

L'urgence du nucléaire durable

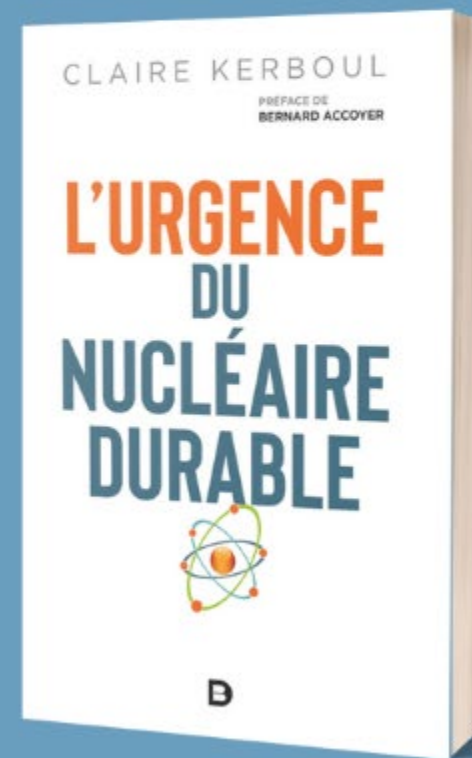
Claire KERBOUL

“

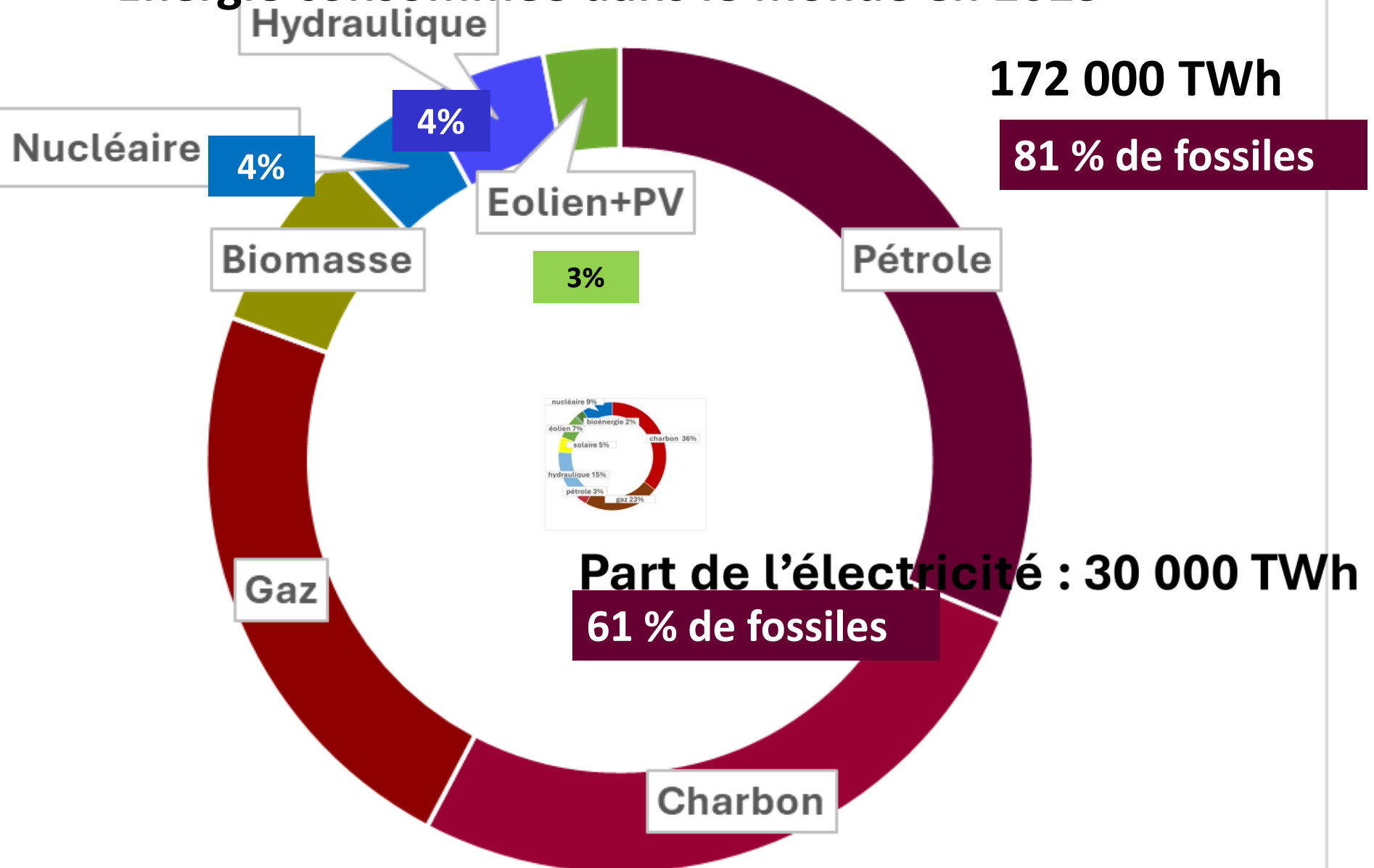
Alors que le réchauffement climatique est devenu le défi probablement le plus grave que l'humanité ait eu à affronter, la priorité est de décarboner plus de 80 % de l'énergie finale utilisée sur Terre, puisque c'est la part des combustibles fossiles dans le mix énergétique mondial.

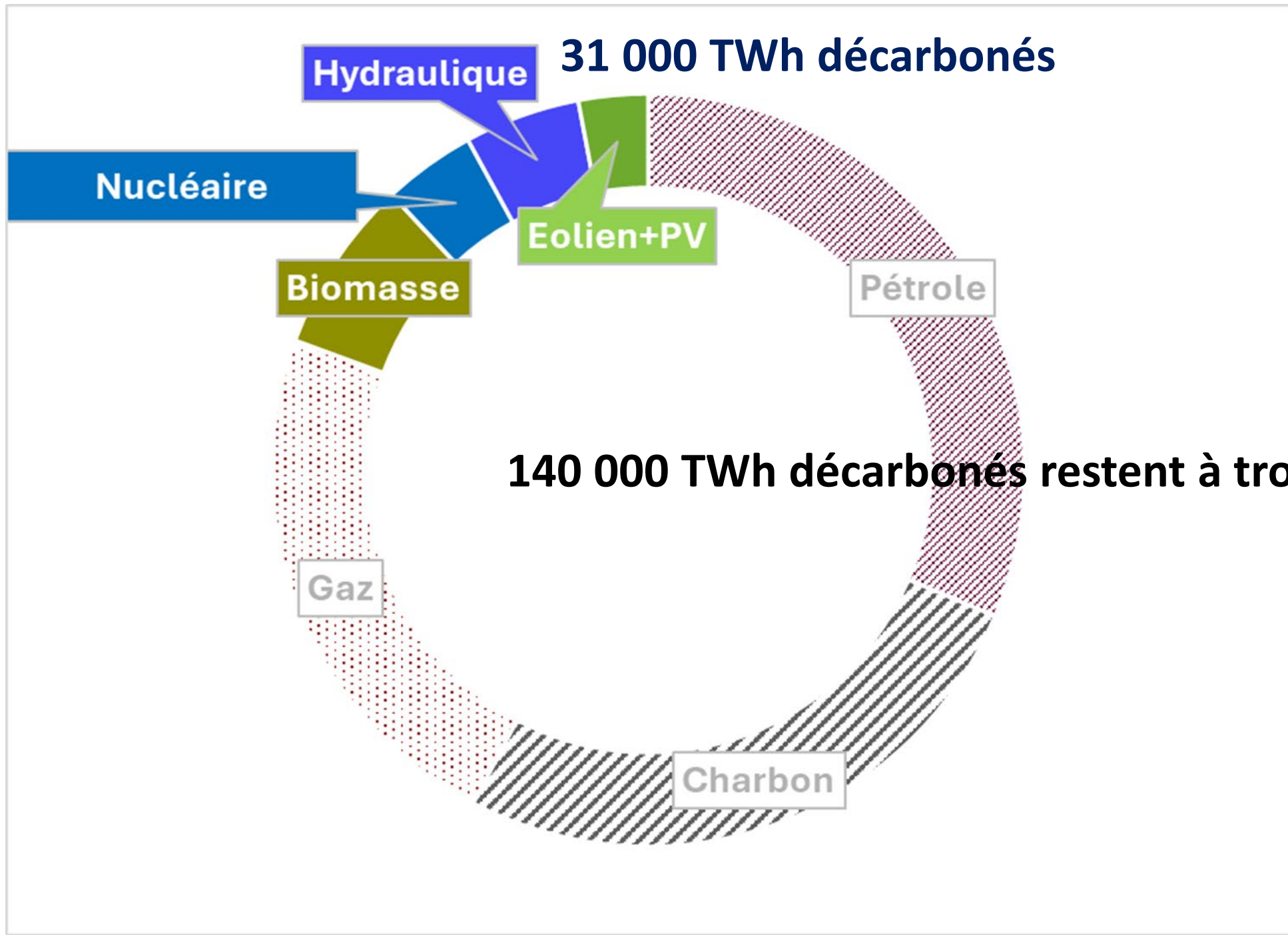
”

Extrait de la préface de Bernard Accoyer



Energie consommée dans le monde en 2023





31 000 TWh décarbonés

Nucléaire

Hydraulique

Biomasse

Eolien+PV

Pétrole

Gaz

Charbon

140 000 TWh décarbonés restent à trouver



AMBIGUÏTÉ

Un monde décarboné

Un monde renouvelable ?

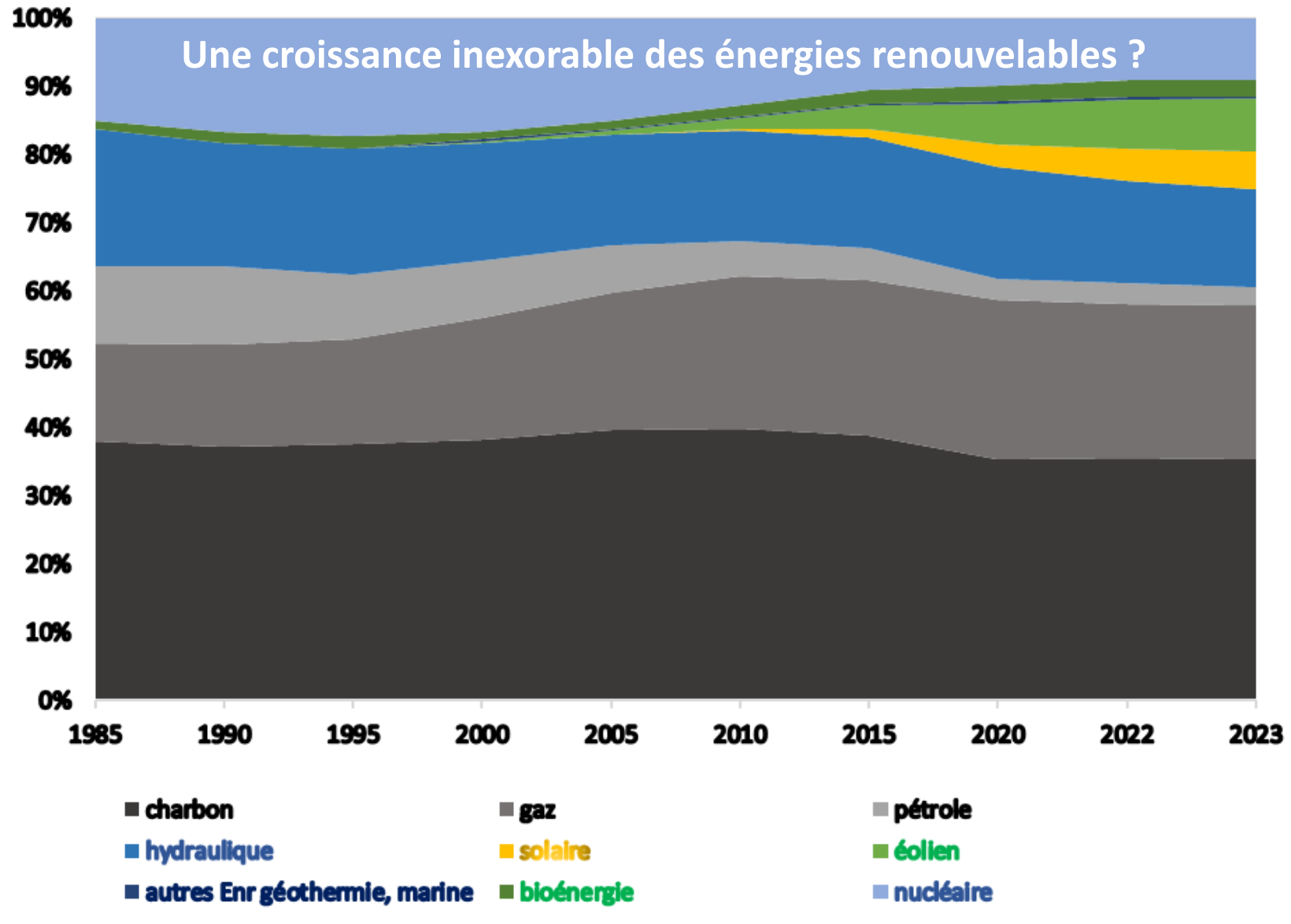
« Les nouveaux sommets atteints par les renouvelables en 2022 annoncent le déclin des fossiles » *Justine Prados – avril 2024*

