



Electricity



# Décarboner l'énergie: quel rôle pour le nucléaire?

par Julia and Jean-Francois Cantel



Industrial Process Heat



**PNC-FRANCE**

PATRIMOINE NUCLÉAIRE ET CLIMAT

*Avec le soutien de la Fondation des Parcs et Jardins de France*

# Intervenants



Julia Cantel - Ingénieur nucléaire  
Chef de projet EDF UK pour le projet  
Hinkley Point C



Jean-François Cantel - Ingénieur nucléaire  
Chef de projet EDF UK pour le projet  
Hinkley Point C

# Sommaire

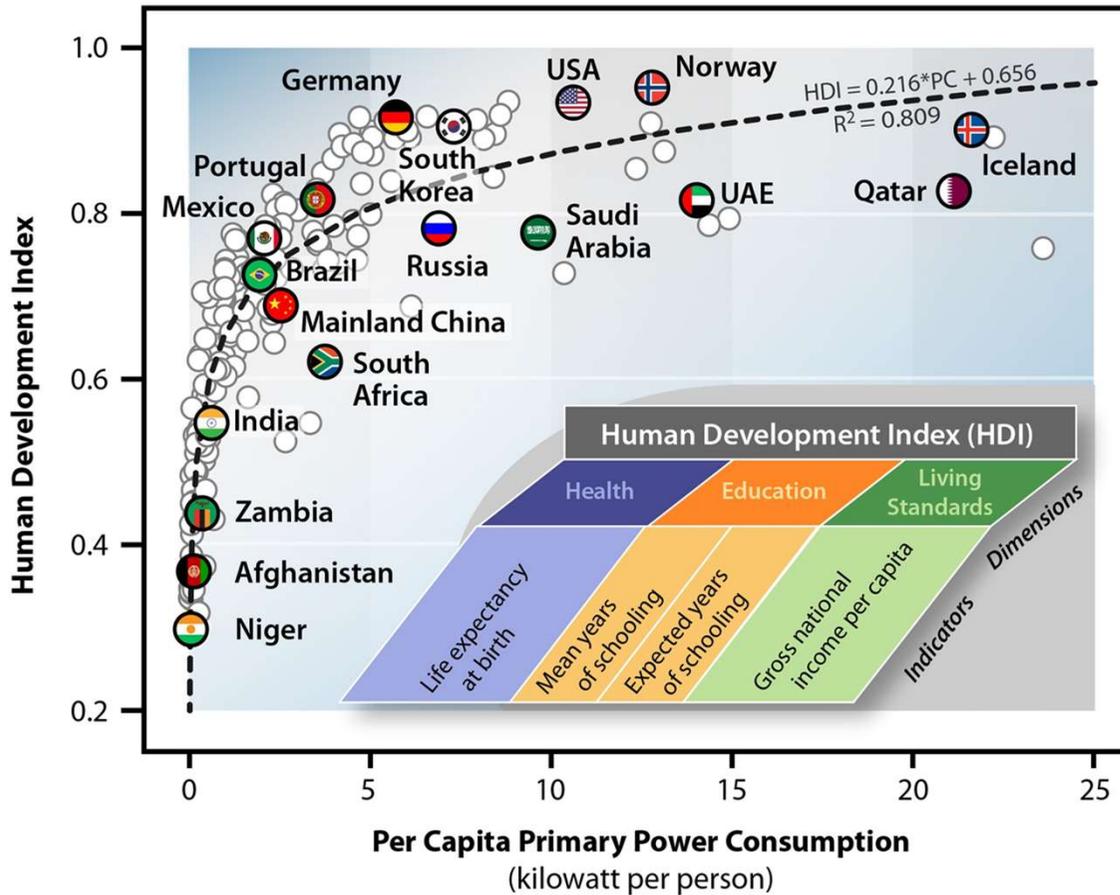
- ▶ **Energie et changement climatique**
- ▶ **L'énergie nucléaire pour la production d'électricité**
- ▶ **Perspectives pour l'énergie nucléaire**

# ► Energie et changement climatique



# Energie et changement climatique

## Pourquoi l'énergie est-elle si importante?



Monde	0,731
Développement humain très élevé	0,892
Développement humain élevé	0,750
Développement humain moyen	0,634
Développement humain faible	0,507
Pays en développement	0,686

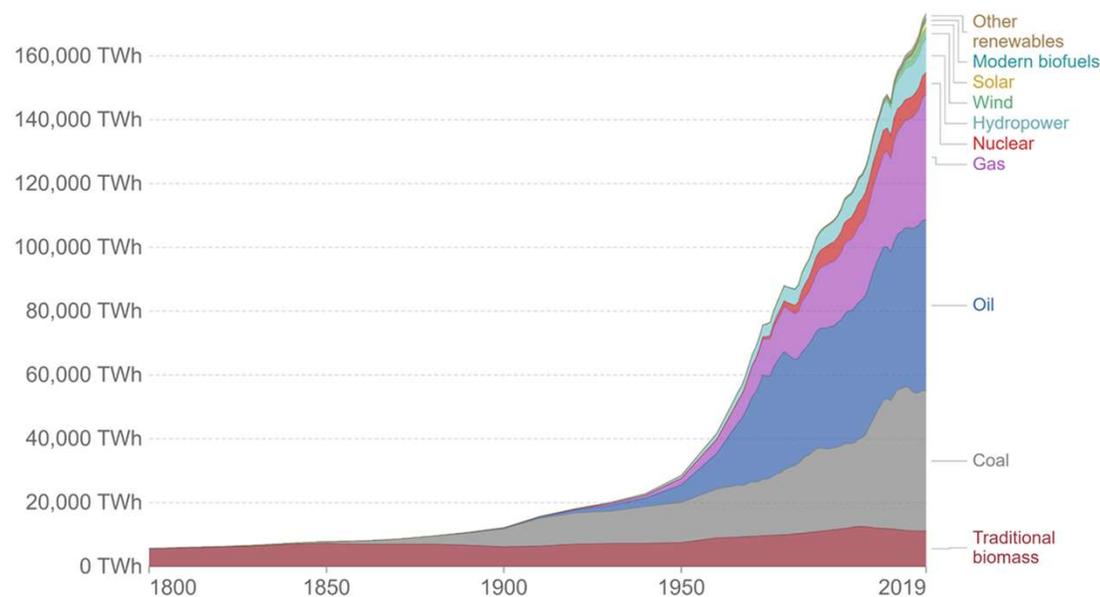
1. Il faut avoir accès à un niveau suffisant d'énergie pour être un pays développé.
2. Au-delà d'un certain seuil, l'amélioration du niveau de vie est marginale comparé à l'énergie à investir (ex. Allemagne/USA/Qatar).

# Energie et changement climatique

## Evolution de la consommation globale d'énergie par source

### Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.



Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Depuis le début de l'ère industrielle : augmentation constante de l'énergie consommée dans le monde.

2019 : **79%** de cette énergie provenait de **combustibles fossiles** (charbon, pétrole, gaz).

Problème de l'utilisation des combustibles fossiles : émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

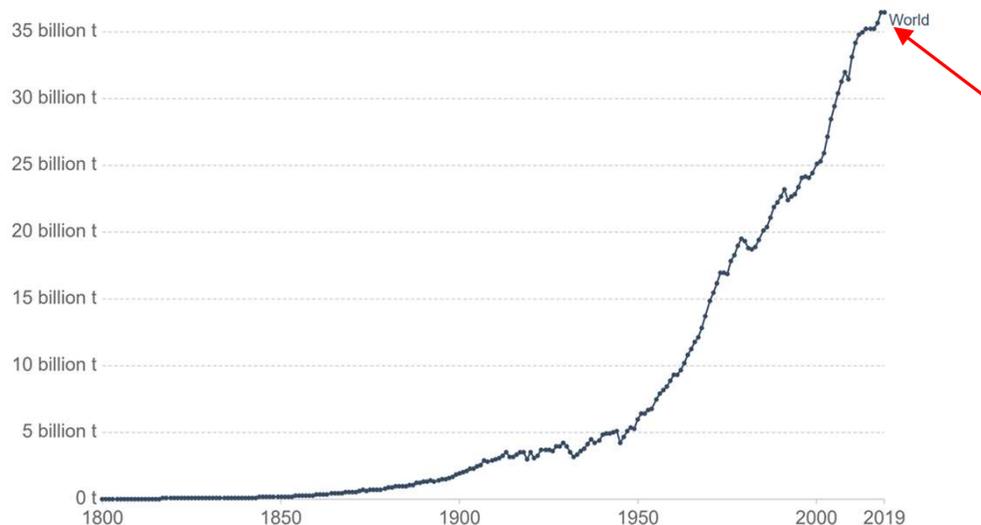
# Energie et changement climatique

## Les combustibles fossiles: moteur du changement climatique

### Evolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub>

#### Annual CO<sub>2</sub> emissions

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the burning of fossil fuels for energy and cement production. Land use change is not included.



Source: Global Carbon Project; Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC)  
Note: CO<sub>2</sub> emissions are measured on a production basis, meaning they do not correct for emissions embedded in traded goods.  
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

Les émissions annuelles de CO<sub>2</sub> ne font qu'augmenter depuis le début de l'ère industrielle.

En 2018, les émissions totales de CO<sub>2</sub> ont représentées environ **37 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>**

En 2018, les émissions totales de Gaz à Effet de Serre (GES) ont représentées environ 49 milliards de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> (eqCO<sub>2</sub>).

Le CO<sub>2</sub> est le premier contributeur au changement climatique, mais d'autres GES sont préoccupants (ex. méthane).

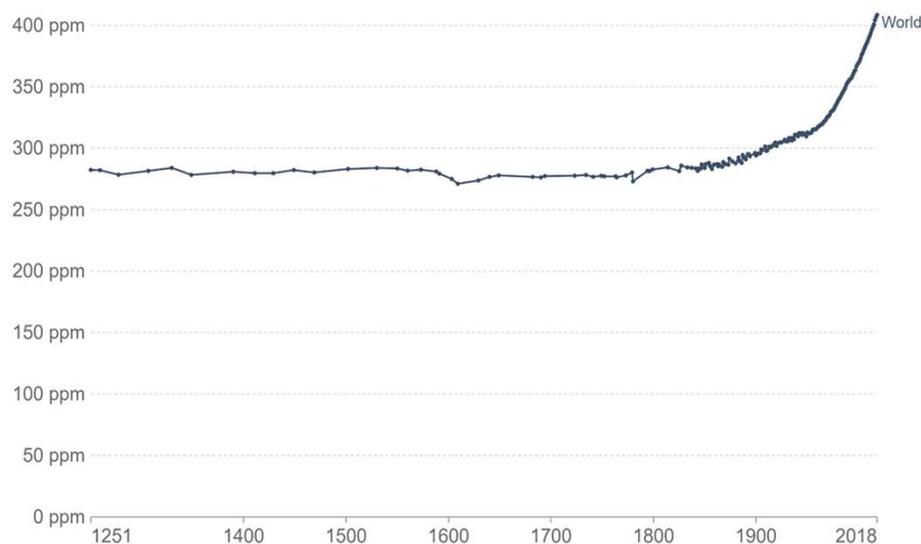
# Energie et changement climatique

## Les combustibles fossiles: moteur du changement climatique

### *Evolution de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>*

#### Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration

Global average long-term atmospheric concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), measured in parts per million (ppm). Long-term trends in CO<sub>2</sub> concentrations can be measured at high-resolution using preserved air samples from ice cores.



Source: EPICA Dome C CO<sub>2</sub> record (2015) & NOAA (2018)

OurWorldInData.org/cc2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Avant l'ère industrielle, et depuis au moins 800 000 ans, la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique était inférieure à **300 ppm**.

Elle a dépassé les 400 ppm en 2014.

# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

« Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. »

Ces évaluations sont fournies aux gouvernements afin d'élaborer des politiques et de définir des orientations, et servent de base de travail dans le cadre des négociations des COP (Conférence des Parties).



# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

La convention cadre des nations unies sur le changement climatique (UN Climate Change), établie en 1992 suite au sommet de la terre à Rio, est l'entité des nations unies qui est chargée d'apporter une réponse mondiale à la menace du changement climatique.

La convention a une portée quasi-universelle avec 197 états qui se réunissent une fois par an à la conférence des parties (COP).



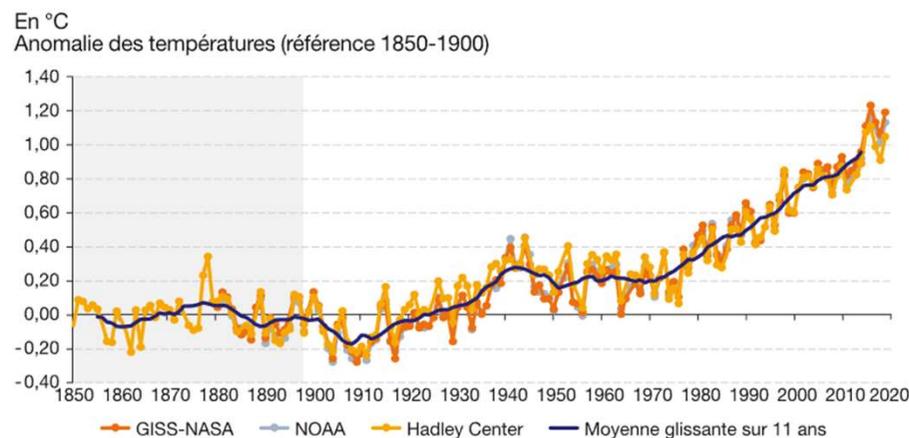
# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

Deux engagements majeurs de la COP21 à Paris en 2015:

- Limiter le réchauffement bien **en-dessous de 2 °C**, et **autant que possible à 1,5 °C**.

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE MONDIALE DE 1850 À 2019



Note : en grisé la période préindustrielle 1850-1900.

Sources : NASA ; NOAA ; Hadley Center

- Atteindre la neutralité carbone en 2050.

# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

### Budget carbone

- Quantité d'émissions de GES en eqCO<sub>2</sub> qui peuvent encore être rejeté dans l'atmosphère avant de dépasser une limite de température moyenne à la surface du globe.
- En 2021, budget carbone de **1,046 Gt** pour maintenir le réchauffement bien en-dessous de 2°C, soit 20 ans d'émissions de GES (au niveau des émissions de 2018).
- En 2021, budget carbone de **400 Gt** pour maintenir le réchauffement sous 1,5 °C, soit 8 ans d'émissions de GES (au niveau des émissions de 2018).

# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

Intérêt de limiter le réchauffement à moins de 2°C, et idéalement à 1,5°C?

IMPACTS AT 1.5°C AND 2°C OF WARMING			
DIRECT IMPACTS	1.5°C	2°C	2°C IMPACTS
<b>EXTREME HEAT</b> Global population exposed to severe heat at least once every five years	14%	37%	2.6X WORSE
<b>SEA-ICE-FREE ARCTIC</b> Number of ice-free summers	AT LEAST 1 EVERY 100 YEARS	AT LEAST 1 EVERY 10 YEARS	10X WORSE
<b>SEA LEVEL RISE</b> Amount of sea level rise by 2100	0.40 METERS	0.46 METERS	0.06m MORE
SPECIES	1.5°C	2°C	2°C IMPACTS
<b>SPECIES LOSS: VERTEBRATES</b> Vertebrates that lose at least half of their range	4%	8%	2X WORSE
<b>SPECIES LOSS: PLANTS</b> Plants that lose at least half of their range	8%	16%	2X WORSE
<b>SPECIES LOSS: INSECTS</b> Insects that lose at least half of their range	6%	18%	3X WORSE

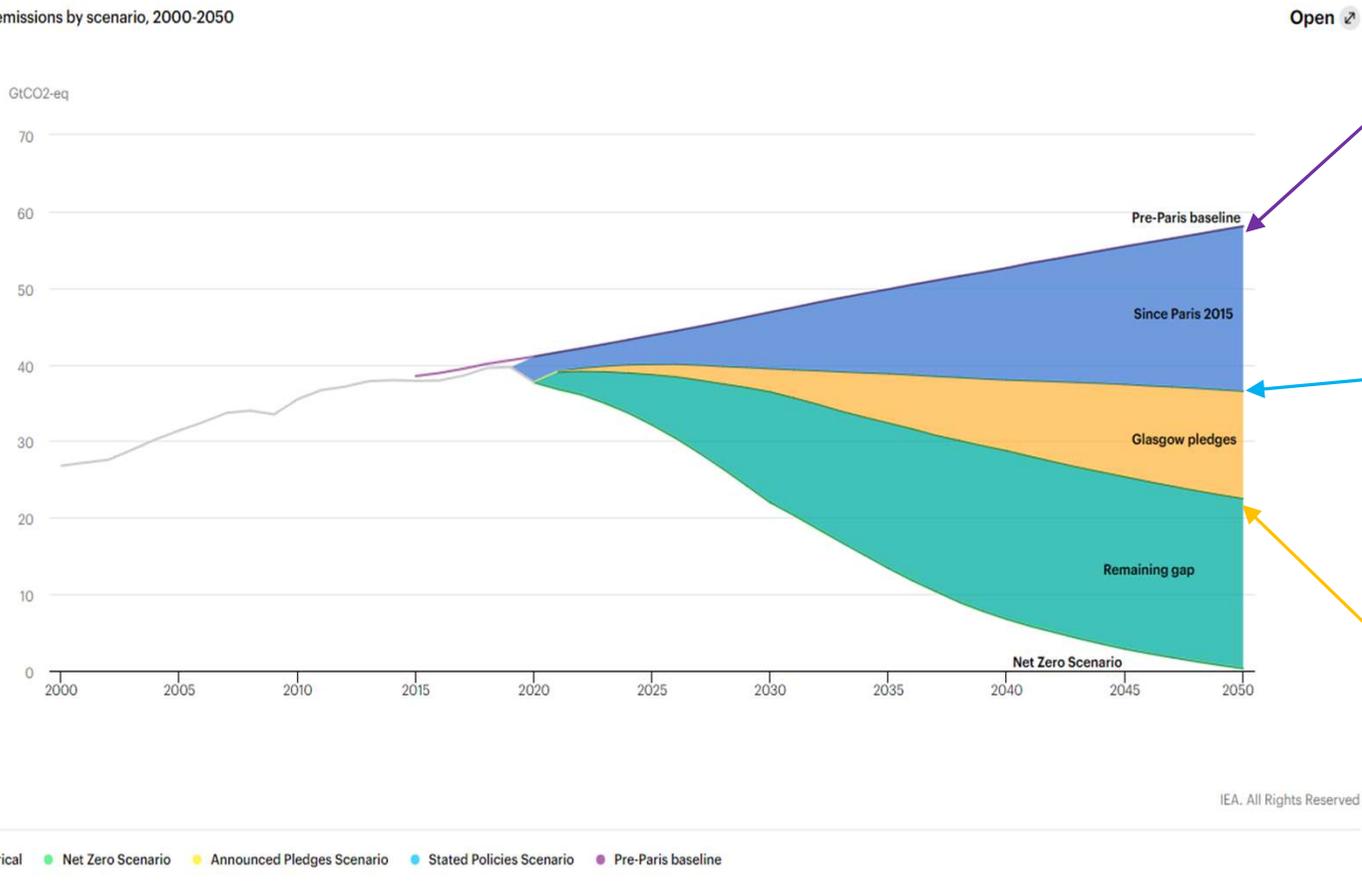
LAND	1.5°C	2°C	2°C IMPACTS
<b>ECOSYSTEMS</b> Amount of Earth's land area where ecosystems will shift to a new biome	7%	13%	1.86% WORSE
<b>PERMAFROST</b> Amount of Arctic permafrost that will thaw	4.8 MILLION KM <sup>2</sup>	6.6 MILLION KM <sup>2</sup>	38% WORSE
<b>CROP YIELDS</b> Reduction in maize harvests in tropics	3%	7%	2.3X WORSE
OCEANS	1.5°C	2°C	2°C IMPACTS
<b>CORAL REEFS</b> Further decline in coral reefs	70-90%	99%	UP TO 29% WORSE
<b>FISHERIES</b> Decline in marine fisheries	1.5 MILLION TONNES	3 MILLION TONNES	2X WORSE

Figure 16: The difference in projected climate impacts between 1.5°C and 2°C of warming. Source: IPCC 2018.

# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique

Global emissions by scenario, 2000-2050



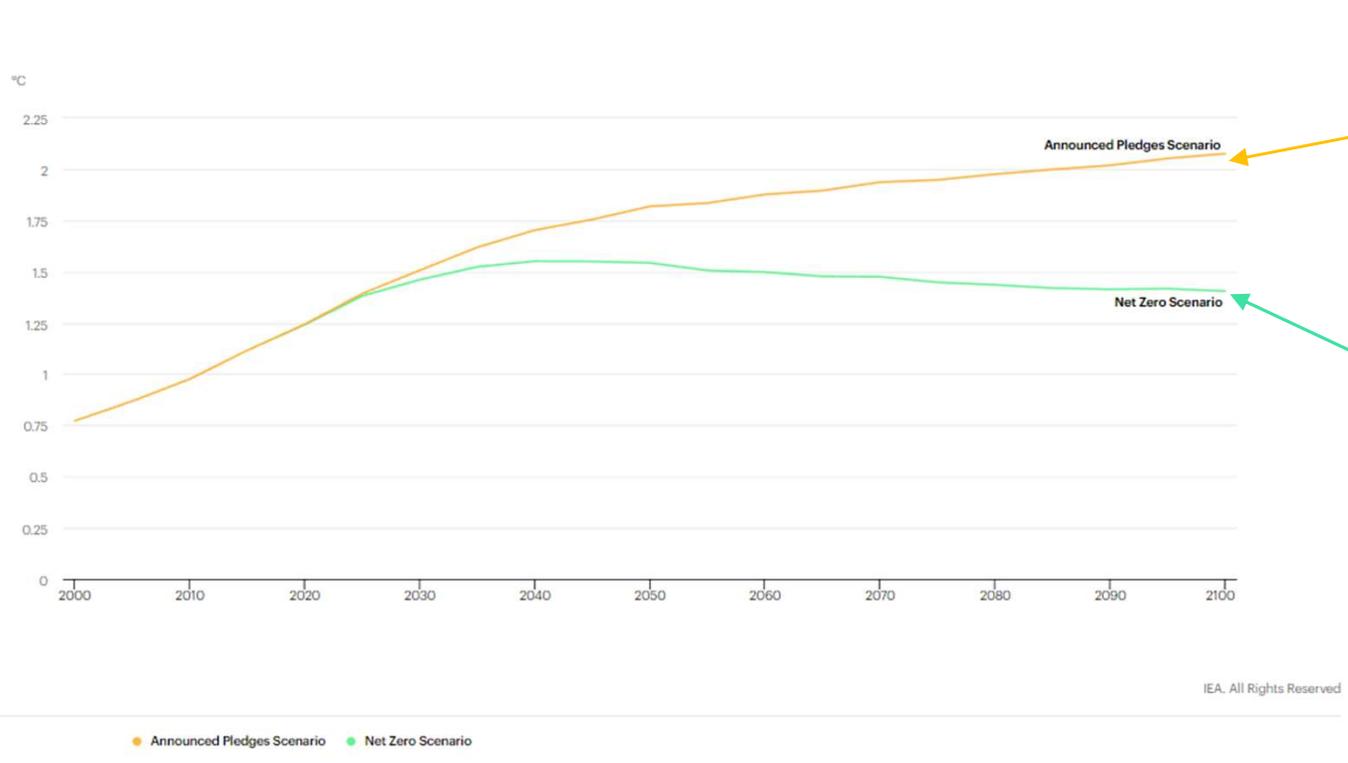
Les engagements pris avant la COP21 de Paris ne suffisent pas à infléchir les émissions d'ici 2050.

Les engagements pris depuis la COP21 jusqu'à la COP25 permettent de réduire légèrement les émissions d'ici 2050.

Si les engagements de la COP26 de Glasgow sont tenus, les émissions descendraient jusqu'à 22 Gt eqCO<sub>2</sub> en 2050.

# Energie et changement climatique

## La réponse de la communauté internationale au changement climatique



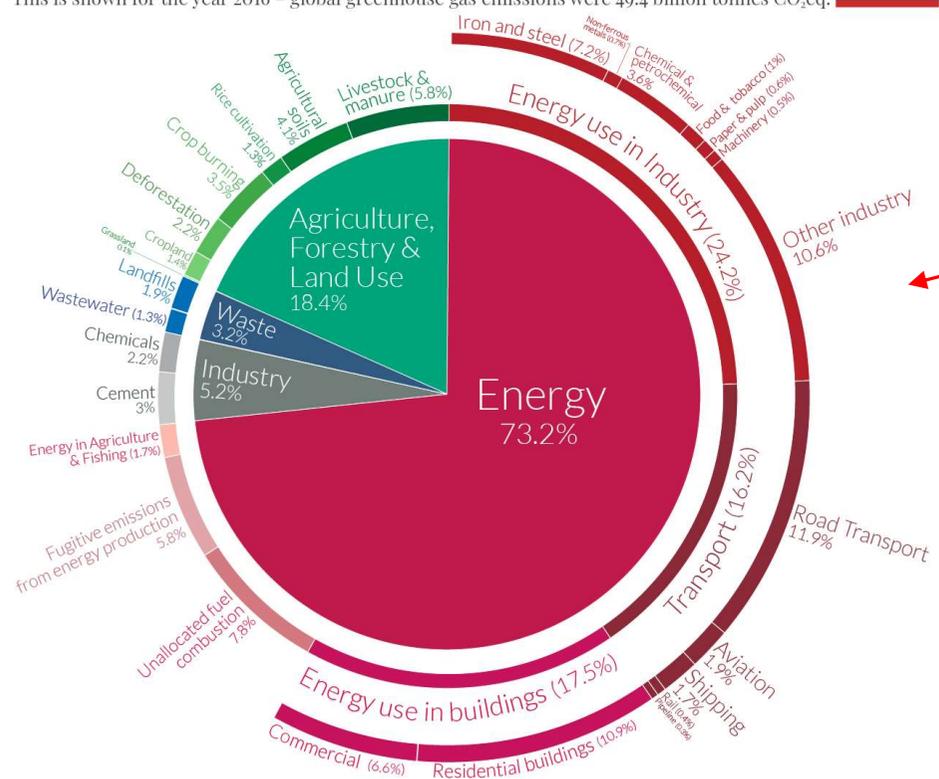
Scénario avec les politiques annoncées jusqu'à la COP26, plus de 2 °C.

Avec un scénario neutralité carbone, les 1,5°C sont légèrement dépassés jusqu'en 2060.

# Energie et changement climatique

## Emissions globales de GES par secteur

Global greenhouse gas emissions by sector  
This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO<sub>2</sub>eq. 



Le domaine de **l'énergie** est responsable de plus de 70% des émissions mondiales de GES.

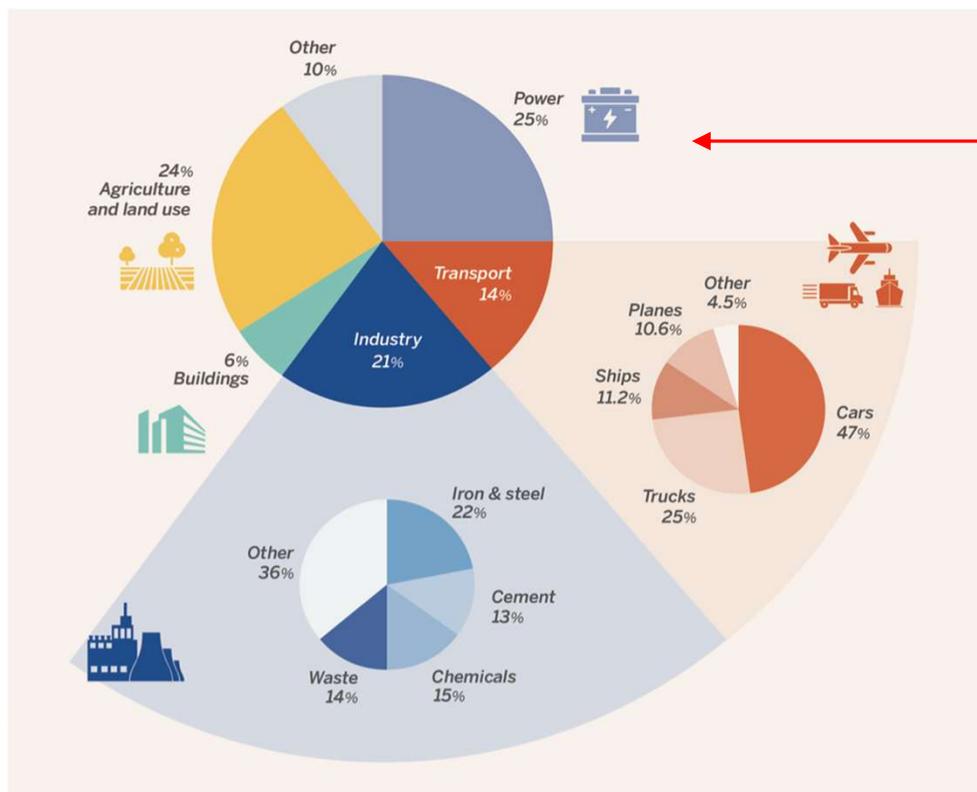
Ex : énergie utilisée pour faire fonctionner aciéries, process industriels, transports, production de l'électricité, chauffage au gaz, etc.

