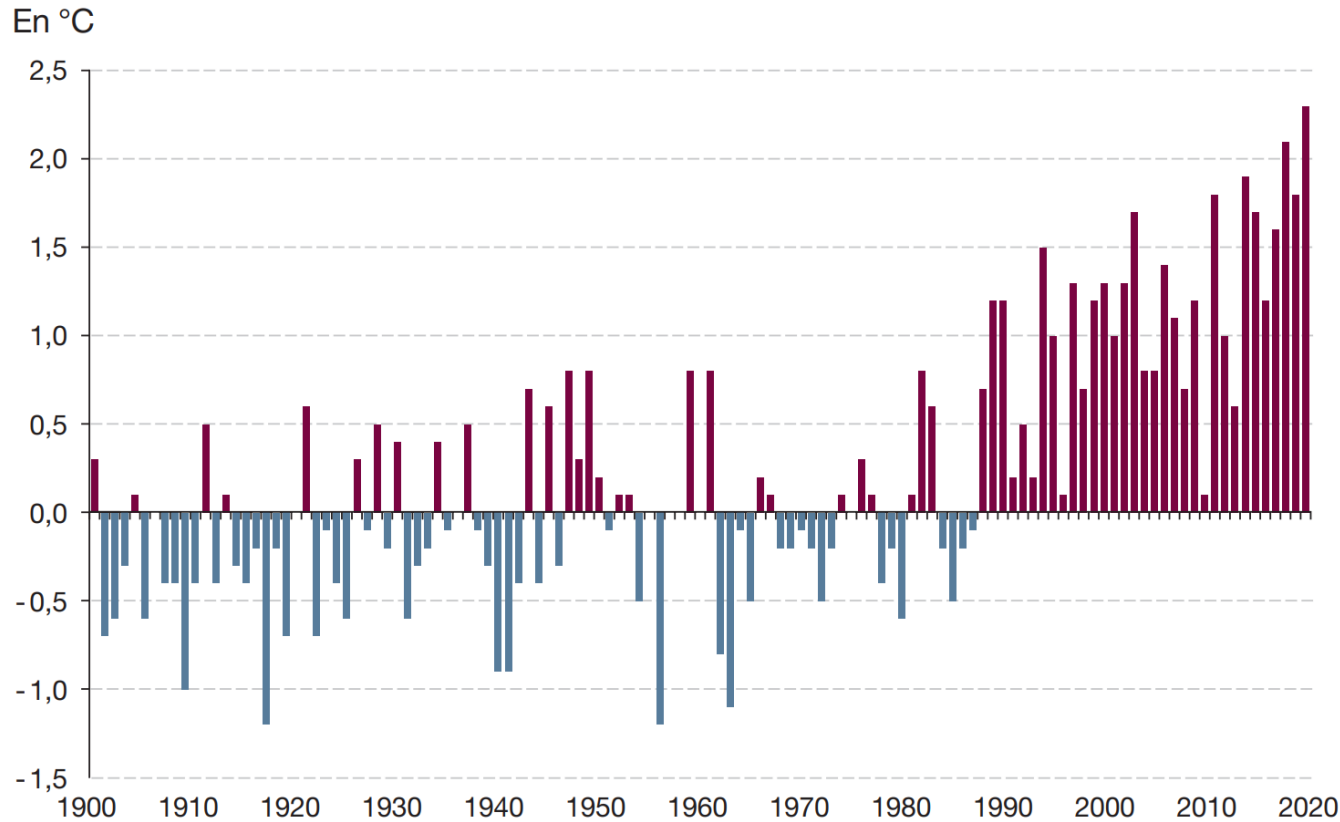


- **Enjeux climatiques**



- **Observations et simulations**

Évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine depuis 1900



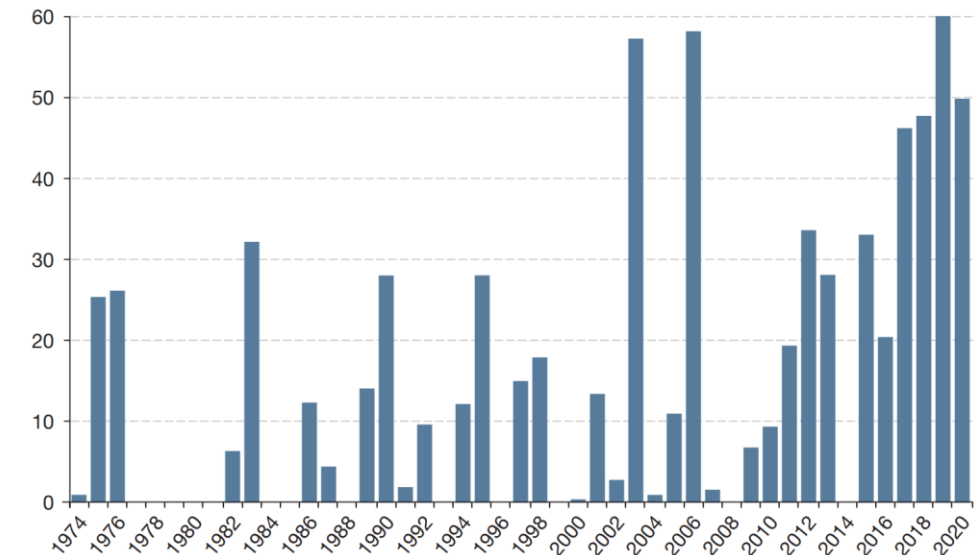
Note : l'évolution de la température moyenne annuelle est représentée sous forme d'écart de cette dernière à la moyenne observée sur la période 1961-1990 (11,8 °C).

Champ : France métropolitaine.

Source : Météo-France

ÉVOLUTION DE LA POPULATION EXPOSÉE AUX CANICULES EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

En millions d'habitants exposés à au moins une canicule dans l'été



Champ : France métropolitaine.

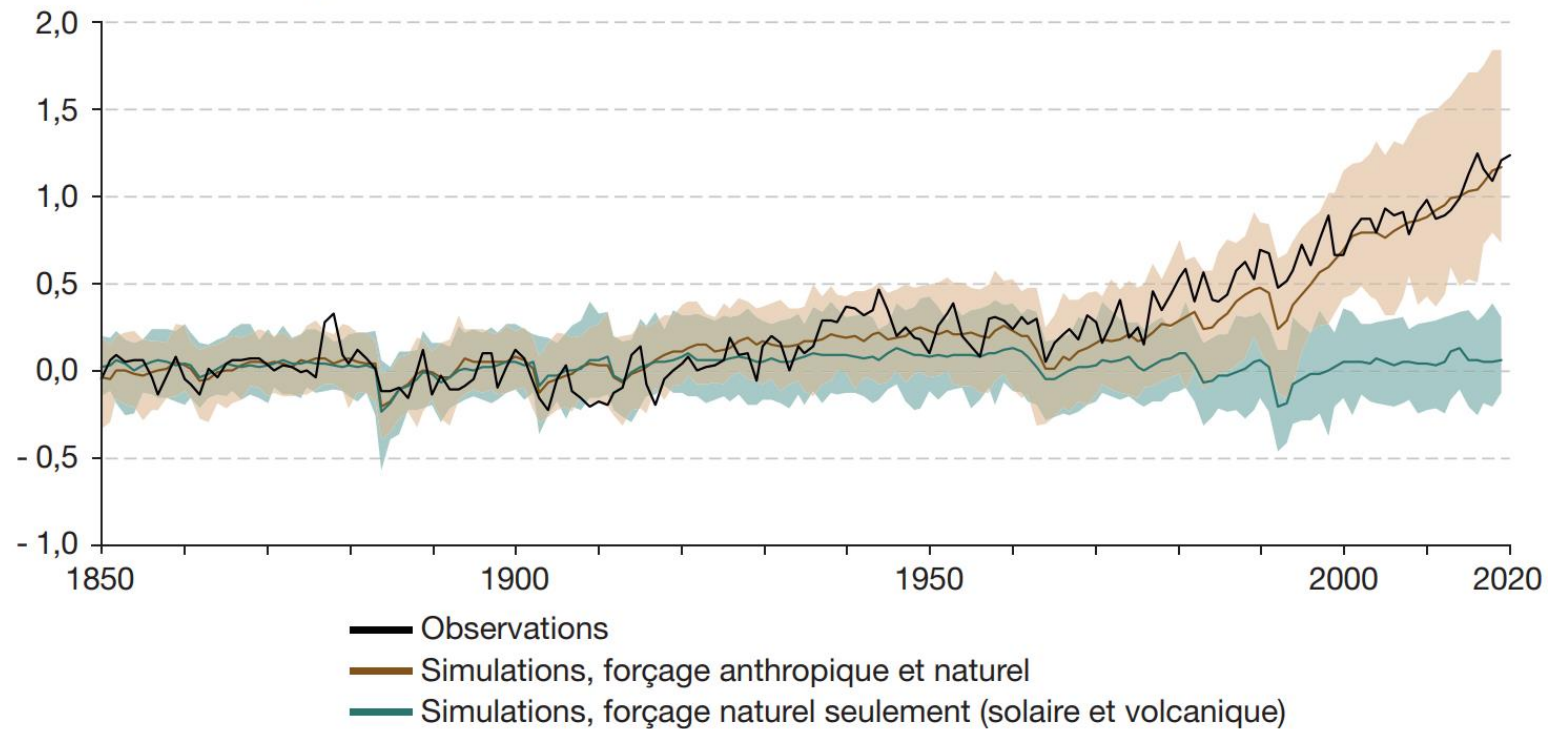
Source : Santé publique France, d'après Météo-France et Insee

Évolution des températures

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE MONDIALE DE 1850 À 2020

En °C

Anomalie des températures (référence 1850-1900)

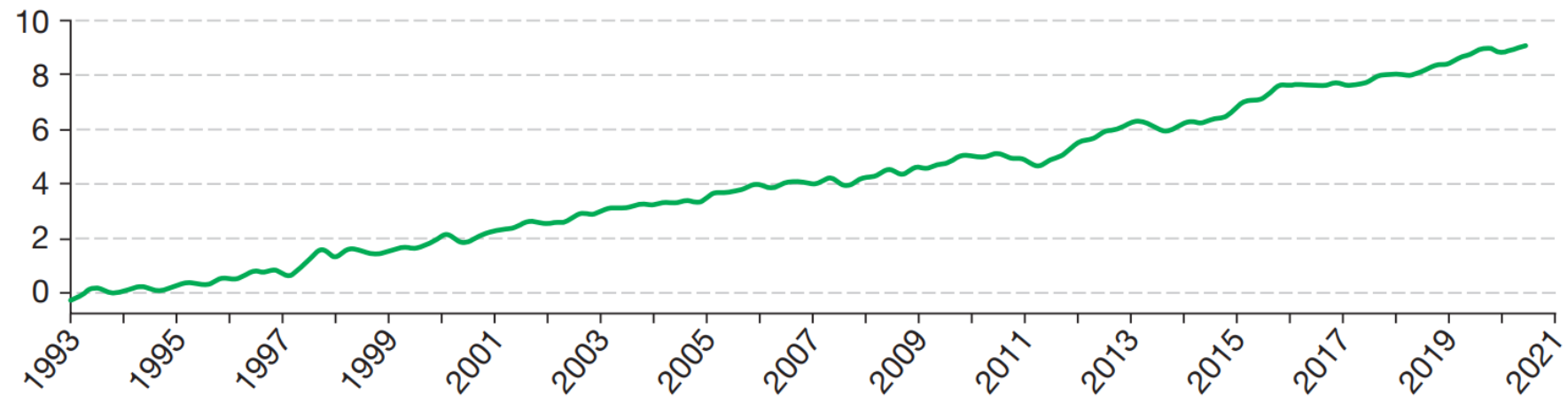


Source : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2021

Évolution du niveau des mers

ÉVOLUTION DU NIVEAU MOYEN DES MERS DU GLOBE DEPUIS 1993

En cm

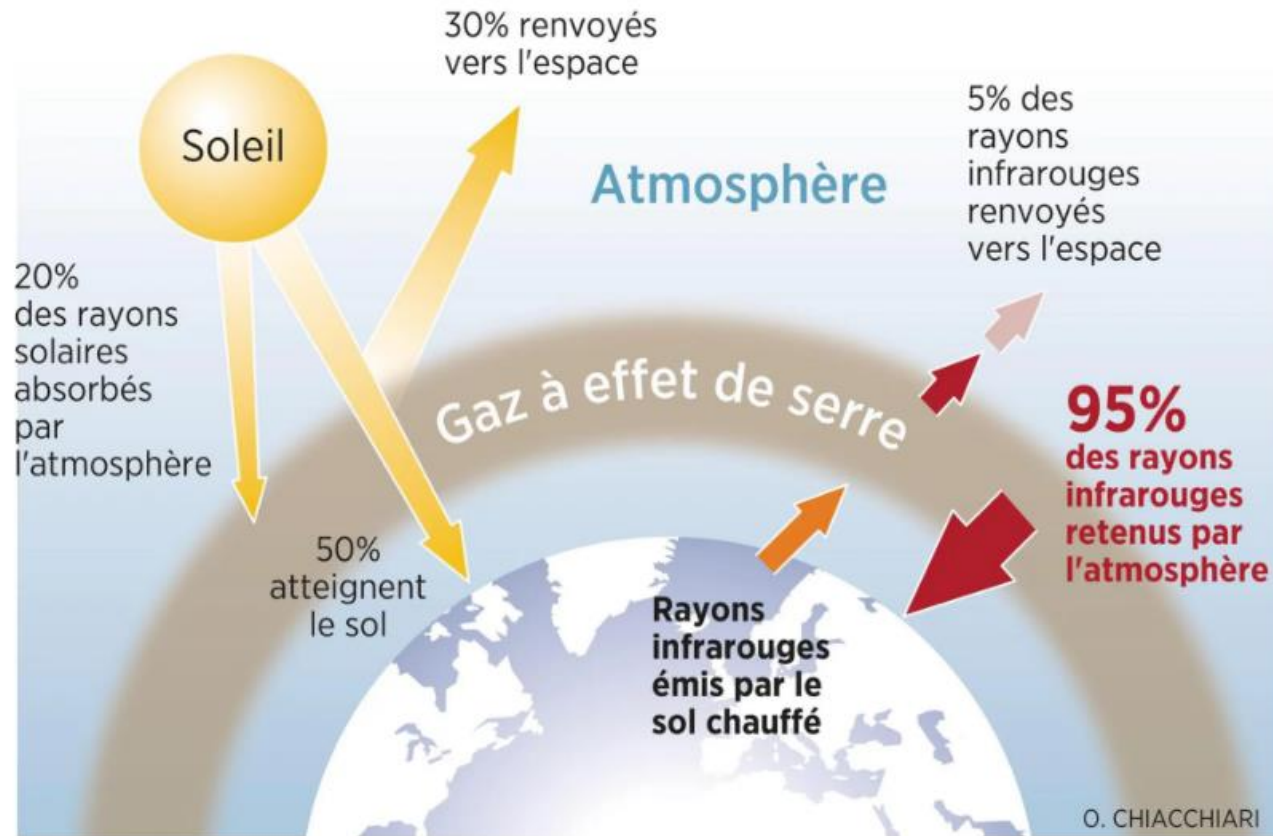


Source : E.U. Copernicus Marine Service Information



- **Les causes**

L'effet de serre



température moyenne du globe : 15 °C

Sans effet de serre la température moyenne du globe serait de -18 °C

Impact de la température du globe sur le climat

L'Europe aujourd'hui

Present Potential Vegetation



L'Europe T Globe – 5°C
- 20 000 ans

22,000 – 14,000 ¹⁴C years ago



Les gaz à effet de serre

0,1% du volume atmosphérique

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆	NF ₃
Concentration atmosphérique 2020 (en 2005 entre parenthèses)	412 ppm (379 ppm)	1 879 ppb (1 774 ppb)	333 ppb (319 ppb)	> 239 ppt (> 49 ppt)	> 91,8 ppt (> 4,1 ppt)	10,3 ppt (5,6 ppt)	2,2 ppt (> 0 ppt)
Pouvoir de réchauffement global (cumulé sur 100 ans)	1	28-30	265	[1,4 ;14 800] selon les gaz	[6 630 ; 11 100] selon les gaz	23 500	16 100
Origine des émissions anthropiques	Combustion d'énergie fossile, procédés industriels et déforestation tropicale	Décharges, agriculture, élevage et procédés industriels	Agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais	Sprays, réfrigération, procédés industriels			Fabrication de composants électroniques
Modification du forçage radiatif en 2020 depuis 1750 par les émissions anthropiques (W/m ²) (en 2005 entre parenthèses)	+ 2,11 (+ 1,66)	+ 0,52 (+ 0,48)	+ 0,21 (+ 0,16)	+ 0,15 (+ 0,09)			

ppm : partie par million ; ppb : partie par milliard ; ppt : partie par millier de milliards.

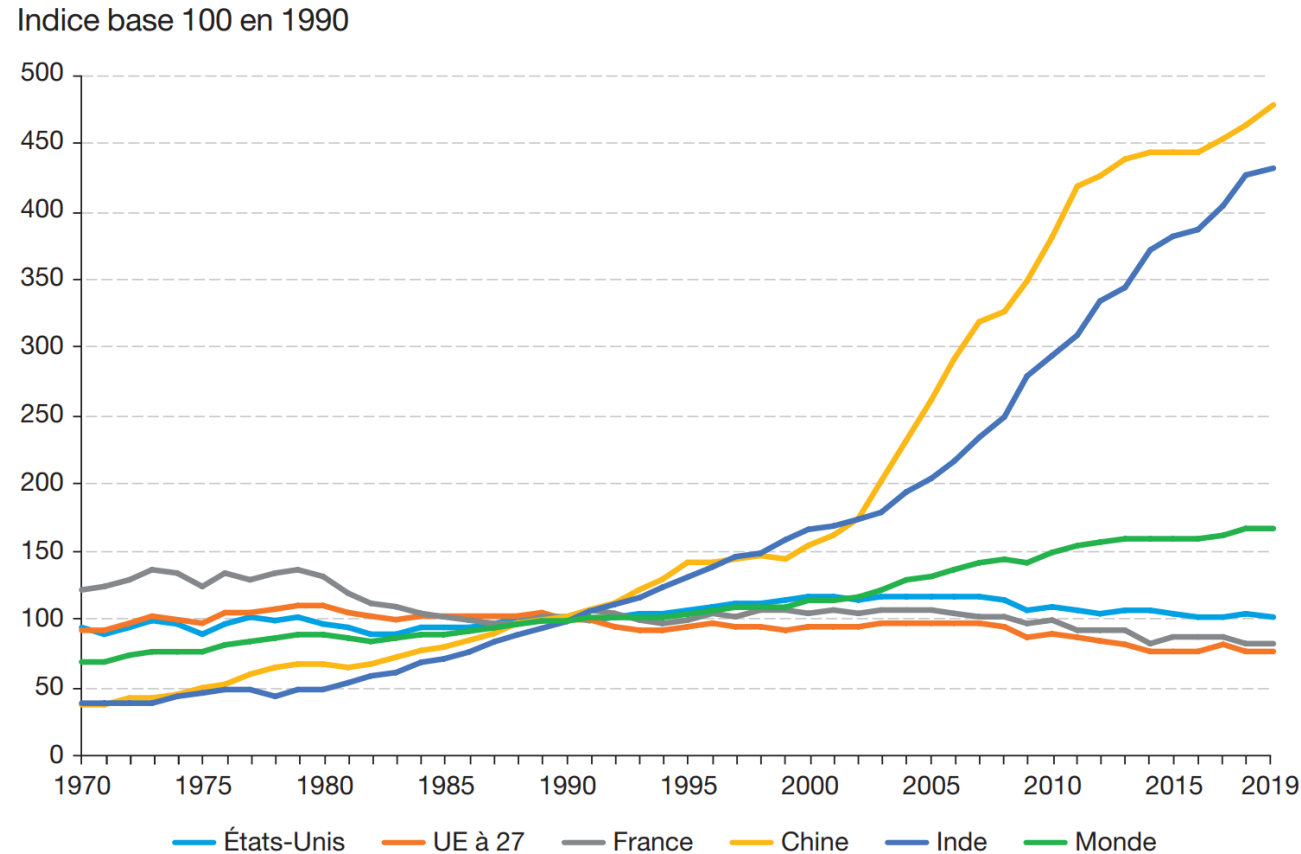
Sources : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013 ; NOAA, 2021 ; Agage, 2021

La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre et représente 0,4 à 4 % du volume atmosphérique.

Les activités humaines ont un impact négligeable sur cette quantité.

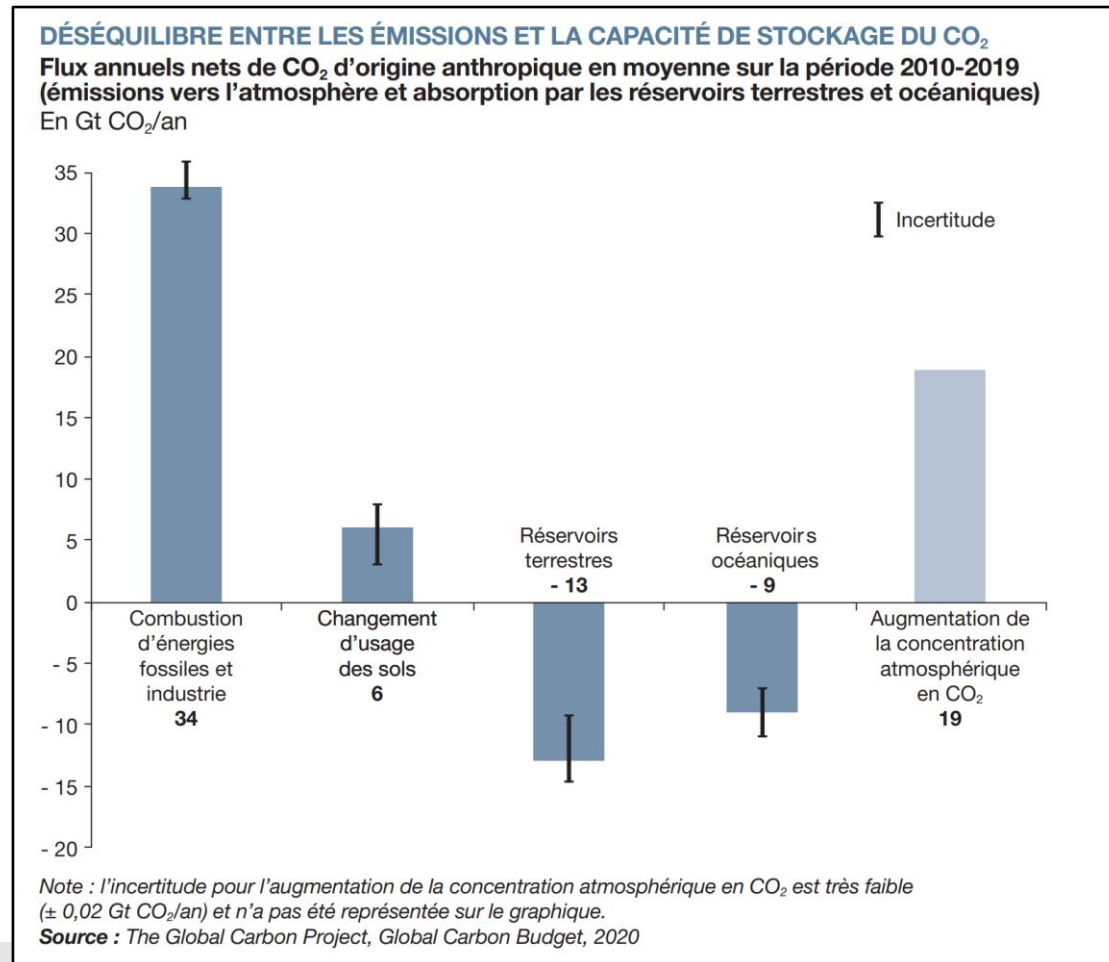
Les activités humaines sont à l'origine de l'augmentation des quantités de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Évolution des émissions de CO₂ dans le monde entre 1970 et 2019



Source : EDGAR, 2020

Origine de l'augmentation des quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère

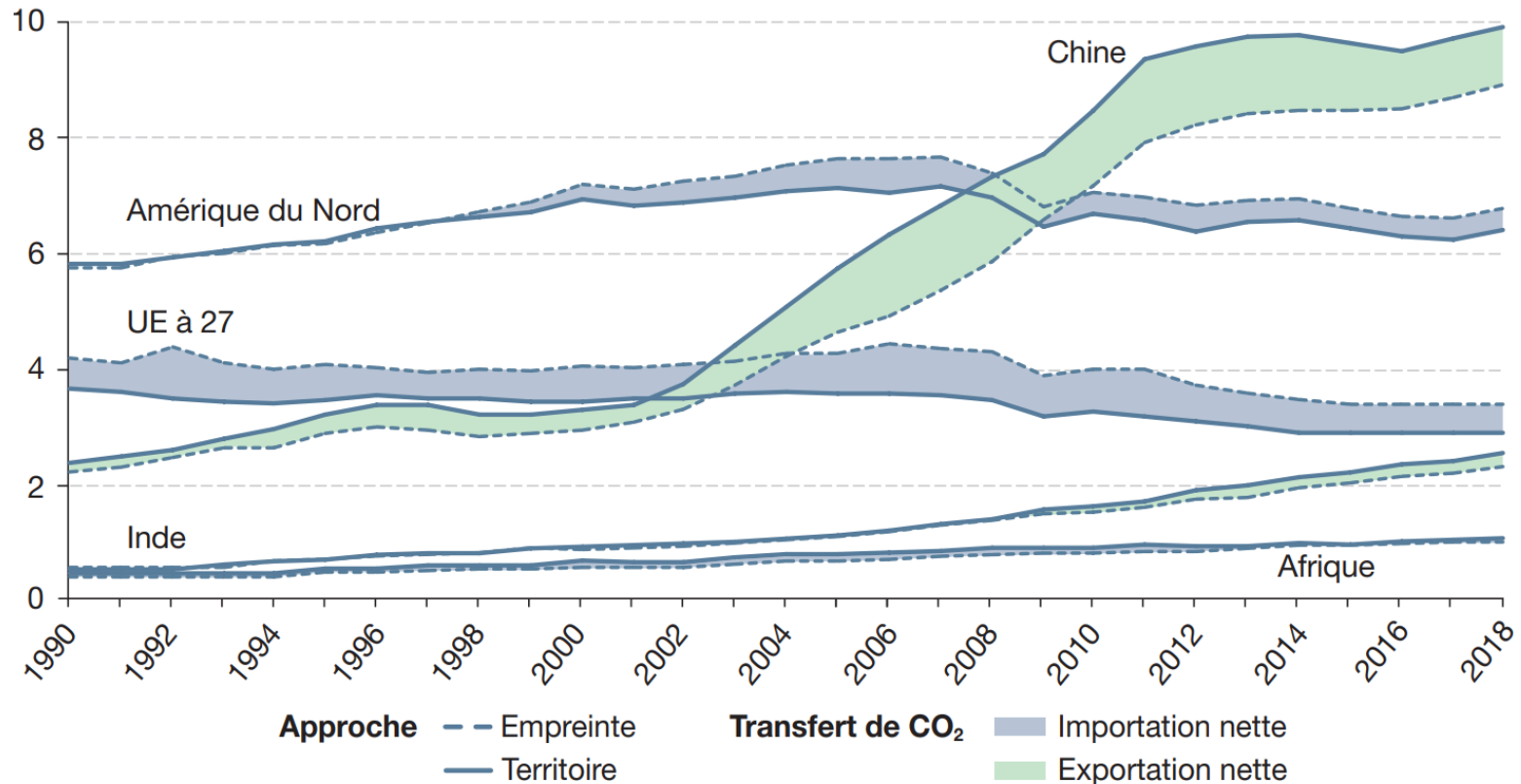


Les activités humaines sont à l'origine de l'augmentation des quantités de ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Émissions territoriales et empreinte carbone

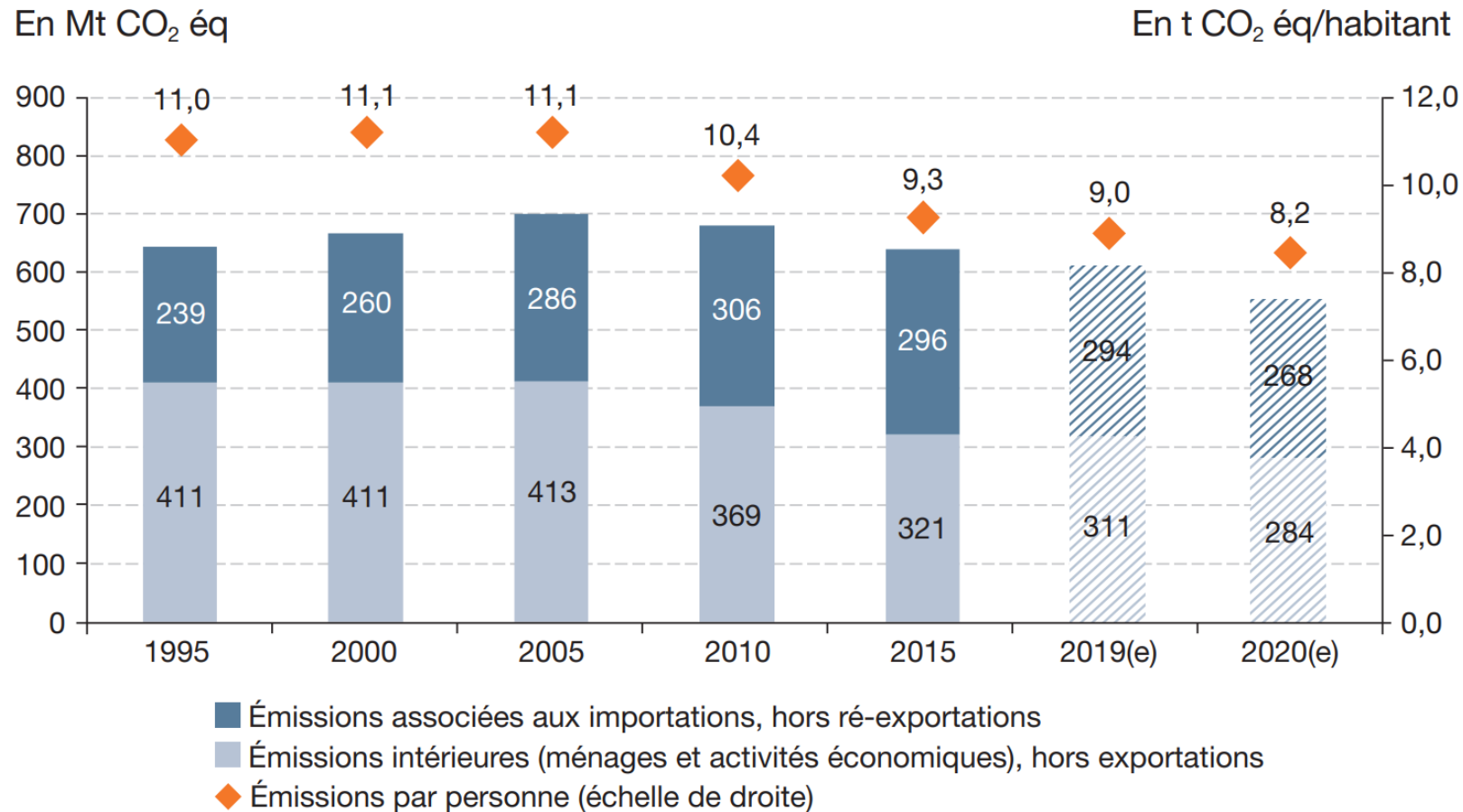
COMPARAISON INTERNATIONALE DES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES À LA COMBUSTION D'ÉNERGIE SELON LES APPROCHES

En Gt CO₂



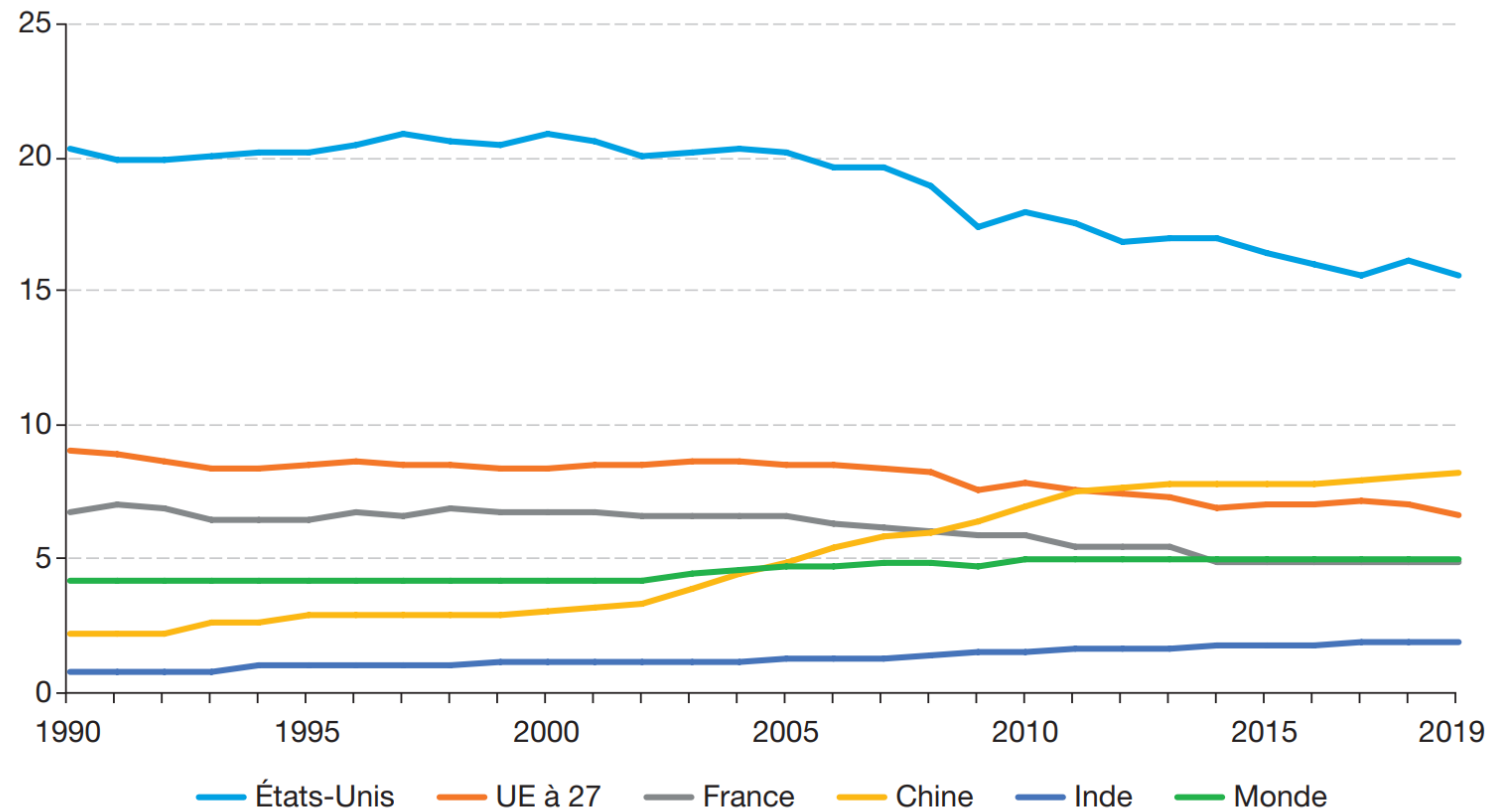
Sources : I4CE, 2021, à partir de Global Carbon Budget 2020 et Banque mondiale, 2021

Évolution de l'empreinte carbone de la France



Évolution des émissions de CO₂ par habitant dans le monde entre 1970 et 2019

En t CO₂/habitant



Sources : SDES, d'après EDGAR, 2020 ; Banque mondiale, 2021

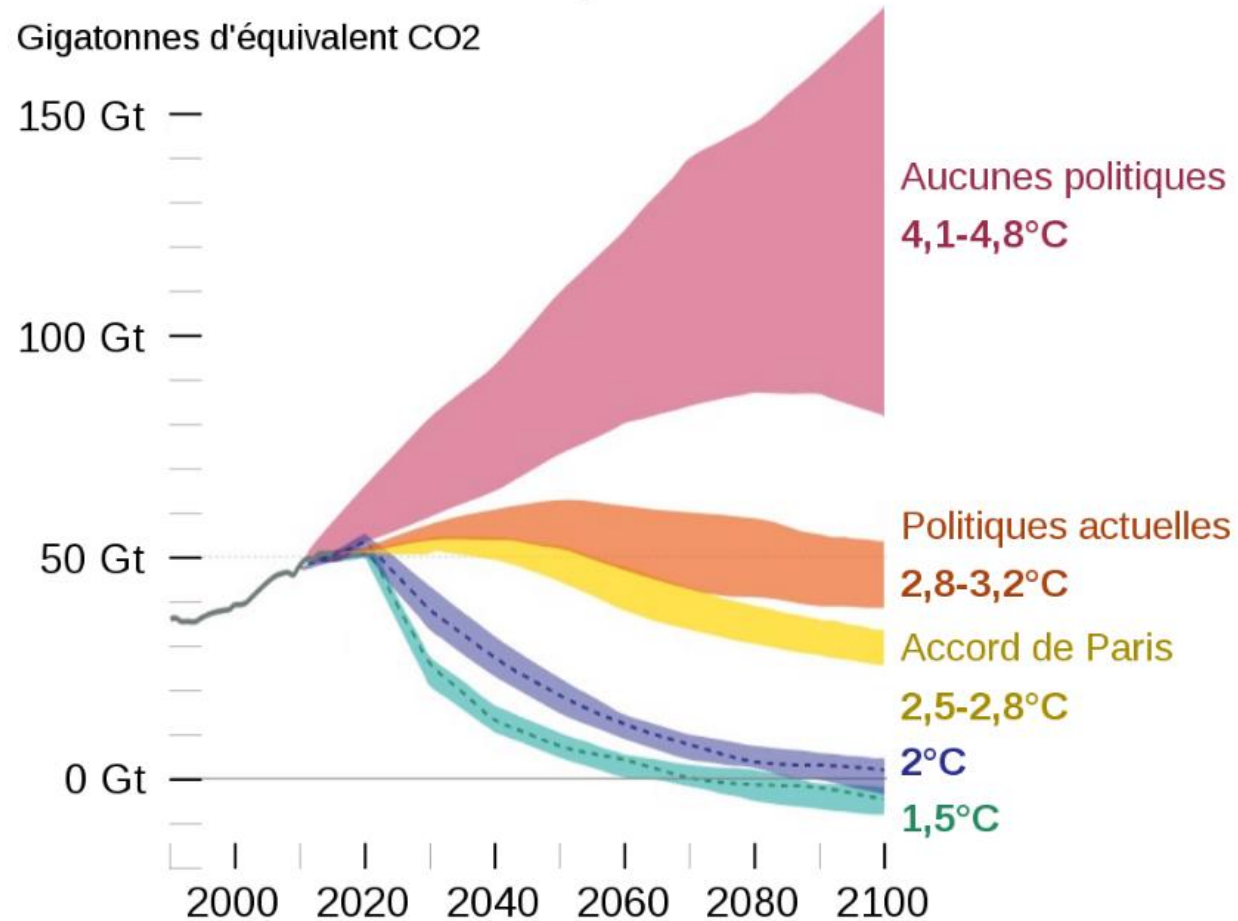


- **Les conséquences**

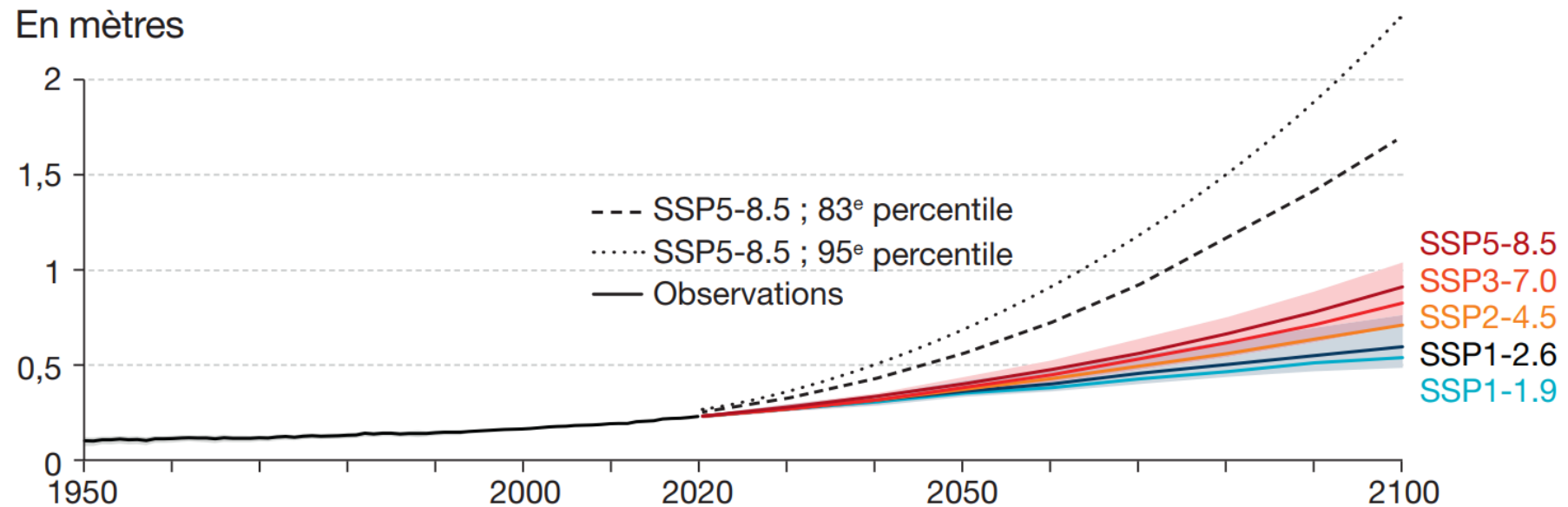
Les différents scénarios du GIEC

Évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre

Émissions mondiales annuelles de gaz à effet de serre
Gigatonnes d'équivalent CO₂



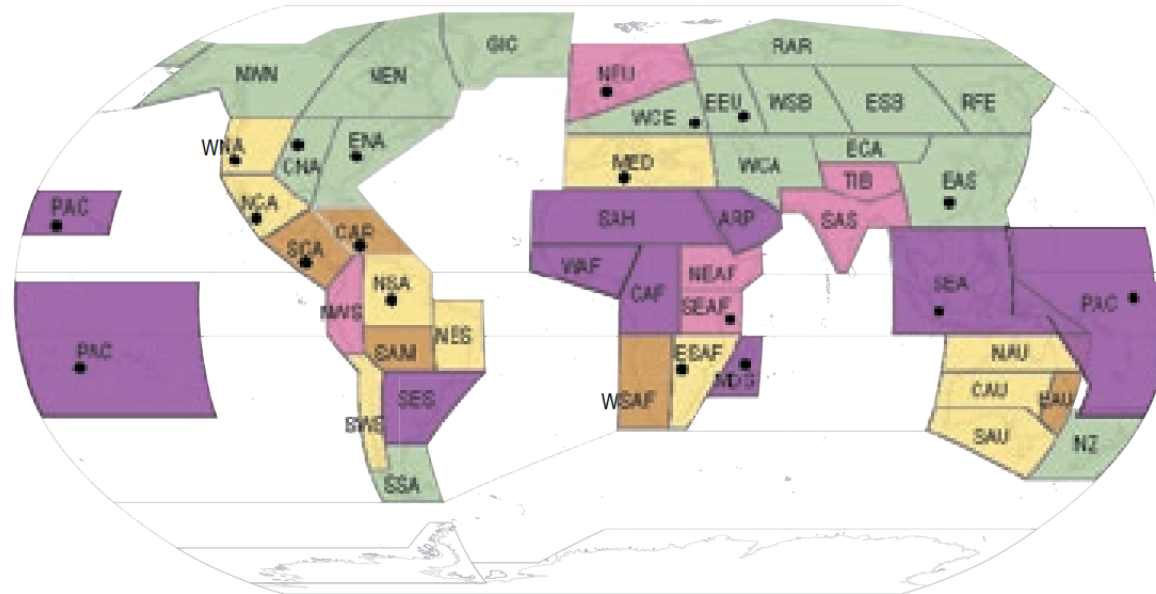
Projection de l'évolution du niveau des mers



Note : les lignes pleines montrent les projections médianes. Les régions ombrées montrent les plages probables pour SSP1-2.6 et SSP3-7.0.

Source : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2021

Conséquences d'une élévation de température de 2°C



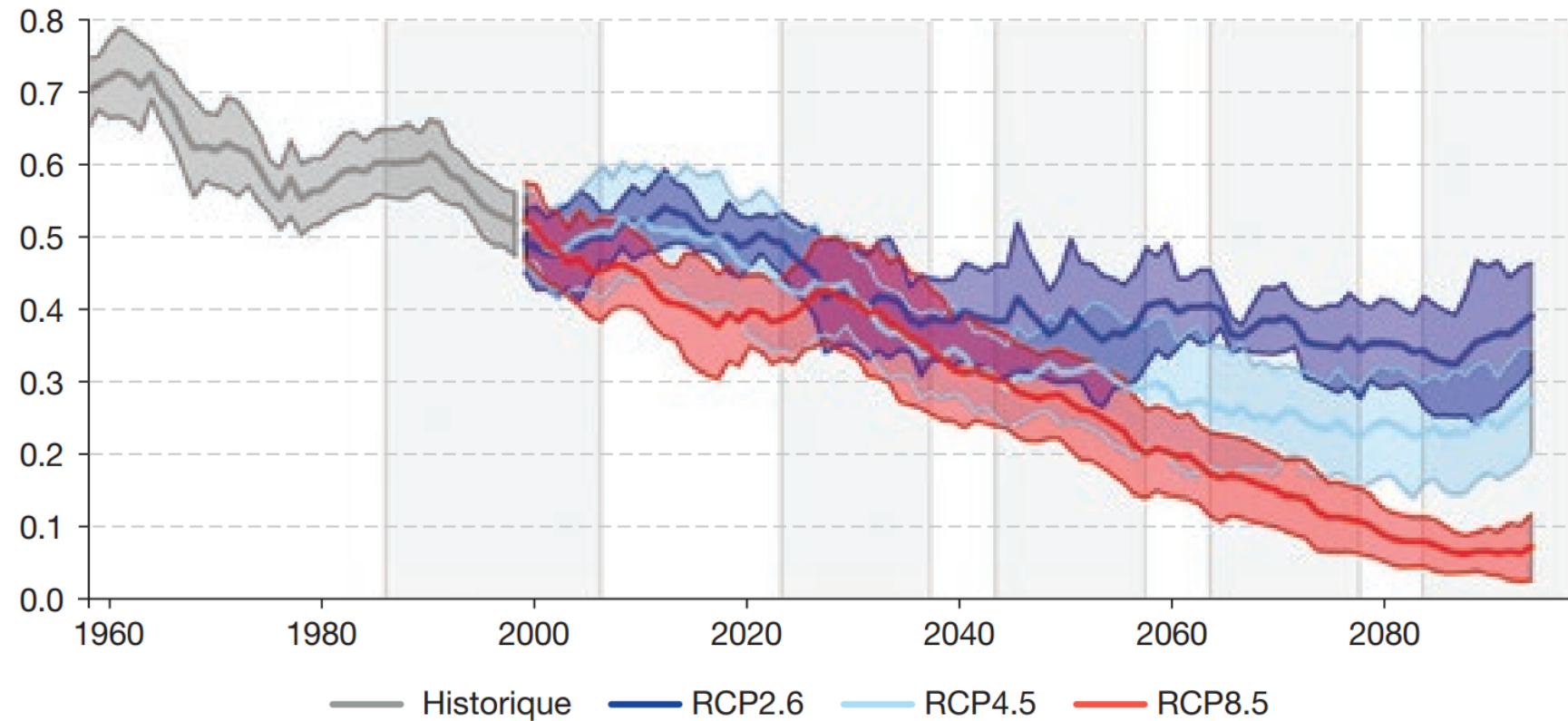
- Plus chaud et plus sec
- Plus chaud et plus sec ; dans certaines régions événements extrêmes plus humides
- Événements extrêmes plus chauds et plus humides ; dans certaines régions plus de précipitations ou de situations sèches favorables aux feux de forêts
- Plus chaud et plus humide ; dans certaines régions plus d'inondations
- Plus chaud ; dans certaines régions événements extrêmes plus humides ou plus de précipitations
- Augmentation de l'intensité des cyclones tropicaux ou des vents violents

Source : SDES,

Conséquence pour la France

Projections des hauteurs de neige pour le massif du Vercors à 1 500 m entre décembre et avril

En mètres





- **Les défis**

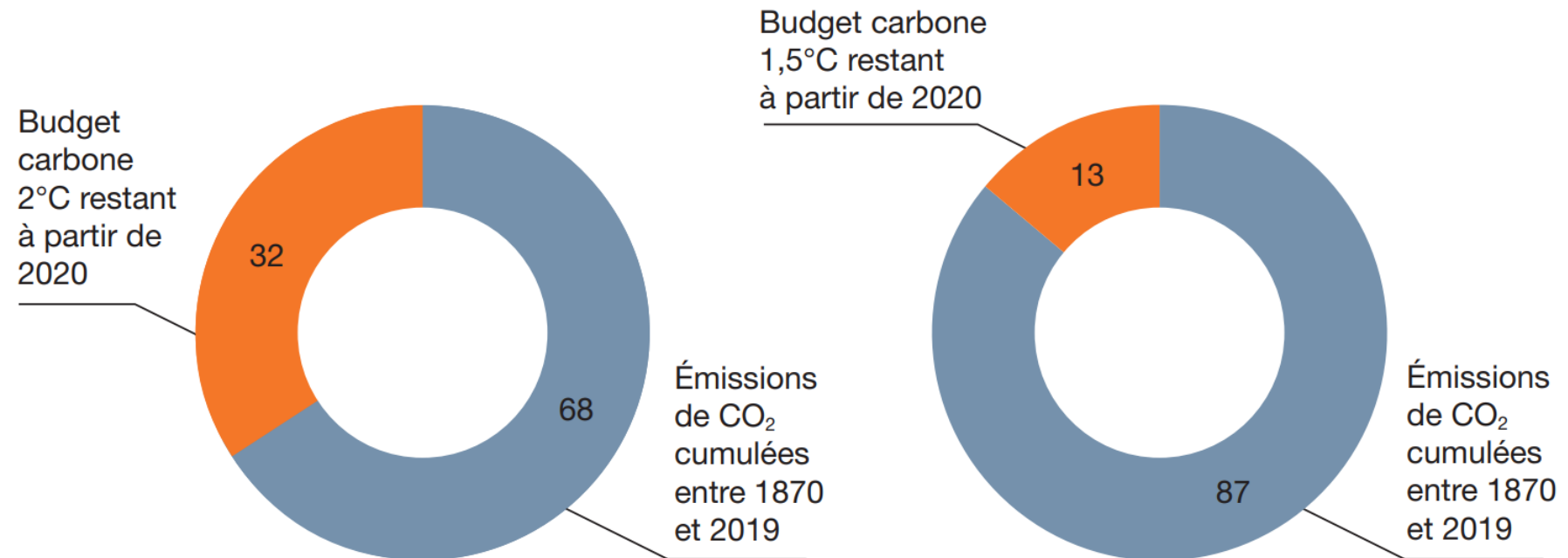


- **La réduction de l'émission des gaz à effet de serre pour atteindre un bilan carbone neutre en 2050**