« Pour la première fois [en 2023] l'éolien et le solaire fournissent 12% de l'électricité mondiale. Cette décennie [...] marque le début de la fin de l'ère fossile ». M. Wiatros-Motyka – Ember 2024

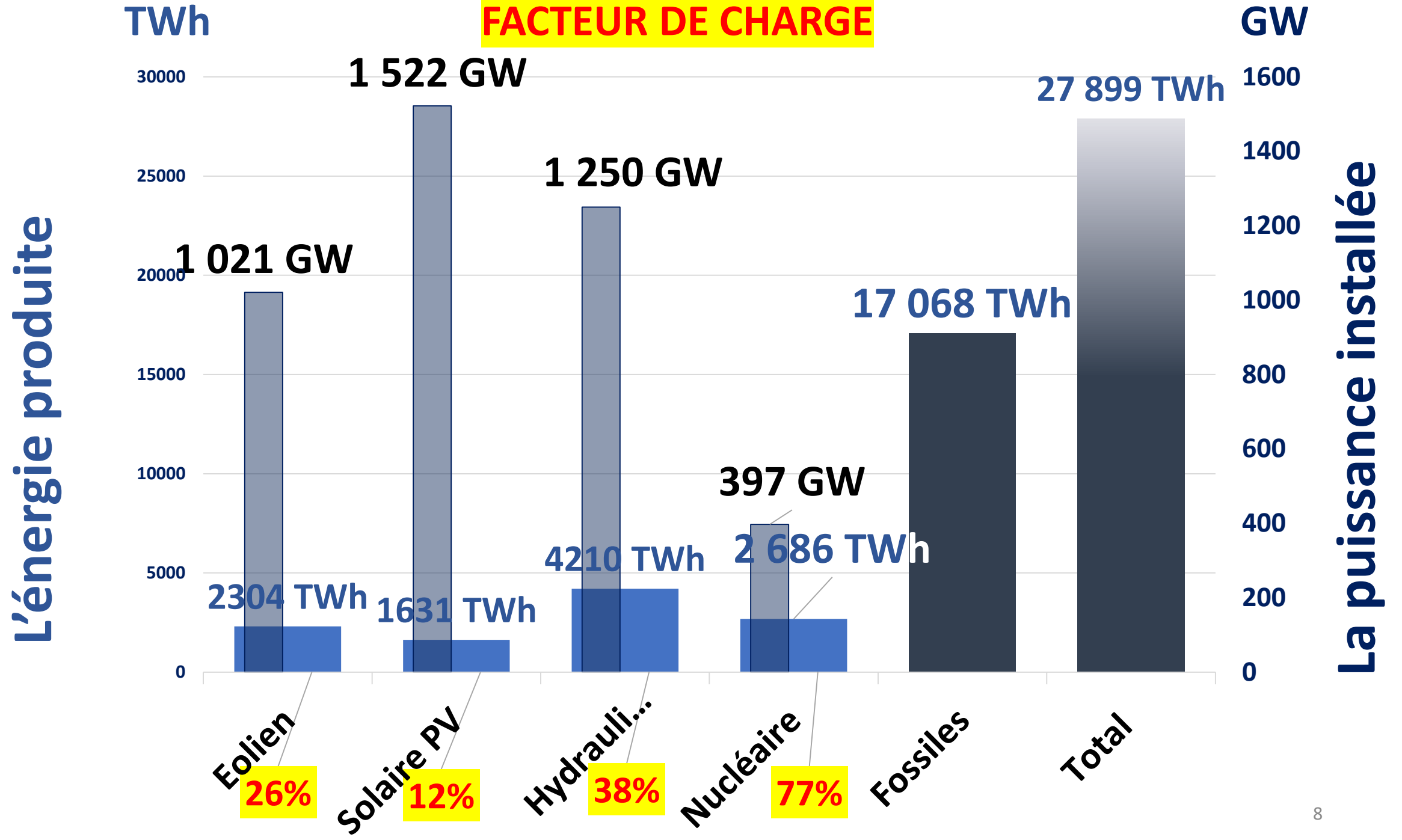
« La transition vers une énergie propre est en cours dans le monde entier et elle est inévitable. Ce n'est pas une question de « si », c'est juste une question de « quand » – et le plus tôt sera le mieux pour tout le monde » *Fatih Birol, directeur exécutif de l'AIE.[...] Nous sommes sur la bonne voie pour atteindre le pic de toutes les énergies fossiles avant 2030. » cf. rapport AIE 2023.*

De fait la demande en charbon pourrait décroître, à mesure que la demande en gaz naturel augmente dans la moitié des scénarios étudiés. *Cf. Resources for the Future in Global Energy Outlook 2024.*

Evolution mondiale des sources d'électricité

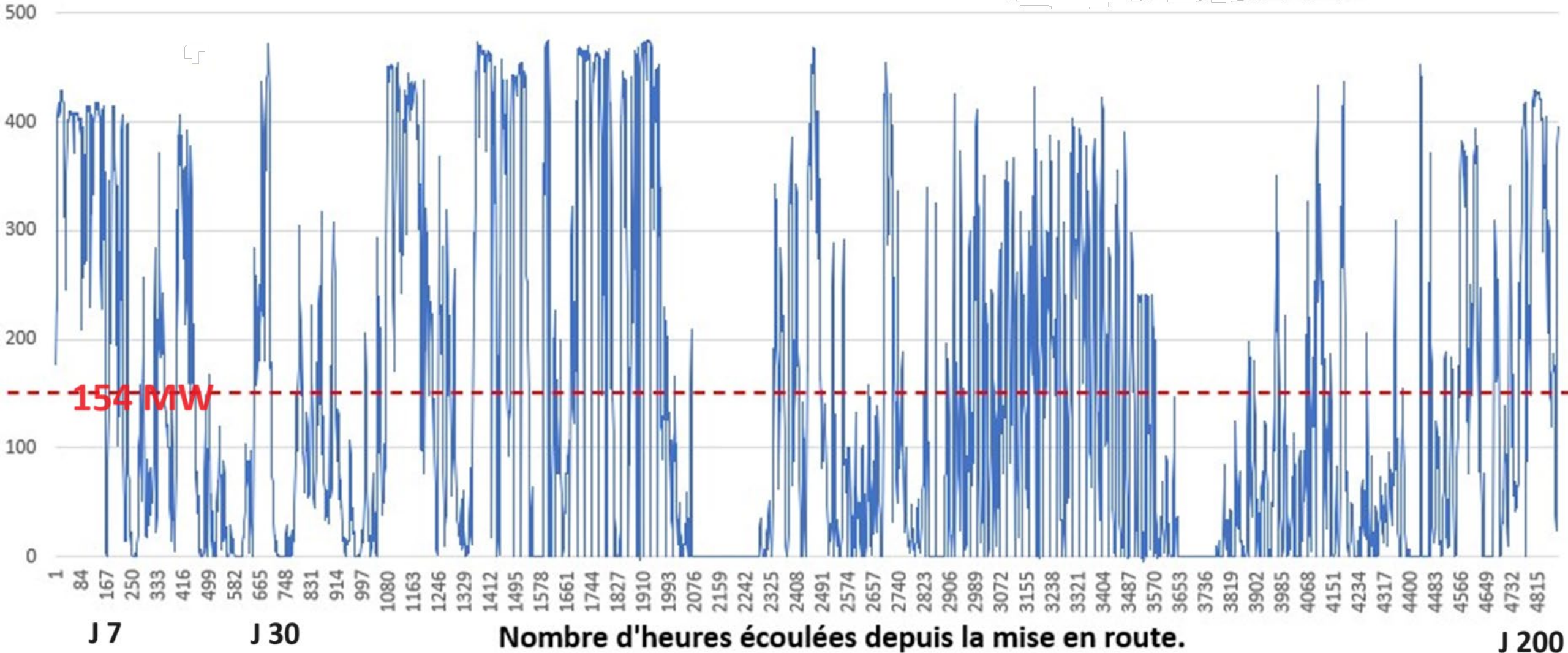


FACTEUR DE CHARGE



Parc éolien en mer du Banc de Guérande (480 MW)

En tiretés le facteur de charge moyen **32 %**





CONFUSION

DURABLE

RENOUVELABLE

ONU – Rapport Brundtland – *Our Common Future* - 1987

« un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. »

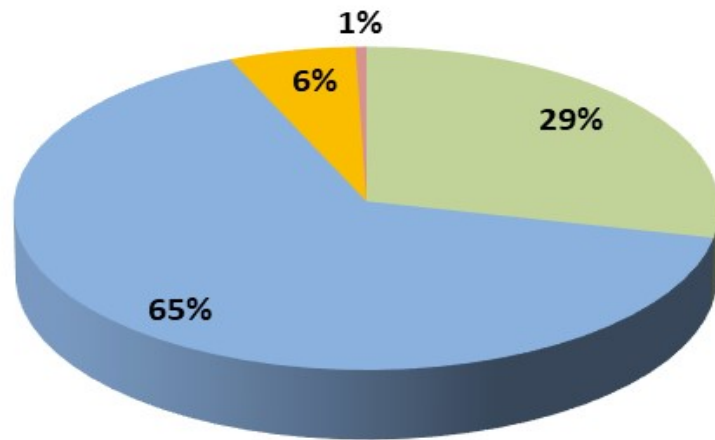


- 1. Economiser les ressources naturelles**
- 2. Minimiser la production de déchets**
- 3. Trouver des solutions socialement et économiquement acceptables**



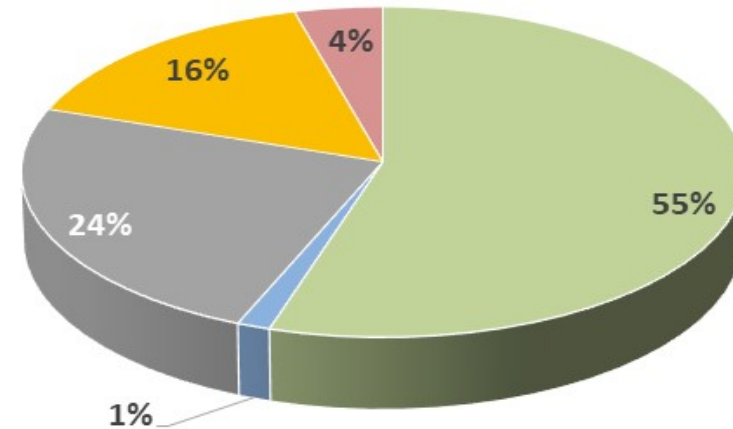
Production d'électricité en 2023 en France métropolitaine et en Allemagne

**France : 495 TWh dont
~ 94% décarbonés**



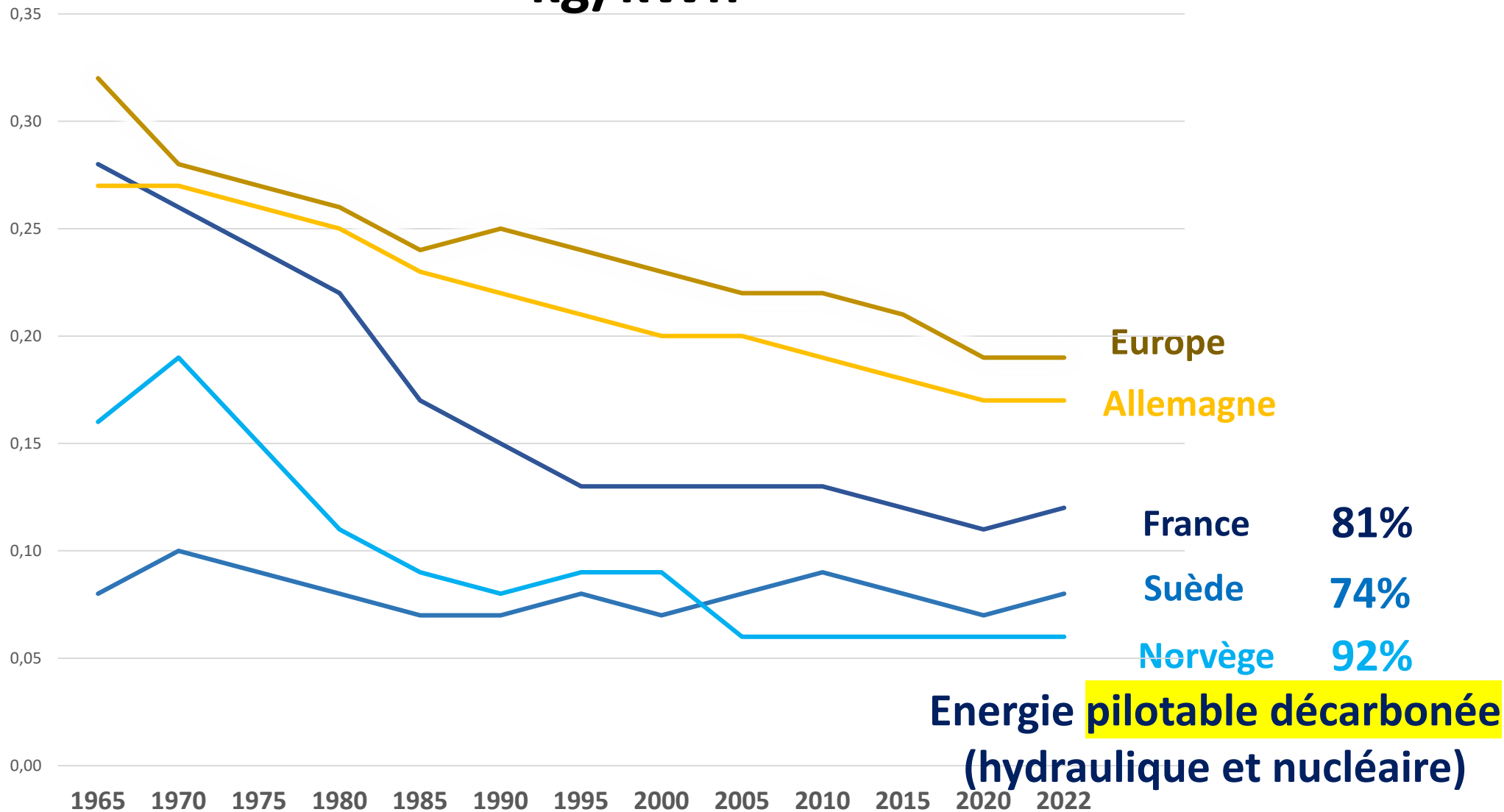
- Energies renouvelables y compris hydraulique
- Nucléaire
- Gaz
- Fioul, Charbon, Autre

