



la martinière: diderot:

L'énergie nucléaire : une solution face aux crises climatique, environnementale, énergétique ?

Thierry CAILLON



SOMMAIRE

01 - Le contexte climatique :

- le réchauffement climatique, c'est quoi ?
- quelles causes ?
- quels moyens d'action ?

02 - L'énergie nucléaire :

- comment ça marche ?
- est-ce bon pour le climat ?
- est-ce écologique ?
- est-ce compétitif ?
- est-ce un outil efficace d'indépendance ?

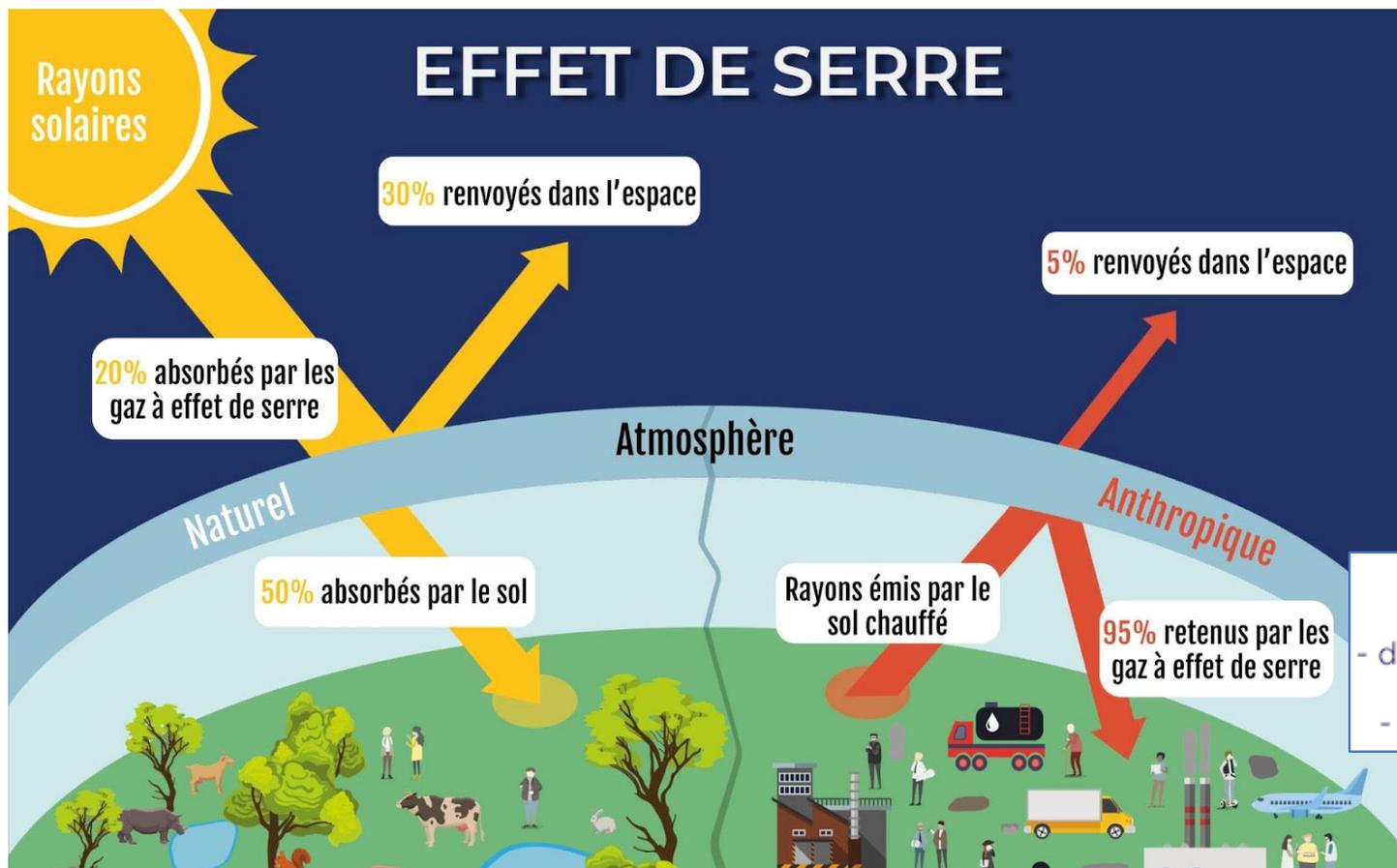


01

Le réchauffement climatique :