Le budget carbone

Les budgets carbone restants à partir de 2020 permettant de limiter à 2 °C et 1,5 °C la hausse moyenne des températures

En %

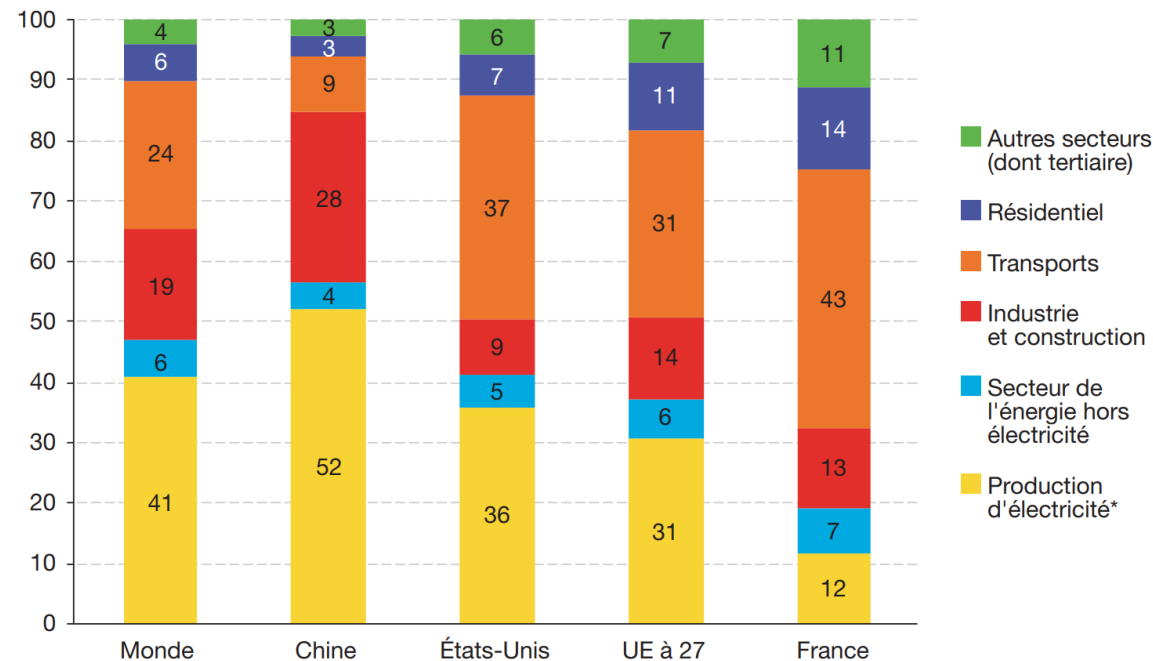


Réduire les émissions de gaz à effet de serre pour atteindre la neutralité carbone en 2050

Répartition sectorielle des émissions de CO₂ dans le monde

ORIGINE DES ÉMISSIONS DE CO₂ DUES À LA COMBUSTION D'ÉNERGIE EN 2019

En %



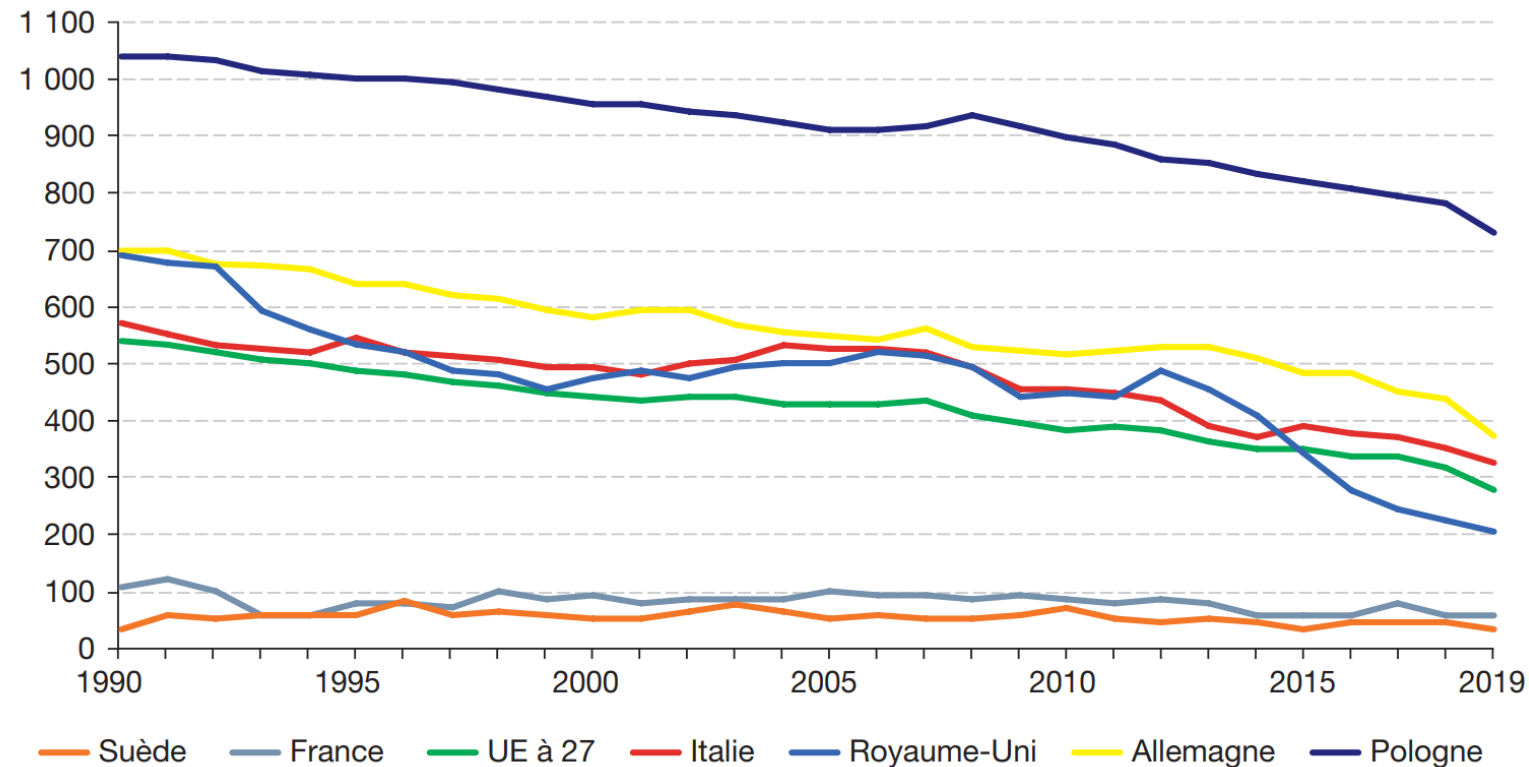
* Y compris cogénération et autoproduction.

Source : AIE, 2021

Disposer d'une production électrique « bas carbone » fiable

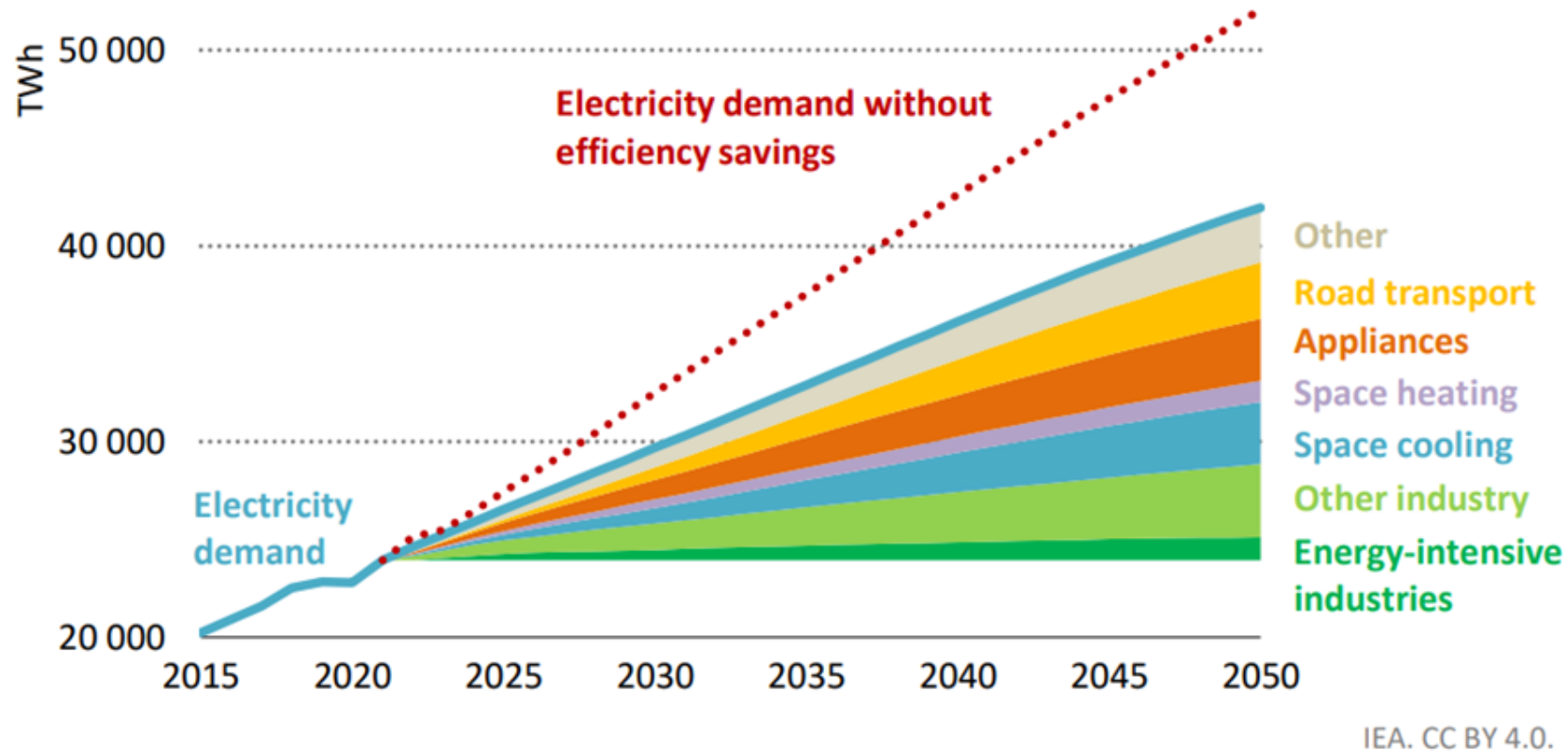
ÉMISSIONS DE CO₂ POUR PRODUIRE 1 kWh D'ÉLECTRICITÉ DANS L'UE

En g CO₂/kWh



Source : J. PERCEBOIS

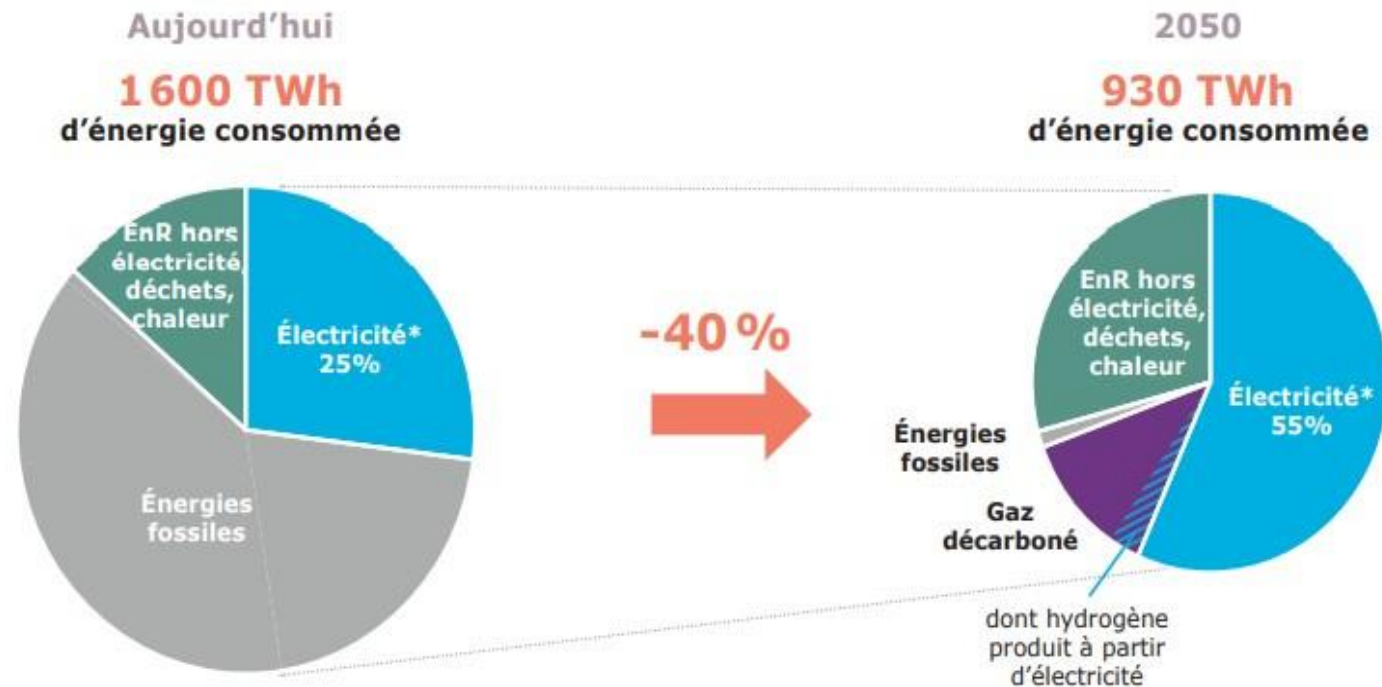
Prévision de la demande en électricité Monde



Energy efficiency gains cut electricity consumption growth by around 10 000 TWh in the STEPS by 2050

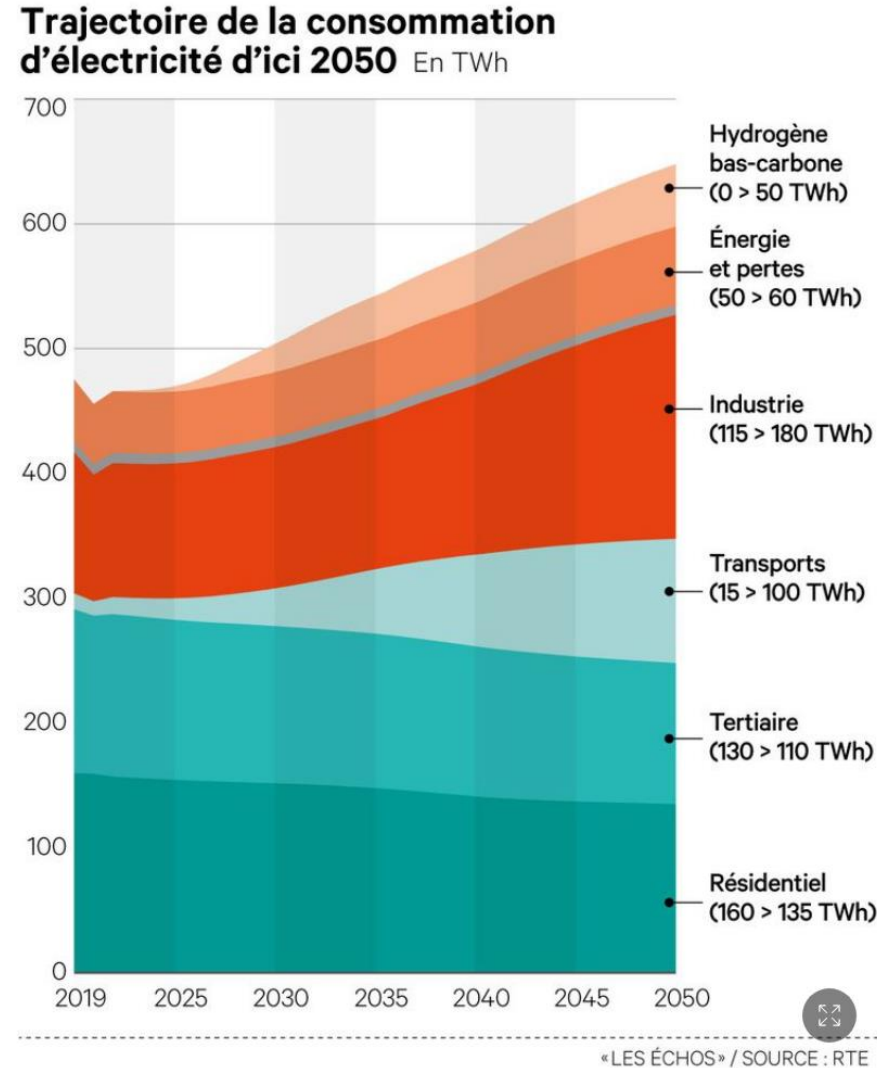
Le scénario RTE 2021

Évolution de la consommation finale d'énergie



* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

Prévision de la consommation d'électricité - France

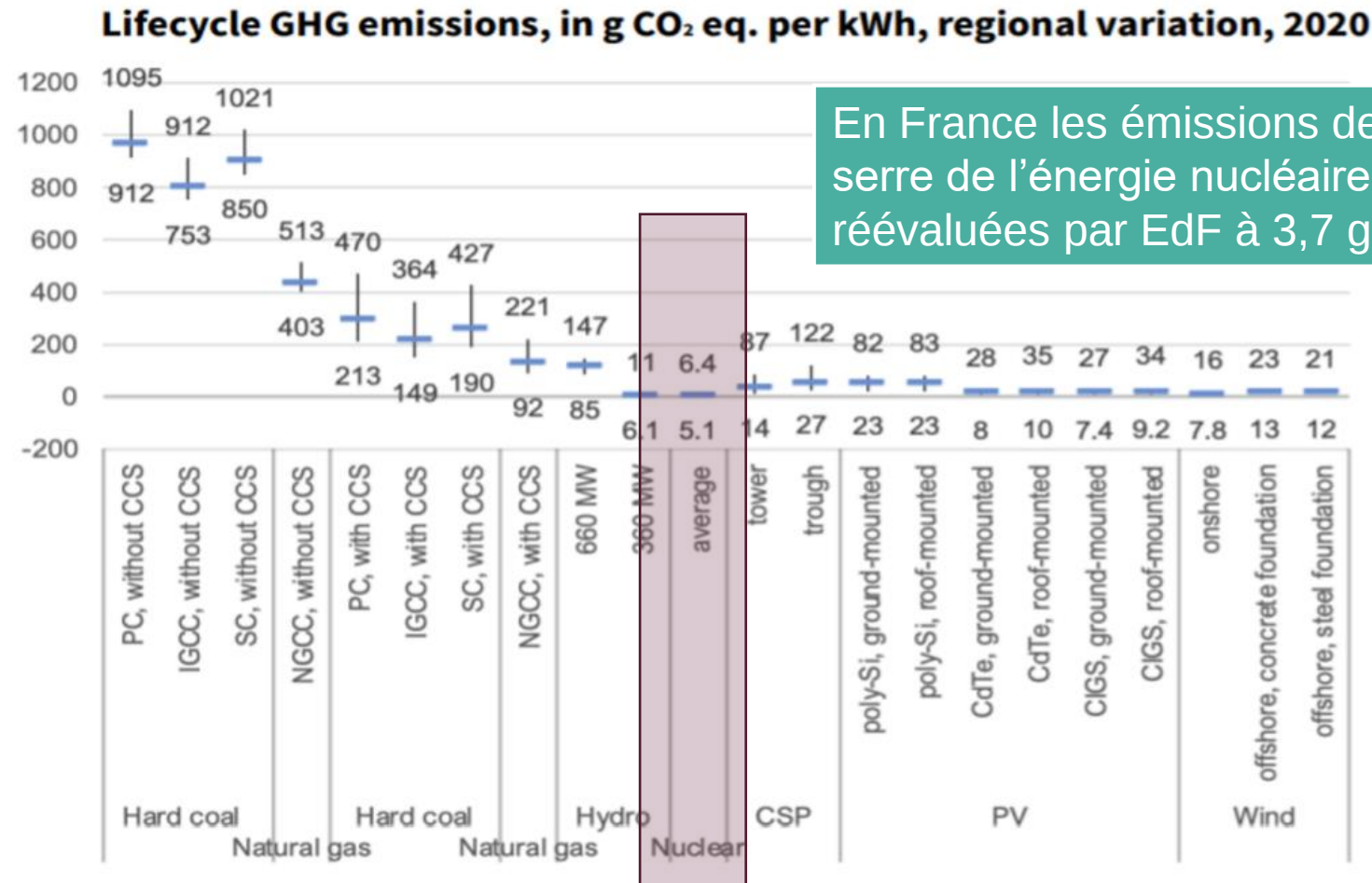


Scénario de référence RTE : 650 TWh

Le scénario « réindustrialisation » : 775 TWh

Scénarios autres : 800 TWh

Emission de gaz à effet de serre des différents moyens de production électrique



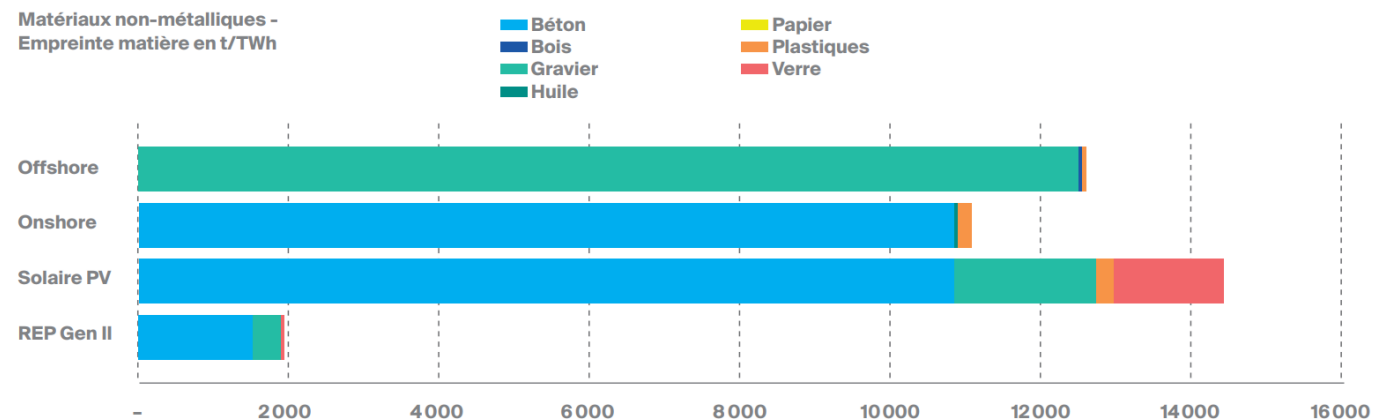
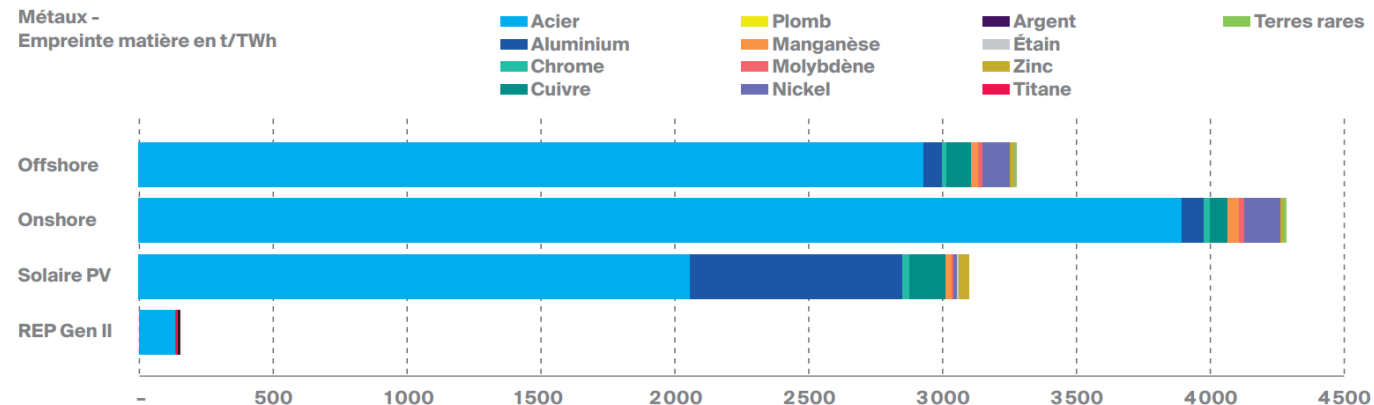
En France les émissions de gaz à effet de serre de l'énergie nucléaire ont été réévaluées par EdF à 3,7 g CO₂ eq/kWh