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.  
Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

# Energie et changement climatique

## Origine des émissions de GES par secteur

FIGURE 12: GLOBAL EMISSIONS BY SECTOR

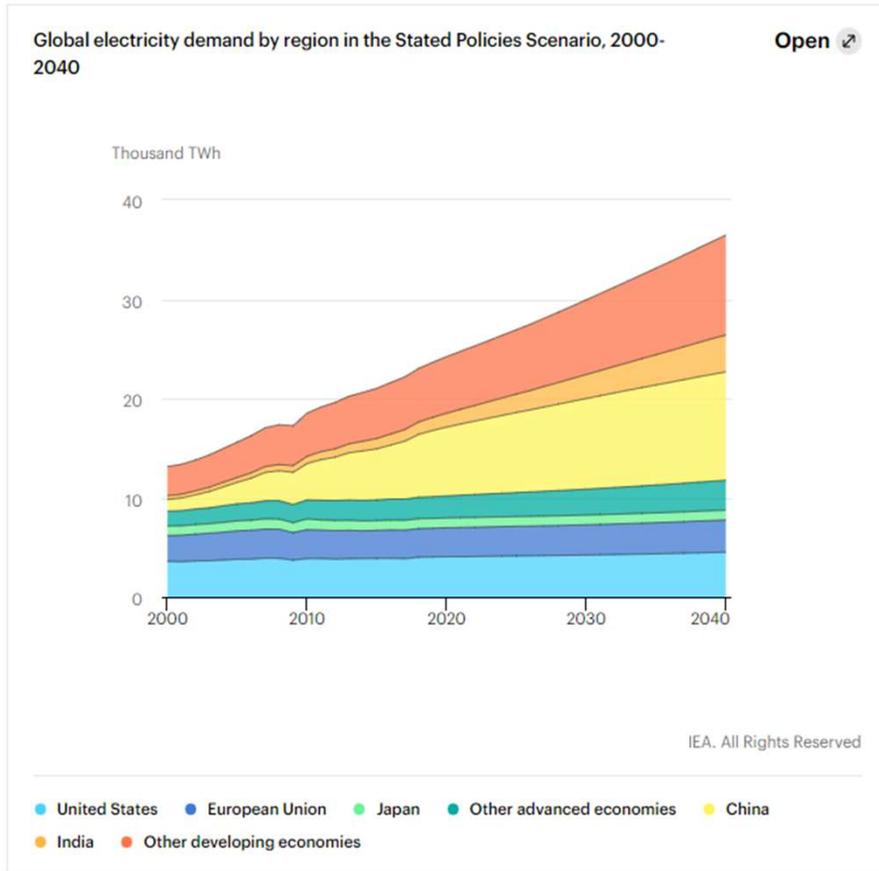


La production d'électricité représente à elle seule **25% des émissions mondiales de GES.**

Source: Emissions data is from the IPCC's Fifth Assessment Report, Working Group III, 2014, and refers to shares of total global greenhouse gas emissions. The split between cars and trucks in road transport emissions is based on the IEA's Energy Technology Perspectives, 2017, since this is not given in the IPCC source.

# Energie et changement climatique

## Projection de la demande mondiale d'électricité jusqu'en 2040



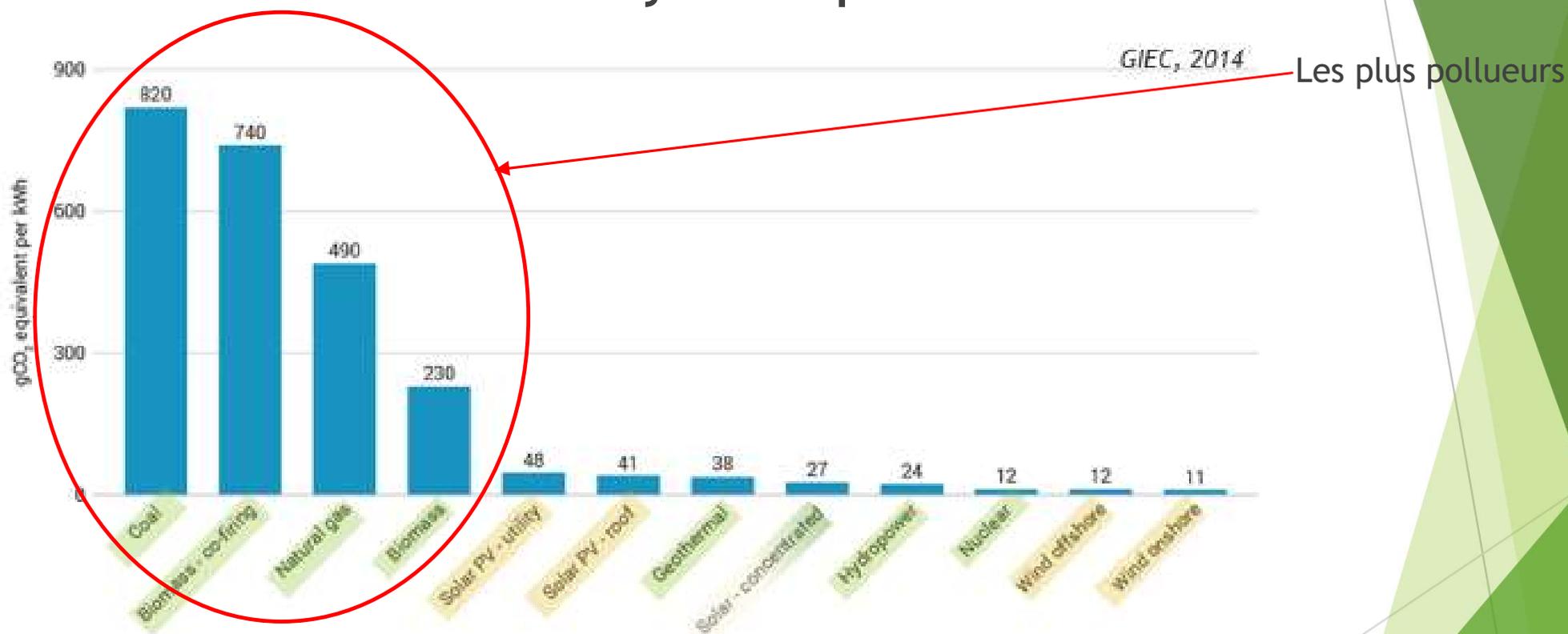
La demande mondiale en électricité ne fera qu'augmenter (en particulier dans les pays dont l'Indice de Développement Humain n'est pas encore élevé).

Challenge: comment réduire les émissions de GES liées à la production d'électricité quand la neutralité carbone va impliquer une électrification des usages et une augmentation de la production d'électricité?

➔ Transition vers des moyens de production d'électricité bas carbone

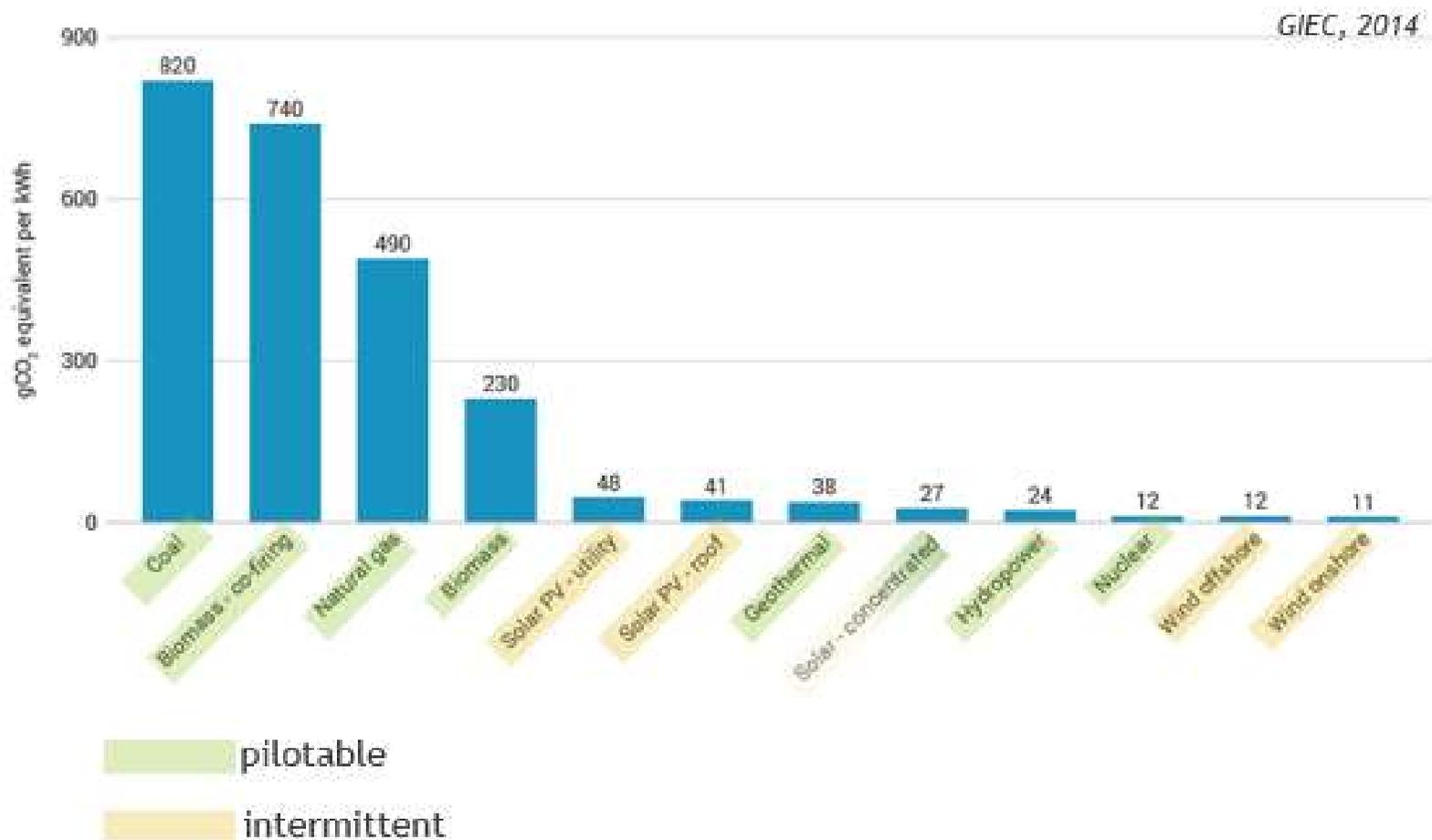
# Energie et changement climatique

## Intensité carbone des moyens de production d'électricité



# Energie et changement climatique

## Intensité carbone des moyens de production d'électricité



Moyen de production pilotables:

- Thermique (charbon, gaz, fioul, biomasse)
- Hydraulique
- Nucléaire

Moyens de production intermittents:

- Eolien
- Solaire

Réseau électrique : la production d'électricité doit suivre la demande à tout moment (inconvenient intermittent)



► **L'énergie nucléaire  
pour la production  
d'électricité**

# L'énergie nucléaire pour la production d'électricité

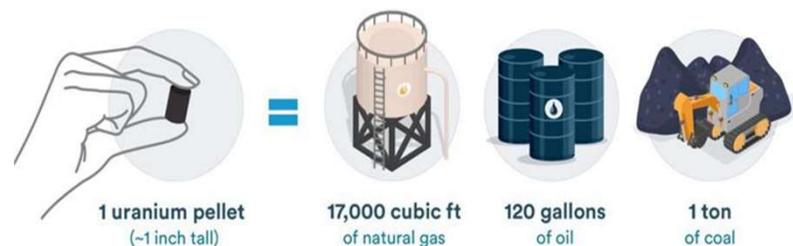
Il existe plusieurs type de réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité, tous sont basés sur la fission nucléaire pour le moment.