**Allemagne : 483 TWh dont
~ 56% décarbonés**



- Energies renouvelables y compris hydraulique
- Nucléaire
- Charbon (Houille/Lignite)
- Gaz
- Fioul, déchets, divers non renouvelables
- Nucléaire

Emissions annuelles de CO₂ en kg/kWh



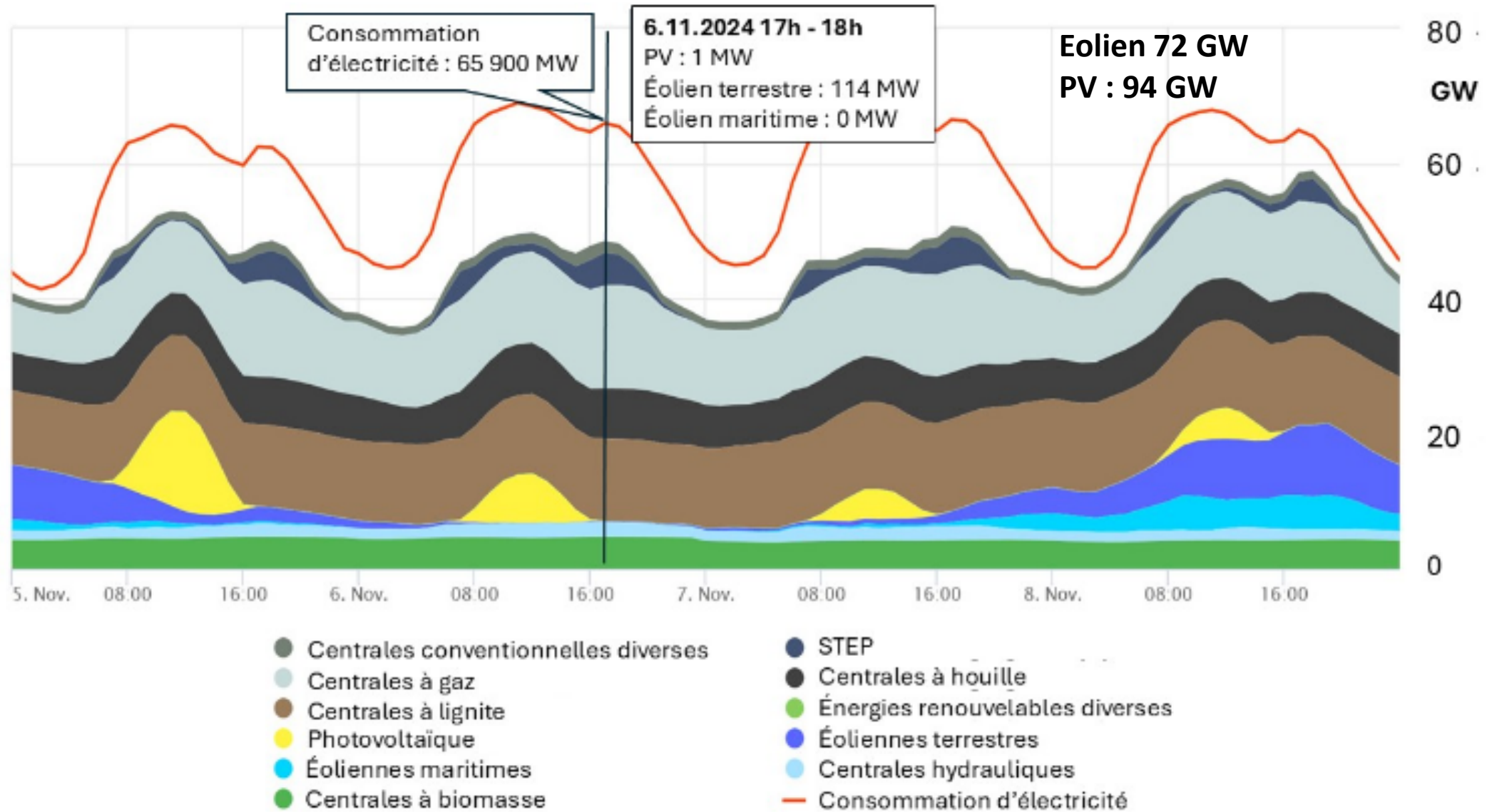
Les Echos, 6 novembre 2024 :

En Allemagne, poussée de fièvre brutale dans les prix de gros de l'électricité

A 17 heures ce mercredi, les prix de gros de l'électricité ont franchi le seuil des **800 € par mégawattheure en Allemagne.**

Des niveaux jamais atteints depuis le déclenchement de la guerre en Ukraine.

En France, le prix était de 128€ entre 17 et 18h et 172€ entre 18 et 19h



source Bundesnetzagentur: <https://www.smard.de>

source Harmut Lauer: <https://allemagne-energies.com/>



L'hydraulique : énergie renouvelable durable



L'éolien et le photovoltaïque : énergies renouvelables non durables

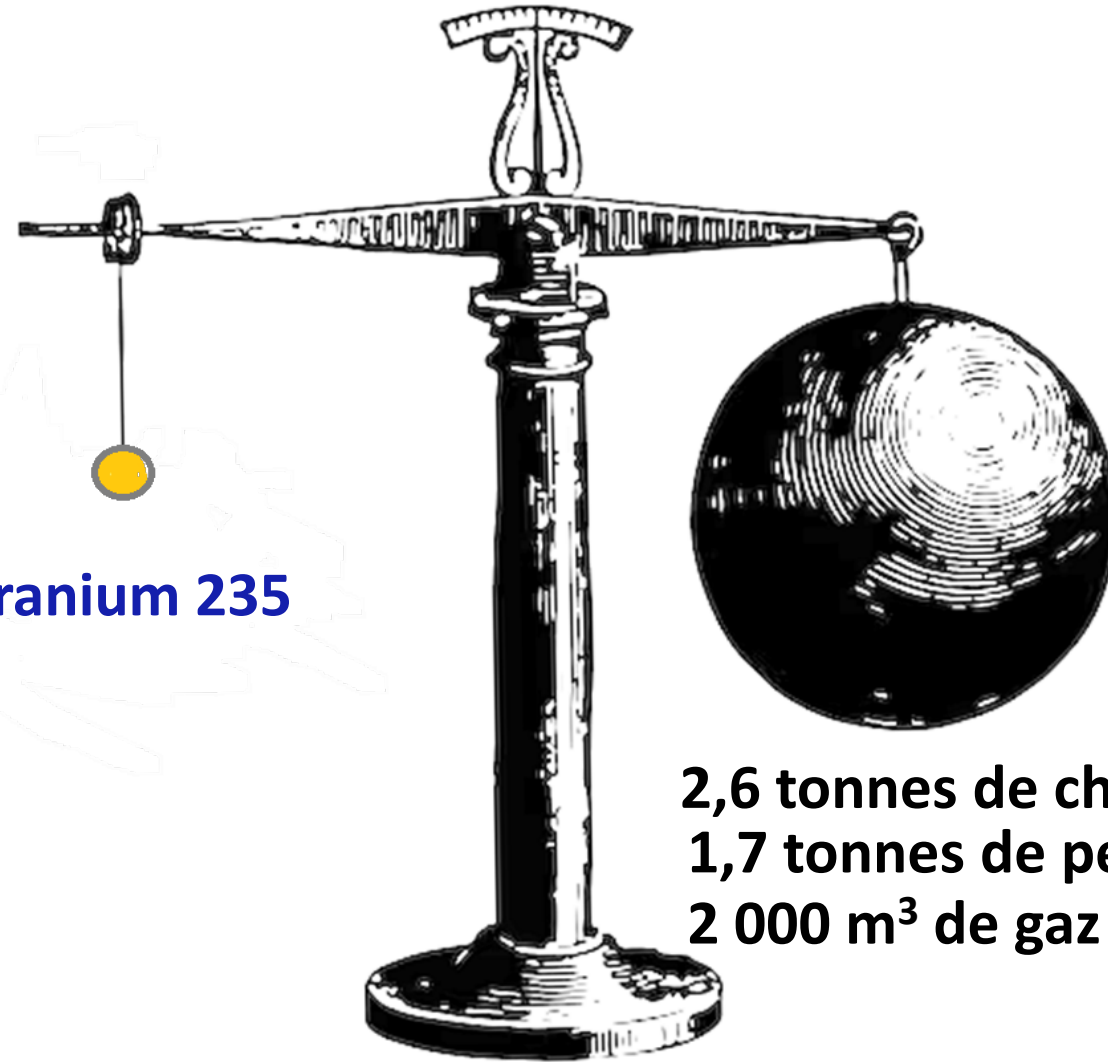
Le nucléaire : peut-il être durable ?

Être décarboné ne suffit pas

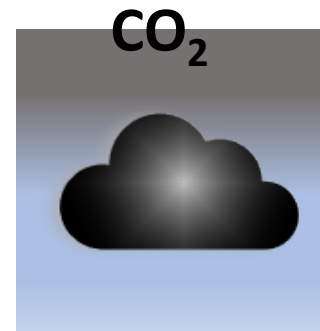


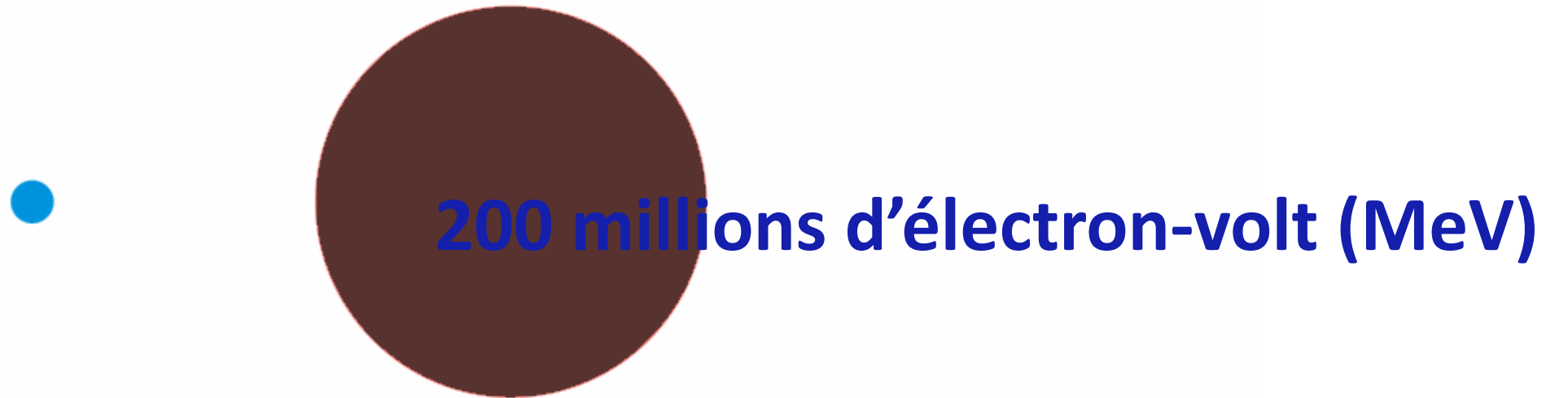
Un potentiel énergétique considérable et décarboné