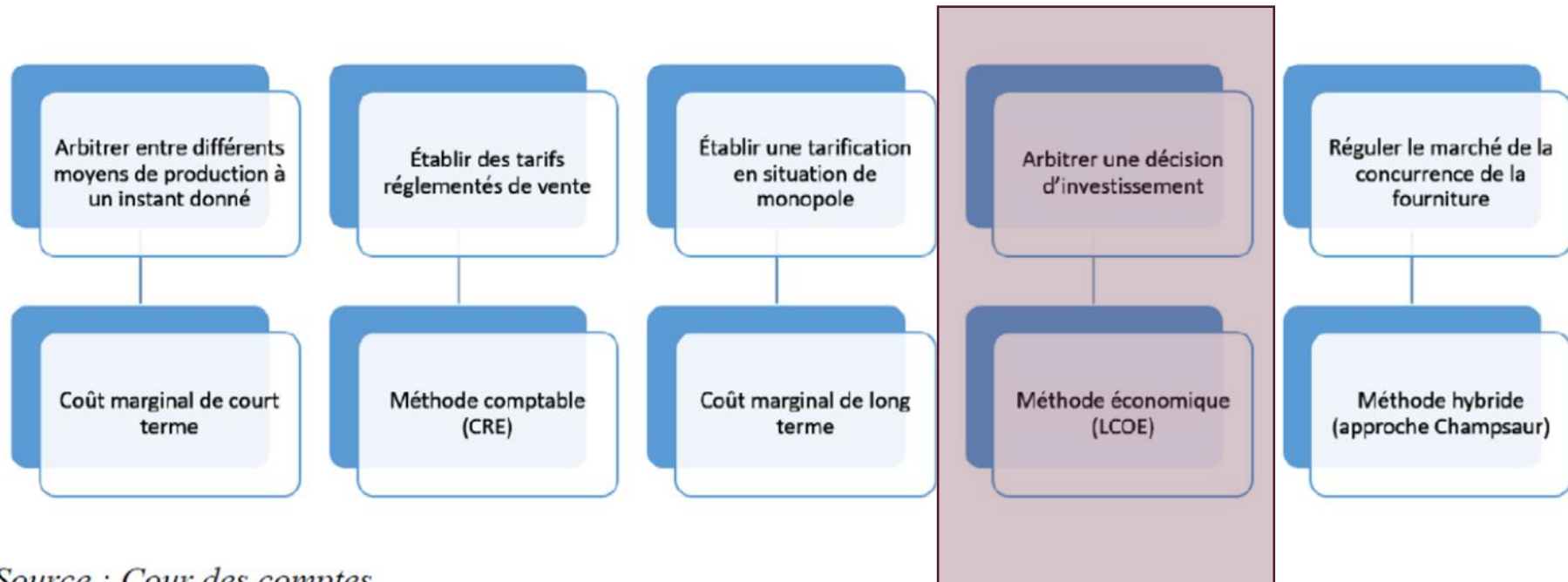
- **Défi économique et industriel**

Empreinte matières des différentes sources d'énergie bas carbone

Comparaison entre un REP de génération II, le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien onshore et offshore – Source : AIE/Sfen



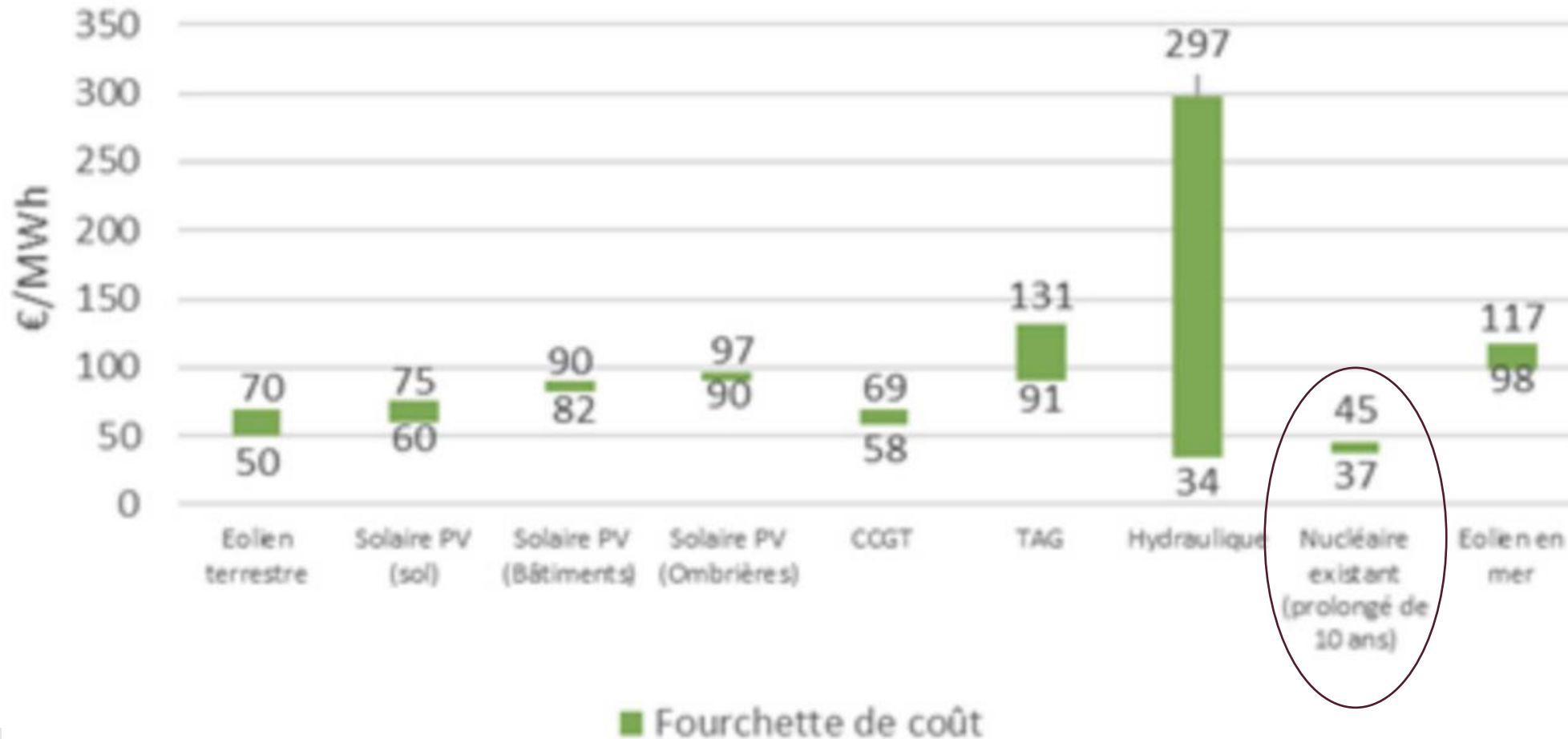
Les différents modes de calcul des coûts des énergies



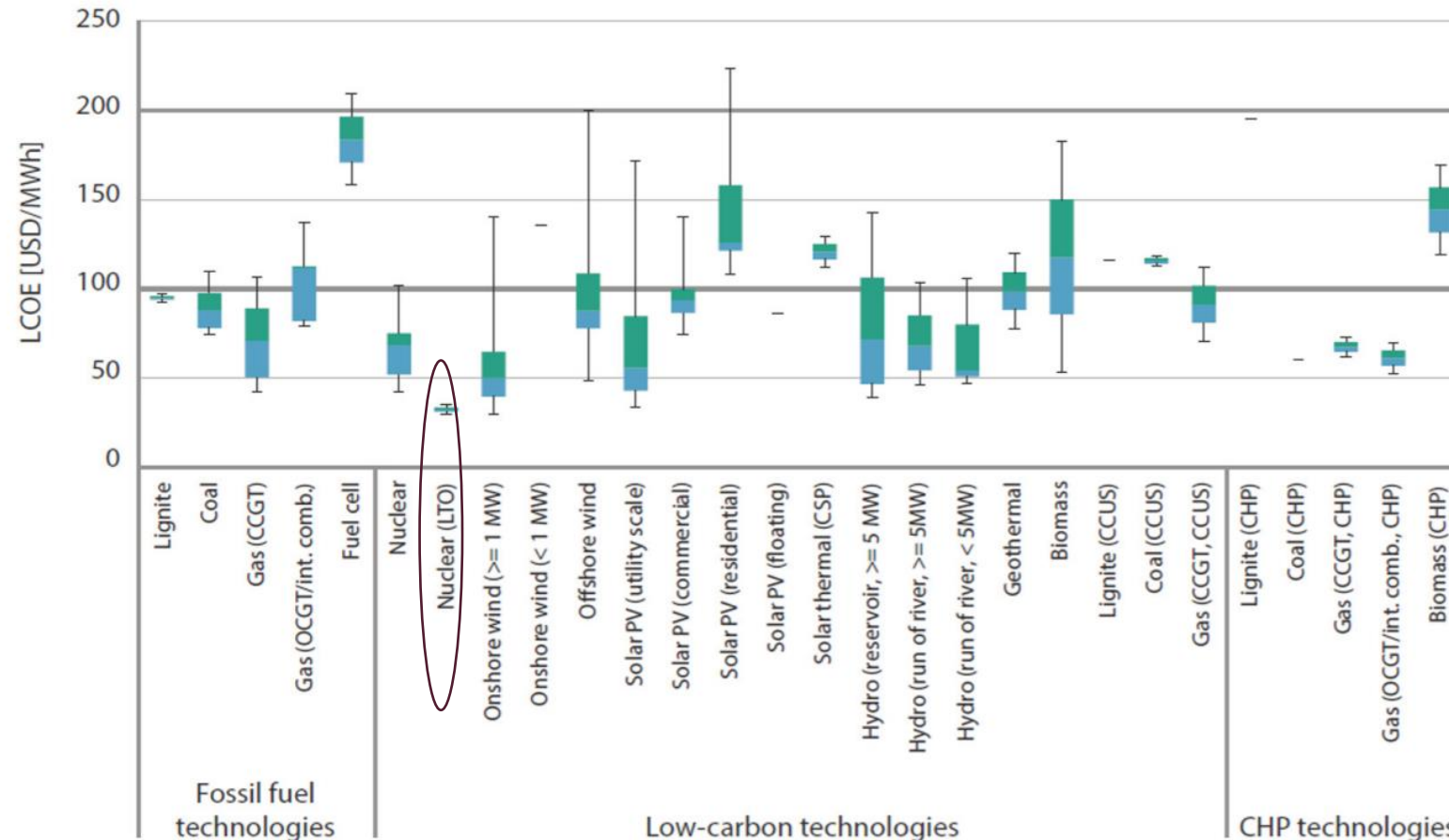
Source : Cour des comptes

$$LCOE_i := \frac{\text{somme des flux de dépenses sur toute la durée de vie de la centrale}}{\text{somme des flux d'électricité produite sur toute la durée de vie de la centrale}}$$

Comparaison du LCOE des différentes filières de production d'électricité en France (source Sfen)



Comparaison du LCOE de différentes technologies dans le monde (source : IEA-NEA 2021)



Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Compétitivité du nucléaire existant

Extrait note Sfen : compétitivité du nucléaire

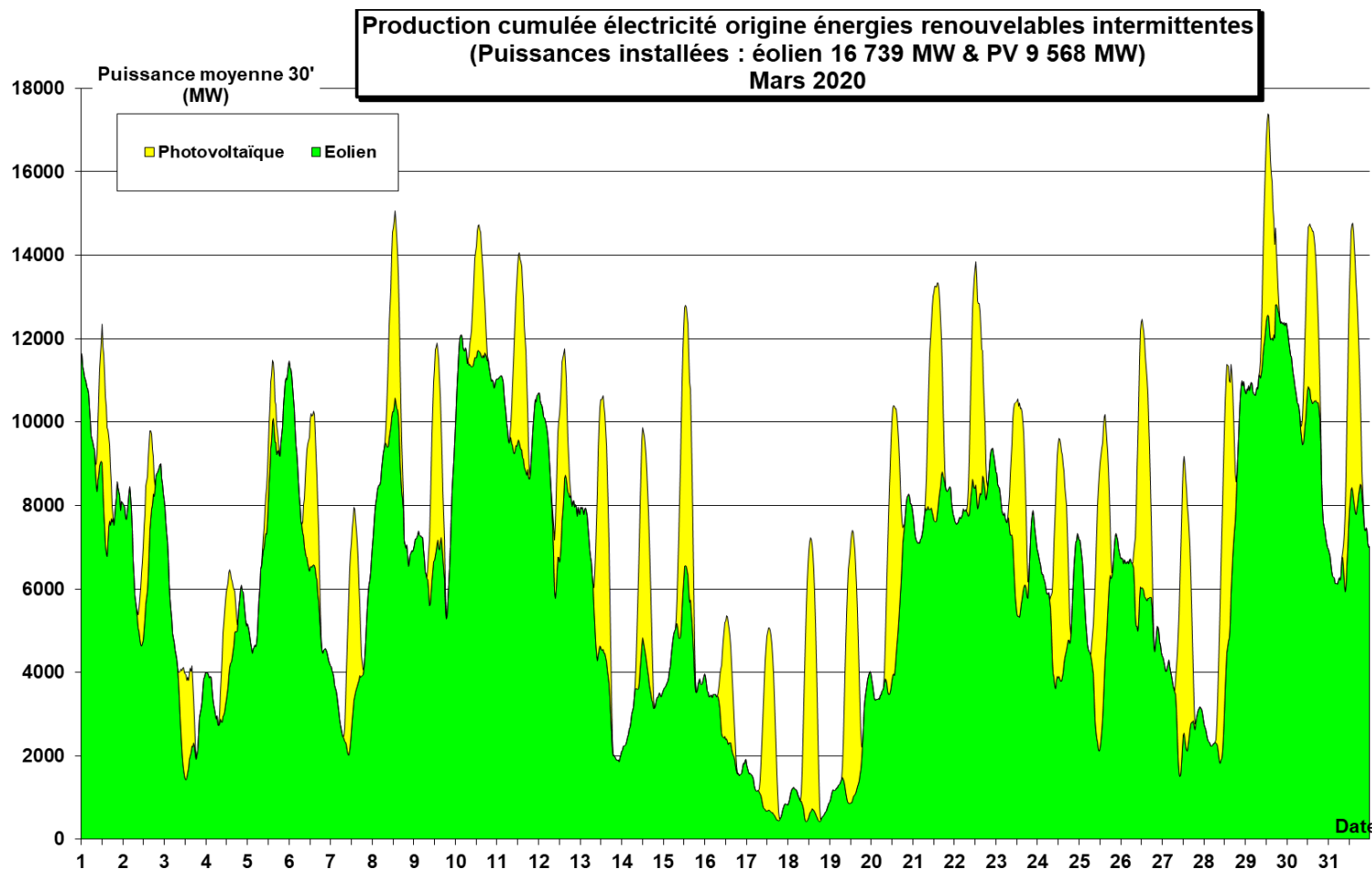
En France, tant qu'ils répondent aux exigences de sûreté, la décision sur le prolongement de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires en service jusqu'à 50 ans et au-delà peut être prise économiquement « sans regret » (c'est-à-dire que les bénéfices immédiats sont avérés et que les impacts futurs, même si incertains, seront positifs), et ce pour le producteur et les consommateurs. Parmi les moyens de répondre à la demande croissante d'électricité sur le court et moyen terme, cette option est à la fois la plus rapide à déployer (délai de visite décennale inférieur à l'année), et la plus économique, avec un LCOE situé entre 25 et 40 €/MWh suivant la durée de prolongation.

La fermeture de Fessenheim ne s'explique ni par des raisons de sûreté ni par des raisons économiques



- **La gestion de l'intermittence des énergies éoliennes et solaires**

Intermittence des énergies solaires et éoliennes à l'échelle française

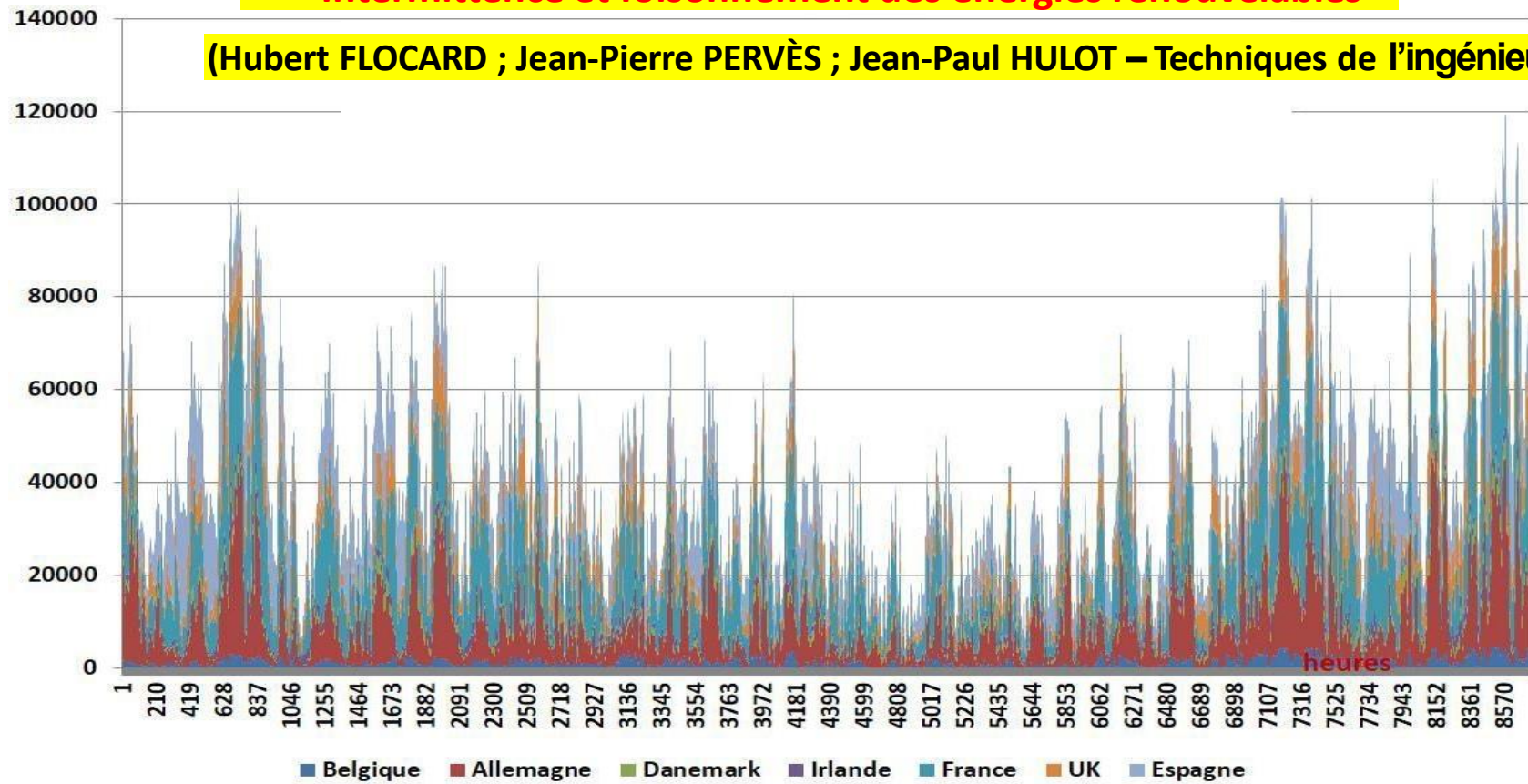


Intermittence des énergies solaires et éoliennes à l'échelle européenne

« Intermittence et foisonnement des énergies renouvelables »

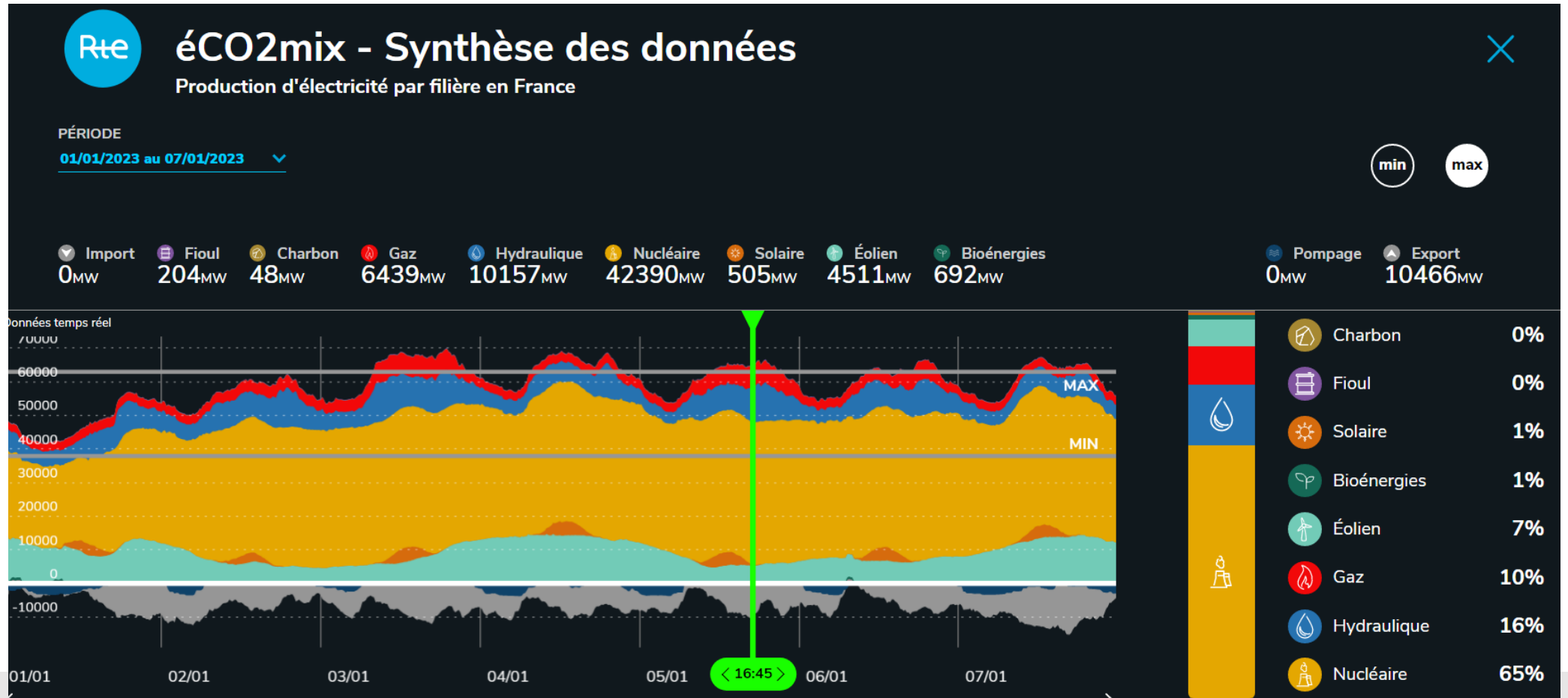
(Hubert FLOCARD ; Jean-Pierre PERVÈS ; Jean-Paul HULOT – Techniques de l'ingénieur)

Diagramme
heure par
heure sur une
année



Le pilotage de la production

Nécessité à tout moment d'adapter la production à la consommation



La robustesse des réseaux électriques

Source : G. SAPY Sciences
en Fête 13 octobre 2022

- En 2050, l'électricité est la principale source d'énergie
- La robustesse des réseaux est un défi majeur, en raison de l'intégration d'énergies renouvelables intermittentes raccordées par des onduleurs
- Nécessité de disposer d'inertie pour stabiliser le réseau et adapter en permanence la production et la consommation

Étude
commune AIE-
RTE du 27
janvier 2021



Quatre ensembles de conditions techniques strictes devront être remplies pour permettre, avec une sécurité d'approvisionnement assurée, l'intégration d'une proportion très élevée d'énergies renouvelables variables dans un système électrique de grande échelle, comme celui de la France [...] Il n'existe aucune démonstration de la faisabilité d'une intégration très poussée d'EnR variables comme l'éolien et le photovoltaïque sur un grand système électrique »