Chaque type de réacteur est défini par:

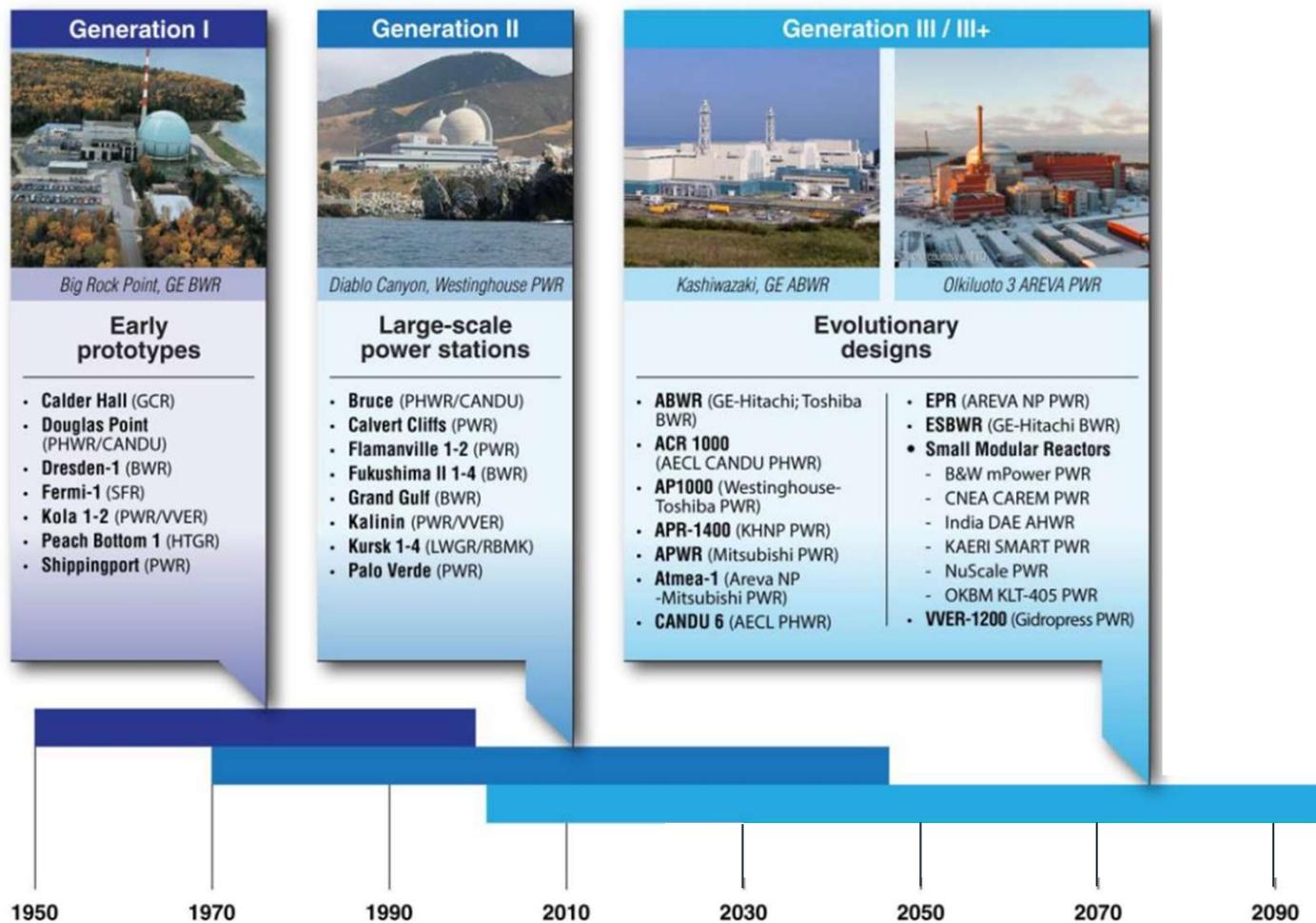
- Un combustible (uranium naturel, uranium enrichi, thorium, etc.) pour dégager de l'énergie
- Un modérateur (eau légère, eau lourde, graphite, pas de modérateur, etc.) pour ralentir les neutrons
- Un caloporteur (eau, un gaz, des sels fondus, du métal liquide, etc.) pour évacuer l'énergie dégagée par le combustible nucléaire



Il existe potentiellement des dizaines de types de réacteurs, mais la densité énergétique du combustible nucléaire reste très importante dans toutes les cas.



# Développement de la flotte nucléaire mondiale



# Situation mondiale du nucléaire

441 réacteurs en opération dans le monde représentant une capacité nette de production de 393.3 GWe et une production annuelle de 2,657 TWh (**10% de la production mondiale d'électricité**).

## CURRENT STATUS

441 NUCLEAR POWER REACTORS  
IN OPERATION

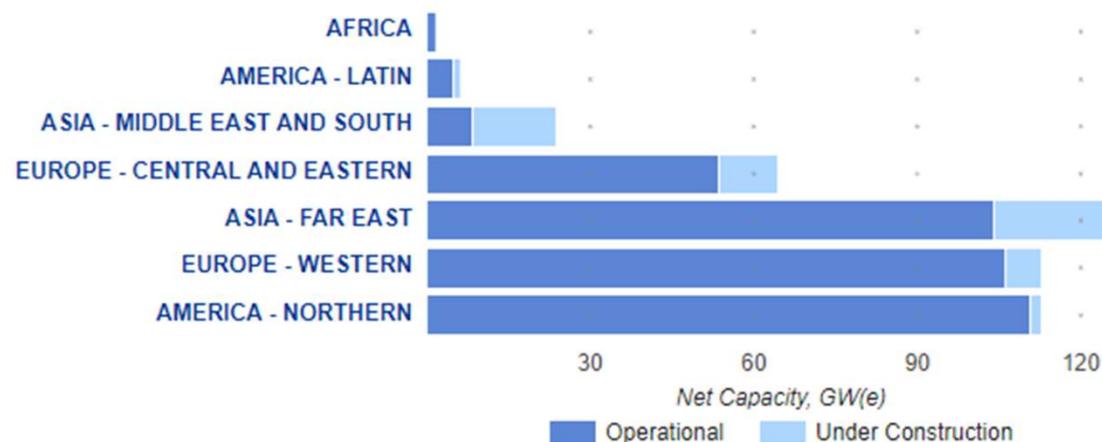
393 316 MWe TOTAL NET INSTALLED  
CAPACITY

51 NUCLEAR POWER REACTORS  
UNDER CONSTRUCTION

53 644 MWe TOTAL NET INSTALLED  
CAPACITY

19 262 REACTOR-YEARS OF  
OPERATION

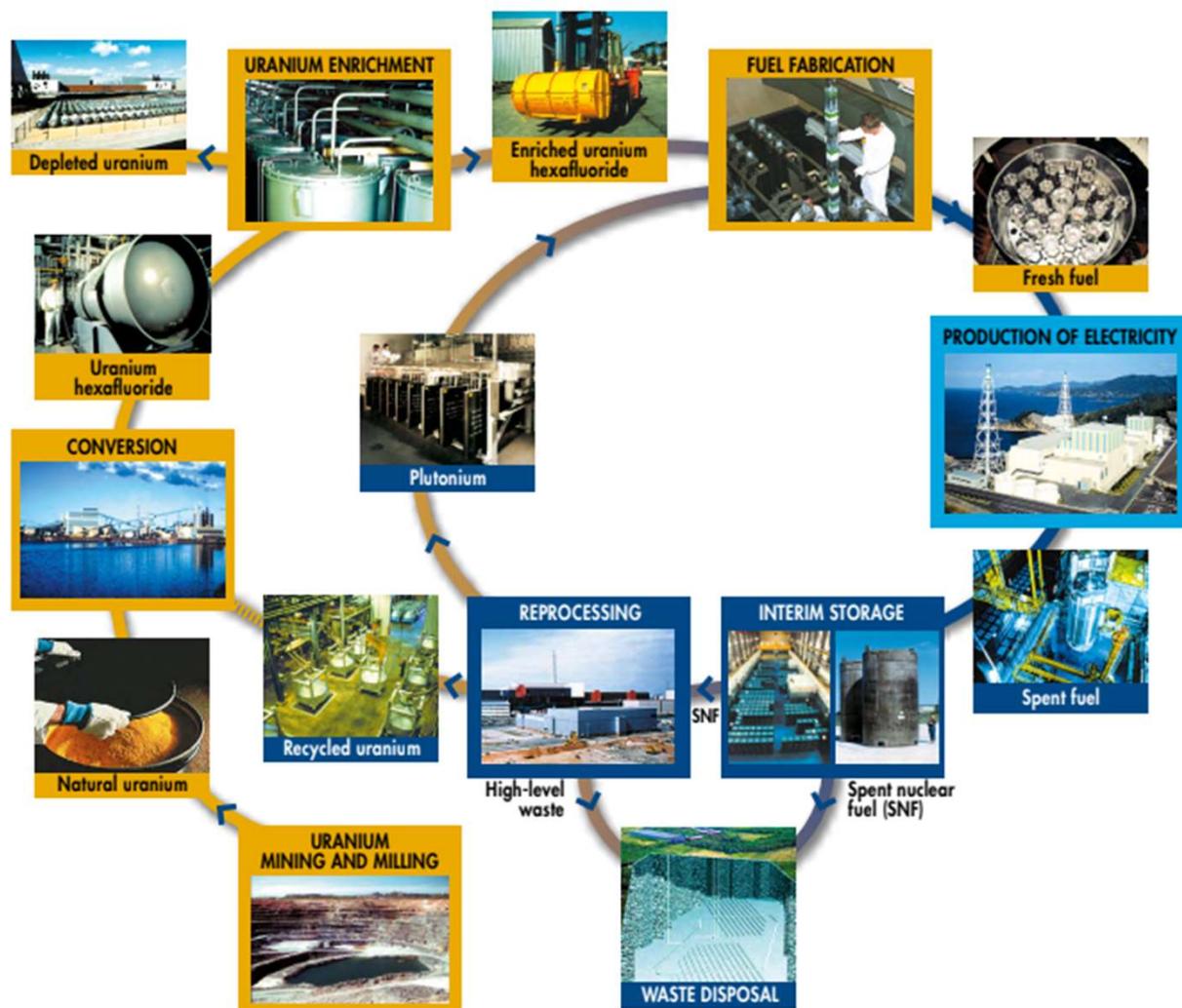
## REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



**70 milliards** de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées jusqu'en 2020 grâce au nucléaire.

# Cycle du combustible nucléaire

Figure 1.6: The nuclear fuel cycle

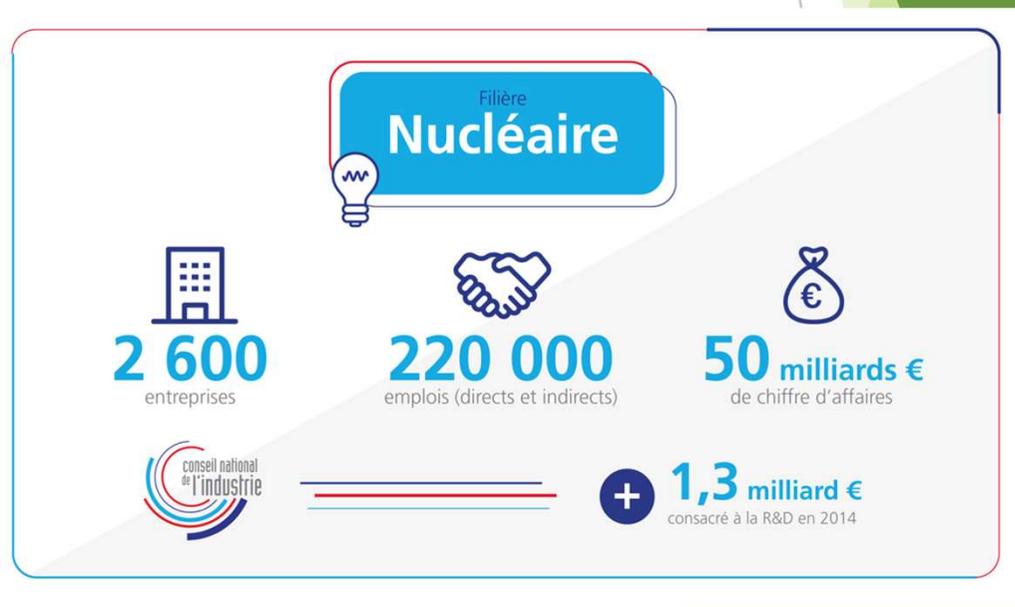


Combustibles utilisés dans les réacteurs à eau légère:

- UOx avec 3 à 4% de U-235
- MOx avec 5 à 10% de Pu

# Situation française

- 56 REP avec une capacité nette de production par unité de 900-1450 MWe (mis en service entre 1977-1999)
- 1 REP en construction (EPR Flamanville 3, 1650 MWe)
- Programme de nouveau nucléaire pour au moins 6 EPR2 (en attente de décision du gouvernement)
- Des installations couvrant l'ensemble du cycle 'fermé' du combustible
- 3eme filière industrielle après l'automobile et l'aéronautique.



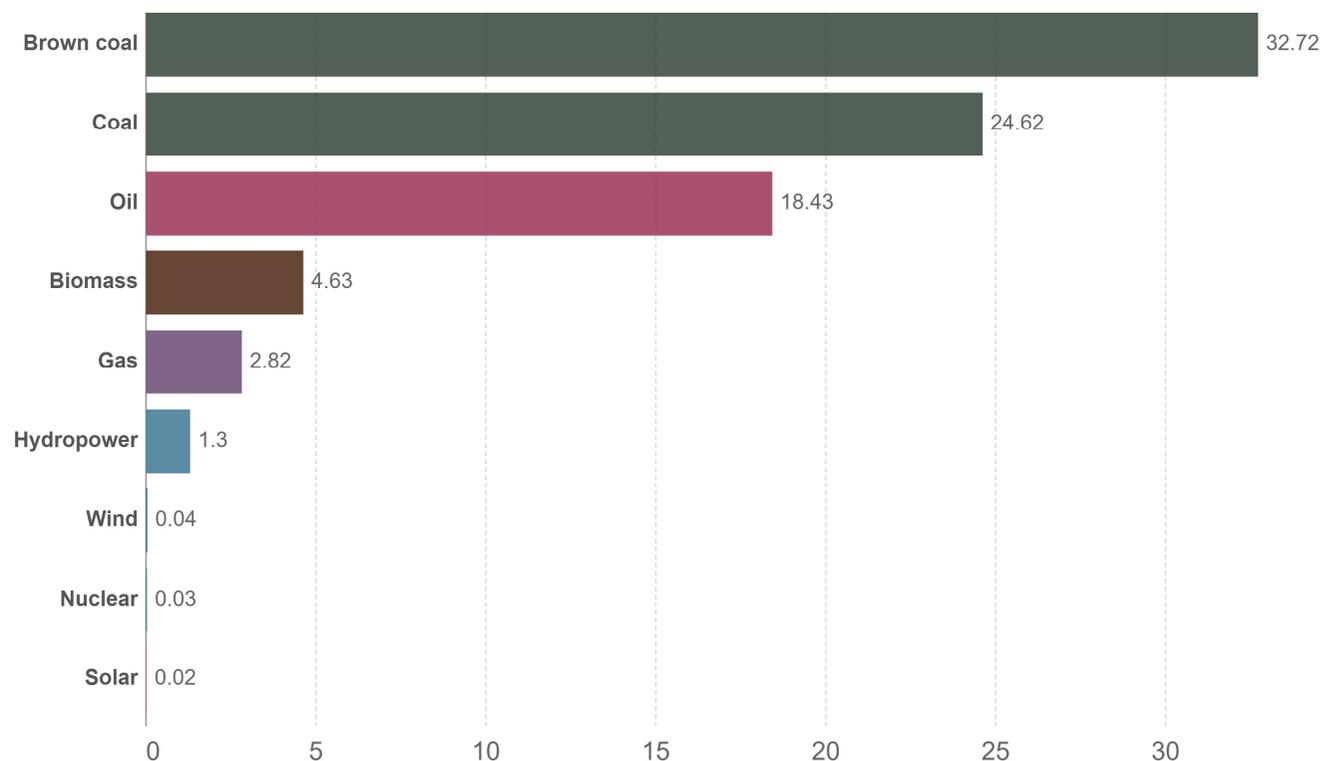
# Intérêt du nucléaire

## Faible mortalité

### Death rates per unit of electricity production

Death rates are measured based on deaths from accidents and air pollution per terawatt-hour (TWh) of electricity.