- quelles causes ?**
- quels moyens d'action ?**

1.1 L'EFFET DE SERRE, C'EST QUOI ?



Principaux gaz à effet de serre :

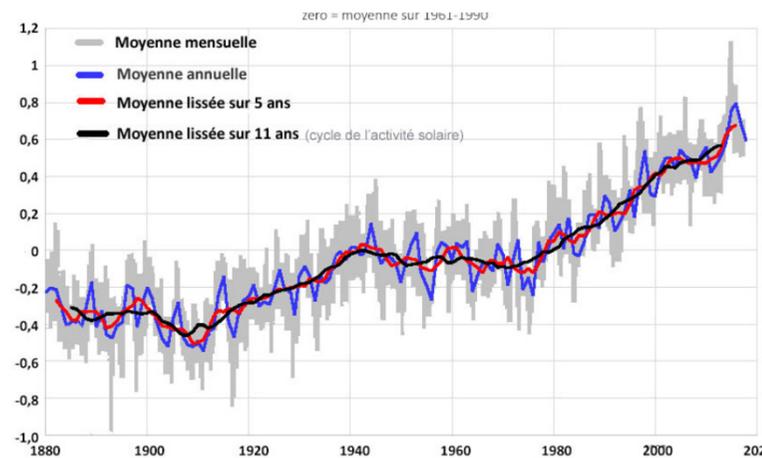
- dioxyde de carbone (CO_2)
- méthane (CH_4)
- protoxyde d'azote (N_2O)



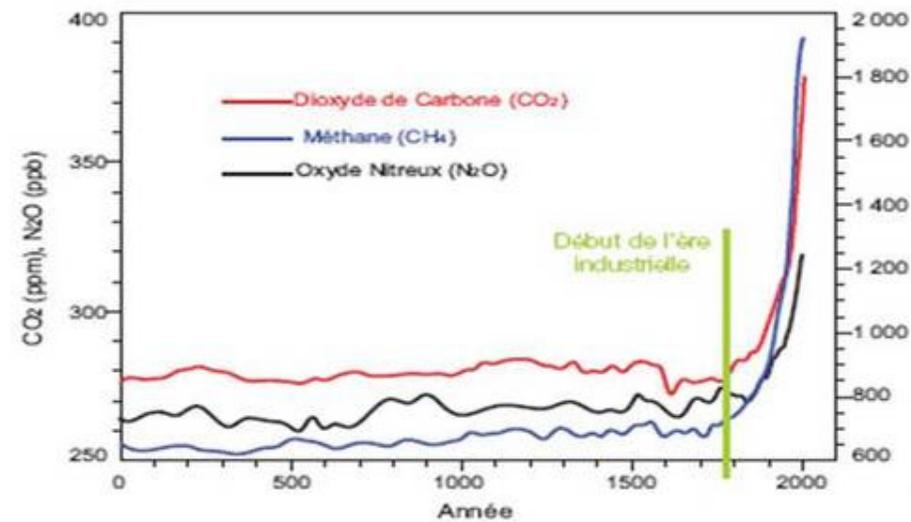
1.2 LES ÉMISSIONS DE GES, EST-CE UN PROBLÈME ?