Évolution des réseaux

Des approches différentes entre l'Allemagne et la France

*Source : G. SAPY Sciences
en Fête 13 octobre 2022*

Technologies « bas carbone » utilisables	Allemagne → Discontinuité Réseau formé par onduleurs	France → Continuité Réseau formé par alternateurs
Nucléaire	0 %	Socle majoritaire (50 à 70 %)
Hydraulique + biomasse + ...	< 10 %	≈ 10 %
Eolien + Photovoltaïque	> 90 %	≈ 20 à 40 %
Turboalternateurs à hydrogène	Très grand nombre	Faible nombre
Stockages hydrogène associés	Capacités très importantes	Capacités limitées
Importations d'hydrogène	70 à 75 % des besoins	Inutiles
Compensateurs synchrones	Très grand nombre	Faible nombre

Fort risque industriel, économique
et d'indépendance
Risque sur la stabilité du réseau
européen

Risques limités



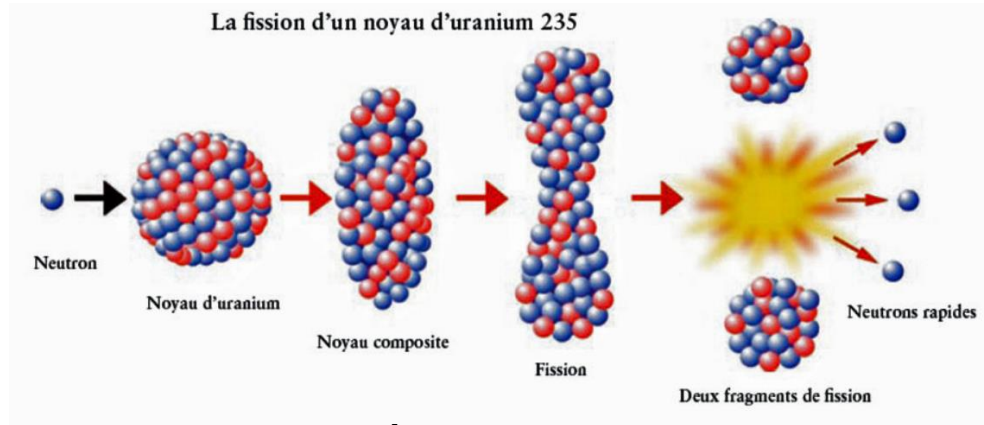
- **Evolution du parc nucléaire français**

La fission nucléaire

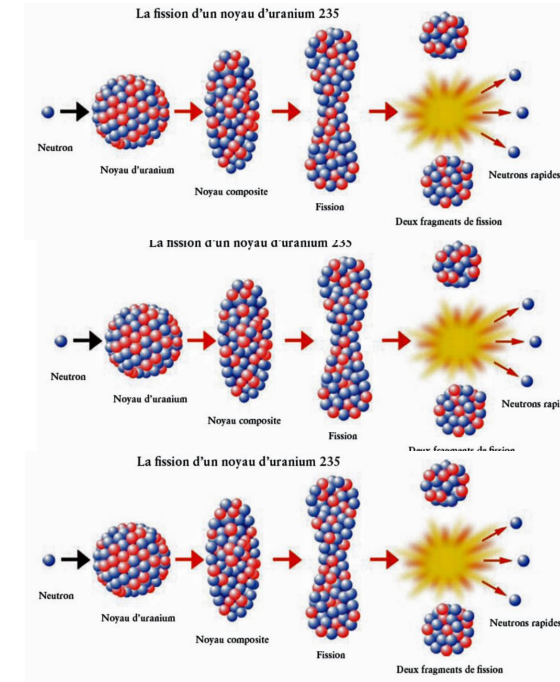
- Découverte en 1938
- Dans la nature seul l'isotope 235 de l'uranium (^{235}U) est fissile (0,7% dans l'uranium naturel)
- La fission de ^{235}U contenu dans 1g d'uranium naturel produit : 158,5 kWh (16 l d'essence)

Fonctionnement d'un réacteur nucléaire

- La réaction en chaîne



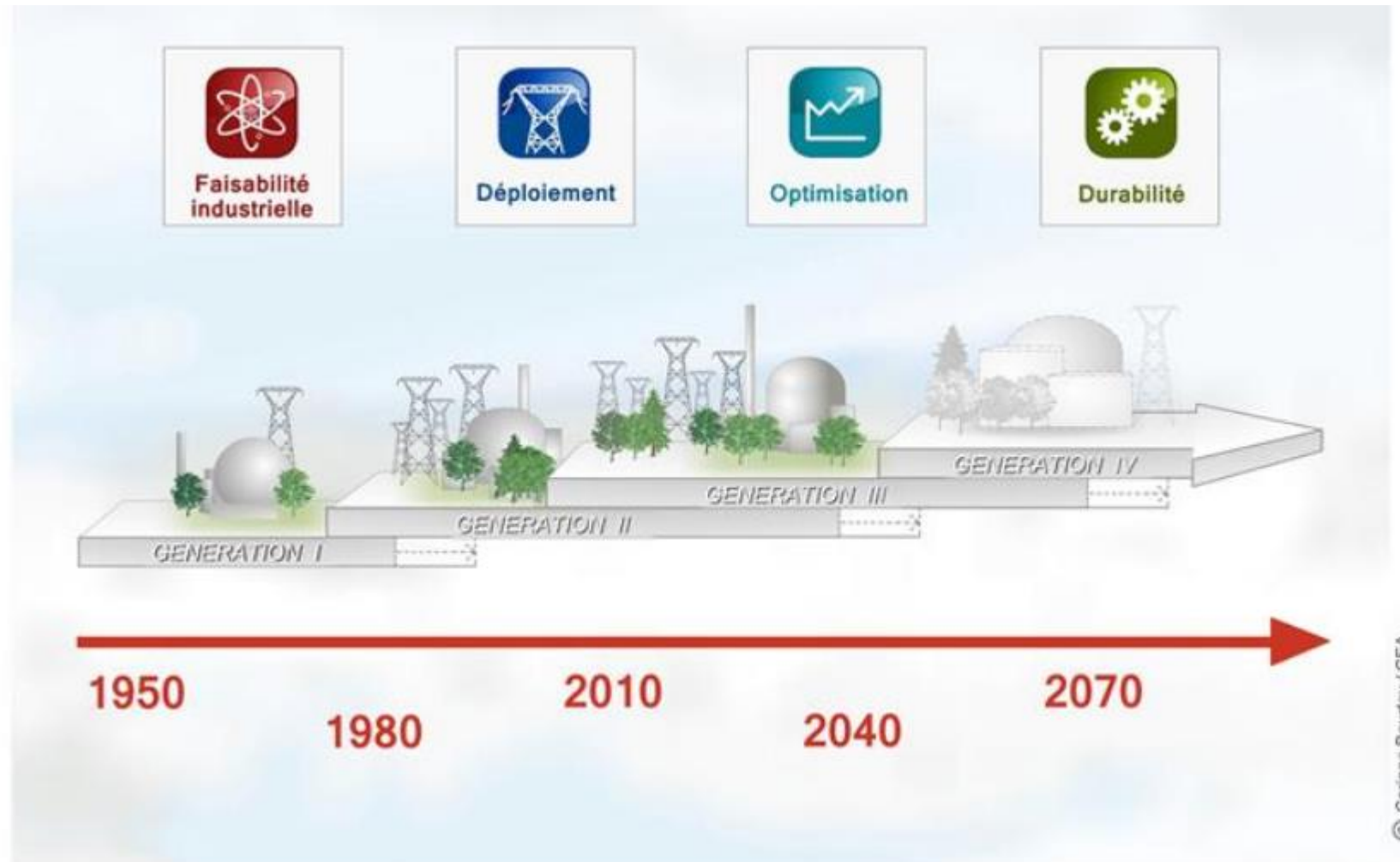
Source : B. Barré

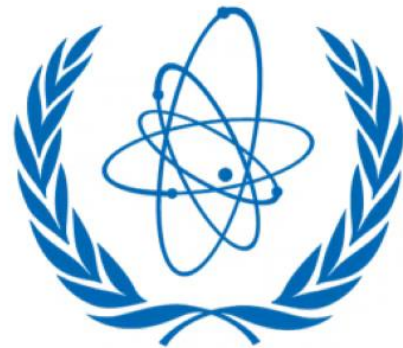


Piloter la réaction

- Les absorbants de neutrons permettent de piloter les fissions
- Des neutrons différés permettent le pilotage de la puissance du réacteur

Les générations de réacteur nucléaire





IAEA

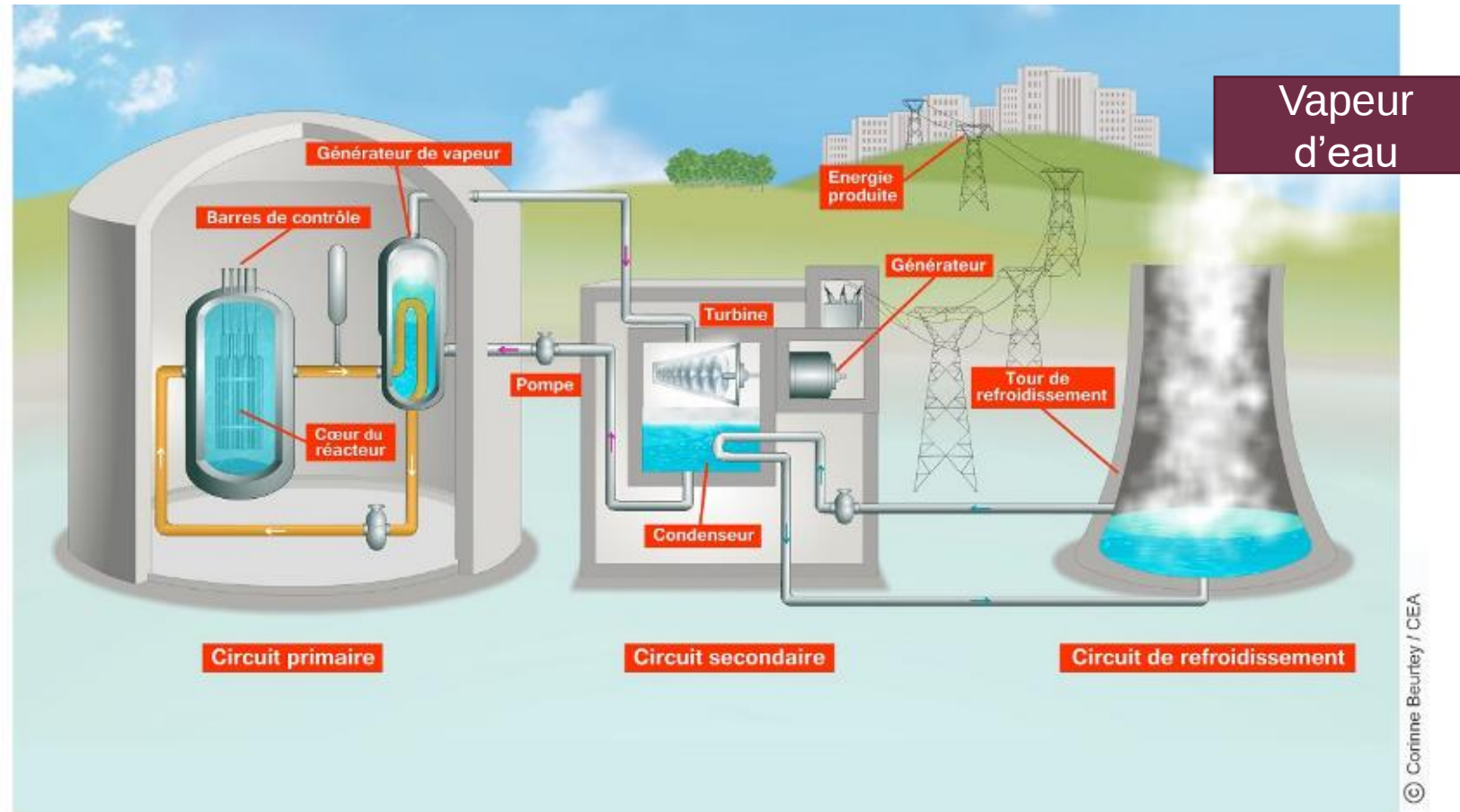
Power Reactor
Information
System

PRIS

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire à réacteur à eau pressurisée (REP)

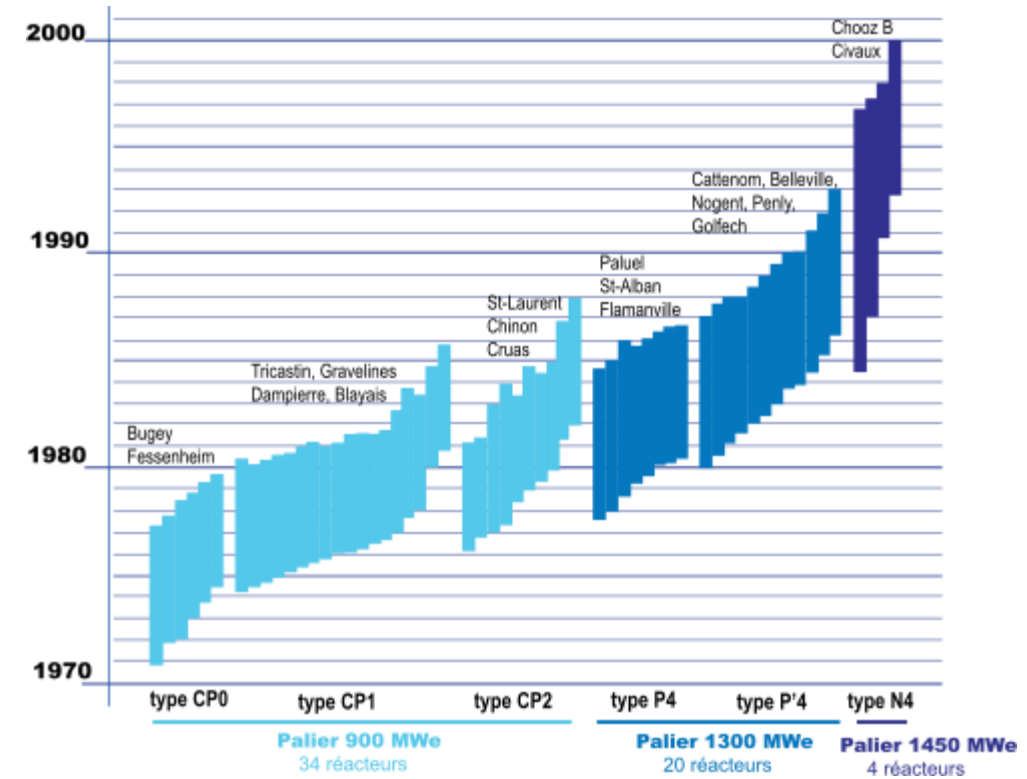
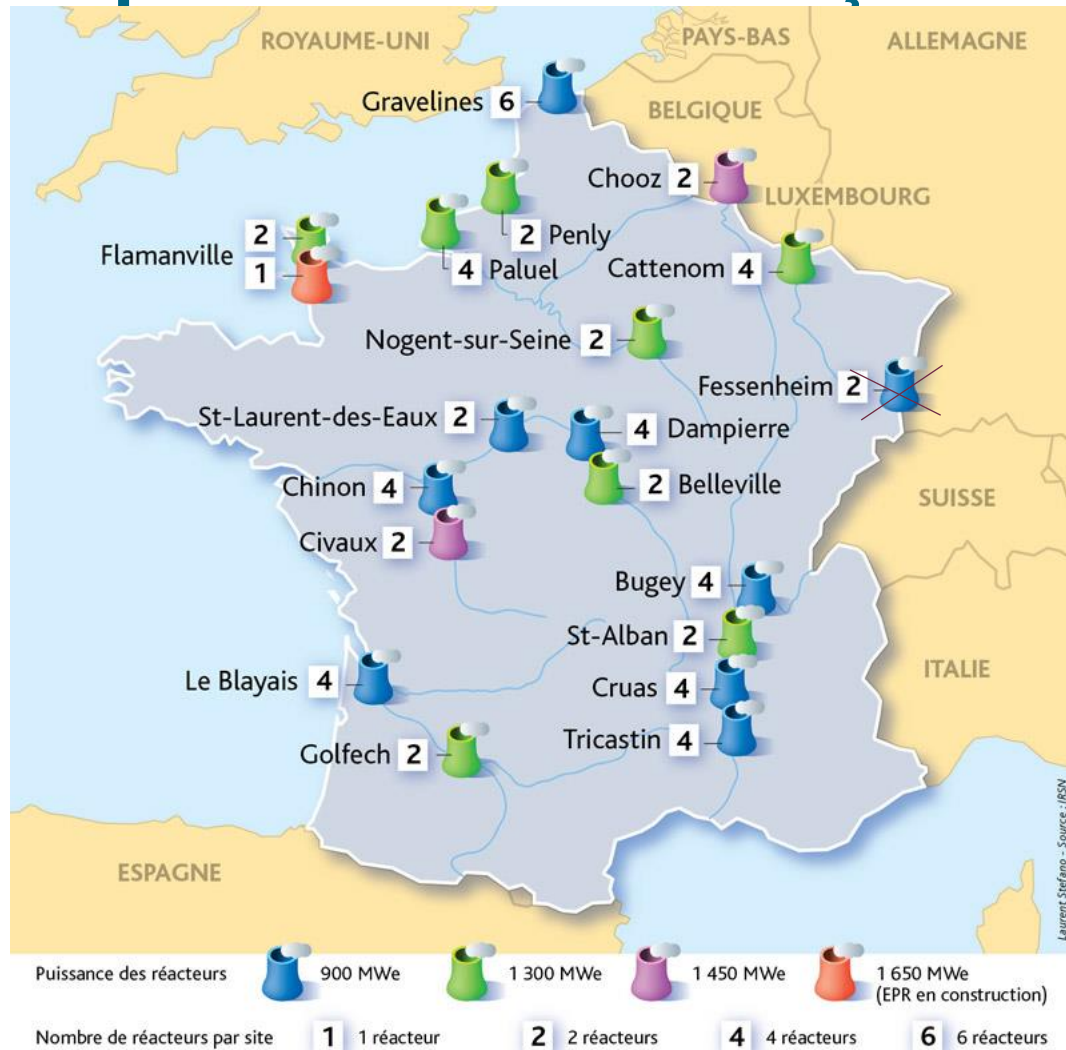
L'eau ralentit les neutrons et favorise les fissions de l' ^{235}U

Nécessite de l'uranium enrichi en ^{235}U



Pas de rejet de CO₂

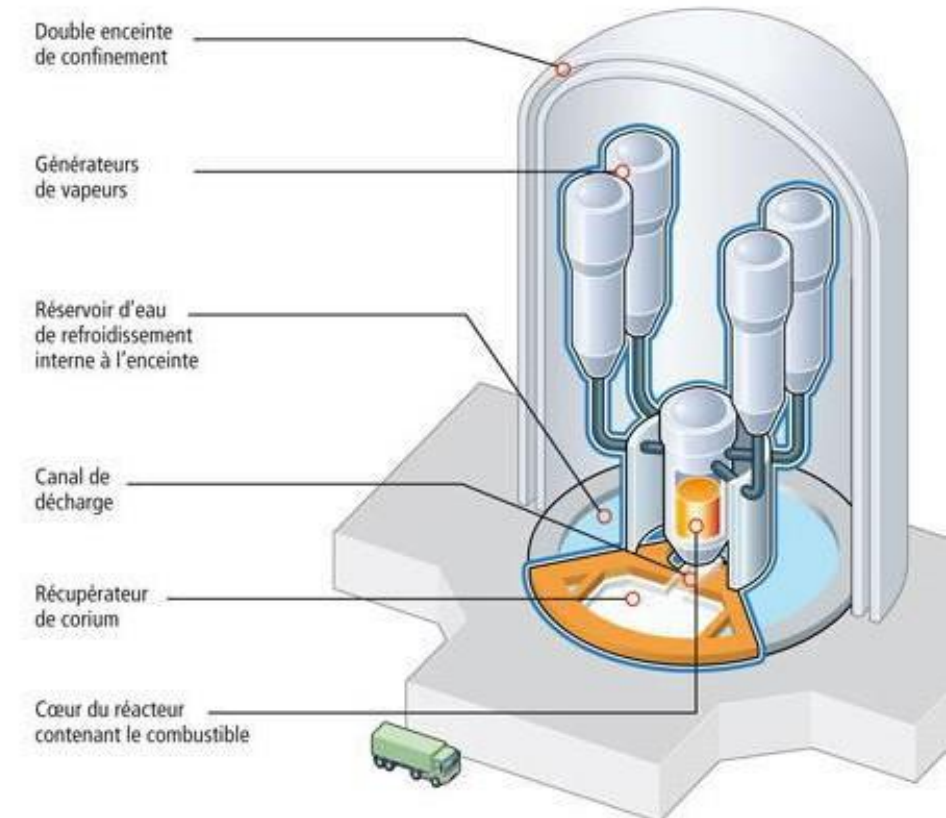
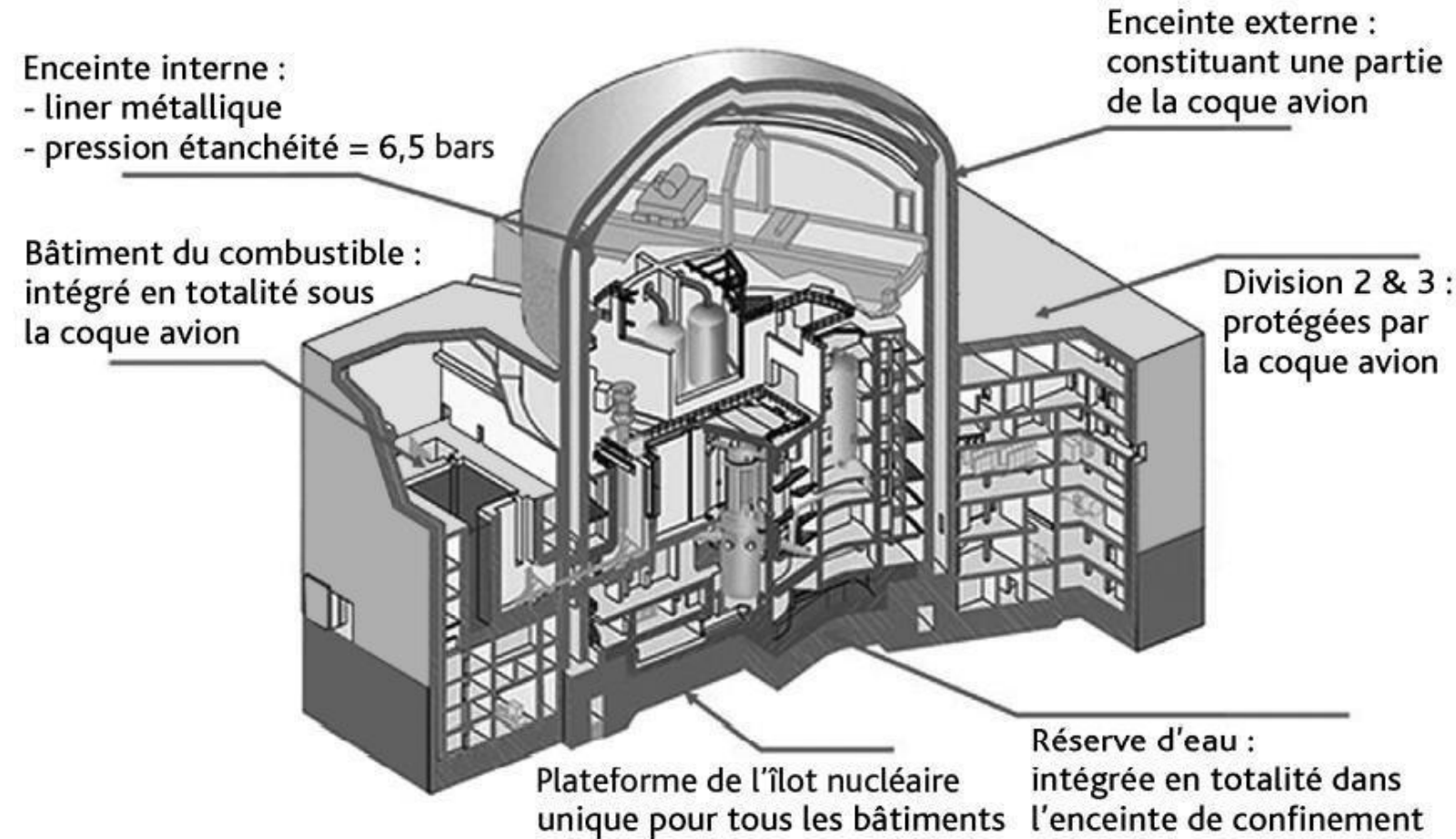
Le parc nucléaire français actuel