Our World  
in Data



Source: Markandya & Wilkinson (2007); Sovacool et al. (2016); UNSCEAR (2008; & 2018)

OurWorldInData.org/energy • CC BY

# Intérêt du nucléaire

## Faible occupation des sols

### Land use of energy sources per unit of electricity

Our World in Data

Land use is based on life-cycle assessment; this means it does not only account for the land of the energy plant itself but also land used for the mining of materials used for its construction, fuel inputs, decommissioning, and the handling of waste.



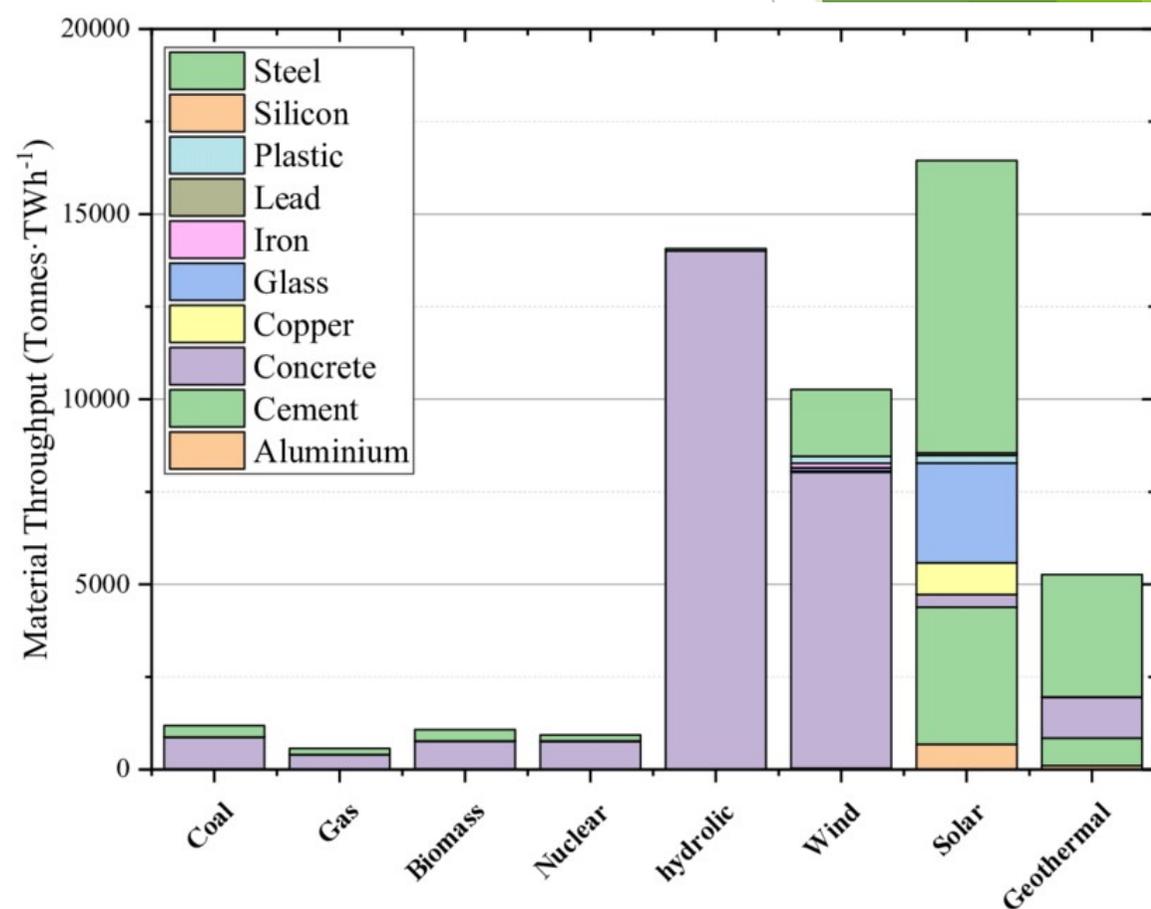
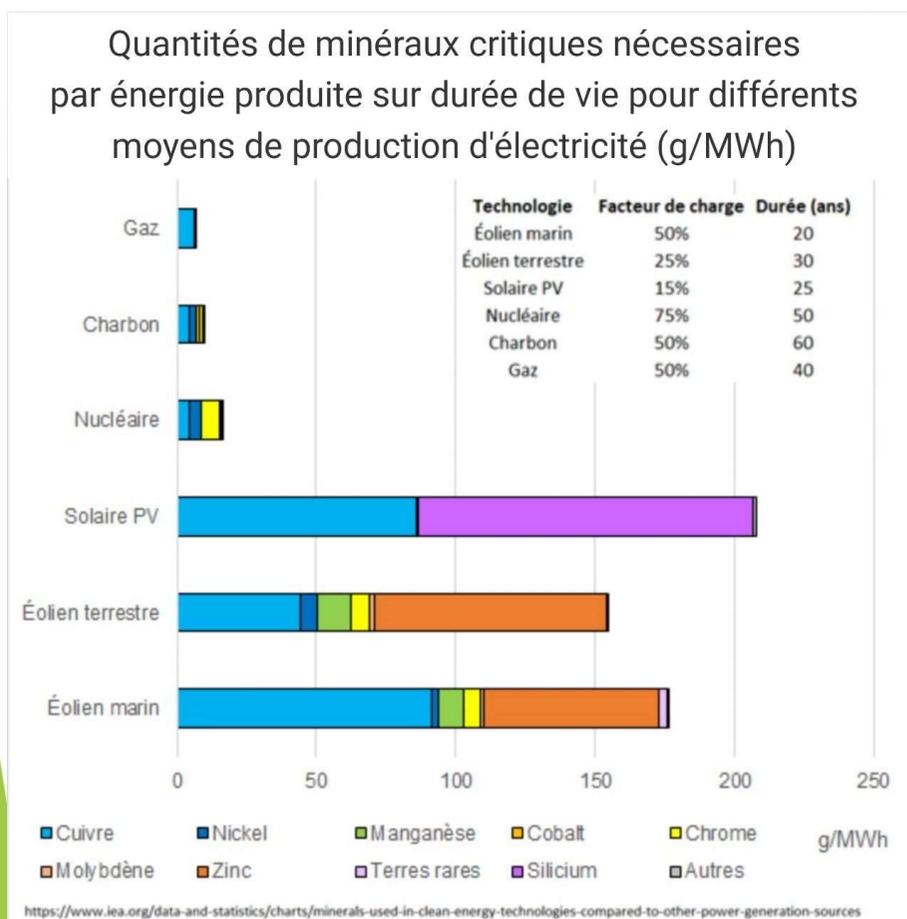
The land use of onshore wind can be measured in several ways, and is distinctly different from land use of other energy technologies. Land between wind turbines can be used for other purposes (such as farming), which is not the case for other energy sources. The spacing of other turbines, and the context of the site means land use is highly variable.



<sup>1000</sup> Capacity factors are taken into account for each technology which adjusts for intermittency. Land use of energy storage is not included since the quantity of storage depends on the composition of the electricity mix. Source: UNECE (2021). Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe for all data except wind. Wind land use calculated by the author. See [OurWorldinData.org/land-use-per-energy-source](https://OurWorldinData.org/land-use-per-energy-source) for more research on this topic. Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

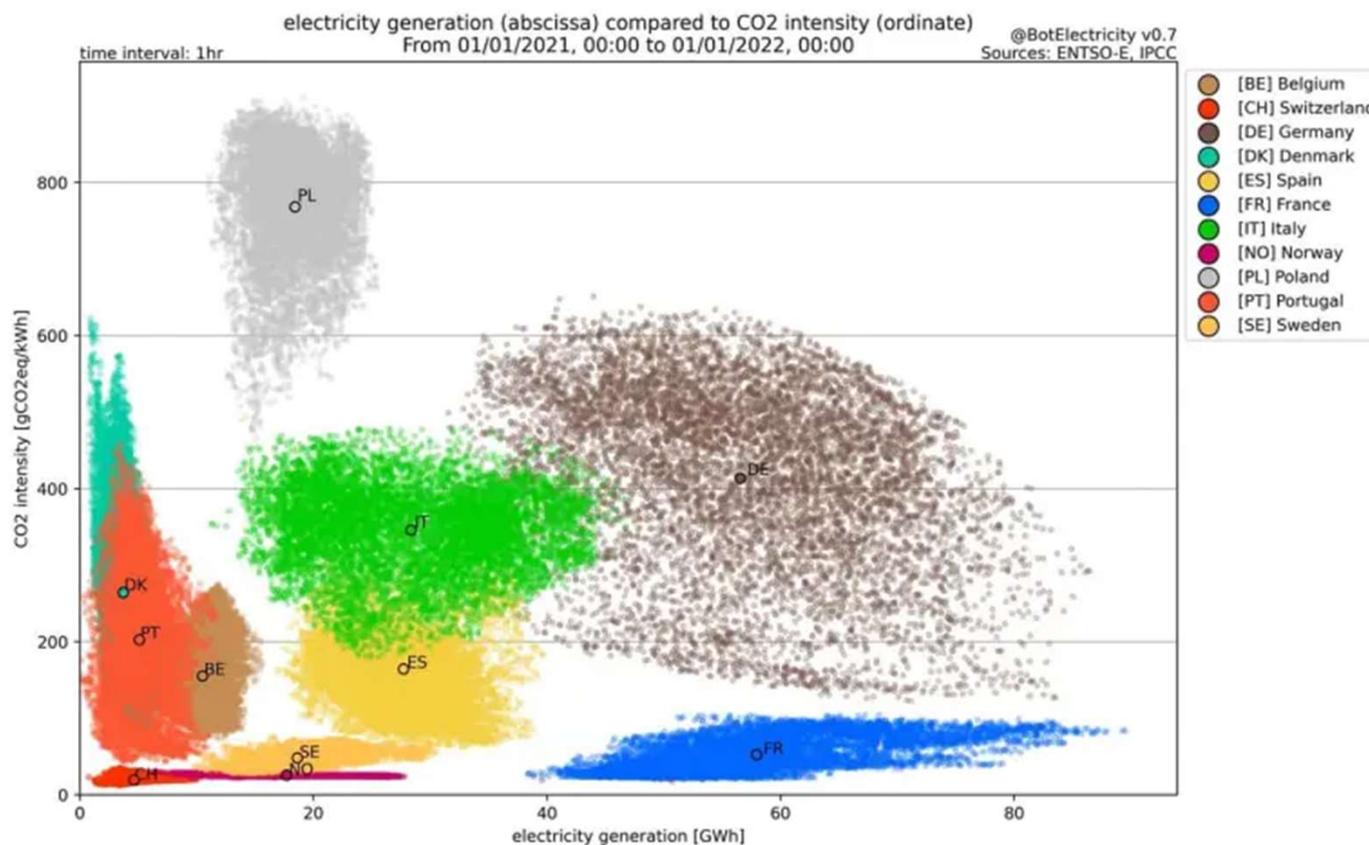
# Intérêt du nucléaire

## Faible empreinte matière



# Intérêt du nucléaire

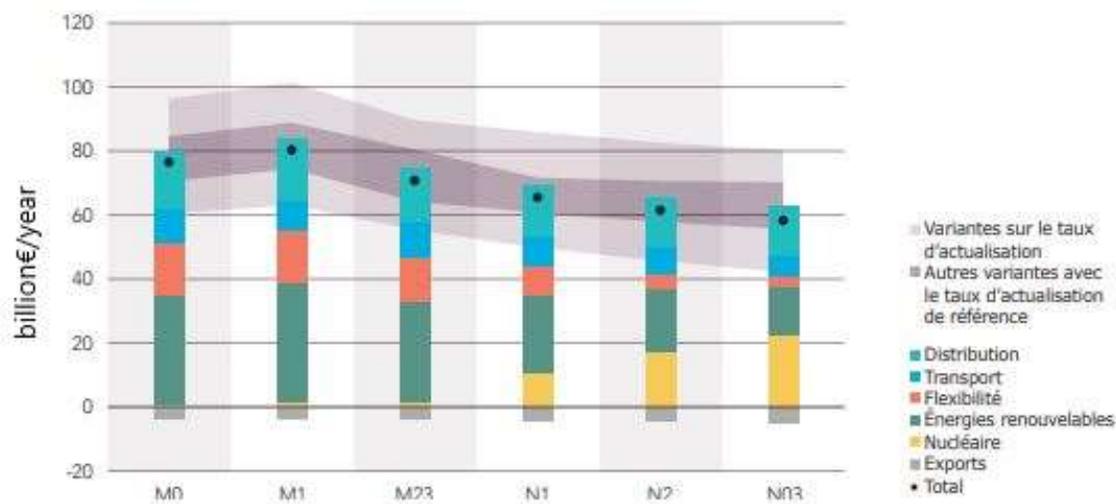
## Décarbonation des mix électriques



# Intérêt du nucléaire

## Coût complet du système électrique plus faible

**Figure 11.32** Annualised full cost of scenarios by 2060



M0: 100% VRE | M1: 87% VRE + 16% existing nuclear (GEN II) | M23: 87% VRE + 16% GEN II  
 N1: 74% VRE + 14% GEN II + 12% new nuclear (GEN III) | N2: 64% VRE + 14% GEN II + 22% GEN III  
 N03: 50% VRE + 23% GEN II + 27% GEN III

Common to all scenarios: 22 GW of Hydro + 8 GW of Pumped-storage hydroelectricity

FUTURS ÉNERGÉTIQUES 2050 | PRINCIPAUX RÉSULTATS | OCTOBRE 2021

Les ENRi sont souvent présentées avec un coût de production inférieurs aux autres moyens de production (LCOE: Levelized Cost Of Electricity).