1 gramme d'uranium 235



**2,6 tonnes de charbon
1,7 tonnes de pétrole
2 000 m³ de gaz**

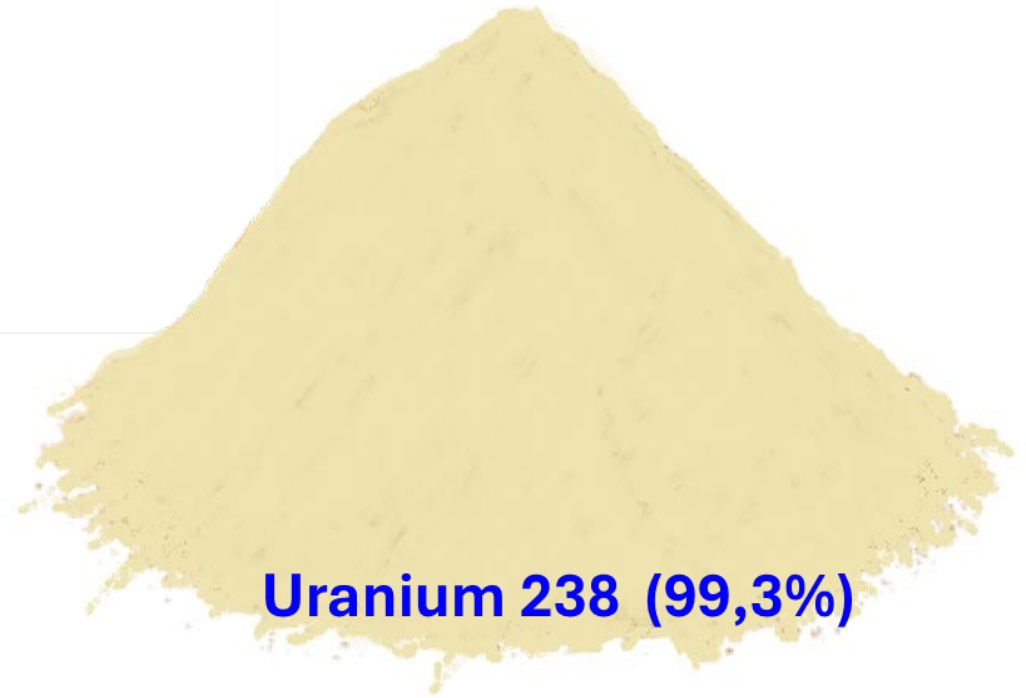






Uranium 235 (0,7%)

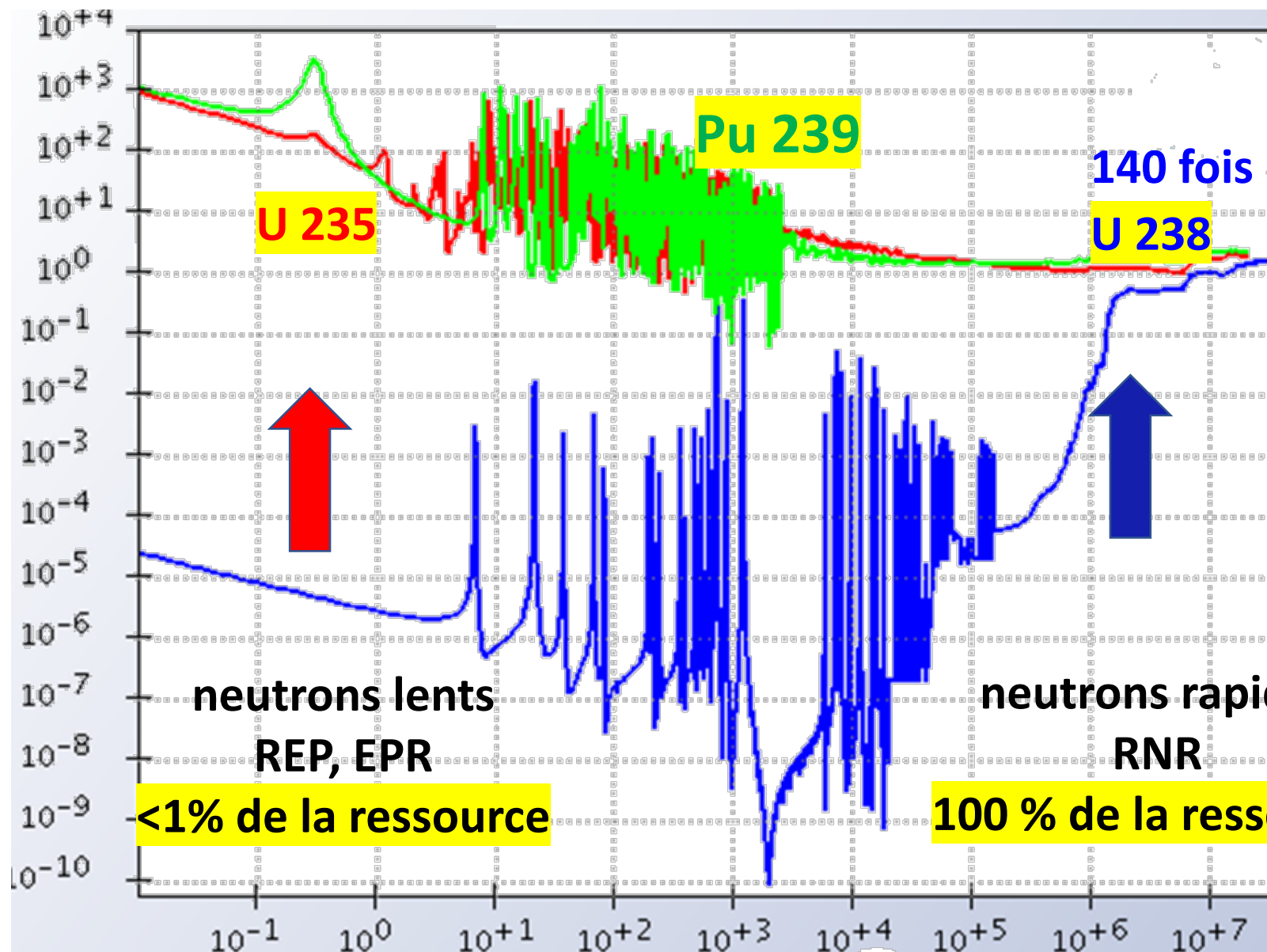
**Réacteurs à neutrons lents
(REP, EPR)**



Uranium 238 (99,3%)

**Réacteurs à neutrons rapides
(RNR)**

Section efficace (barn)



U 235

Pu 239

U 238

140 fois plus que l'U235

neutrons lents
REP, EPR

neutrons rapides
RNR

<1% de la ressource

100 % de la ressource

Energie incidente des neutrons (eV)

Source: <https://cosmologie.wordpress.com/manhattan/bohr/>

« *The country which first develops a breeder will have a great competitive advantage in atomic energy* »

Enrico Fermi - 1945



20 décembre 1951,
1^{er} RNR électrogène au monde
(*Experimental Breeder Reactor*)
EBR-1



Rapsodie - 40 MWth – 1967 - 1978

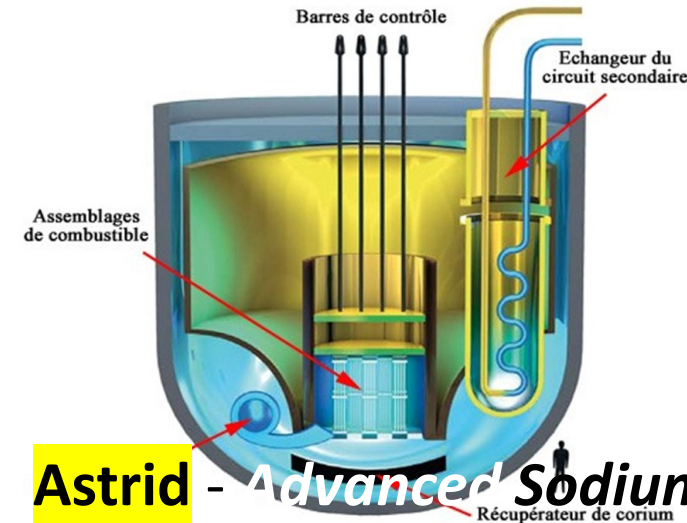


Phenix – 250 MWe – 1973 - 2010



SuperPhenix – 1200 MWe – 1986 - 1997

DURABLE : UN FIASCO FRANÇAIS ?



Astrid - *Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration* – 2010-2019

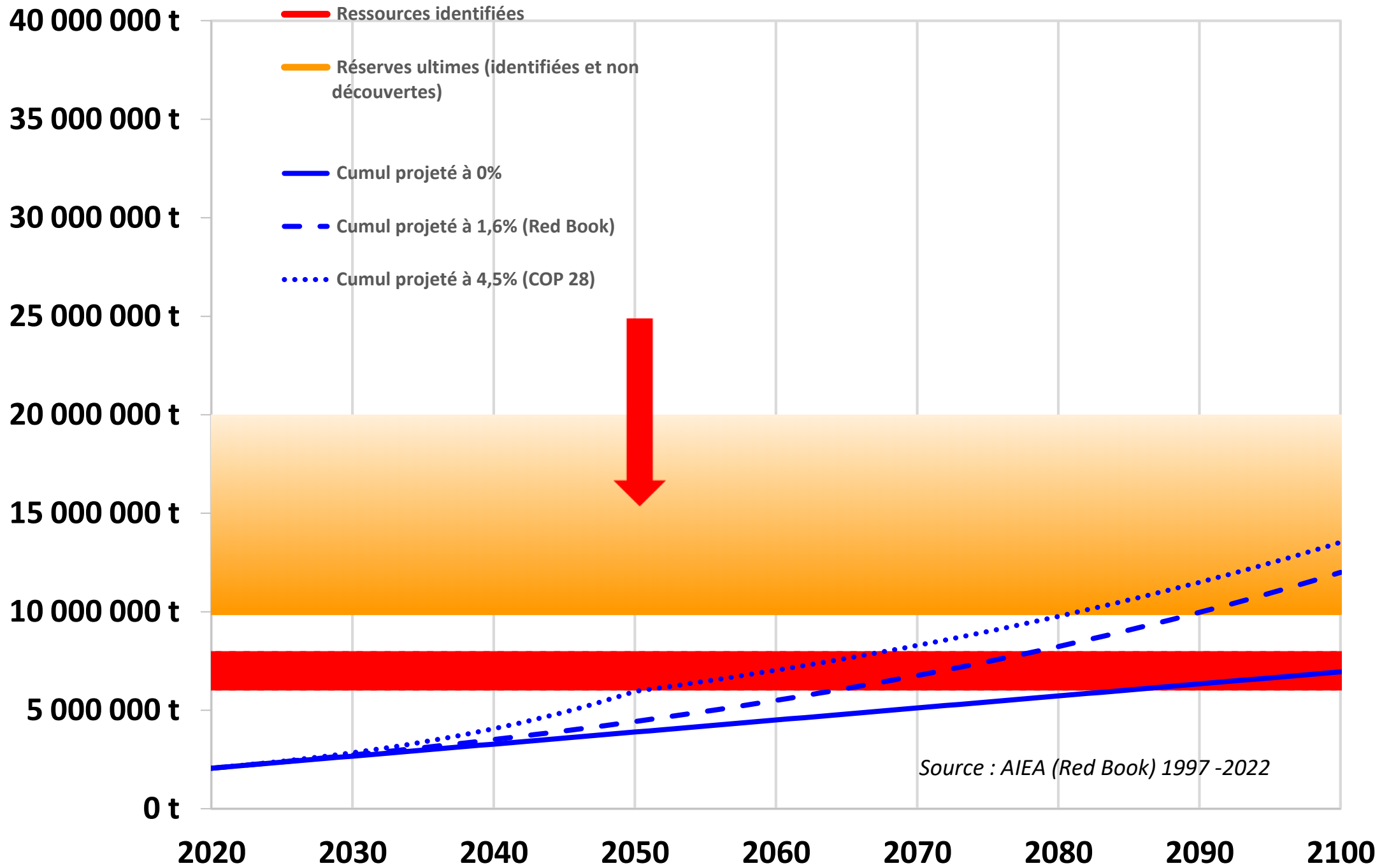


PENSER RESSOURCE

Le vrai défi de la **durabilité**

Uranium 235

Uranium 238



Source : AIEA (Red Book) 1997 -2022

450 000 tonnes

⇔ 7 000 années de production d'électricité

50 ans ou 5 000 ans ?