Calendrier de construction

Les réacteurs de 3^{ème} génération

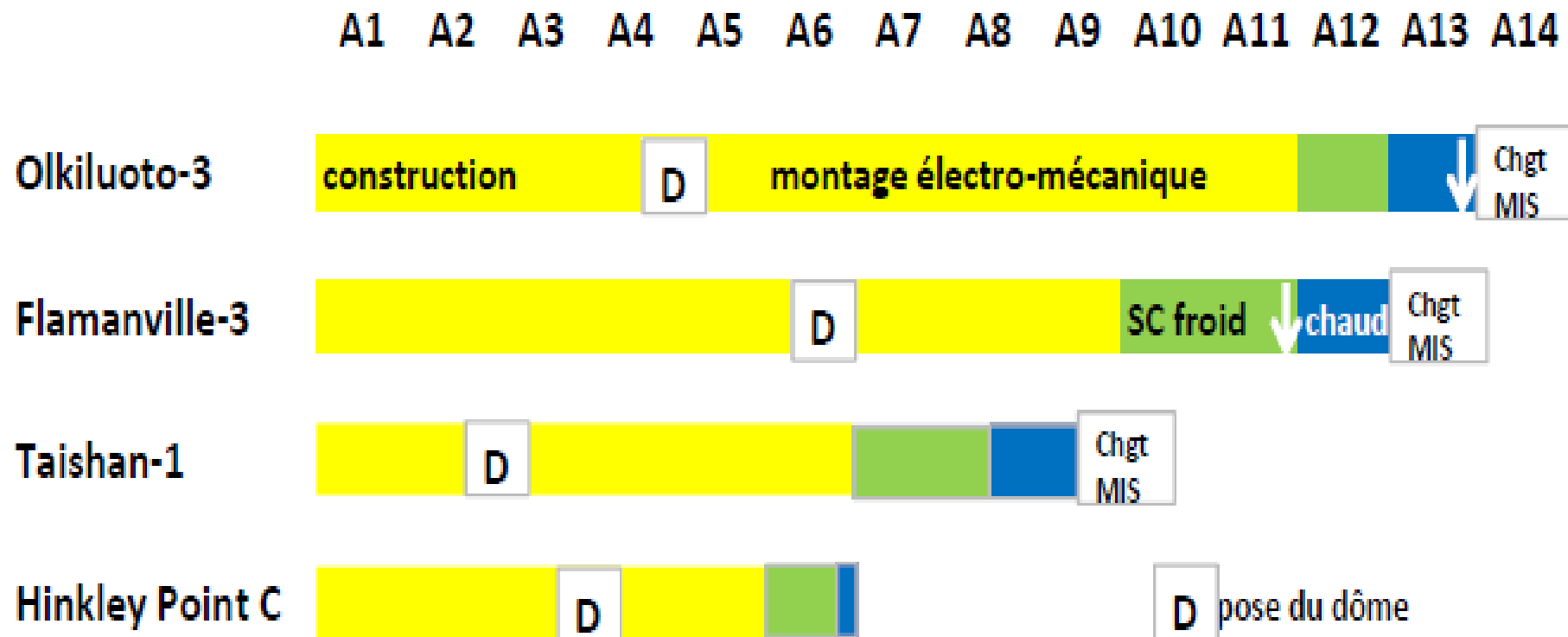
L'EPR – 1 650 MWe



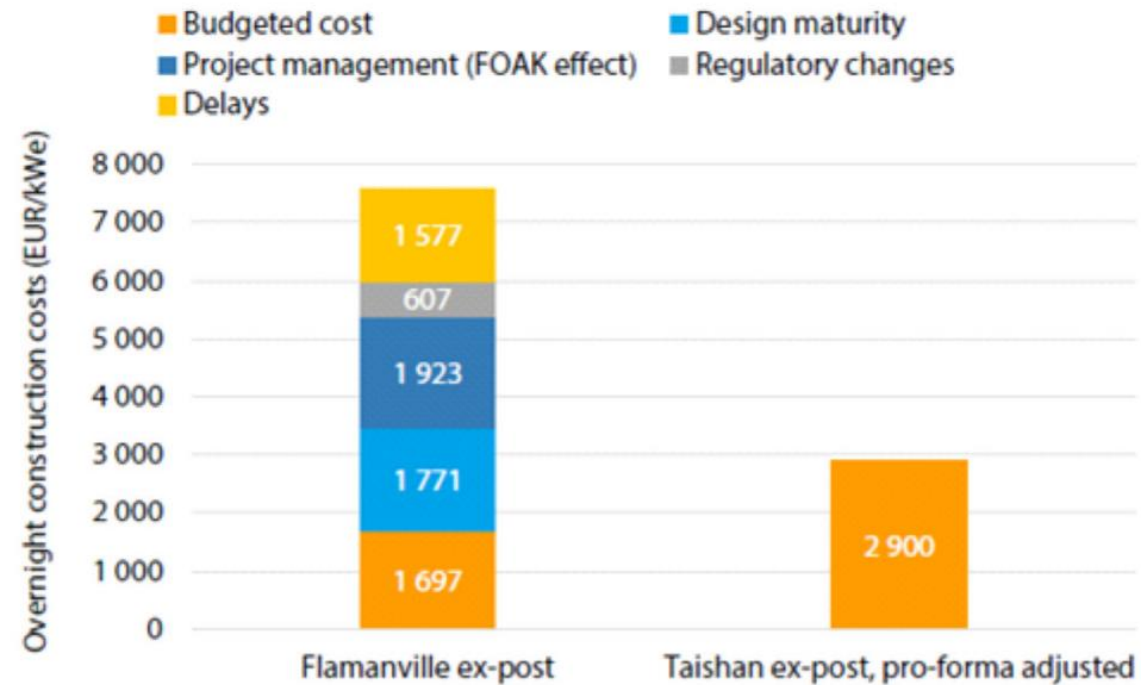
EPR : un réacteur de 3^{ème} génération évolutionnaire

- **Sûreté renforcée**
- Réduction des doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs au cours de l'exploitation normale et des incidents d'exploitation.
- Réduction significative de la fréquence globale de fusion du cœur à 1/100 000 par an et par réacteur
- Réduction significative des rejets radioactifs dans tous les cas d'accident :
 - pour les accidents sans fusion du cœur. Pas d'action de protection (évacuation, mise à l'abri) au voisinage de la centrale ;
 - pour les accidents de fusion du cœur. Élimination des rejets précoces importants
 - pour les autres situations de fusion du cœur : mise à l'abri limitée, pas de relogement permanent, pas d'évacuation au-delà du voisinage immédiat de la centrale, pas de restriction à long terme de la consommation d'aliments.
- **Gains économiques**
- **Augmentation du taux de combustion des éléments combustibles**
 - Réduction du besoin en combustible
 - Réduction de la production de déchets
 - Augmentation du facteur de charge (90%)
- **Durée d'exploitation supérieure à 60 ans**

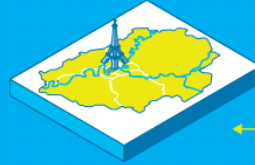
EPR : l'apprentissage



EPR : Analyse des coûts de l'EPR de Flamanville



Source: Based on Folz (2019), "Rapport au Président Directeur Général d'EDF: La construction de l'EPR de Flamanville."



EN SERVICE
OU EN CONSTRUCTION

Chine

2 unités
Site : **Taishan**
Puissance : **1 650 MWe**
Connexion au réseau en 2018 et 2019

Royaume-Uni

2 unités
Site : **Hinkley Point C**
Puissance : **1 650 MWe**
Connexion au réseau prévue en 2027

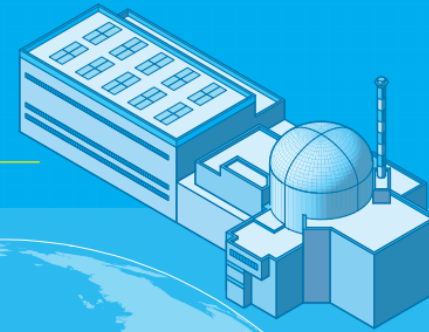
France

1 unité
Site : **Fliamanville**
Puissance : **1 650 MWe**
Démarrage prévu fin 2023

Finlande

1 unité
Site : **Olkiluoto**
Puissance : **1 650 MWe**
A divergé le 21 décembre 2021 et va entrer en opération commerciale en décembre 2022

L'EPR est un réacteur de forte puissance avec une production annuelle de 12 TWh. À titre de comparaison, la consommation électrique de l'Île-de-France est de 66 TWh (2018, RTE).



EN PROJET

Pologne

4 à 6 unités
Site : à déterminer
Puissance : **1 650 MWe**
EDF a remis une offre préliminaire non engageante en octobre 2021.

Inde

6 unités
Site : **Jaitapur**
Puissance : **1 650 MWe**
Offre technico-commerciale engageante remise par EDF en avril 2021.

Royaume-Uni

2 unités
Site : **Sizewell C**
Puissance : **1 650 MWe**
Projet validé par le gouvernement britannique en juillet 2022.

France

EPR 2
6 unités (EPR 2)
Site : **Penly, Gravelines, Bugey ou Tricastin**
Mise en service à partir de 2035

République tchèque

1 unité
Site : **Dukovany**
Puissance : **1 200 MWe**
EDF et deux concurrents ont été sélectionnés pour l'appel d'offres en mars 2022.

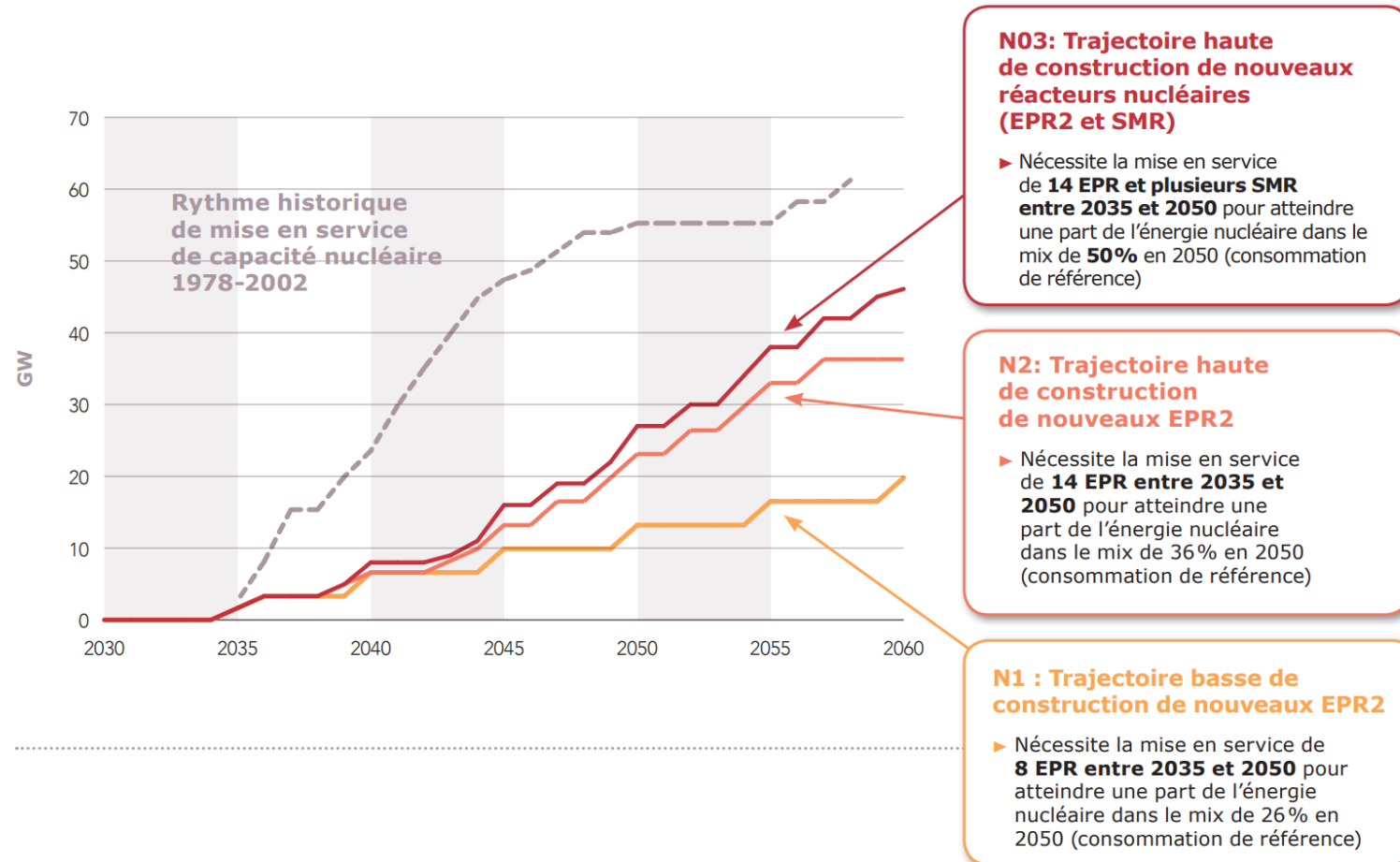
Nombre de réacteurs



Les projets EPR dans le monde

Les projets EPR se concrétisent avec deux unités en exploitation en Chine et deux autres proches d'être mises en service en Europe. L'EPR continue de séduire à l'international avec deux unités en construction au Royaume-Uni et jusqu'à quinze unités proposées par EDF dans le cadre d'appels à projets. En France, le gouvernement souhaite la construction de six à quatorze EPR2, une version optimisée de l'EPR.

Évolution du parc nucléaire dans les scénarios de RTE



EPR 2



Numérique
généralisé en
conception



Tuyaux
d'eau
brute en
PEHD



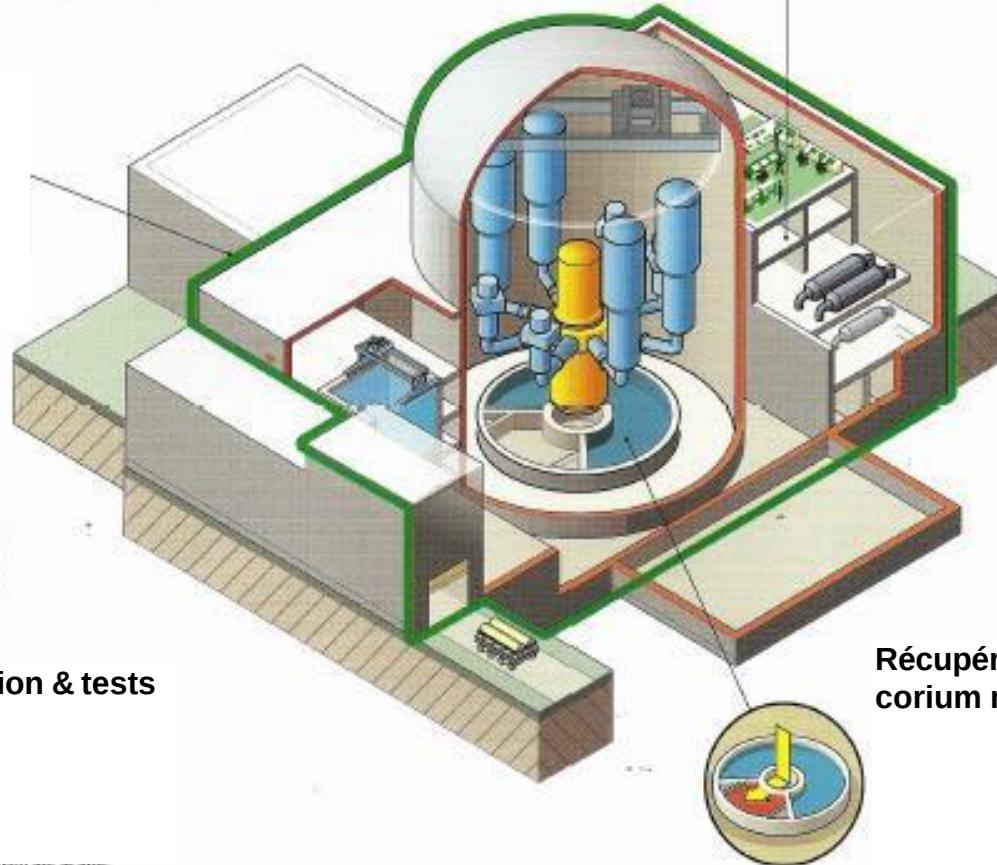
Constructibilité &
circulation des
matériels accrues

Enceinte
étanche simple

Même niveau
de sûreté que
l'EPR

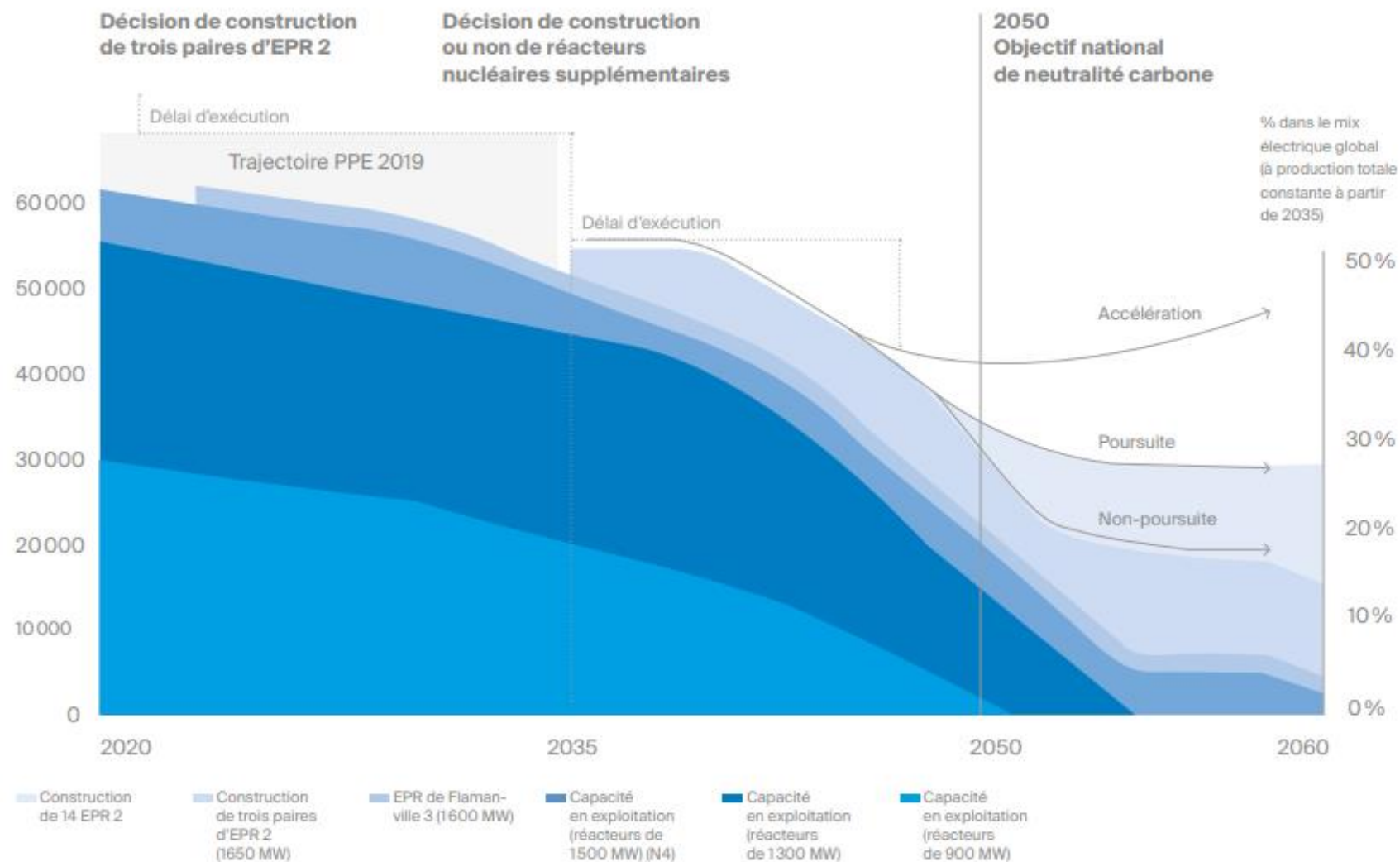


Préfabrication & tests
en usine



Récupérateur de
corium maintenu

Capacités de production nucléaire : simulation 2020-2060

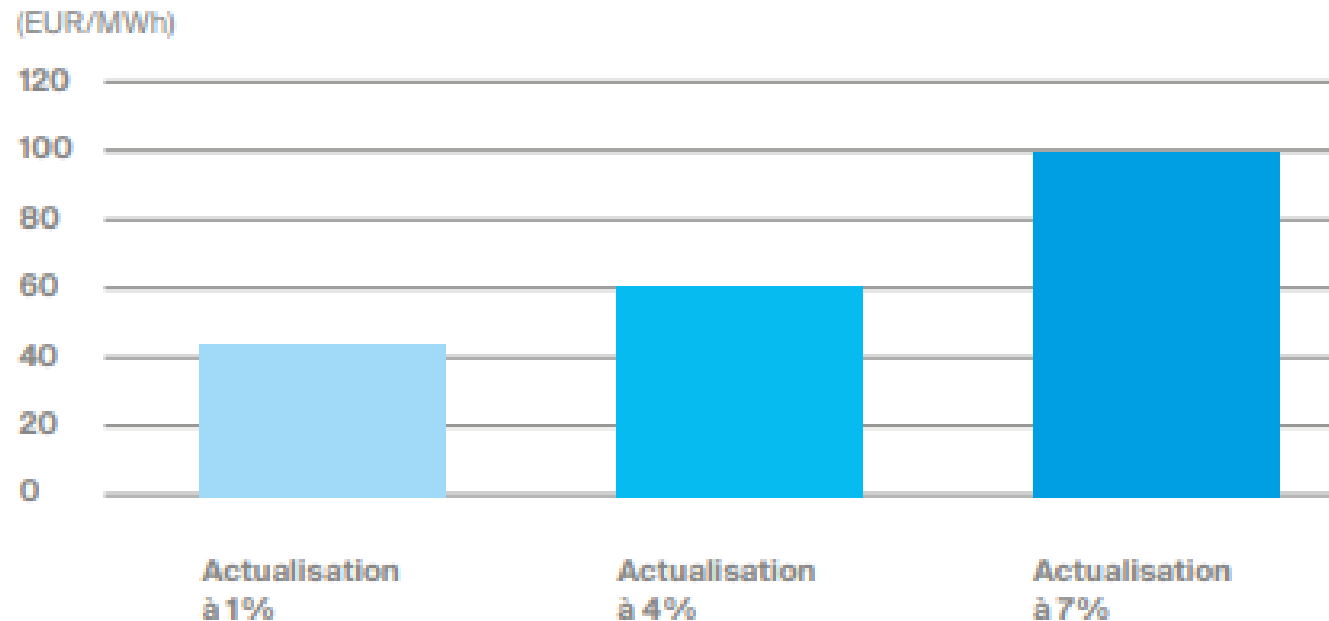


Source : RGN

Évolution du parc nucléaire

Coût de production actualisé sur trois paires d'EPR2

Source: Note gouvernementale, « Travaux relatifs au nouveau nucléaire », février 2022.