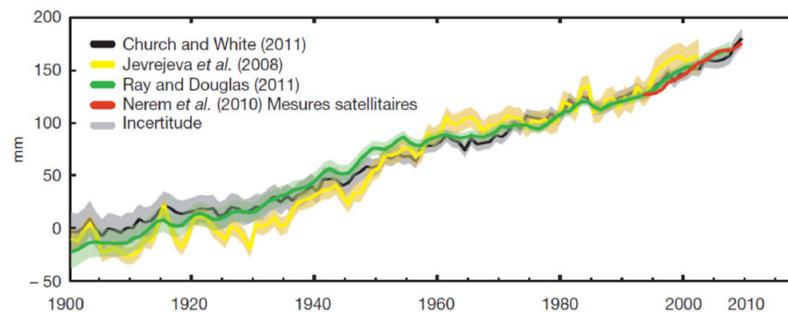
Evolution de la température moy. globale de 1800 à 2018 (GIEC, 2014)



Evolution des concentrations des GES (GIEC, 2007)

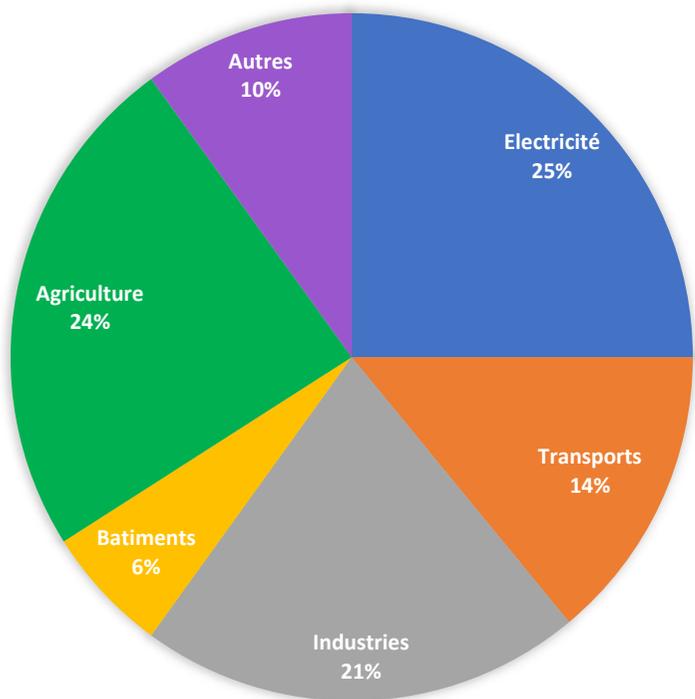


Evolution du niveau moyen des mers, par rapport à la période 1900-1905 (GIEC, 2013)

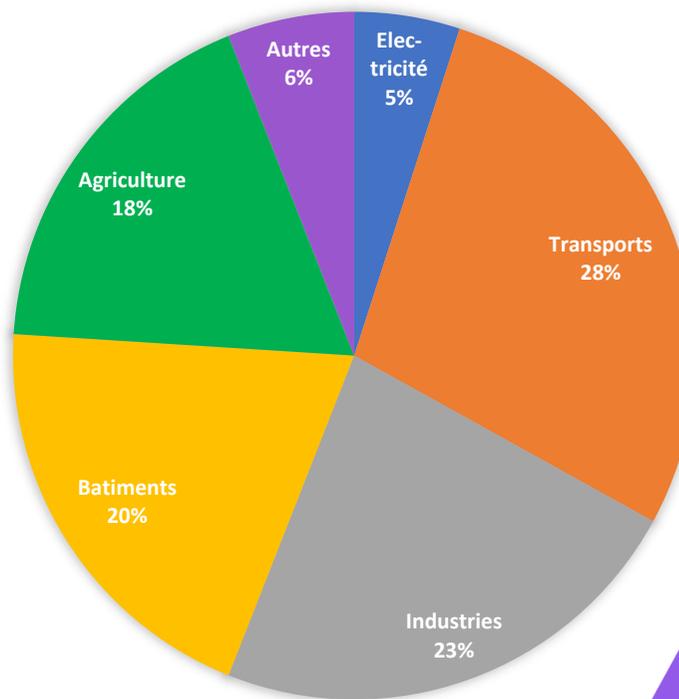


1.3 QUELS SONT LES SECTEURS LES PLUS EMETTEURS DE GES ?

Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur économique (GIEC, 2014)