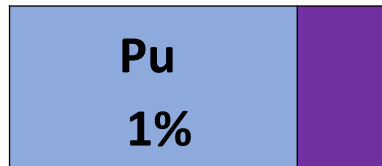
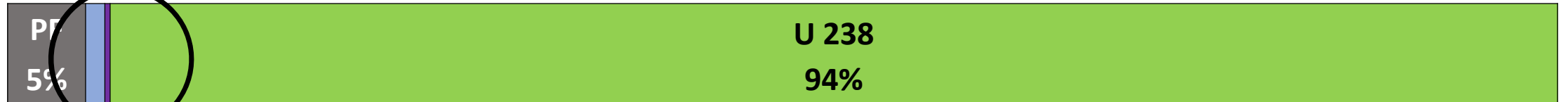
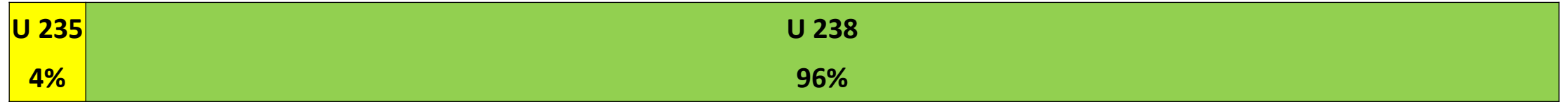


U_{235}



U_{238}

REP ou EPR neutrons lents

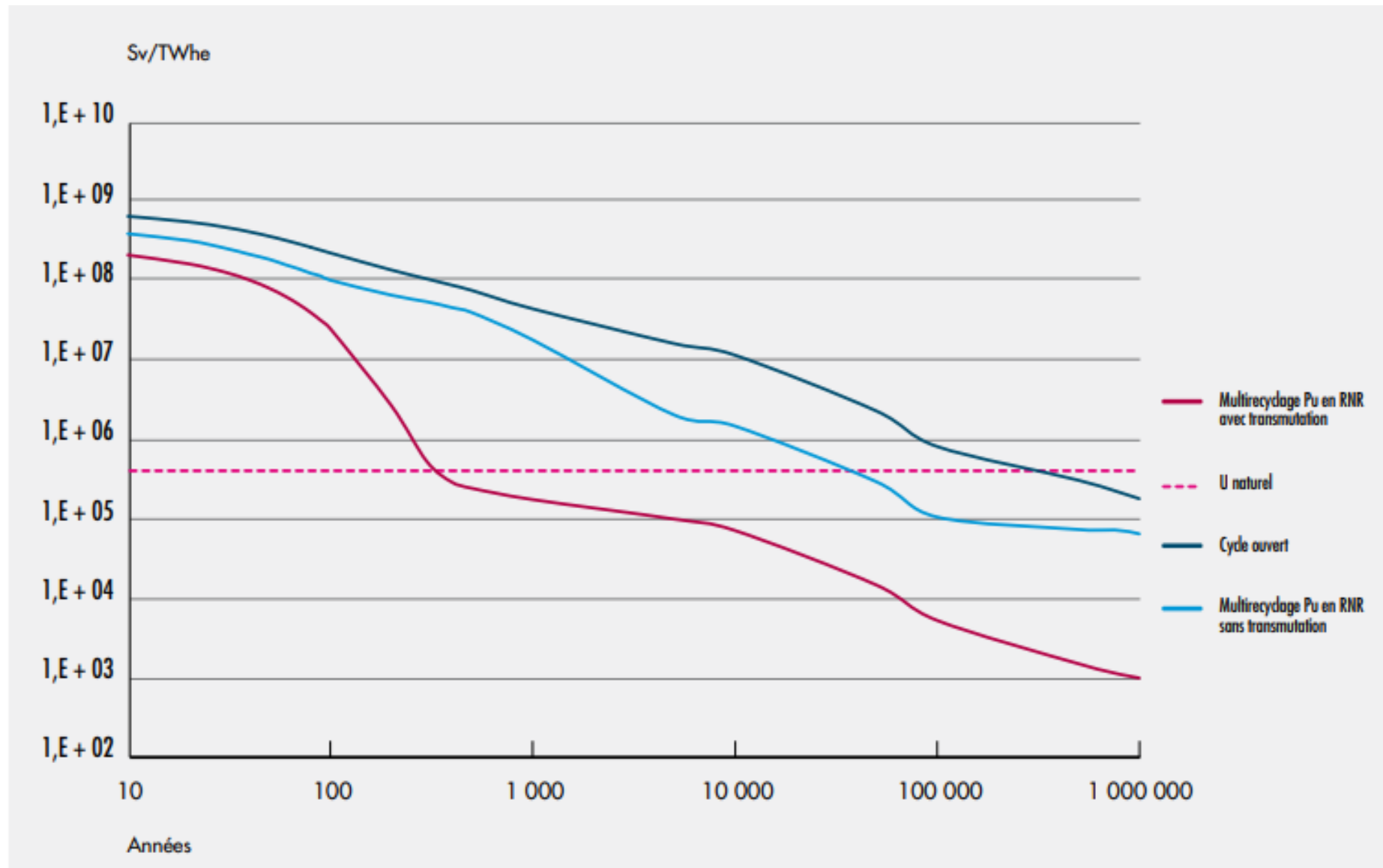


0,15% transplutoniens

RNR neutrons rapides



L'impact des RNR sur les déchets est considérable

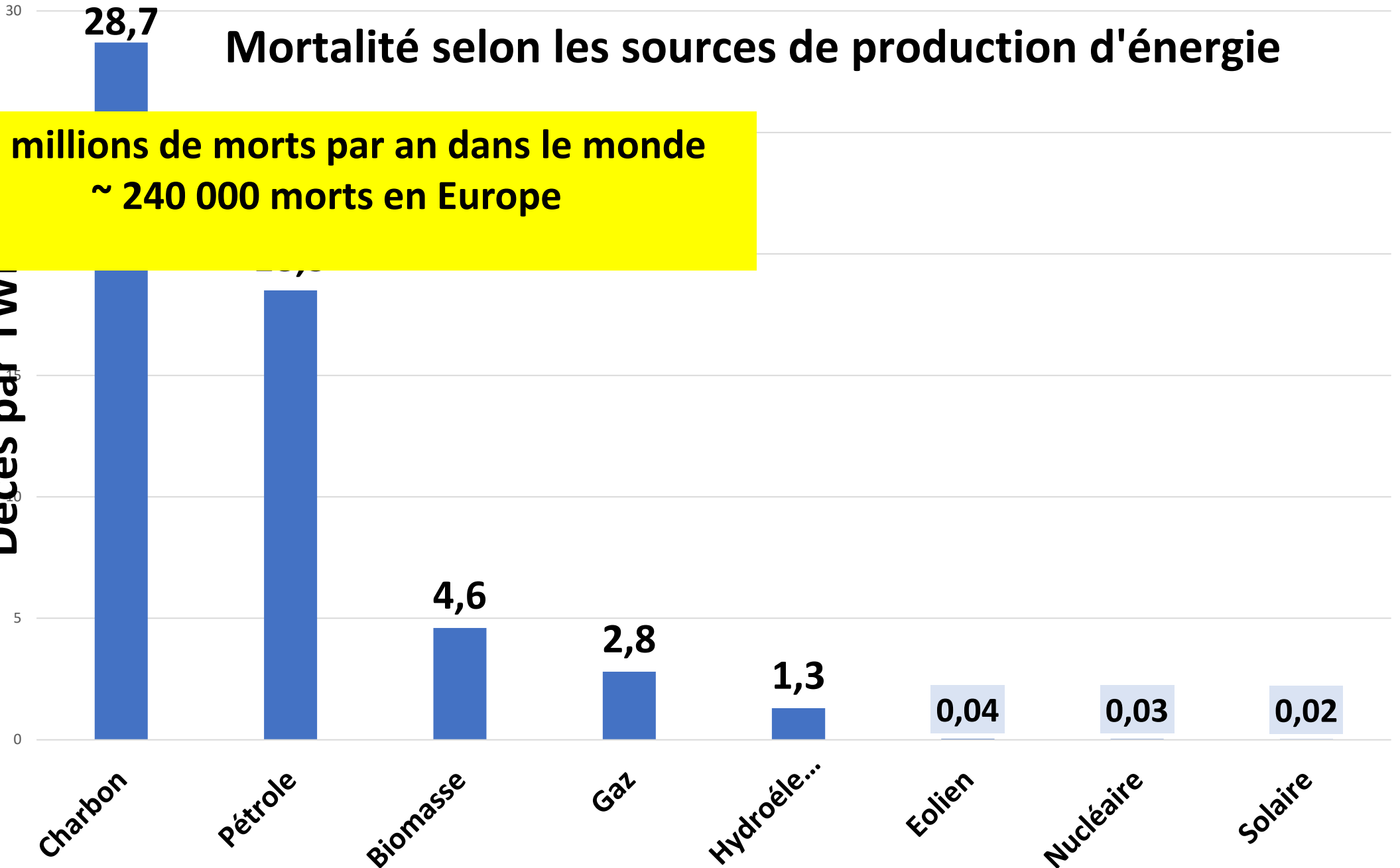


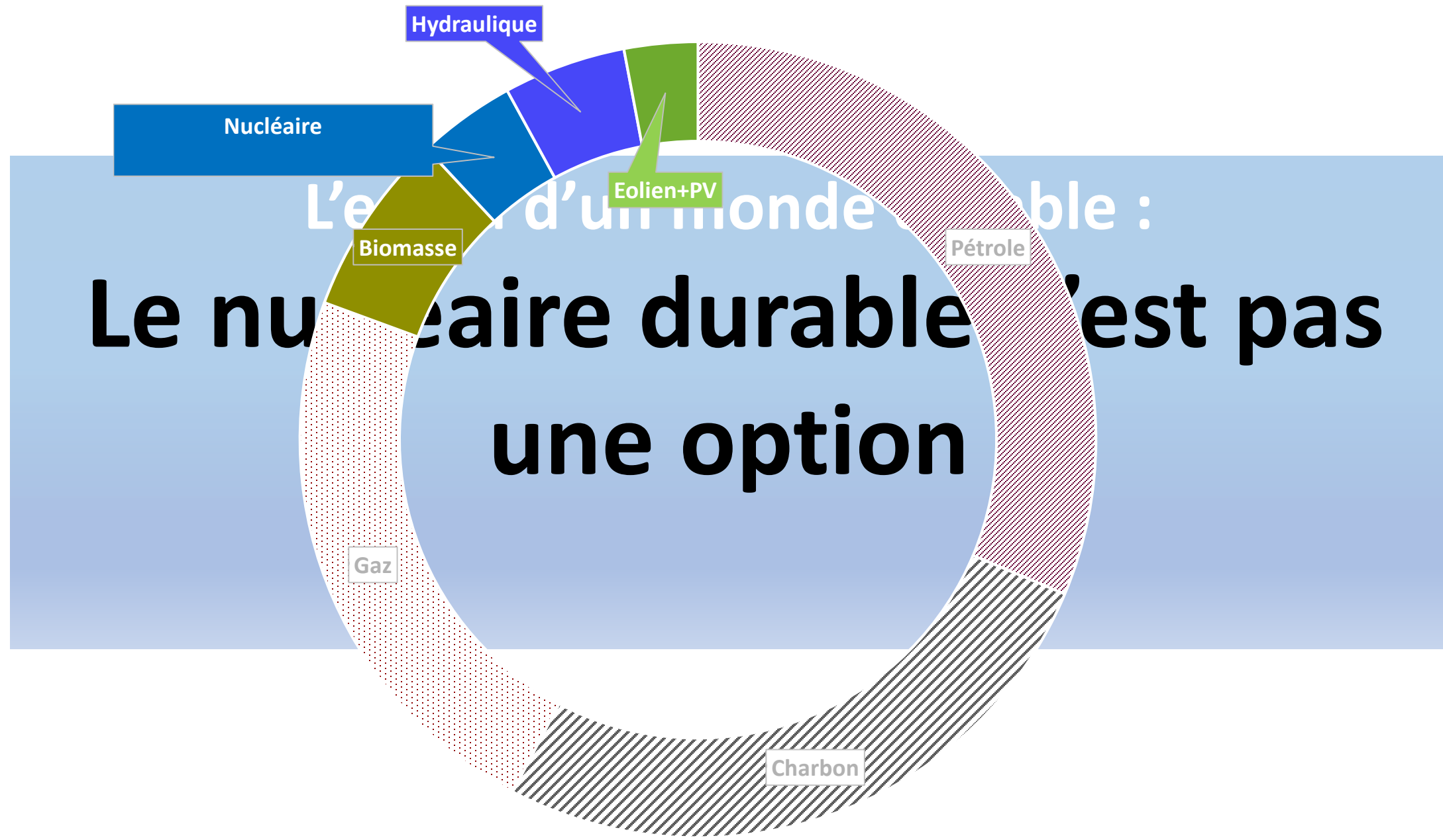
Source : CEA-Dossier 2012 – <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications>