Les coûts de production

Figure 21 : Coût de production des principales filières de production en France à l'horizon 2050 (source : RTE, 2021)

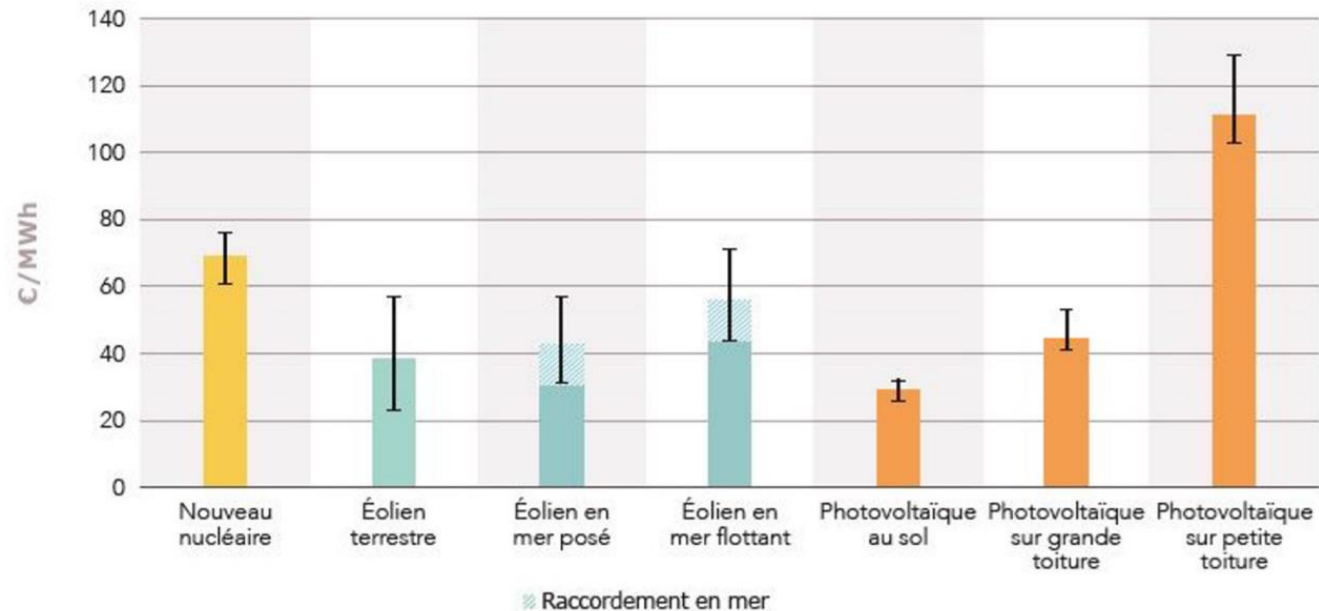
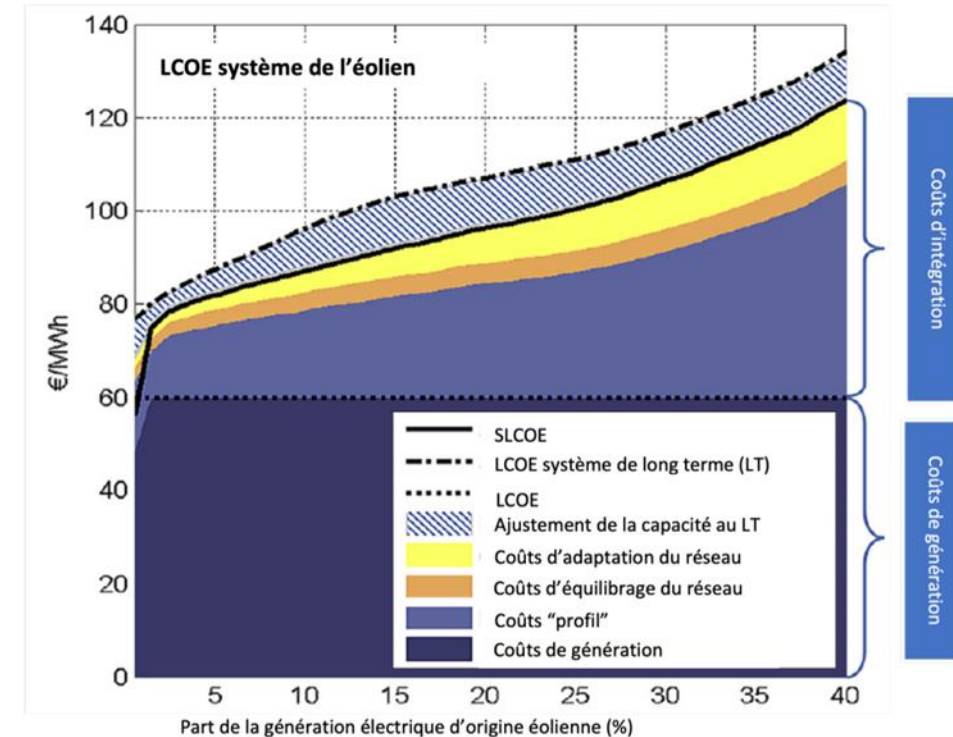


Figure 27 : SLCOE de l'éolien terrestre en Allemagne en 2011 (source : Ueckerdt et al., 2013)



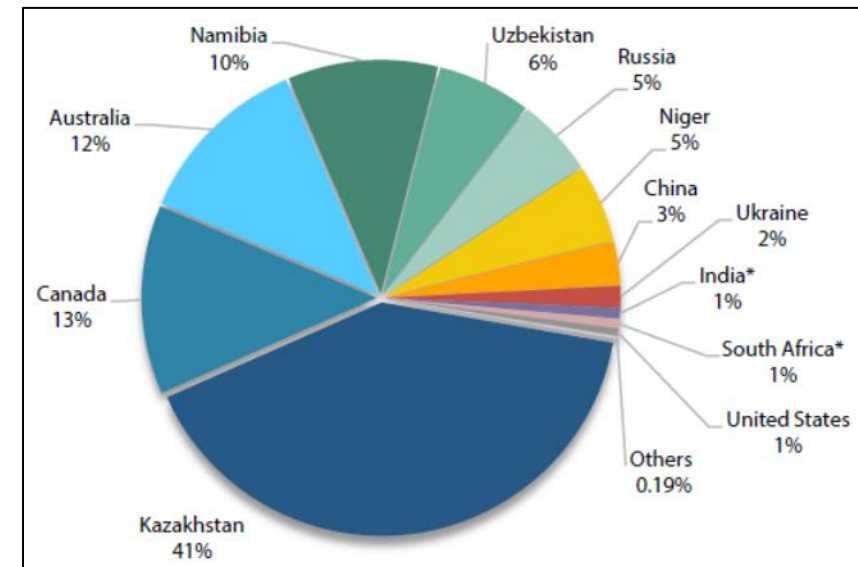
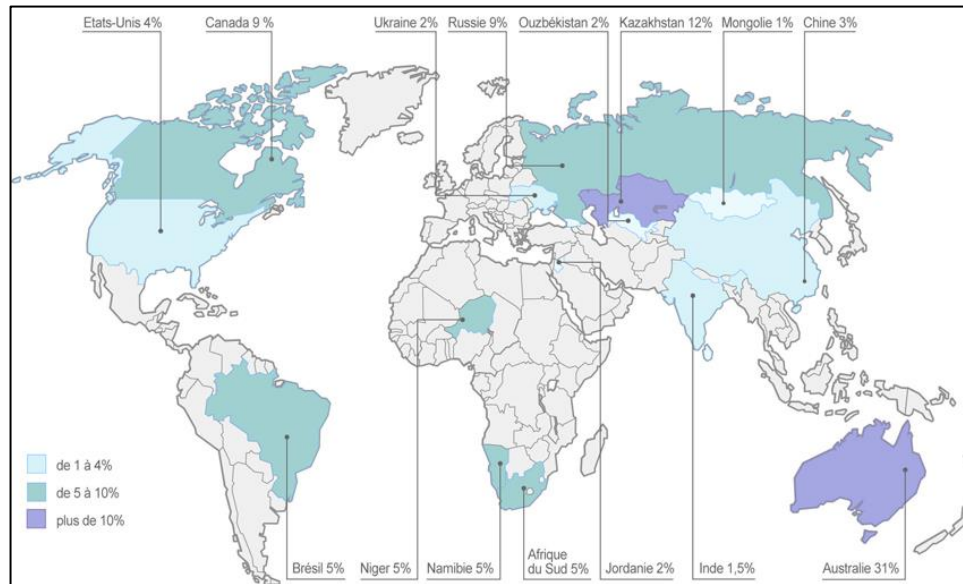


- **Les conditions de la durabilité**

La durabilité

Disponibilité de l'uranium

- Ressources géologiques
- Besoins actuels : 60 000 t/an
- Ressources conventionnelles estimées : 15 millions de tonnes
(eau de mer : 4 milliards de tonnes : récupérables ?)
- Répartition géographique

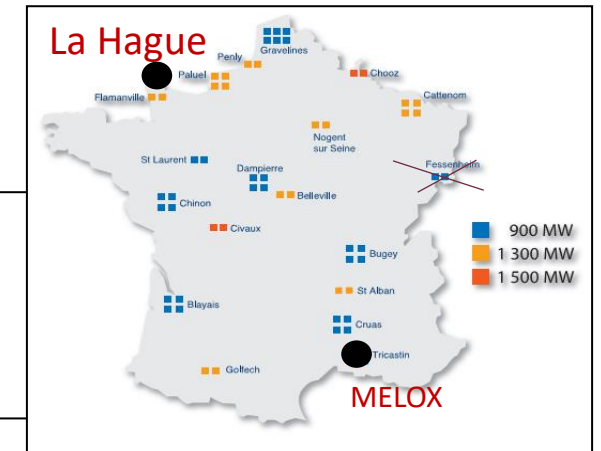


La durabilité

Le recyclage des combustibles usés

- Objectifs :
 - Valoriser les matières énergétiques
 - Minimiser le volume des déchets nucléaires
- Situation internationale du recyclage
 - France : en opération industrielle (La Hague et usine MELOX) et recyclage en réacteurs
 - Japon, Russie, Chine et Inde : en développement
 - Royaume-Uni, Etats-Unis : regain d'intérêt
 - Finlande : pas de recyclage (stockage direct en 2030) ➡
- En attendant : entreposage (300 000t dans le monde)

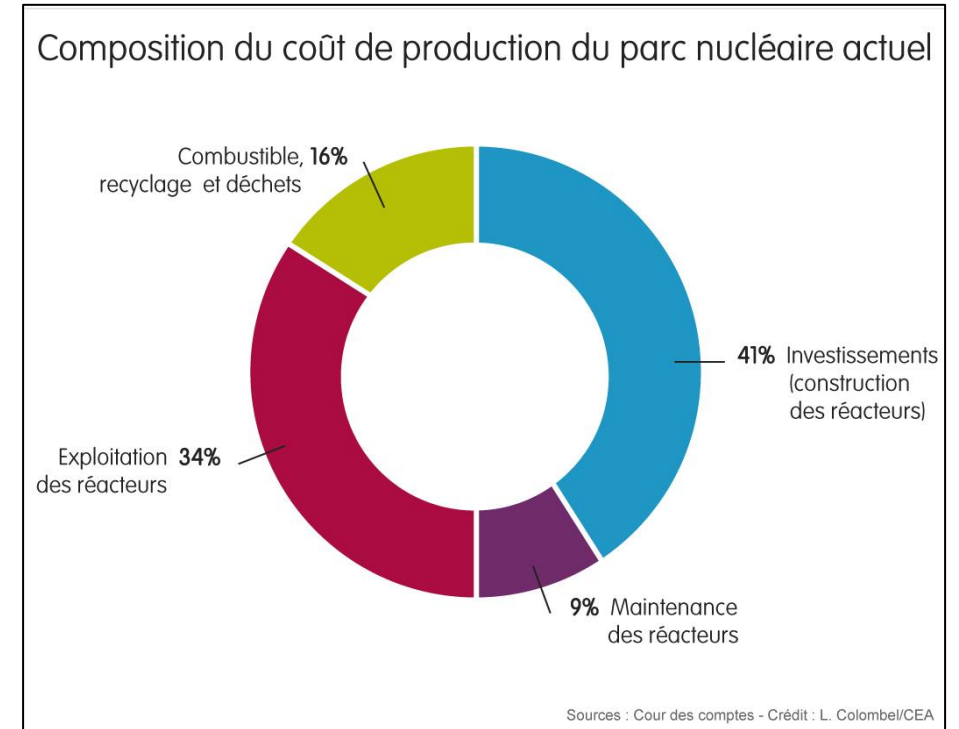
56 REP
24 autorisés MOX
(les réacteurs de 900 Mwe)
4 autorisés URE



Le coût du combustible en France

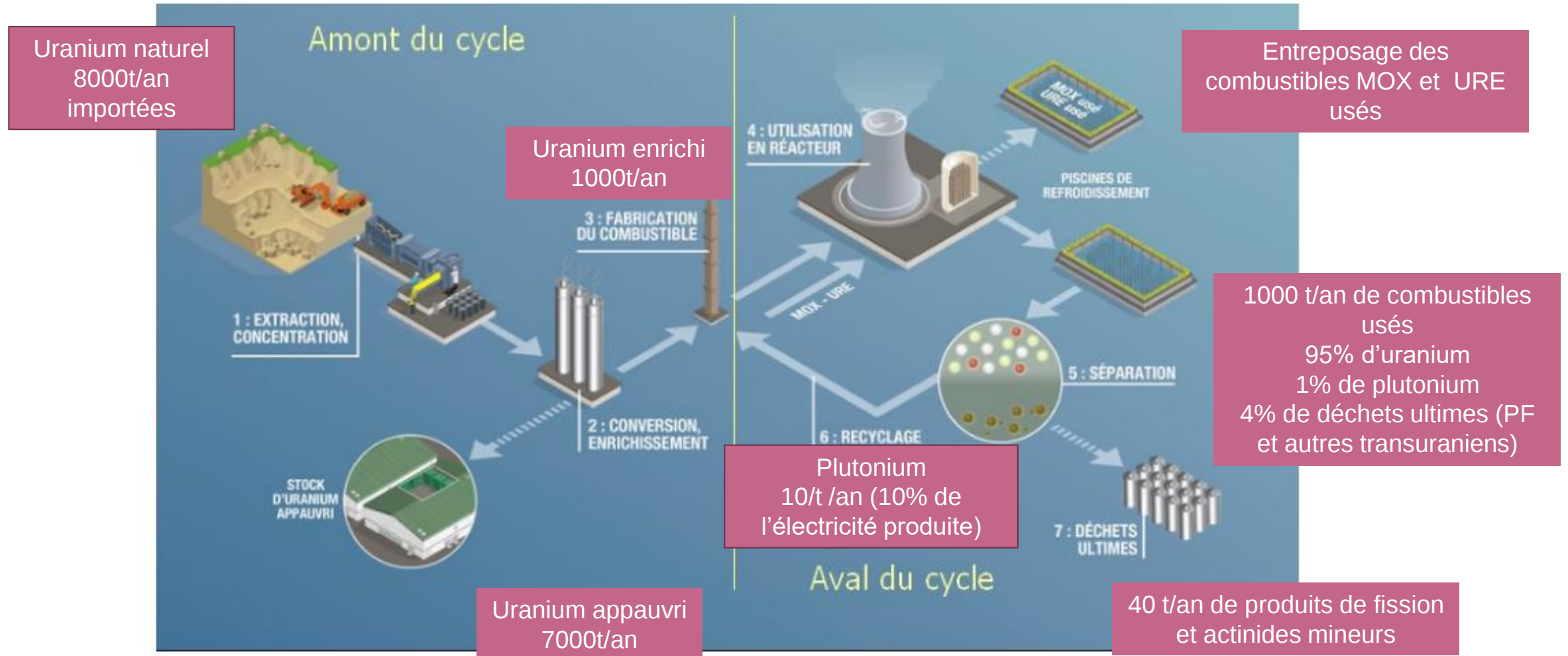
Cour des comptes 2012

- **Le coût du combustible est inférieur à 20% du coût de production (10€/MWh)**
- **Dans ce coût, l'extraction de l'uranium représente 5% soit $\frac{1}{4}$ du coût du combustible**
- **Le coût du kWh issu des centrales nucléaires est peu sensible aux variations du marché de l'uranium**



La durabilité

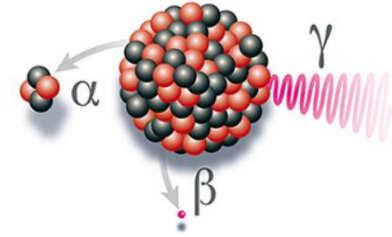
Le cycle du combustible français actuel



La durabilité

La gestion des déchets radioactifs

- Les grands principes
 - Protection des personnes et de l'environnement
 - Réduction de la quantité et de la nocivité
 - Prévention ou limitation de la charge pour les générations futures
 - Principe pollueur-payeur
- Le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR)
 - Outil de mise en œuvre des principes
- L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (l'Andra)
 - Organisme chargé de trouver et mettre en œuvre des solutions pour garantir une gestion sûre pour l'ensemble des déchets radioactifs français
 - Réalise et édite tous les 3ans un inventaire complet des matières et déchets radioactifs

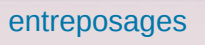


*Loi du 28 juin 2006
relative à la gestion
durable des matières et
déchets radioactifs.*

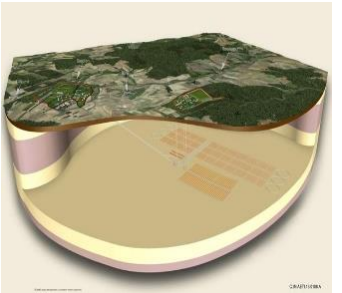
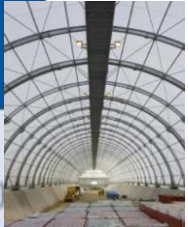
La durabilité

La gestion des déchets radioactifs

Des solutions
opérationnelles

Période radioactive* / Activité**	Vie très courte (VTC) (période < 100 jours)	Principalement vie courte (VC) (période ≤ 31 ans)	Principalement vie longue (VL) (période > 31 ans)
Très faible activité (TFA) < 100 Bq/g	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA) entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA) de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g			  Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)
Haute activité (HA) de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	Non applicable		

* Période radioactive des éléments radioactifs (radionucléides) contenus dans les déchets
 ** Niveau d'activité des déchets radioactifs

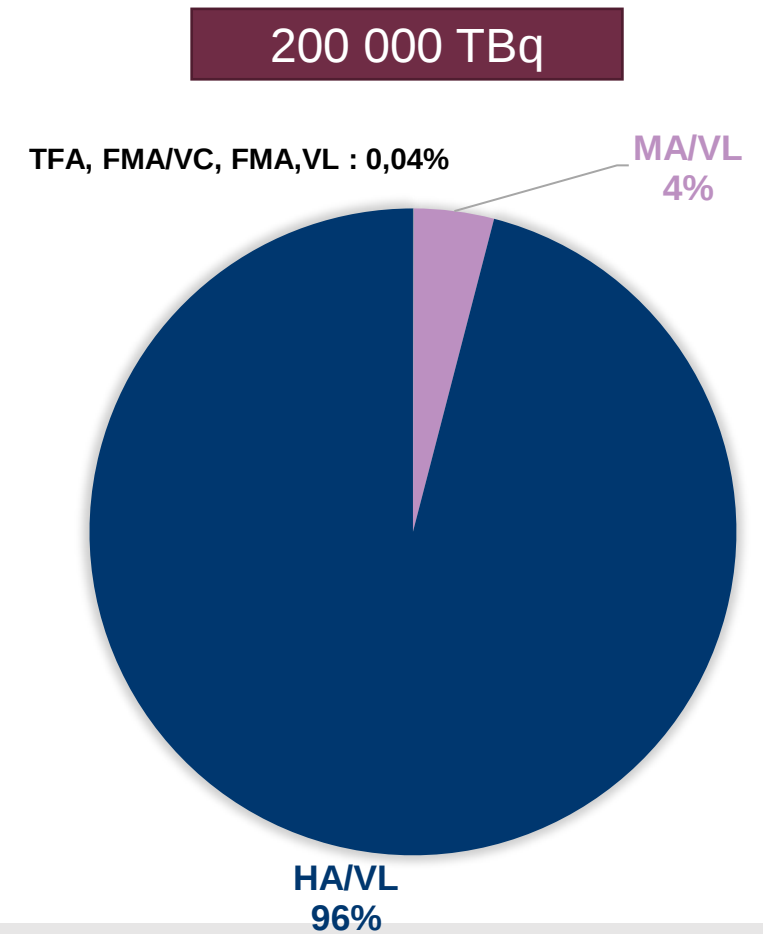
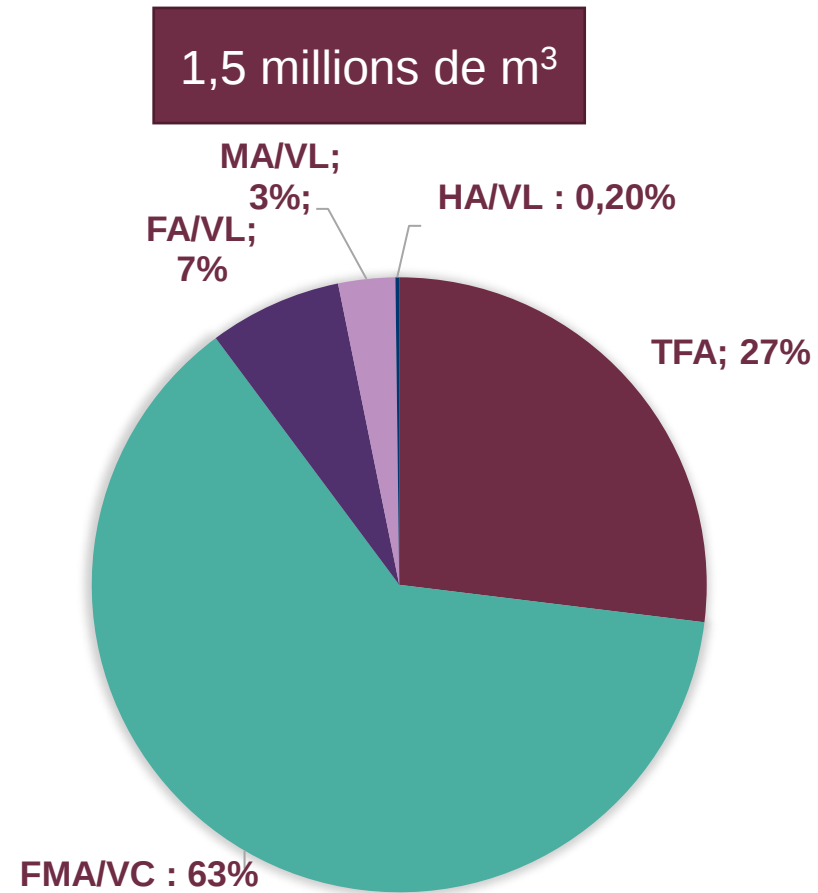


Source
Andra

La durabilité

La gestion des déchets radioactifs

Répartition en volume et activités



La durabilité

La gestion des déchets radioactifs

Vue d'ensemble de Cigéo

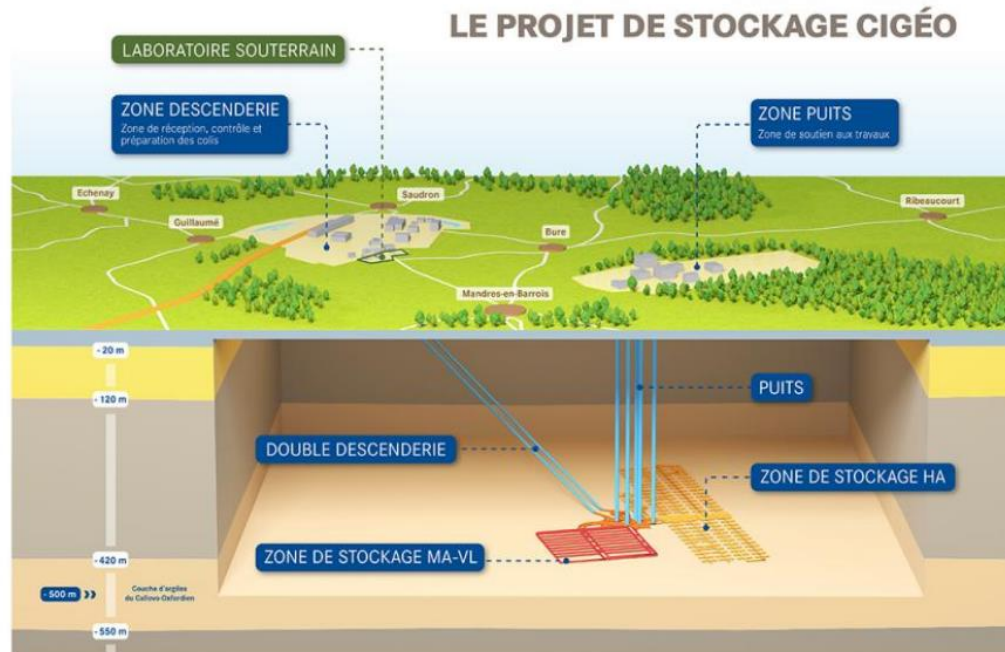


Schéma de principe du projet de stockage Cigéo

- Cigéo
- Stockage robuste aux changements sociétaux
- Évite de faire porter la charge aux générations futures

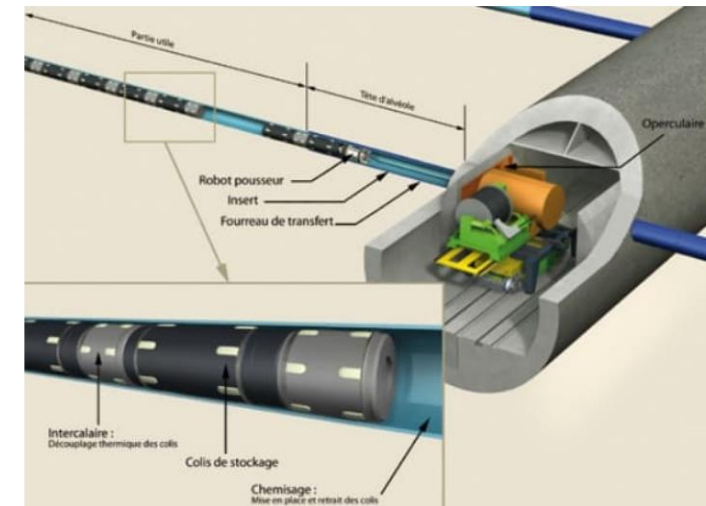
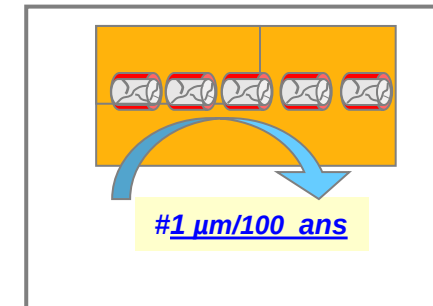
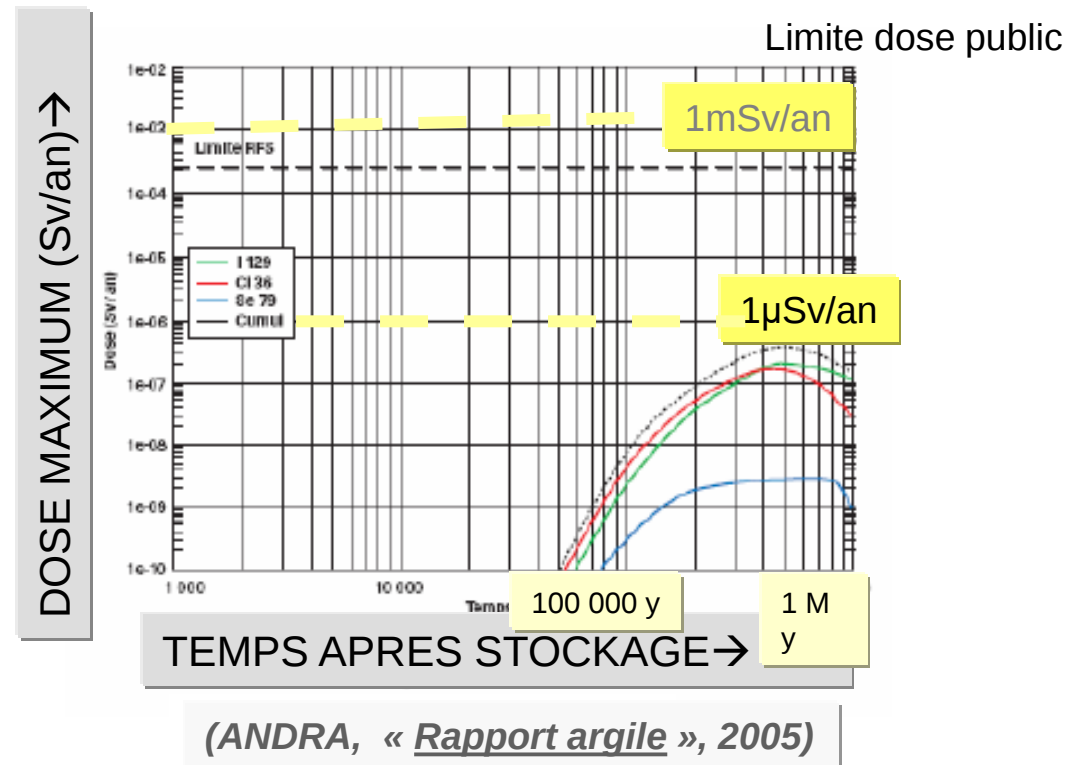