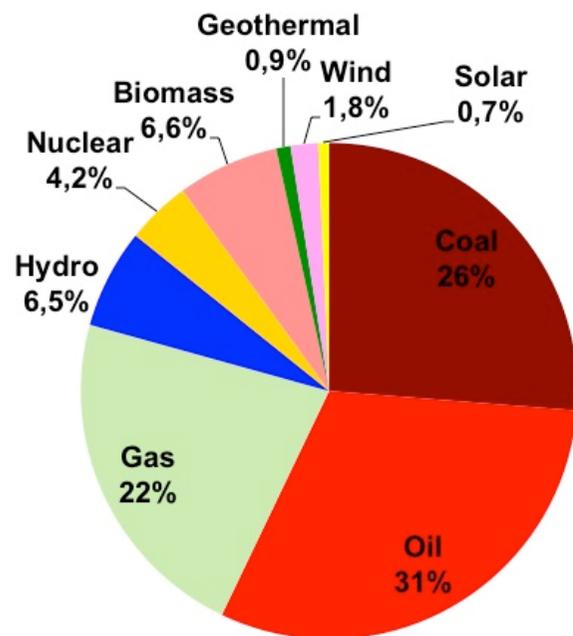


Émissions françaises de gaz à effet de serre par secteur économique (CITEPA, 2014)



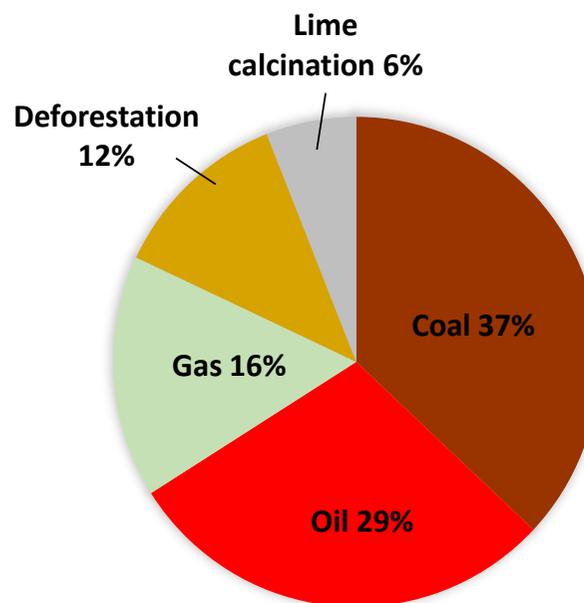
1.4 QUEL EST LE ROLE DE L'ÉNERGIE DANS LES ÉMISSIONS DE GES ?

Consommation mondiale d'énergie primaire
(BP Statistical Review, 2017)



79% de la consommation d'énergie primaire provient de sources fossiles
(pétrole, charbon, et gaz)

Origine des émissions mondiales de CO2
(BP Statistical Review, 2017)



82% des émissions de CO2 proviennent de l'utilisation des énergies fossiles
(pour utilisation ensuite dans différents secteurs :
électricité, industrie, transport, bâtiment, chauffage)



1.5 PEUX T-ON ENCORE AGIR POUR LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

Selon les scientifiques du GIEC, il est encore possible de limiter le réchauffement climatique à + 1,5 °C ou + 2°C ...

Pour cela, il faudrait réduire de moitié la production de GES d'ici 2030. Et ensuite il faudrait continuer les efforts, sur le même rythme, pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050...

En prenons nous le chemin ? Pas vraiment, car depuis le 1^{er} rapport du GIEC en 1990 les émissions mondiales de GES n'ont cessé d'augmenter, y compris en 2021 !