Mortalité selon les sources de production d'énergie

6,5 millions de morts par an dans le monde
~ 240 000 morts en Europe

Décès par TW





LES FAUSSES BONNES IDÉES

Le thorium

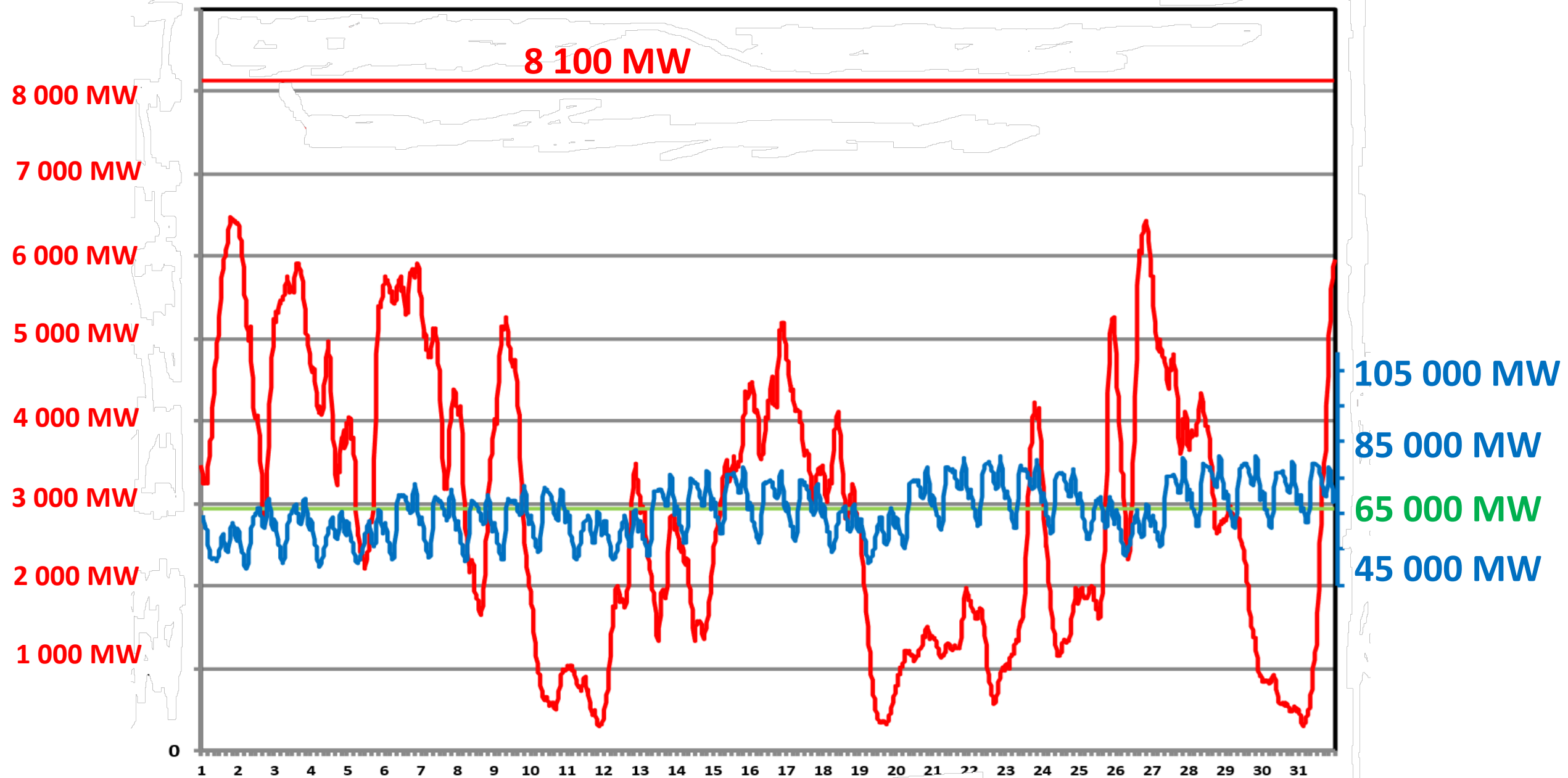
L'uranium de l'eau de mer

L'enrichissement de l'uranium appauvri

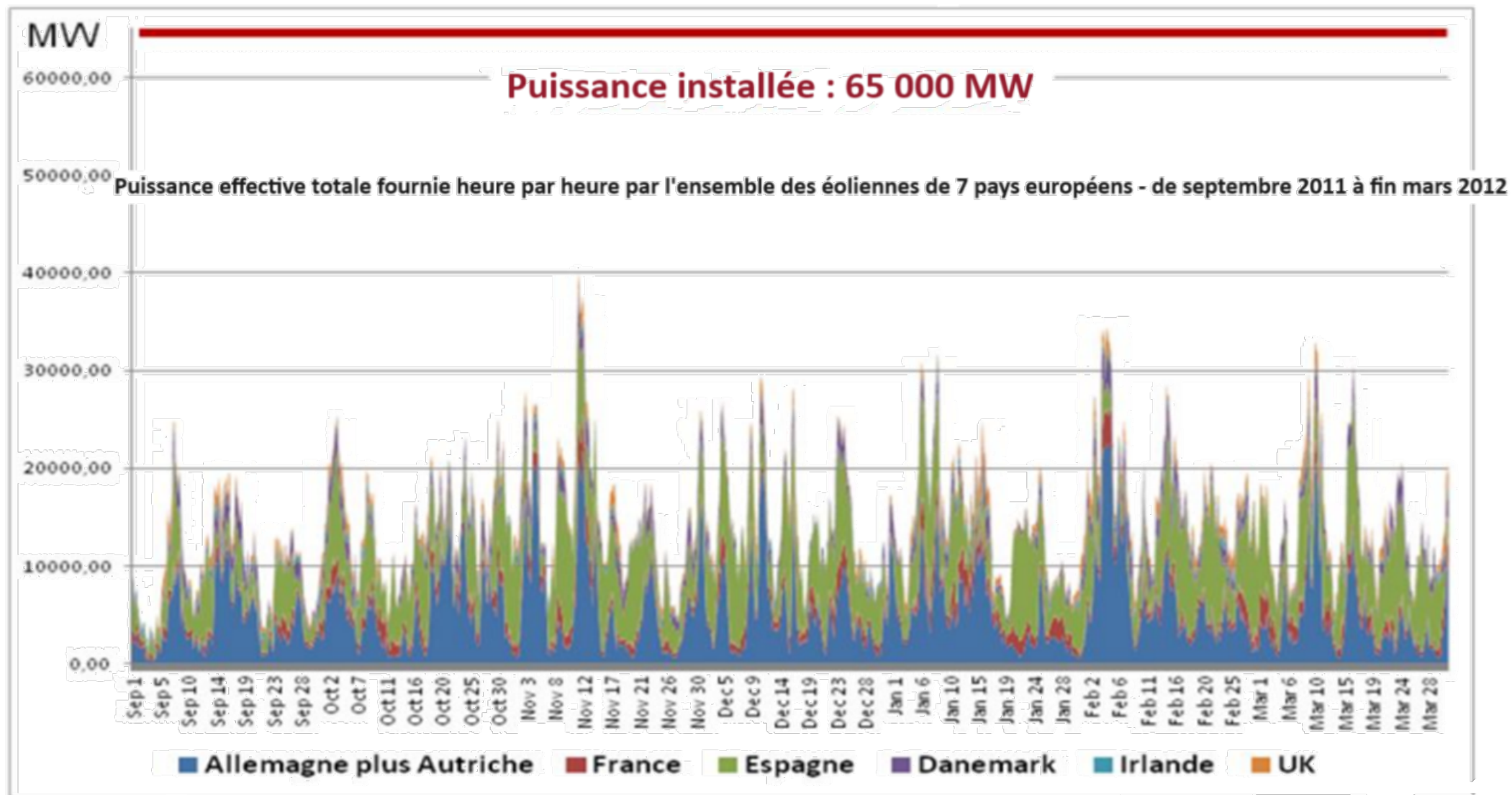
La fusion

....

Puissance éolienne installée / Puissance électrique totale consommée – Janvier 2014

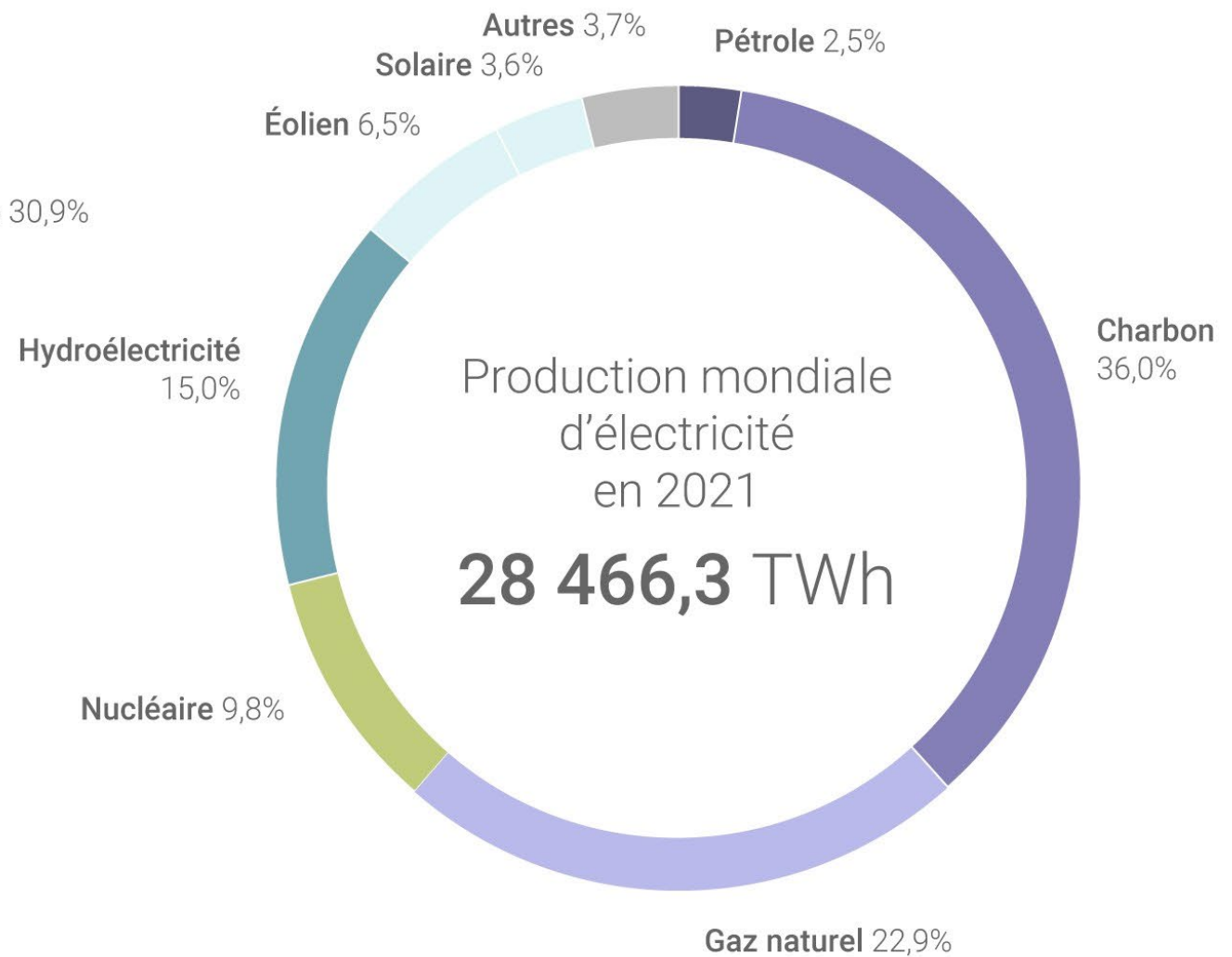
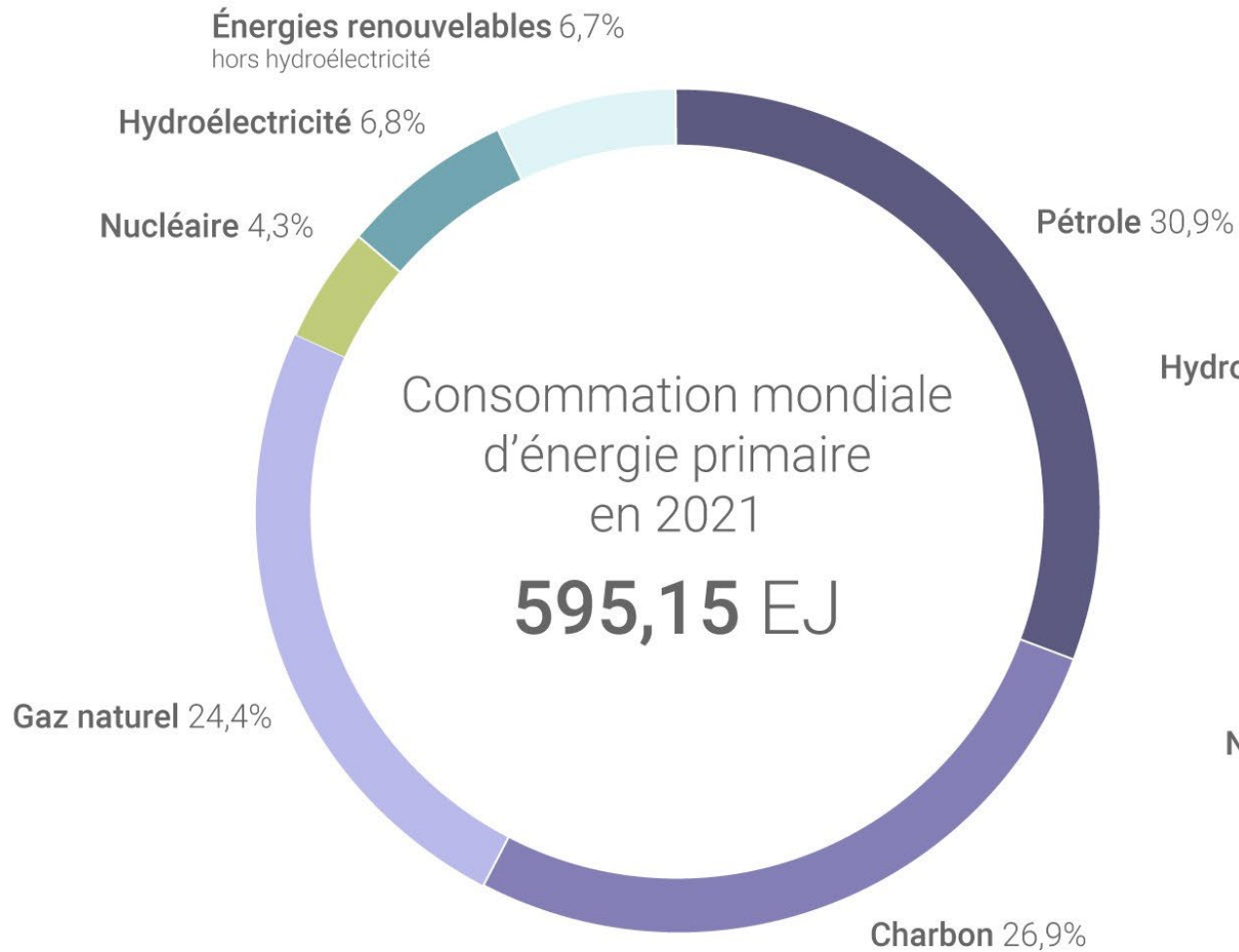