Le LCOE ne reflète pas le coût de l'intégration des ENRi dans le système électrique (complexification du réseau électrique, flexibilité)

Il faut regarder le coût global d'un système électrique (cf. étude RTE 'Futurs Energétiques 2050').

# Gestion des déchets radioactifs

- Gestion très réglementée
- Obligation de classification et d'inventaire par tous les producteurs
- Gestion centralisée dans des centres de stockage par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs (ANDRA)

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

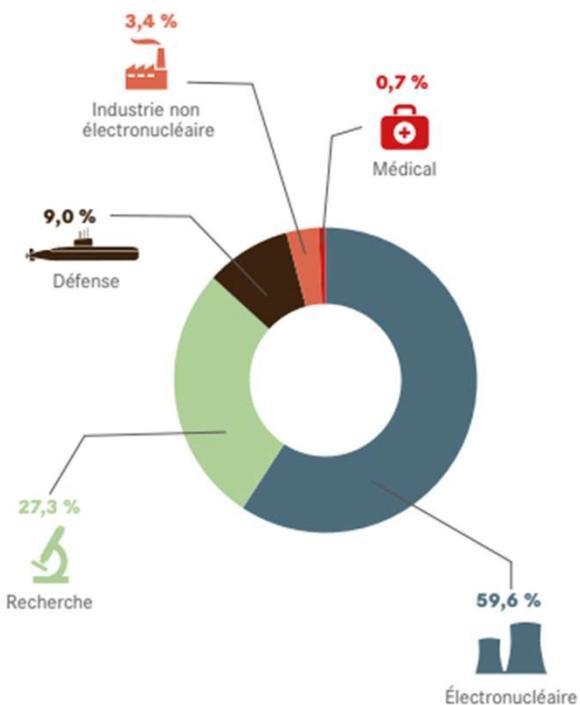


\* Période radioactive des éléments radioactifs (radionucléides) contenus dans les déchets.  
 \*\* Niveau d'activité des déchets radioactifs

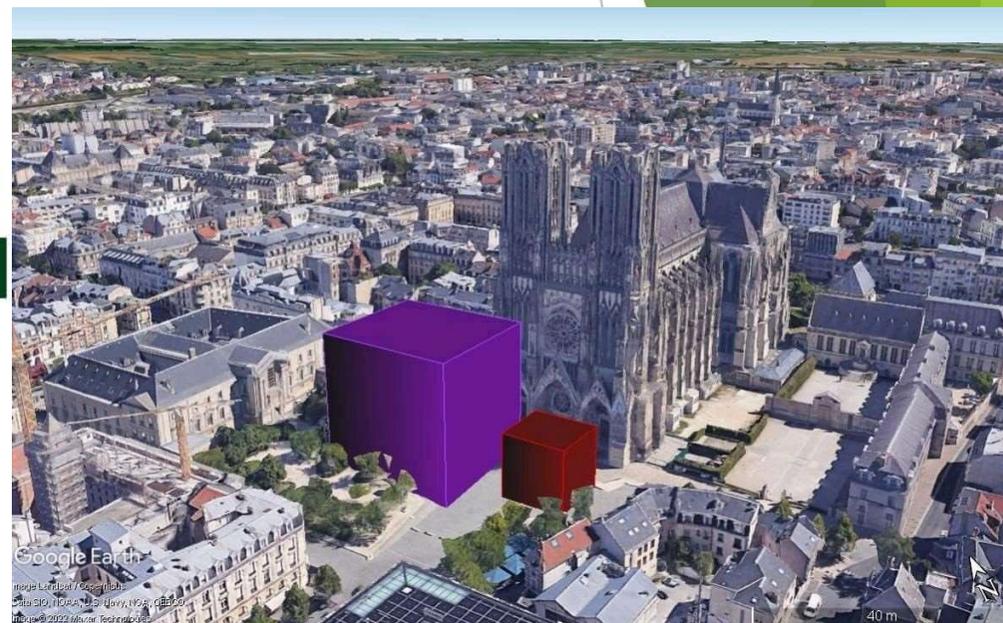
# Gestion des déchets radioactifs

- Origine et quantités de déchets

► RÉPARTITION PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE DU VOLUME DE DÉCHETS (EN ÉQUIVALENT CONDITIONNÉ) DÉJÀ STOCKÉS OU DESTINÉS À ÊTRE PRIS EN CHARGE PAR L'ANDRA À FIN 2018



La répartition des volumes et niveaux de radioactivité présentée ci-dessous est issue de l'édition 2018 de l'Inventaire national (sur la base des chiffres à fin 2016) :

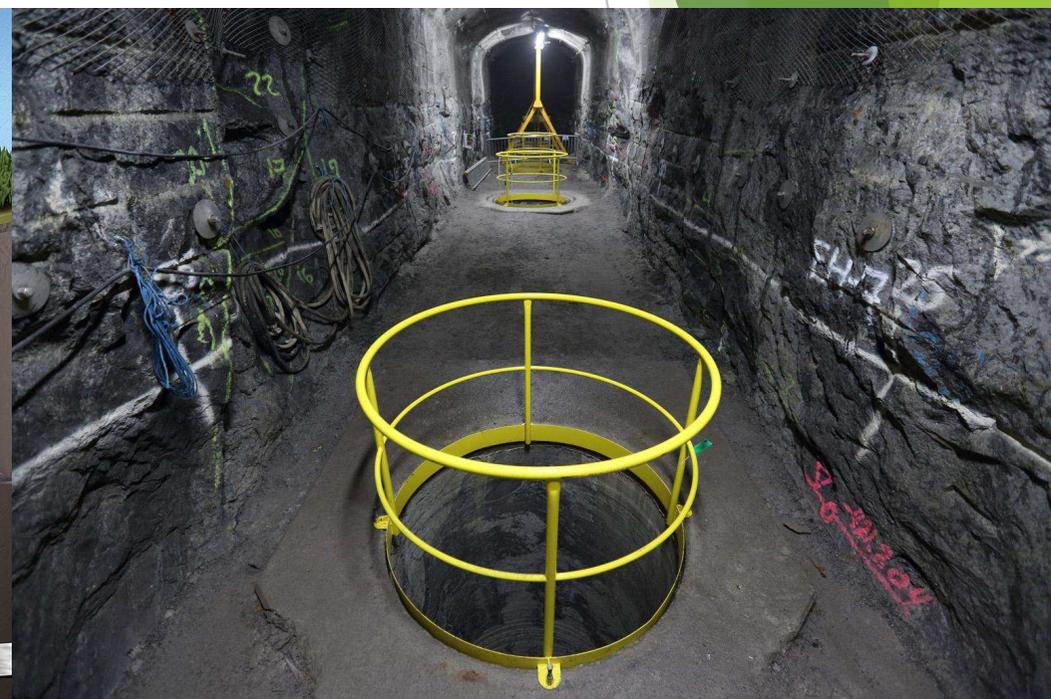
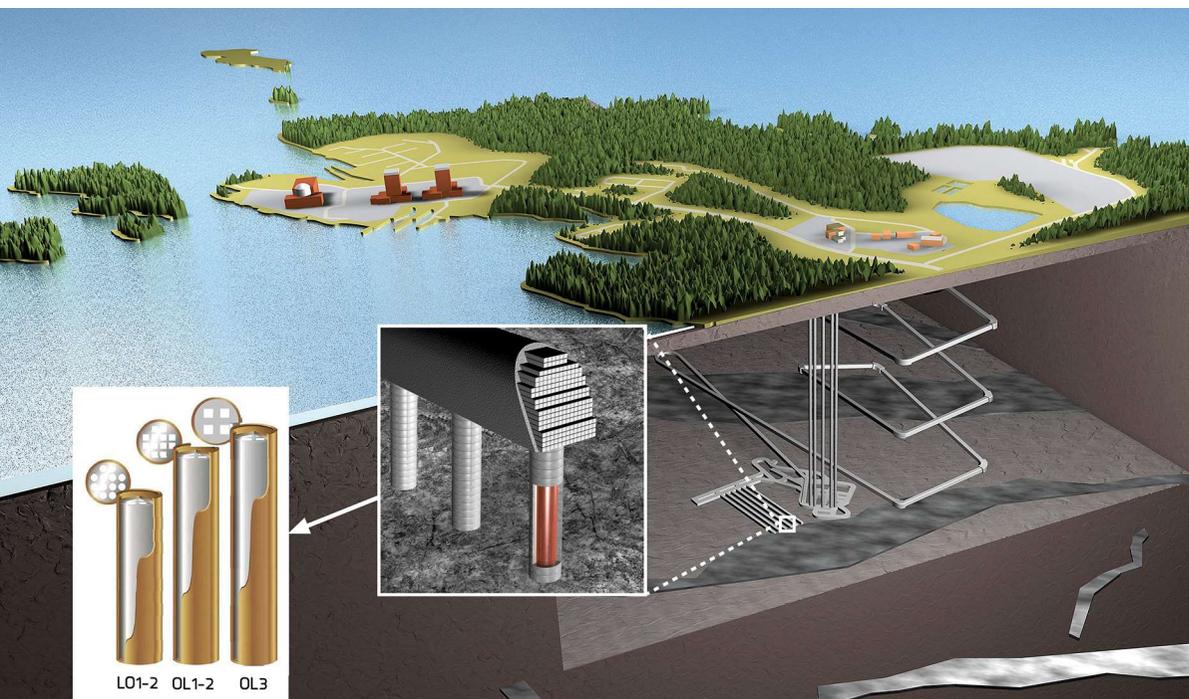


Tous les déchets HA-VL générés en France jusqu'en 2018 représentent un cube de 15m de côté (cube rouge), pour les déchets MA-VL il s'agit d'un cube de 35m de côté (cube violet foncé).

# Gestion des déchets radioactifs

Un consensus international pour les déchets MA/HA-VL: le stockage géologique en couche profonde

- Projet Onkalo en Finlande (granite), mise en opération en 2025.



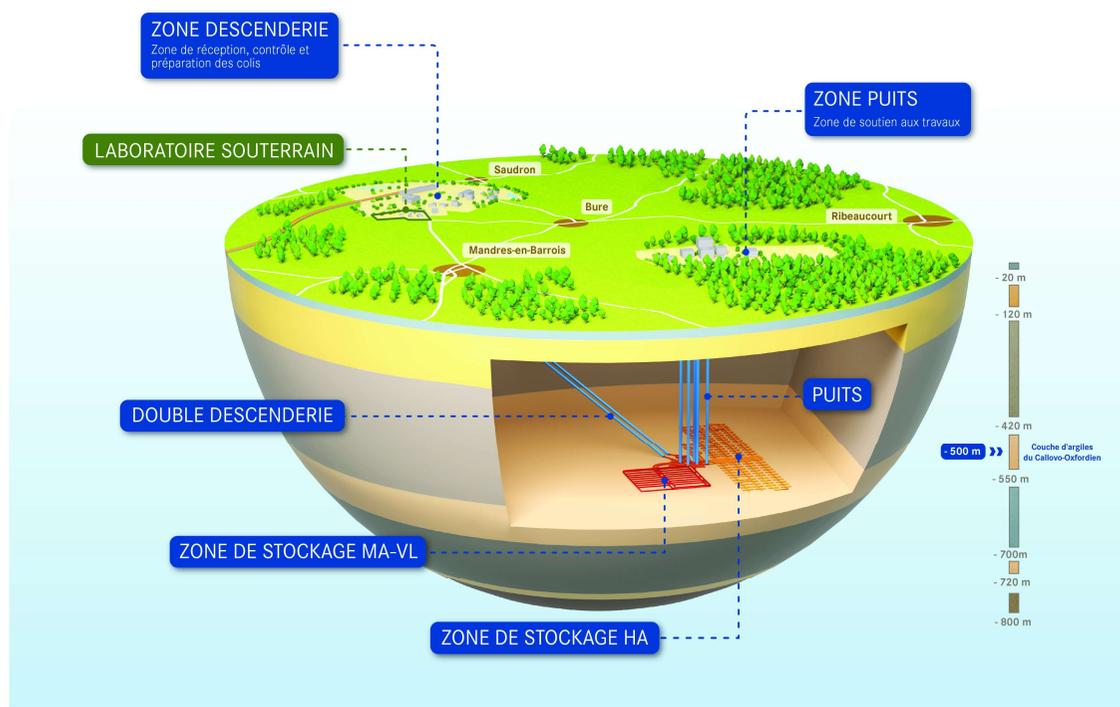
Projet a Forsmark en Suède (granite), mise en opération entre 2030 et 2035.

# Gestion des déchets radioactifs

Un consensus international pour les déchets MA/HA-VL: le stockage géologique en couche profonde

- Projet Cigéo en France (argile), mise en opération en 2035.