Cela dit, des moyens d'actions existent, et chaque dixième de degré gagné atténuera les effets du réchauffement climatique. Ces leviers, complémentaires les uns des autres, sont au nombre de 4 :

Développer toutes les énergies bas carbone

Intensifier l'efficacité énergétique

Electrifier massivement les usages

Promouvoir en engageant la sobriété



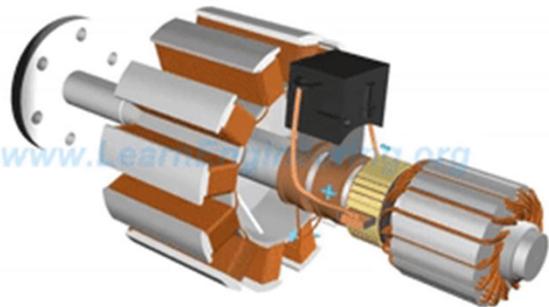
02

L'énergie nucléaire :

- comment ça marche ?
- bon pour le climat ?
- écologique ?
- compétitif ?
- outil d'indépendance ?

2.1 COMMENT PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ ?

Dans la plupart des sources de production d'électricité, on utilise la force de rotation pour faire tourner un alternateur, qui lui va ainsi produire de l'électricité.



Mais un alternateur, comment ça fonctionne ?



Il y a 2 moyens utilisés pour faire tourner l'alternateur :

1°) Directement la force mécanique de rotation, obtenue par exemple par :

- la force du **vent** pour les **éoliennes**,
- La force de l'**eau** dans les **barrages hydroélectriques**.

2°) Ou en utilisant de la chaleur pour produire de la vapeur, qui elle-même va faire tourner l'alternateur :

- Dans les **centrales thermiques**, à partir de la combustion du **pétrole**, du **charbon**, ou du **gaz**
- Dans les **centrales nucléaires**, à partir de la chaleur générée par la **fission nucléaire**

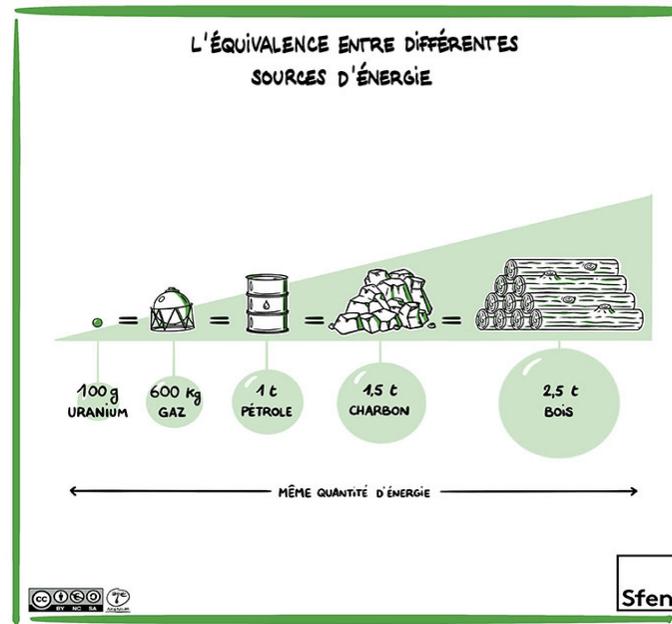
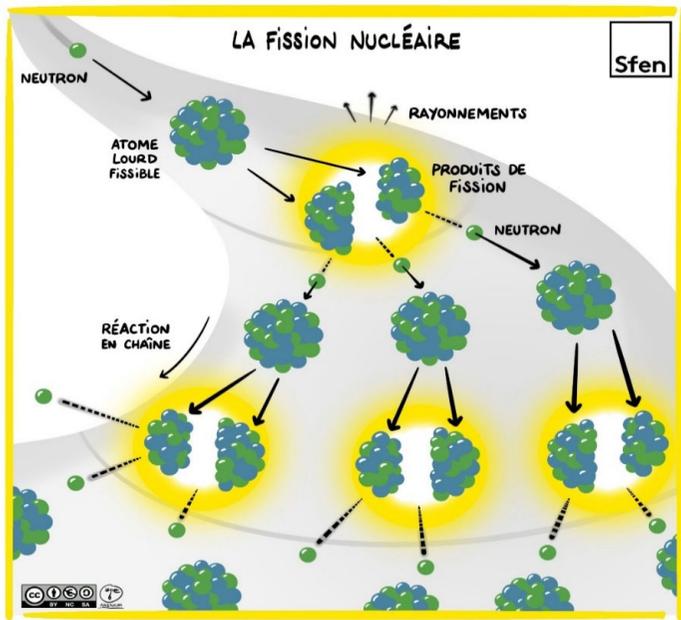