Schéma de stockage des déchets à Bure © -

La durabilité

La gestion de déchets

- L'argile : un matériau performant pour le confinement des matières radioactives

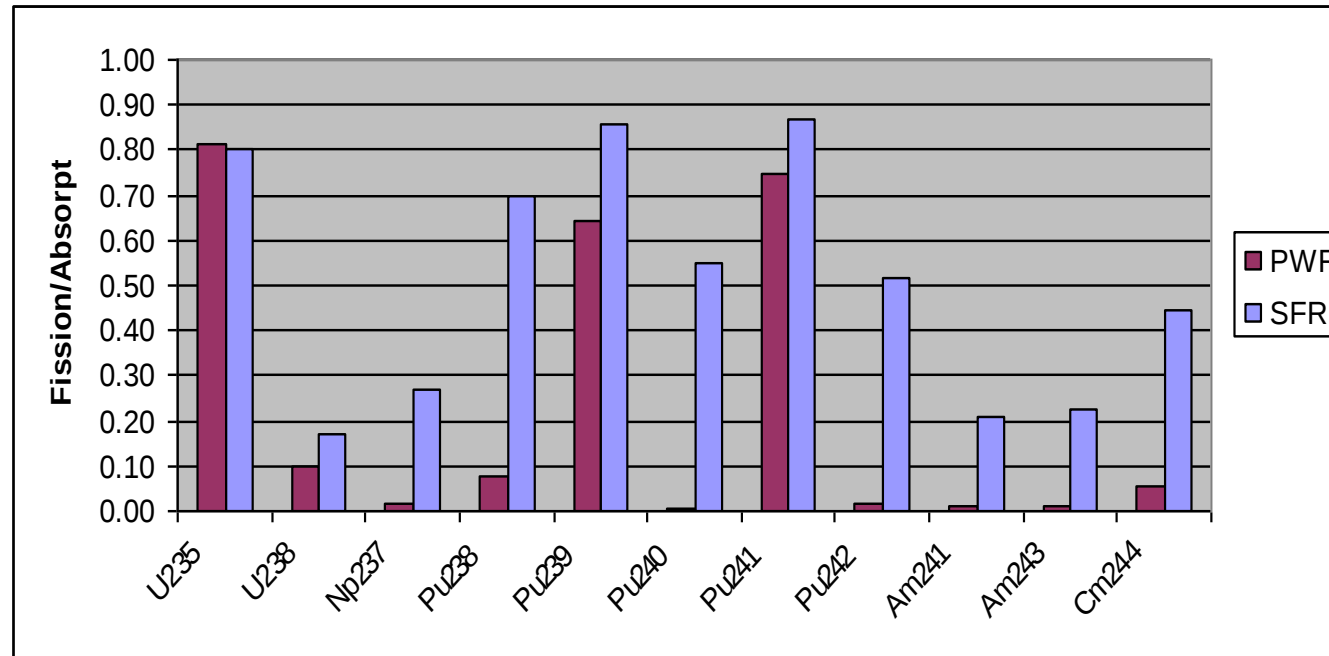


Les actinides mineurs (les plus dangereux à long terme) sont quasi immobiles dans l'argile

La durabilité

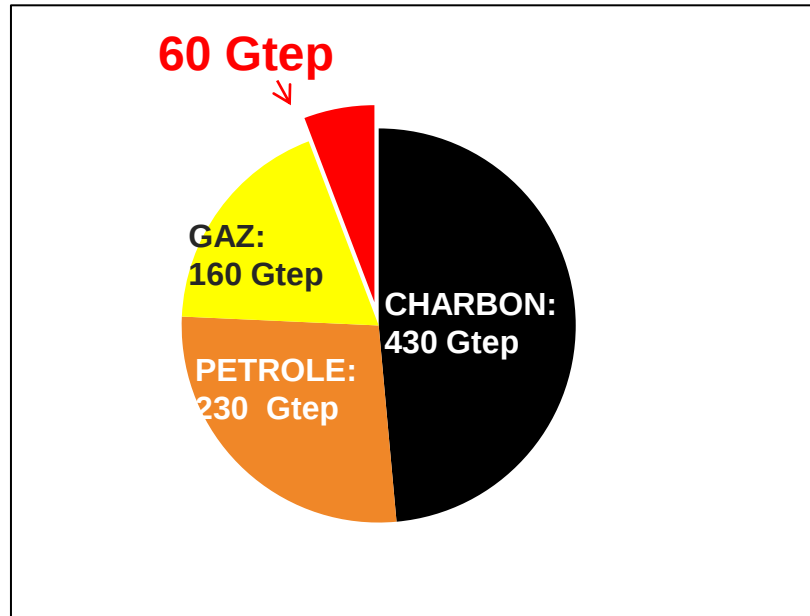
Le multi-recyclage des matières

- Dégradation de la qualité du plutonium en réacteur à eau (REP, EPR)
- Seuls les réacteurs à neutrons rapides permettent le multi recyclage du plutonium et l'utilisation de tout le stock d'uranium (transformation de l'uranium238 en plutonium239 fissile)



La durabilité

Utilisation de la totalité du stock d'uranium

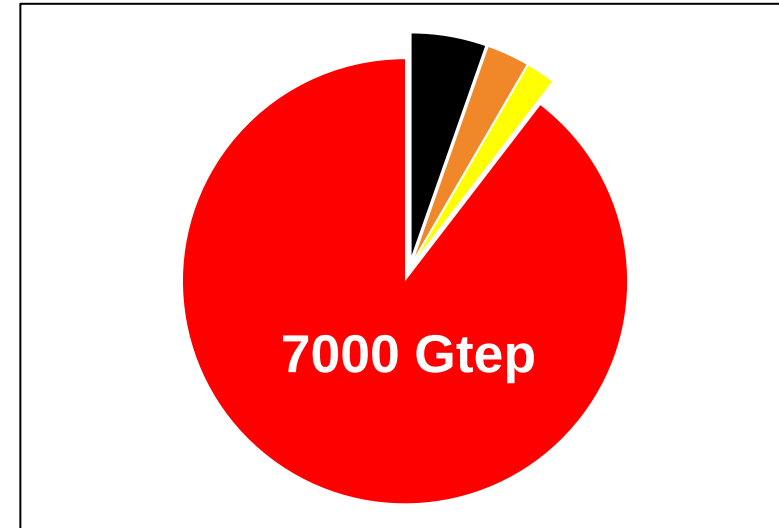


Utilisation actuelle des ressources en uranium
en réacteur à eau

RESSOURCES CONVENTIONNELLES IDENTIFIEES

(BP statistical review, 2016 and NEA, 2014)

(OIL 239 Gt, COAL 890Gt, GAS 186 Tm³, URANIUM 5Mt)



Multirecyclage de l'uranium et du plutonium
en réacteurs rapides

France

- Utilisation des stocks d'uranium appauvri
- Assure l'alimentation d'un parc de réacteur à neutrons rapides fournissant 400 TWhe par an pendant plusieurs siècles

La durabilité

La 4^{ème} génération – Le programme ASTRID

Advanced Sodium-cooled Technological Reactor for Industrial Demonstration

1500 MWth-600 MWé

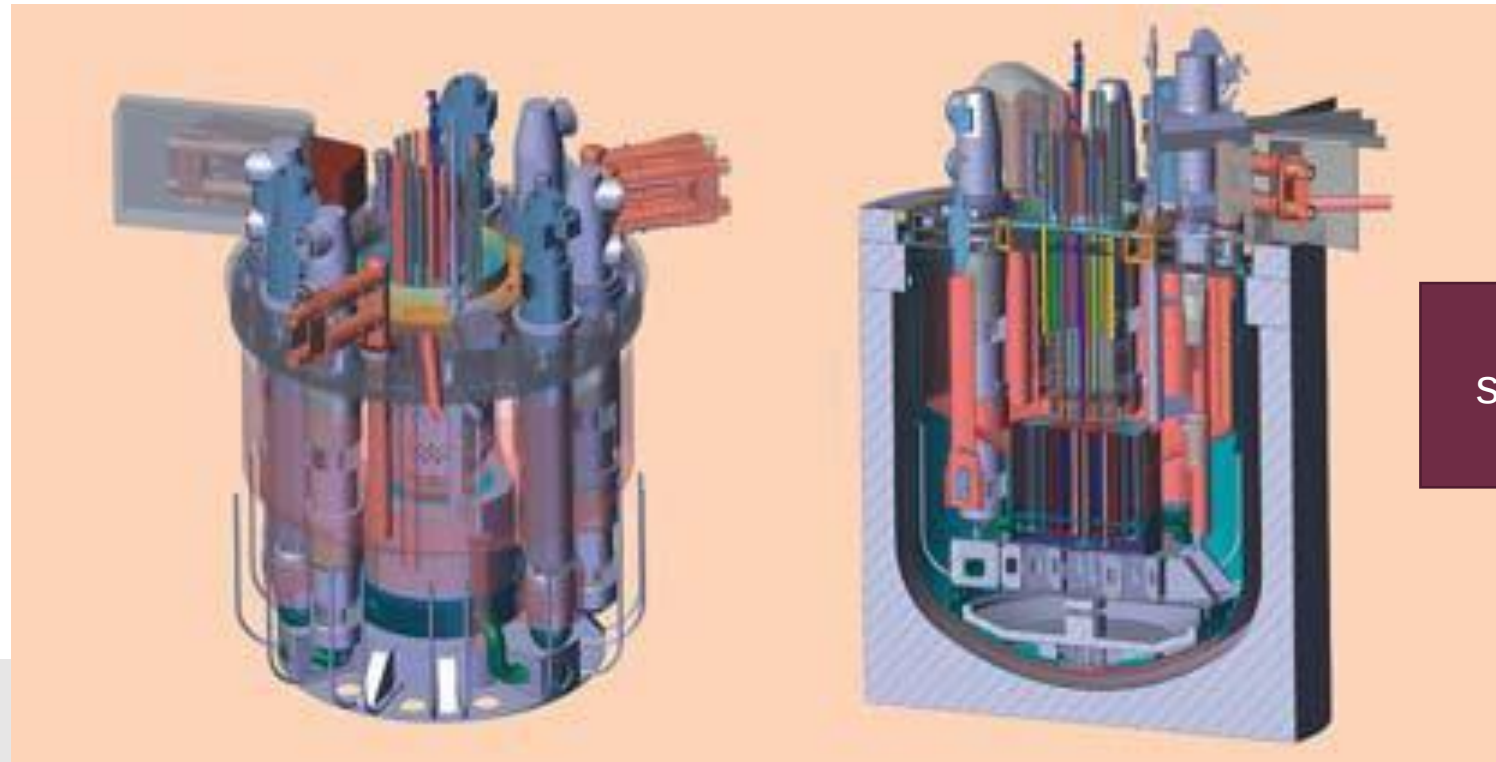
Sûr

Pas d'effet de vide positif

Pas d'eau (éch Na-N₂)

Durable

Brûle U-238 Transmutation des actinides



Mis en
sommeil en
2019



- **Les SMR (petits réacteurs modulaires)
et les nouveaux acteurs**

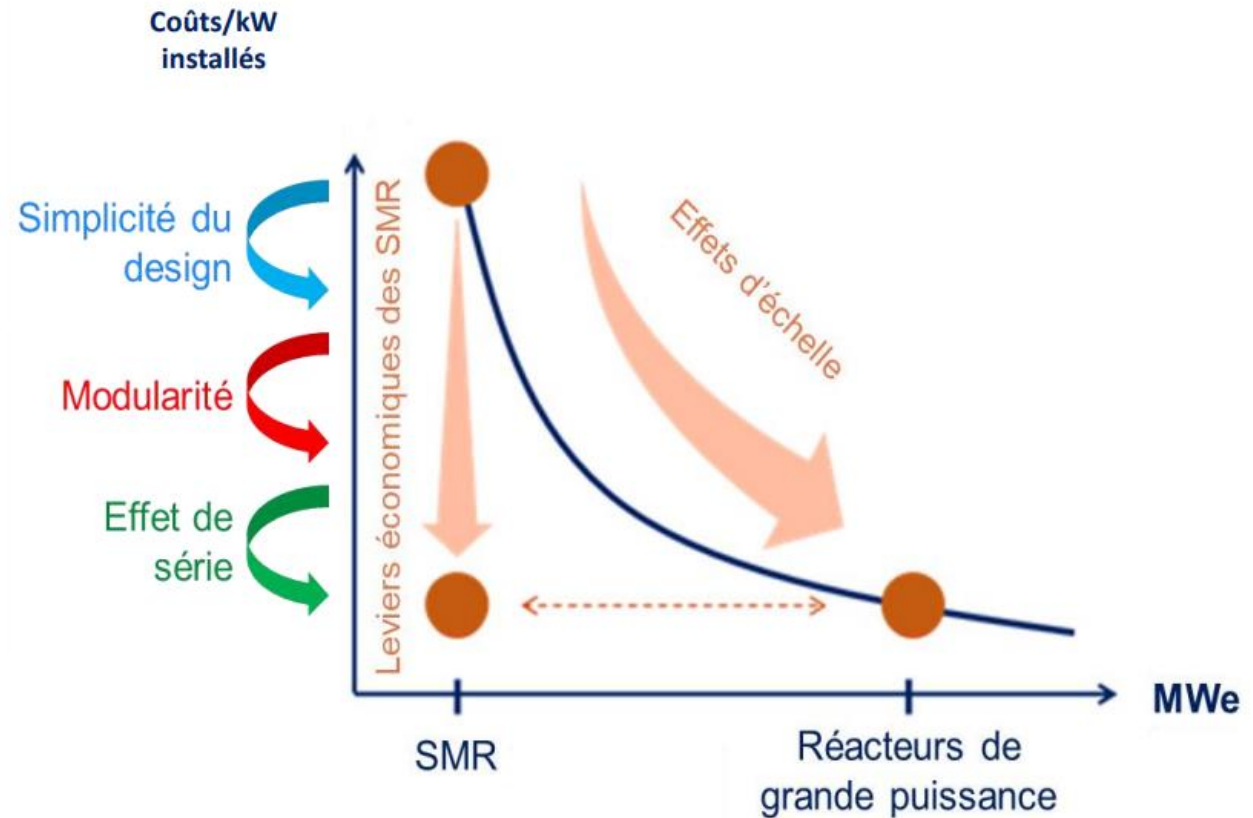
Les Small Modular Reactors (Petits réacteurs modulaires)

Une conception **plus simple** grâce à une taille plus modeste.

Une conception **modulaire** pour réduire les durées et les risques de chantier.

Une **standardisation** forte qui autorise les effets de série (usine & chantier).

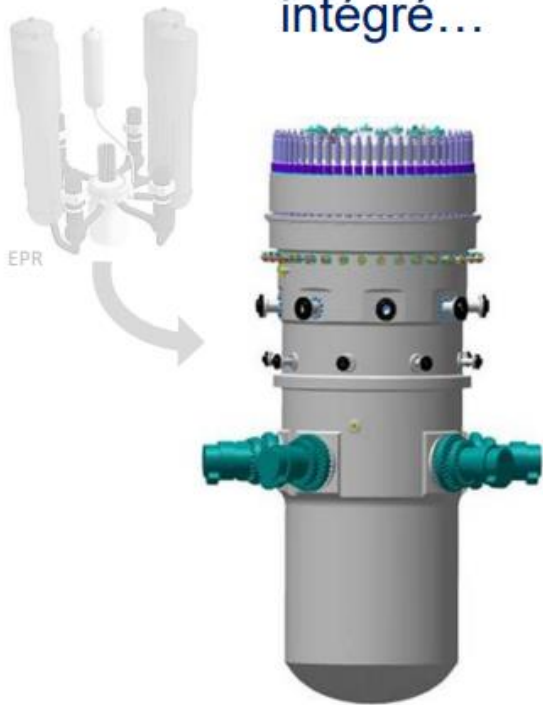
Des dispositifs de **sûreté passive**.



Le projet de SMR Français NUWARD™

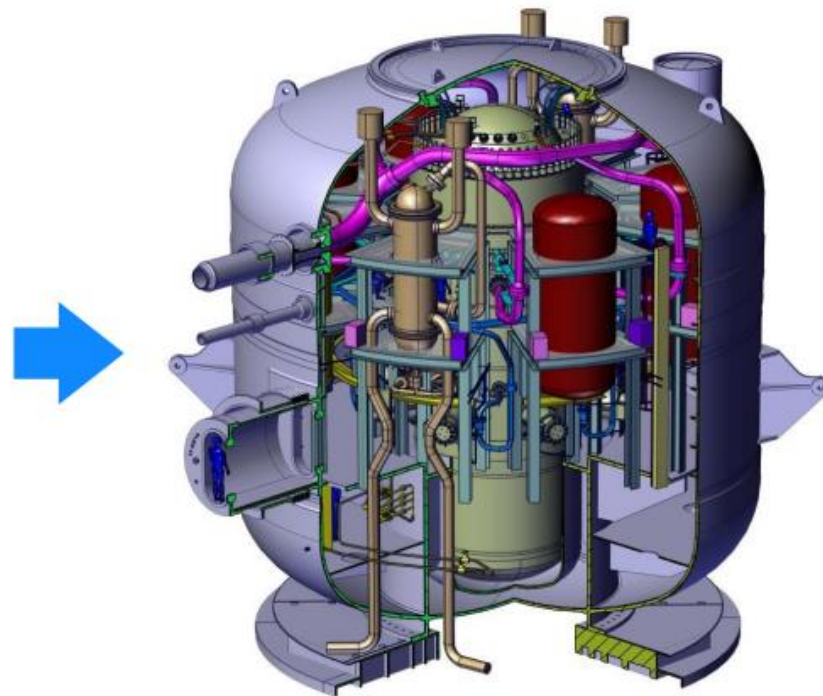
Consortium EdF, TechnicAtome, Naval Group, Framatome, CEA
Piloté par EdF

Un réacteur
intégré...



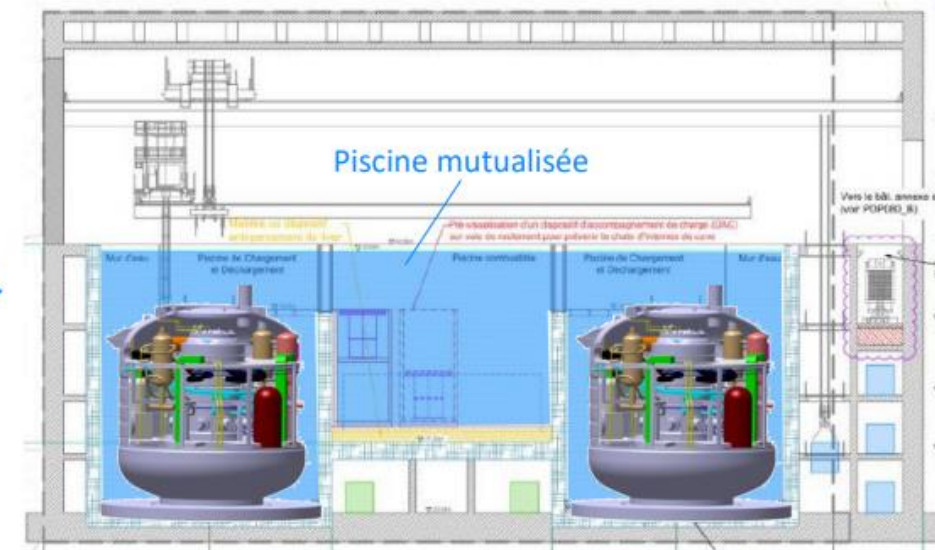
Réacteur I54

...installé dans une enceinte métallique
immergée dans un bassin d'eau



NSSS – périmètre TechnicAtome

... placé dans un îlot nucléaire
comprenant 2 réacteurs de 170MWe
et une piscine d'entreposage



Îlot Nucléaire

Le projet de SMR Français NUWARD™

Les principales caractéristiques de NUWARD™



Une puissance nominale de 340 MWe (2 réacteurs intégrés de 540 MWth, combustible UO2 enrichi à moins de 5%).



Design modulaires et standardisé, pour un assemblage en usine et un délai de chantier réduit au maximum.



Sûreté passive pour garantir l'absence de contre-mesures au-delà des limites du site (incl. en postulant une situation accidentelle).



Optimisation de l'intégration dans le paysage et de l'impact environnemental.



Design international pour satisfaire les exigences de multiples autorités de sûreté sans redesign important.



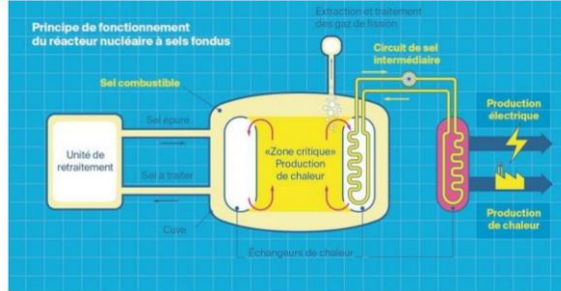
Cible de 1^{er} béton de la centrale de référence en France en 2030.



Polyvalence by-design pour l'usage en cogénération, production d'hydrogène, désalinisation, capture et valorisation du CO2.

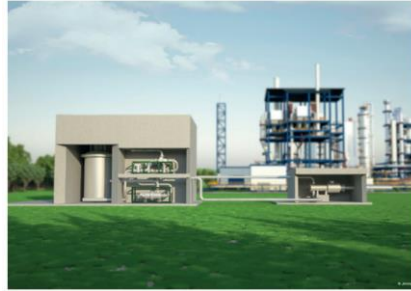
Programme d'investissement France 2030

Les nouveaux acteurs



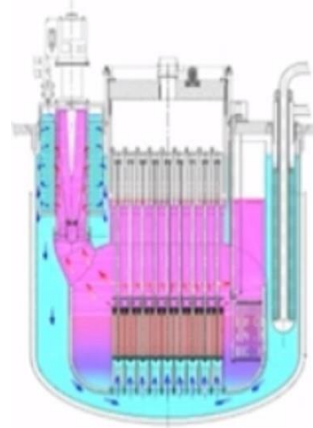
Naarea

- Réacteur à **neutrons rapide à sel fondu**
- Puissance **40 MWe**
- Pas besoin d'eau
- Alimentation de sites industriels ou des communautés isolées



Jimmy

- Réacteur à **haute température refroidi au gaz**
- Puissance **10 MWth**
- Pas besoin d'eau
- Fourniture de chaleur industrielle



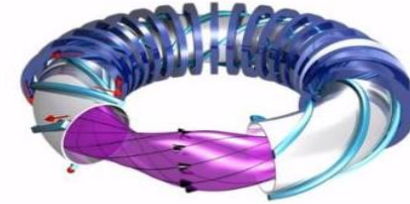
Newcleo

- Réacteur à **neutrons rapides refroidi au plomb**
- Puissance **20 Mwe** propulsion navale
- Puissance 200 Mwe installation à terre



Transmutex

- Réacteur à **neutrons rapides refroidi au plomb-bismuth piloté par accélérateur de particule**
- Transmutation et valorisation des déchets
- Puissance **100 MW** dans un premier temps



Difficile à construire
Facile à opérer (état stationnaire, stable)

Renaissance fusion

- Réacteur de fusion nucléaire du type **stellarator** (configuration magnétique différente de celle d'ITER) à
- Puissance **1000 MWe**



Conclusion

La France dispose déjà d'un mix énergétique fortement décarboné pour produire son électricité, grâce à l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables.

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, il sera nécessaire d'augmenter notre production électrique en maintenant ses performances bas carbone.

Dans ce cadre l'énergie nucléaire, énergie décarbonée, économique et garante de notre souveraineté à toute sa place.



Merci de votre attention !