Exemple en vraie grandeur du « foisonnement » de la production éolienne en Europe



Source : SLC – Jean-Pierre Perves et Hubert Flocard – mars 2012

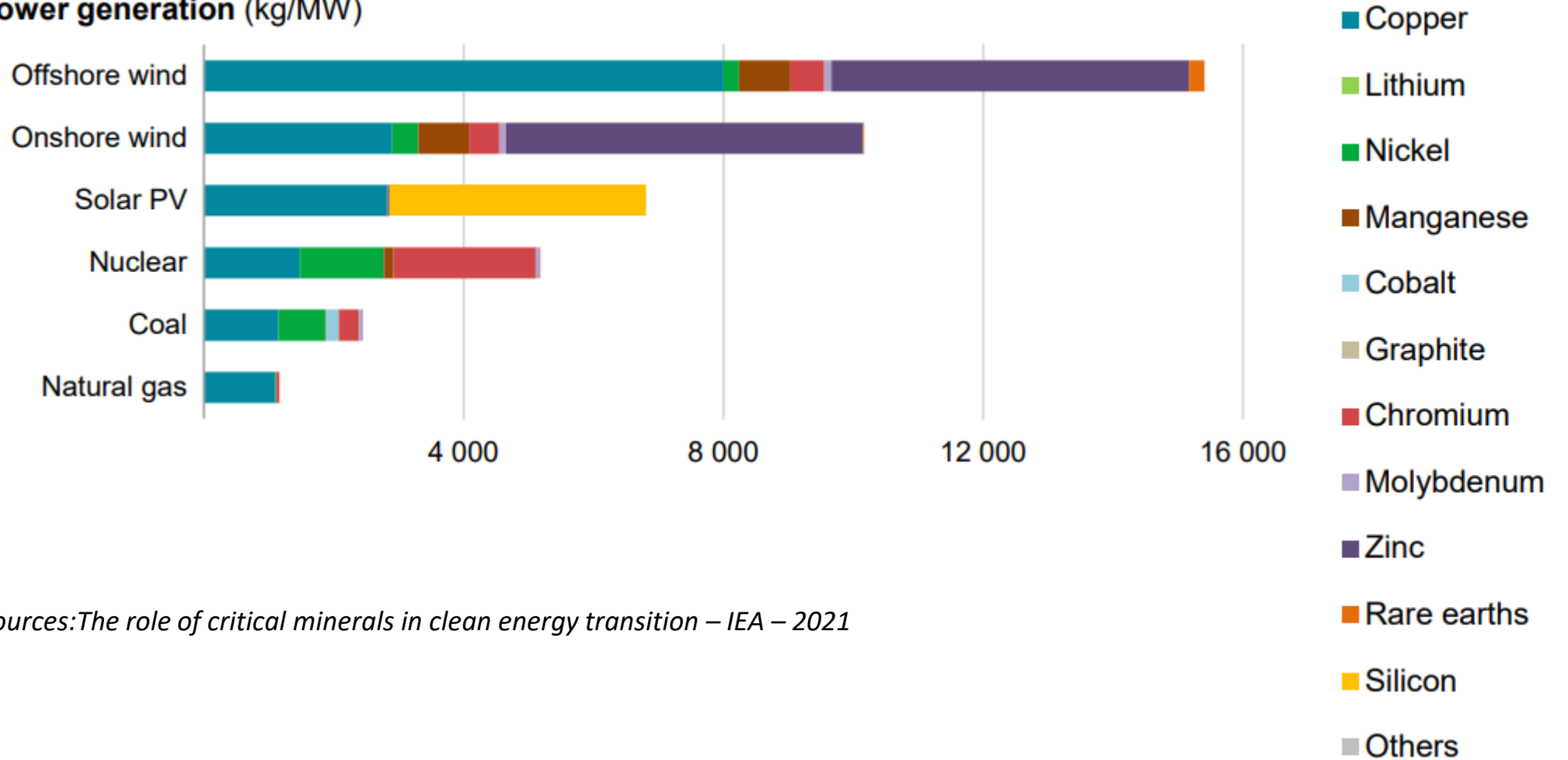
Monde La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2021



Connaissance des Énergies | Sources : BP Statistical Review of World Energy, juin 2022.

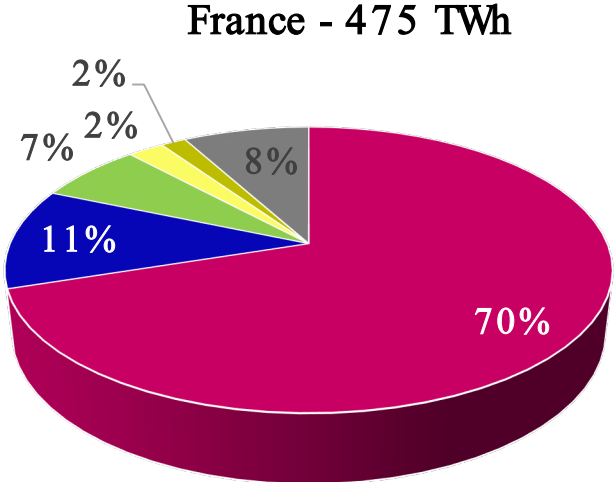
Les énergies renouvelables intermittentes impliquent un recours accru aux minéraux critiques

Power generation (kg/MW)

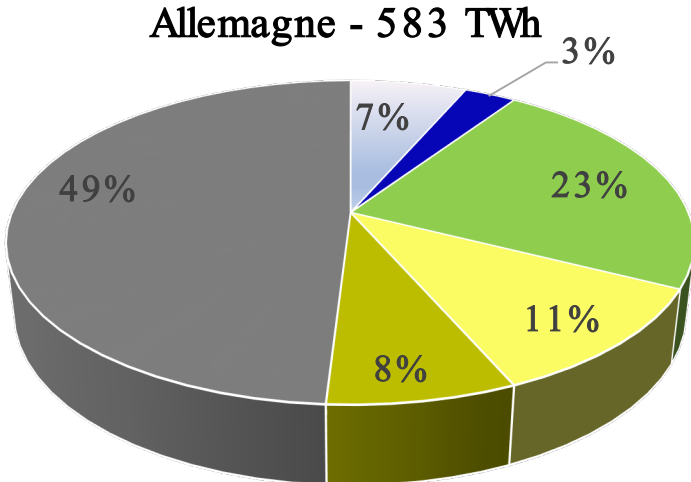


Sources: The role of critical minerals in clean energy transition – IEA – 2021

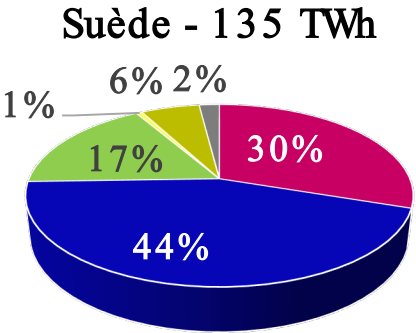
Données 2022



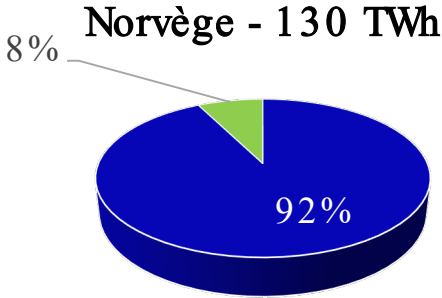
■ Nucléaire ■ Hydraulique ■ Eolien ■ PV ■ Biomasse ■ Fossiles



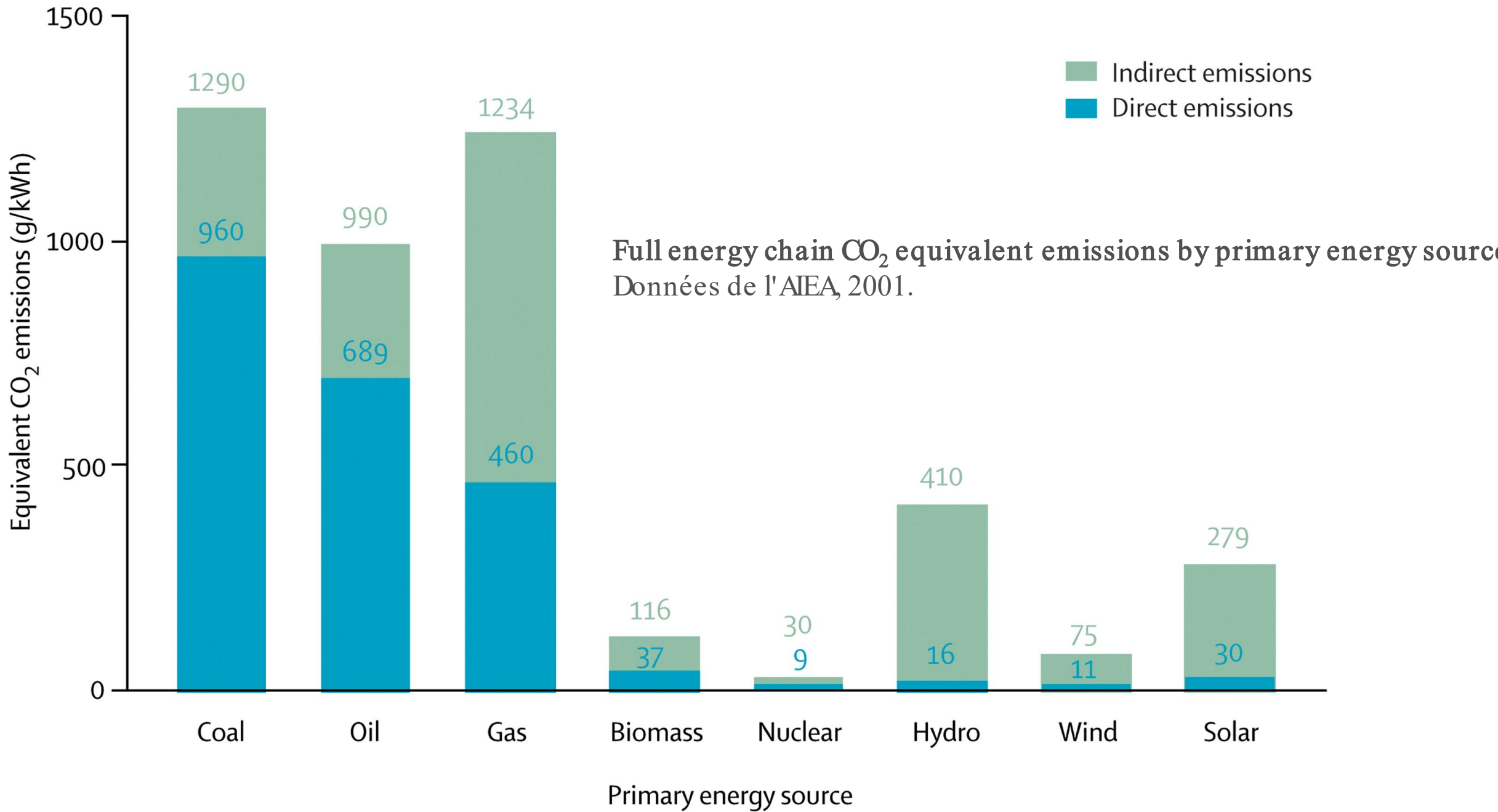
■ Nucléaire ■ Hydraulique ■ Eolien ■ PV ■ Biomasse ■ Fossiles