2.1 LA FISSION NUCLÉAIRE, C'EST QUOI ?

La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd, instable et fissile (U235 ou Pu239), qui éclate alors en 2 atomes plus légers.

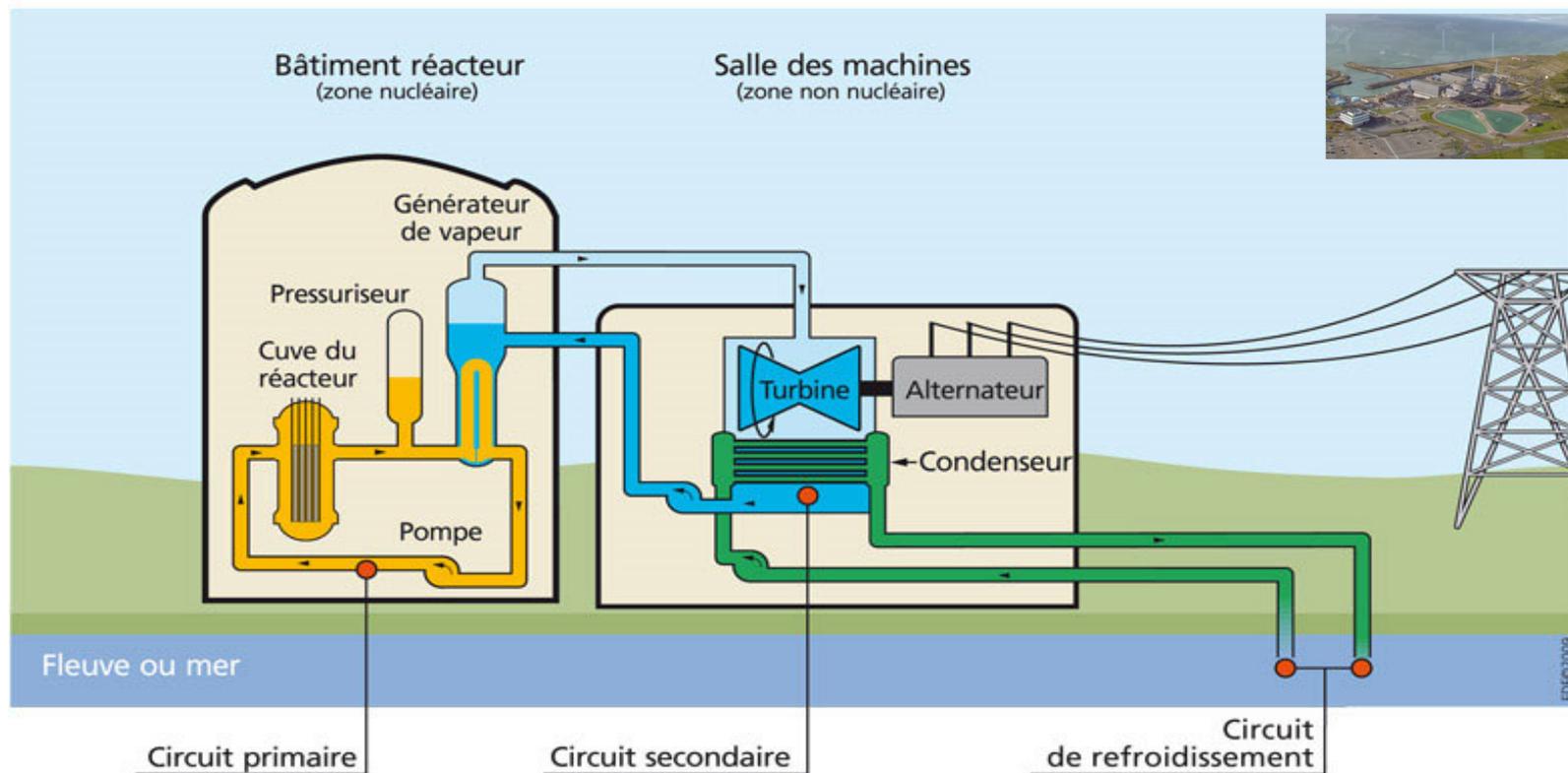
Cela produit de l'énergie, des rayonnements radioactifs et 2 ou 3 neutrons capables à leur tour de provoquer une fission. Et ainsi de suite. C'est le mécanisme de la **réaction en chaîne**.