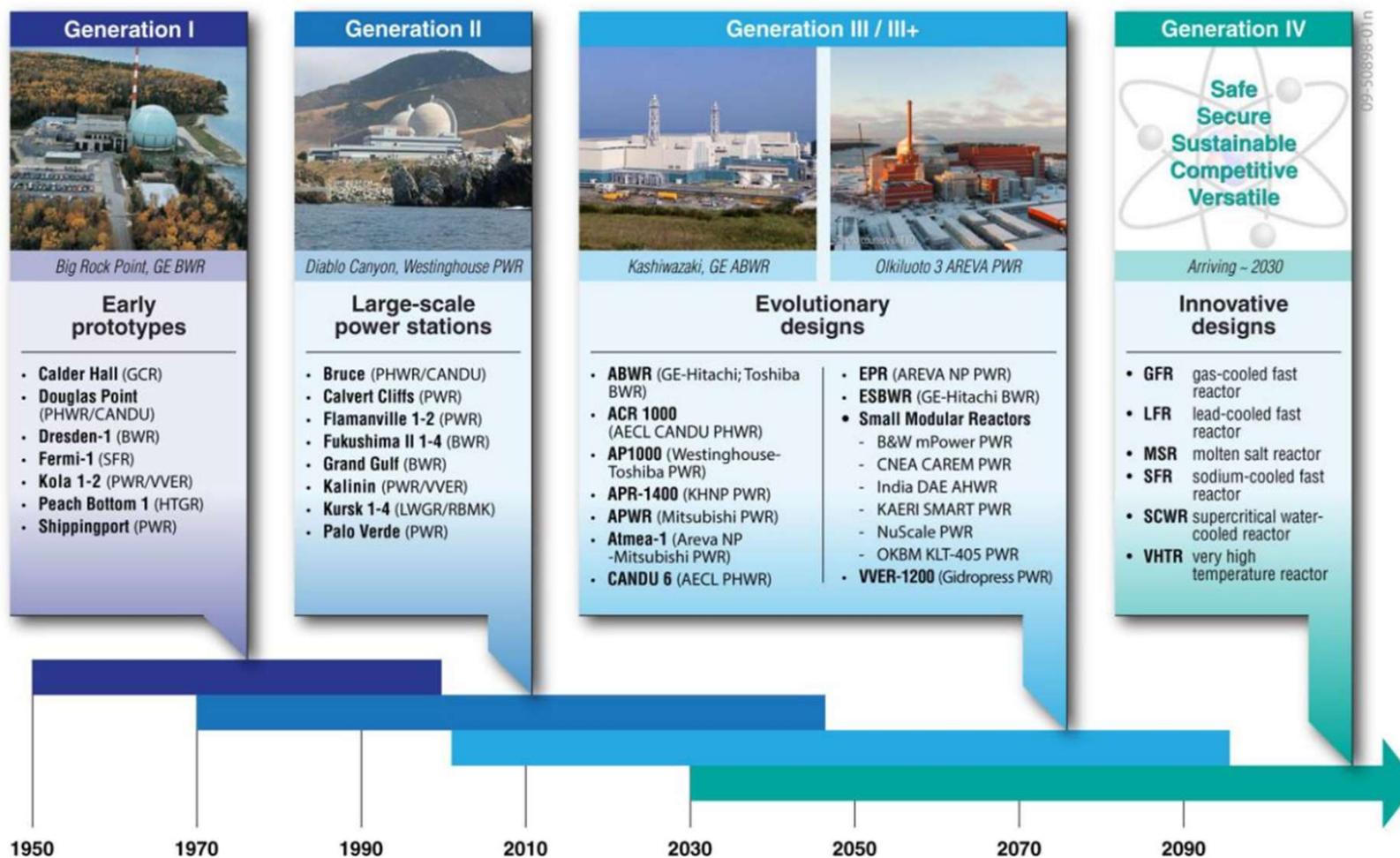
## LE PROJET DE STOCKAGE CIGÉO



► Perspectives pour  
l'énergie nucléaire

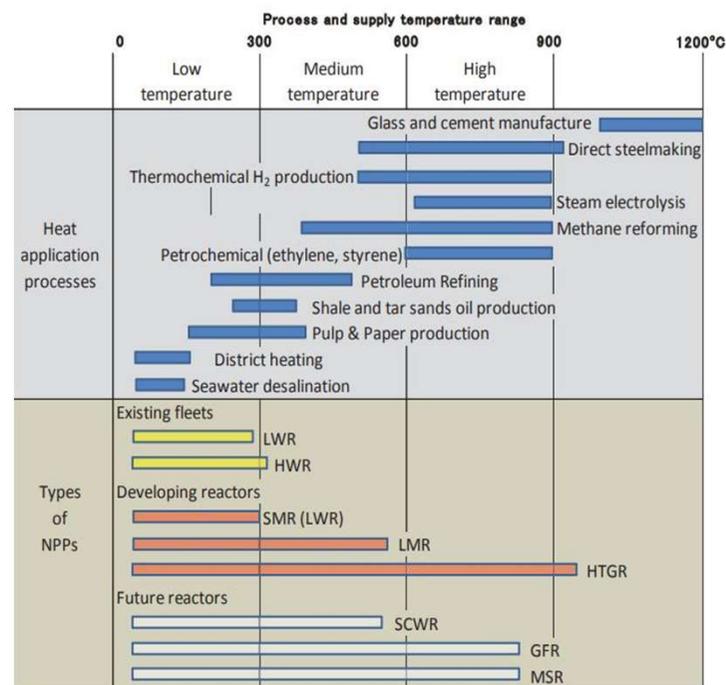
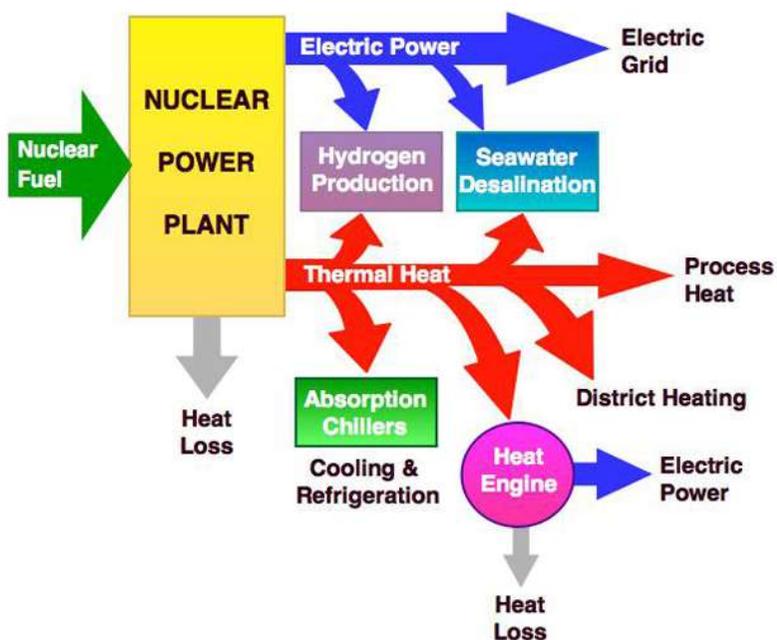


# Perspectives pour l'énergie nucléaire



# Réacteurs avancés

- Amélioration de la sûreté et de la fiabilité (ex. suppression du risque d'accident grave)
- Minimisation de la production de déchets
- Co-génération (actuellement 54 réacteurs utilisés pour DH, 29 pour PH et 9 pour SD)



Note: GFR — gas cooled fast reactor; HTGR — high temperature gas reactor; HWR — heavy water reactor; LMR — liquid metal reactor; LWR — light water reactor; MSR — molten salt reactor; NPP — nuclear power plant; SCWR — supercritical water reactor; SMR — small modular reactor.

FIG. 7. Temperature ranges of heat application processes and types of nuclear power plant.

# Small Modular Reactors

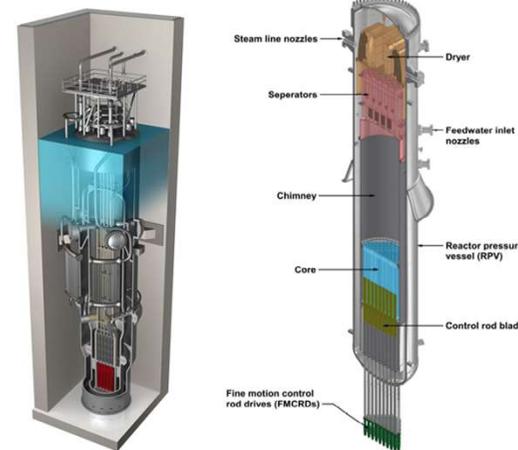
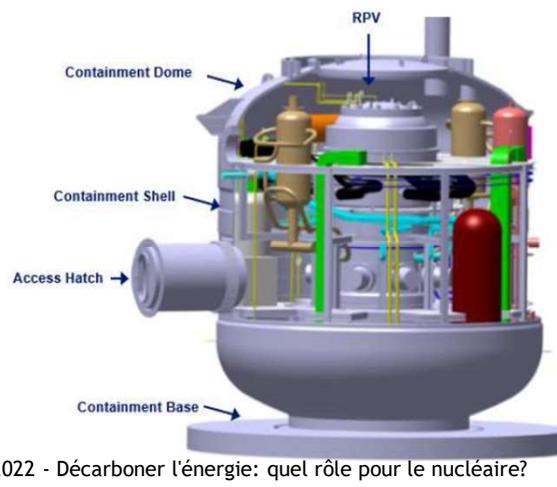
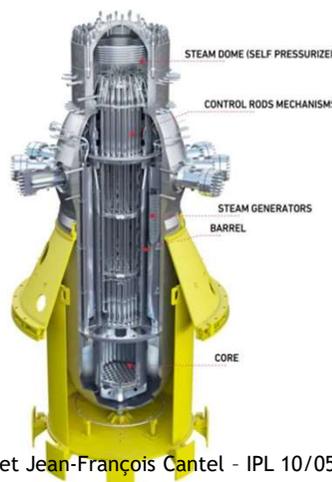
Les SMRs ont une puissance comprise entre 10 MWe and 300 Mwe.

Ils présentent un haut niveau de simplification, de modularisation, de standardisation et de construction en usine dans leur conception afin de maximiser l'avantage économique d'une production en série.

Les différents modules sont transportés et assemblés sur site avec des délais plus court ce qui fiabilise le planning de construction et favorise un retour sur investissement plus rapide.



*CAREM25 construction site*



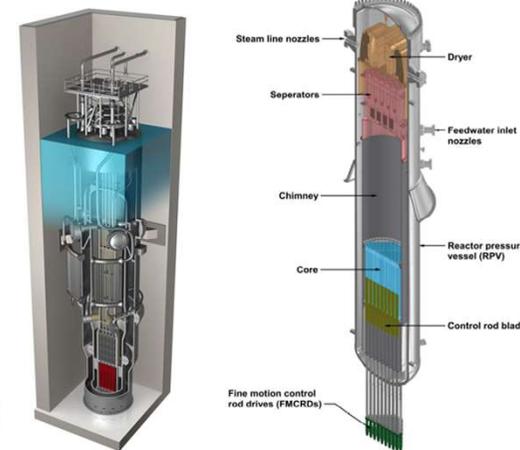
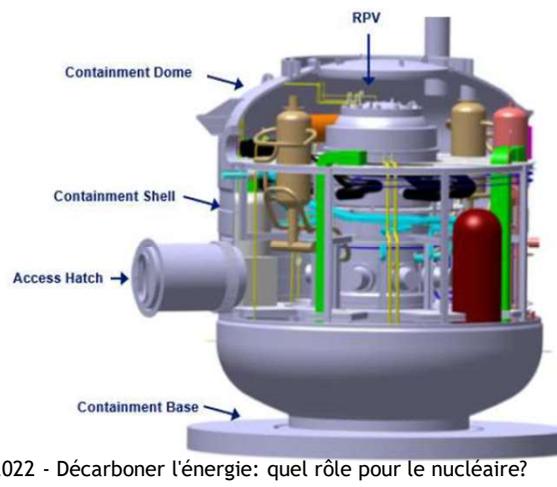
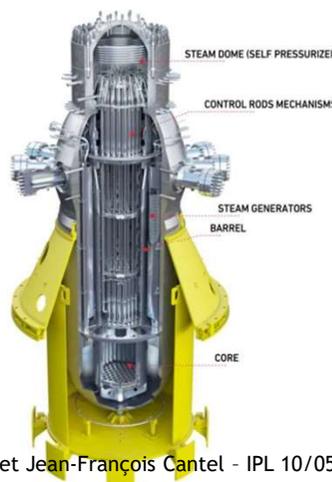
# Small Modular Reactors

SMR : Fort intérêt a travers le monde, 32 concepts référencé en 2012 contre 83 en 2022.

- Concepts par pays: USA 20, Russie 15, Chine 10, Japon 7, Canada 5, UK 5, Afrique du Sud 4, Corée du sud 4, France 6.
- Situation des 83 concepts: 4 en exploitation, 3 en construction, les autres sont a des stades plus ou moins avancés de conception.



*CAREM25 construction site*

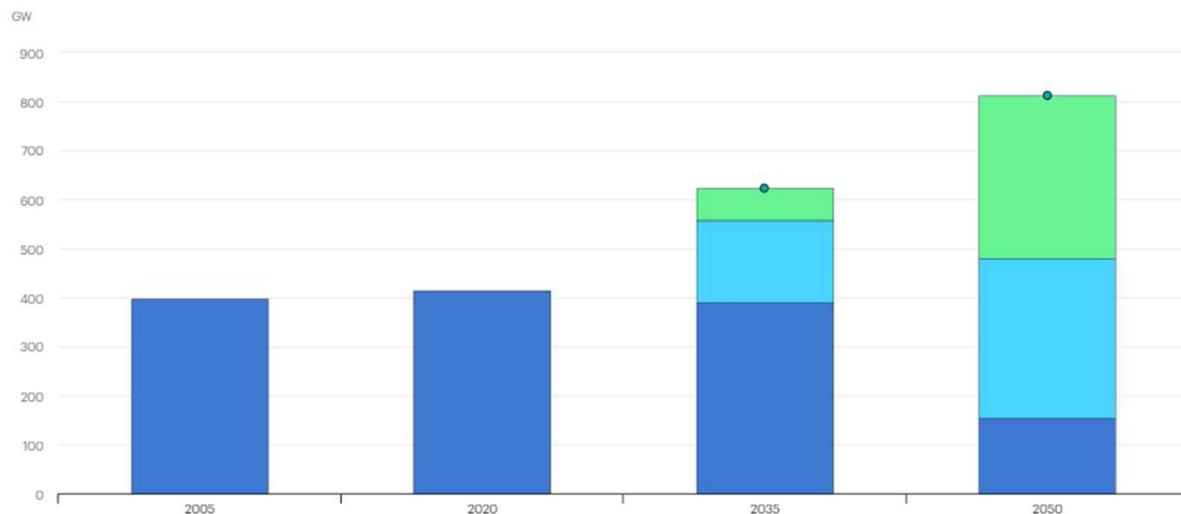


# Conclusion

# Projection de la capacité électronucléaire mondiale

## Global nuclear power capacity in the Net Zero Scenario, 2005-2050

Last updated 3 Nov 2021



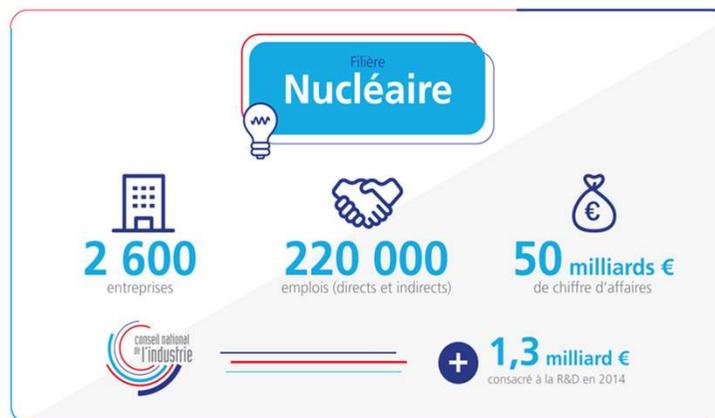
IEA. All Rights Reserved

● Existing nuclear fleet (operations to 60 years for most reactors) ● Planned construction ● Gap to Net Zero Scenario ● Net Zero Scenario

L'Agence Internationale de l'Énergie prévoit un doublement de la capacité électronucléaire mondiale d'ici 2050 afin d'atteindre la neutralité carbone.