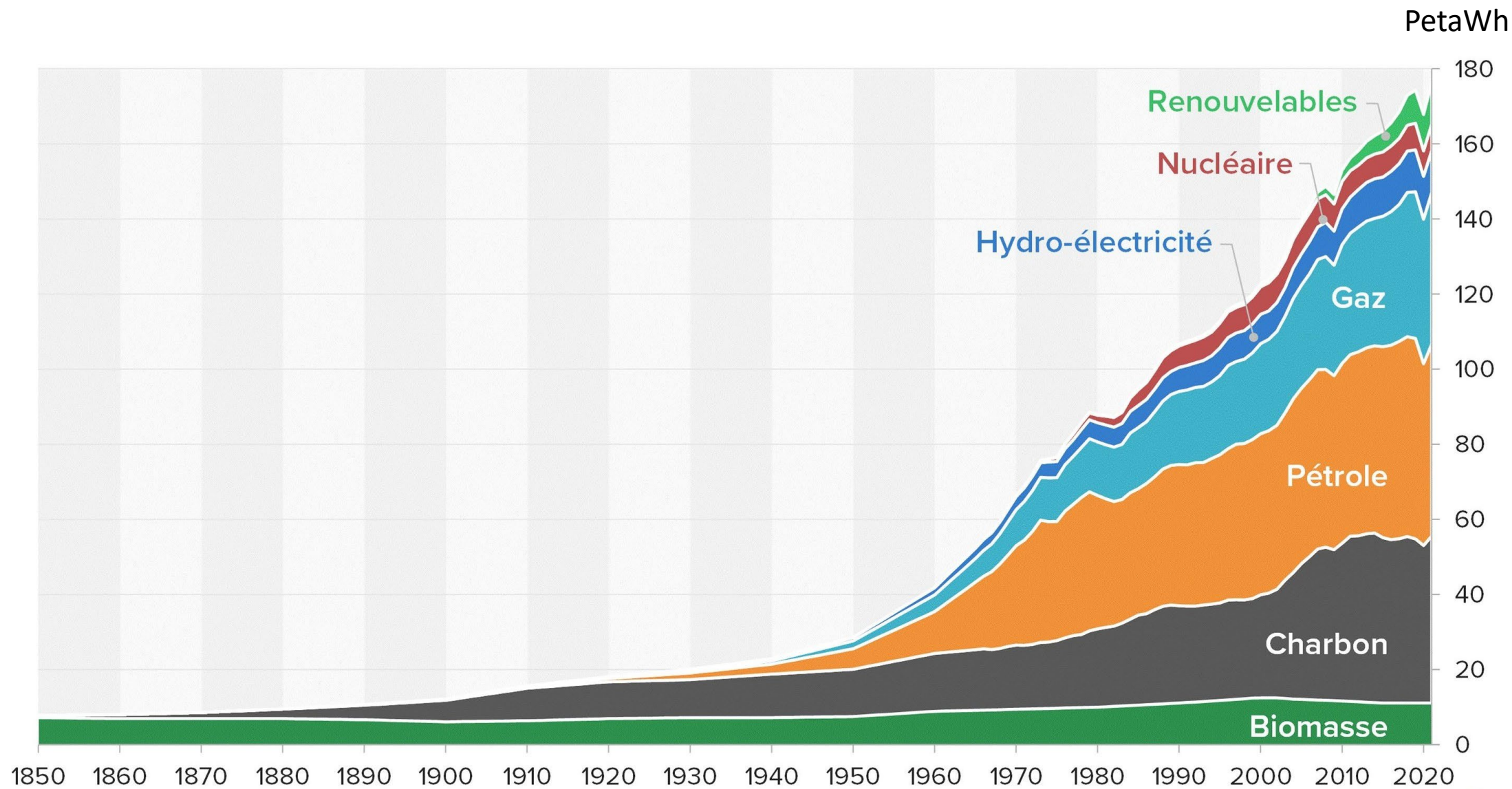
■ Nucléaire ■ Hydraulique ■ Eolien ■ PV ■ Biomasse ■ Fossiles



■ Nucléaire ■ Hydraulique ■ Eolien ■ PV ■ Biomasse ■ Fossiles



Consommation mondiale d'énergie primaire par source



Source : Our World in Data et BP Statistical Review of World Energy

Rapsodie : 1^{er} réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
(24 MWth puis 40 MWth)

Conçu en 1957,
lancé en 1962,
fonctionne de 1967 à 1978.



Superphénix : 2^{ème} RNR français refroidi au sodium
Prototype industriel de 2^{ème} génération de 1200 MWe

Conçu en 1974
(EDF avec l'Italie et l'Allemagne)
Fonctionne de 1986 à 1997



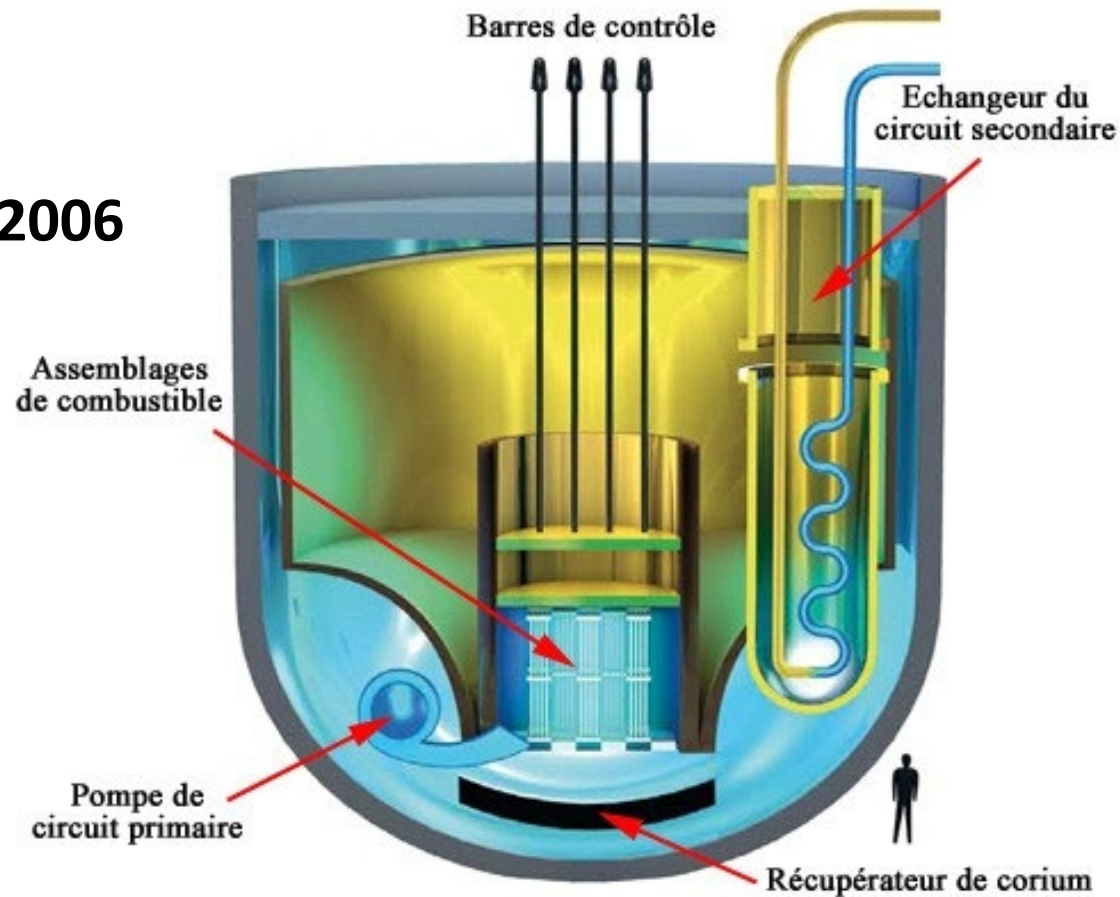
Source : © © France 3 Alpes

Claire Kerboul - www.nucleairedurable.fr

ASTRID : lancé en 2010 - arrêté en 2019

(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)

Inscrit dans la loi de programmation de la recherche du 28 juin 2006 (article 3)



Le Cœur à faible vidange (CFV) pour améliorer la sûreté en cas d'accident. La fuite des neutrons hors du cœur est favorisée.

Le récupérateur de corium : en cas de fusion du cœur, le magma très chaud (+ de 2 000 °C) est étalé afin d'éviter tout emballement de la réaction en chaîne.

Source : © Défis du CEA N°172 ©



Les deux noyaux issus de la fission sont plus légers que l'uranium d'un cinquième de la masse d'un proton : 200 MeV (Lise Meitner et O. R. Frisch. « *Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction* » Nature 143, 239-240, 11 février 1939).

Pourquoi les neutrons thermiques ne « brisent »-ils que l'uranium, et pas le thorium ?

Pourquoi n'y-a-t-il pas de réactions en chaîne dans les mines ?

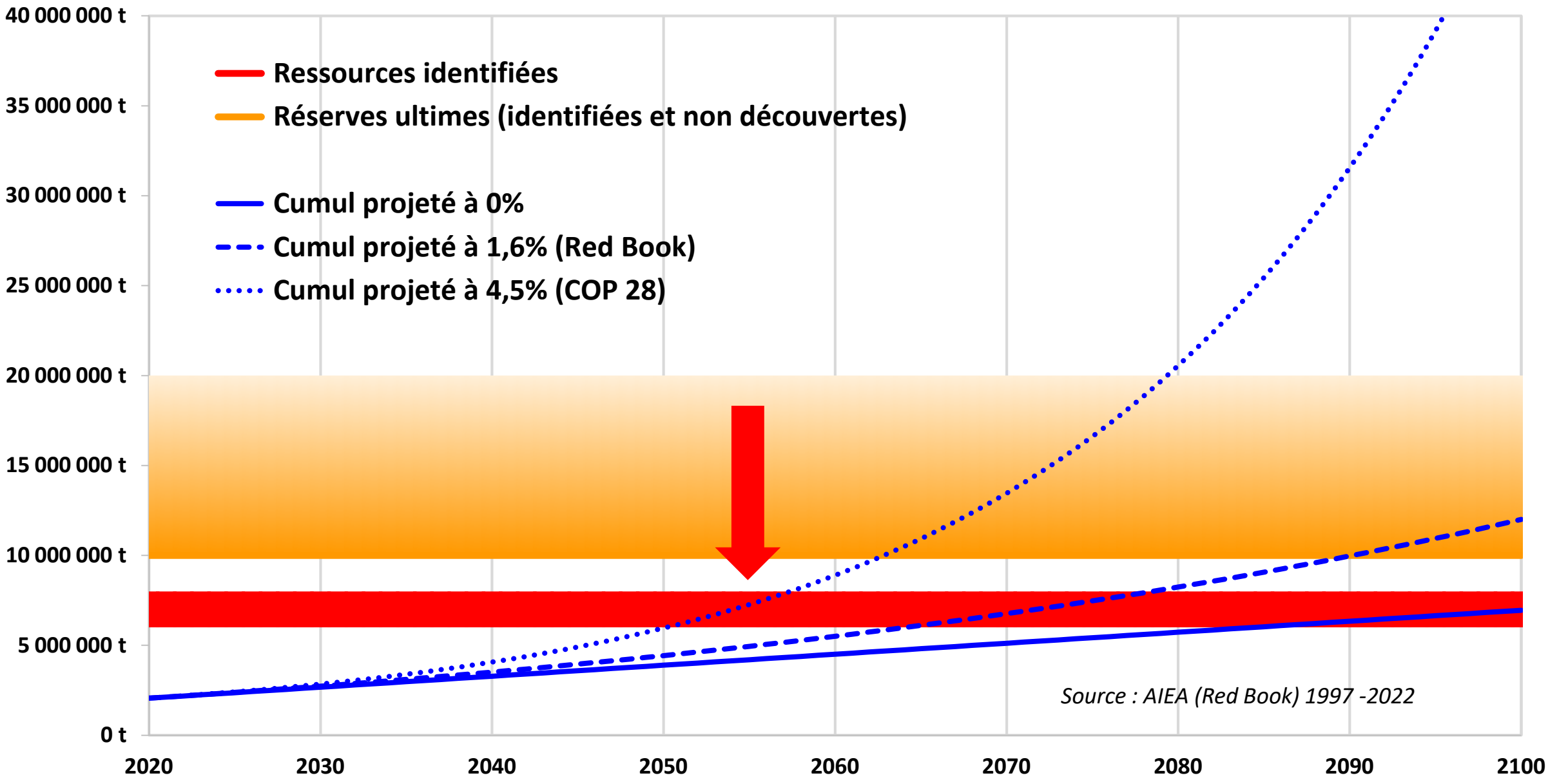
Sur 100 neutrons produits par fission dans l'uranium naturel :

90 sont capturés par l' U_{238} ;

8 fissionnent l' U_{238} ;

2 fissionnent l' U_{235} ,

soit 25 neutrons à la 2^{ème} génération. La réaction en chaîne s'éteint.



Source : AIEA (Red Book) 1997 -2022

Rapport d'enquête de l'Assemblée nationale sur l'arrêt de Superphénix et la filière des RNR - 26 juin 1998

« [...] il a été demandé périodiquement à la DSIN (autorité de sûreté) ce que la DSIN pensait de la sûreté de Superphénix, et nous avons chaque fois ...[...] confirmé ce jugement global : **la sûreté de Superphénix est cohérente avec celle du parc des réacteurs à eau sous pression qui constituent notre référence** ». André-Claude Lacoste, directeur de la DSIN.

Rapport OPECST sur l'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet « Astrid » - juillet 2021

C'est au travers d'un article de presse, paru le 29 août 2019, que la décision de ne pas poursuivre le projet ASTRID au-delà de 2019 par la construction d'un prototype a été rendue publique. Elle a été confirmée le lendemain par **un communiqué de presse du CEA annonçant le report de cette construction à la fin du siècle.**

Les intérêts à long terme du pays, notamment son indépendance énergétique dans un contexte où l'électricité représentera une part croissante de sa consommation d'énergie, **ne semblent pas avoir été pris en compte**