# Carrière dans l'énergie nucléaire

Grande variété de postes pour des jeunes diplômés en France.

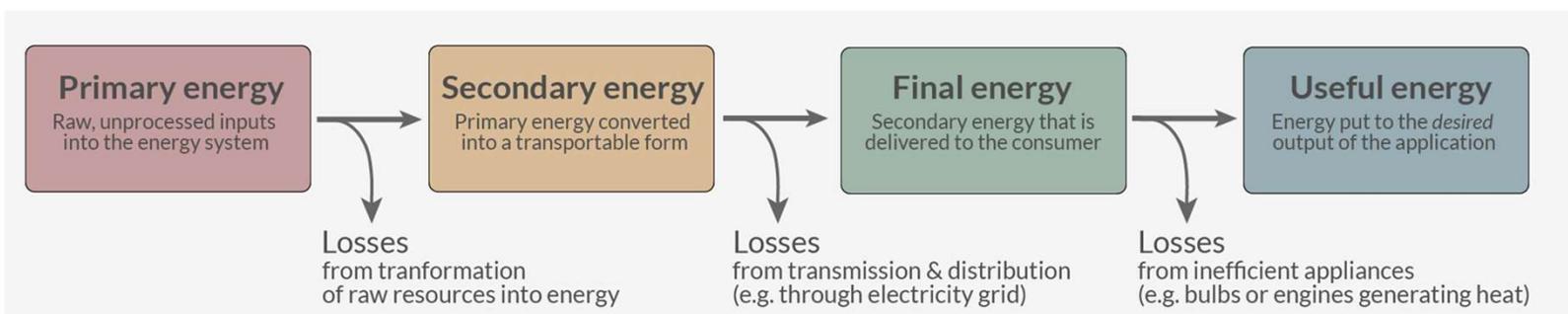


Acteurs majeurs: EDF, Framatome, Orano et toutes les entreprises du GIFEN, ANDRA, ASN, IRSN. CEA et CNRS pour la recherche.

- Recherche et développement: chercheur (centres de R&D des entreprises, CEA, CNRS)
- Ingénierie: ingénieur d'études, ingénieur projet, ingénieur achats, ingénieur sûreté, inspecteur des fabrications
- Construction: ingénieur chargé de surveillance, ingénieur essais de mise en service
- Production: ingénieur conduite installations ou maintenance, manager d'équipe

# A vos questions!

# The four ways of measuring energy



## Example: Coal to power a lightbulb



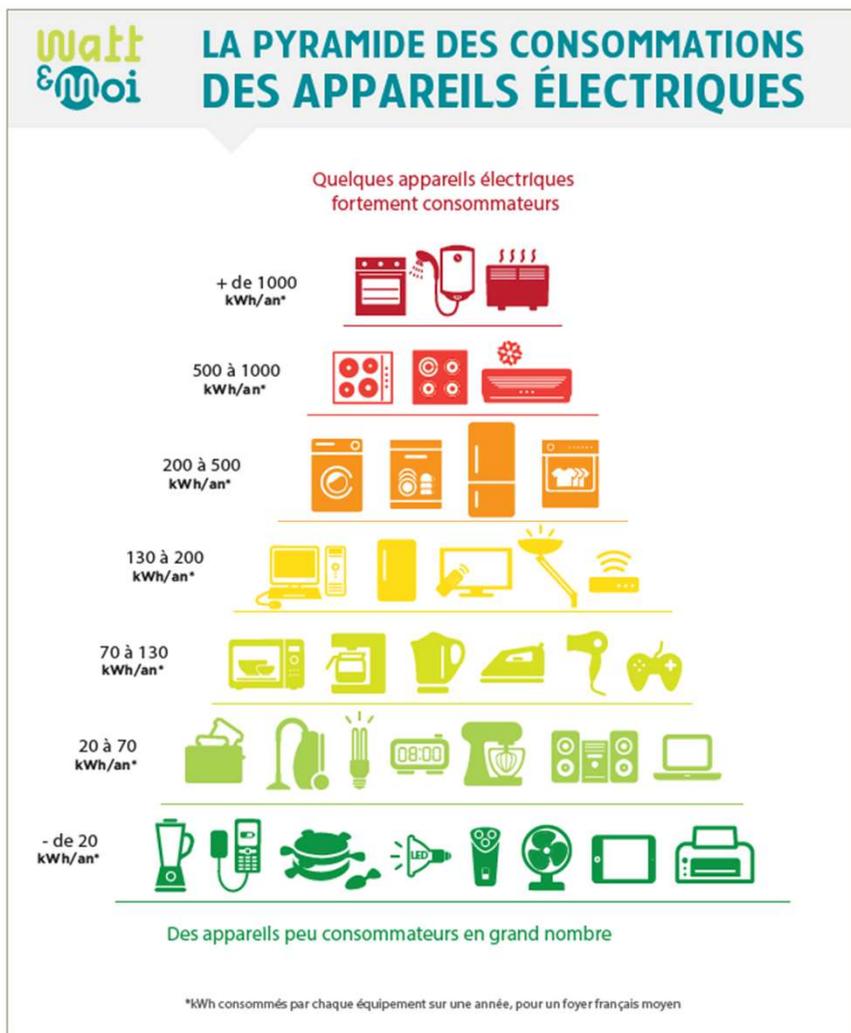
## Example: Wood to provide heat



## Example: Oil to drive a car



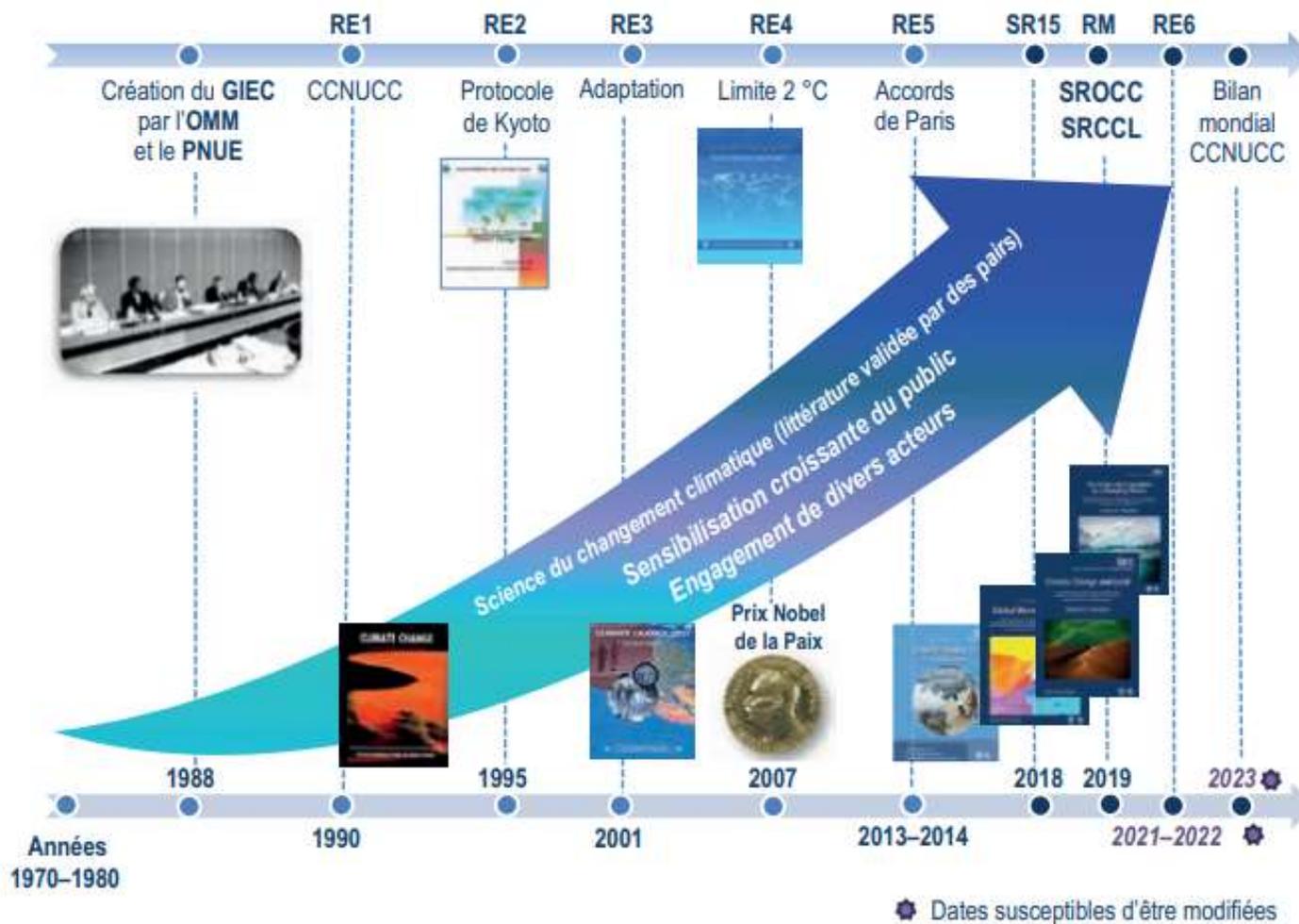
## Ordre de grandeur de consommations électriques



## Que peut-on faire avec 1 kWh ?

	Appareil	Temps de fonctionnement
	Réfrigérateur A+	5 h 42 mn
	TV LCD	8 h 20 mn
	Téléphone portable	50 cycles de recharge
	Machine à laver A+	30 mn
	Ampoule LED	143 h
	Four micro-ondes	60 mn
	Chauffage (2 radiateurs)	20 mn
	Aspirateur	1 h 15 mn
	Renault électrique Zoé	8,5 km

# GIEC



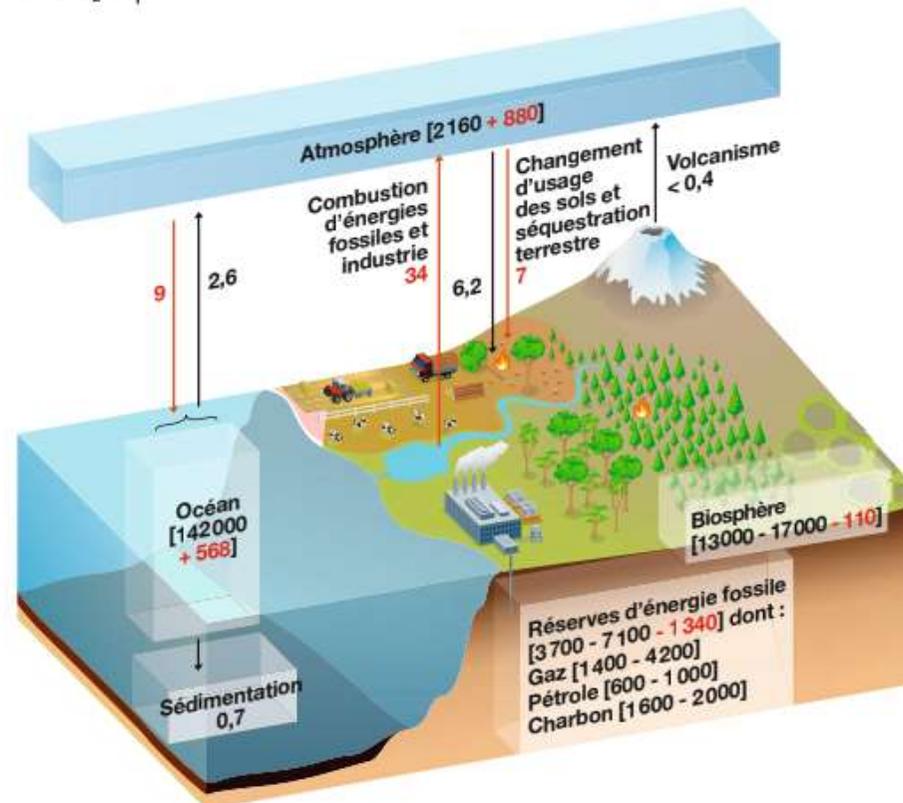
[2020-AC6\\_fr.pdf \(ipcc.ch\)](https://www.ipcc.ch/2020-AC6_fr.pdf)

# Réservoirs et flux de GES

## RÉSERVOIRS ET FLUX DE GES : EXEMPLE DU CO<sub>2</sub> AU COURS DES ANNÉES 2010-2019

Flux en Gt CO<sub>2</sub> éq/an

Stocks en Gt CO<sub>2</sub> éq



Note : ce graphique présente : (i) entre crochets, la taille des réservoirs aux temps préindustriels en milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> en noir et leur variation sur la période 1750-2011 en rouge ; (ii) sous forme de flèches, les flux de carbone entre les réservoirs en milliards de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an (voir glossaire). Les flux préindustriels sont en noir. Ceux qui sont liés aux activités anthropiques entre 2010 et 2019 sont en rouge.

Sources : d'après Giec, 1<sup>er</sup> groupe de travail, 2013 et The Global Carbon Project, Global Carbon Budget, 2020