- Cet éclatement s'accompagne d'un **dégagement de chaleur**, c'est à dire d'énergie, très important :



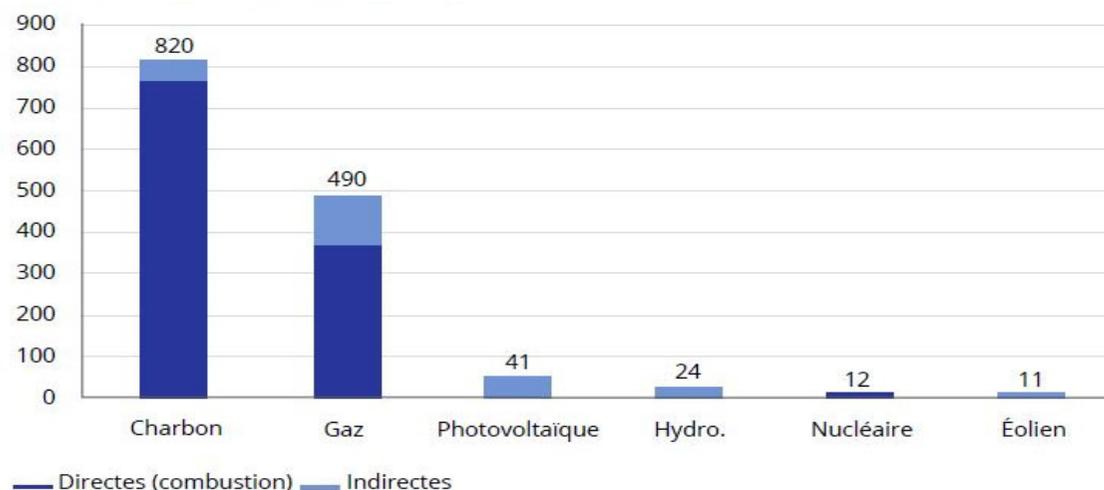
2.1 ET COMMENT FONCTIONNE UN REACTEUR NUCLÉAIRE ?

Réacteur à Eau Pressurisée (REP ou PWR) : 66% du parc mondial (100% du parc français)



2.2 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / CLIMAT : UNE TRÈS FAIBLE EMPREINTE CARBONE

Les experts du GIEC placent l'énergie nucléaire au niveau mondial à 12 g de CO₂/kWh :



Bilan gaz à effet de serre
(g eq CO₂/kWh)

Méthodologie : ACV

Source : IPCC par GIEC,
2015

En France, compte tenu de la faible empreinte carbone de l'électricité utilisée pour l'étape de l'enrichissement de l'uranium, le niveau d'émissions est beaucoup plus faible :

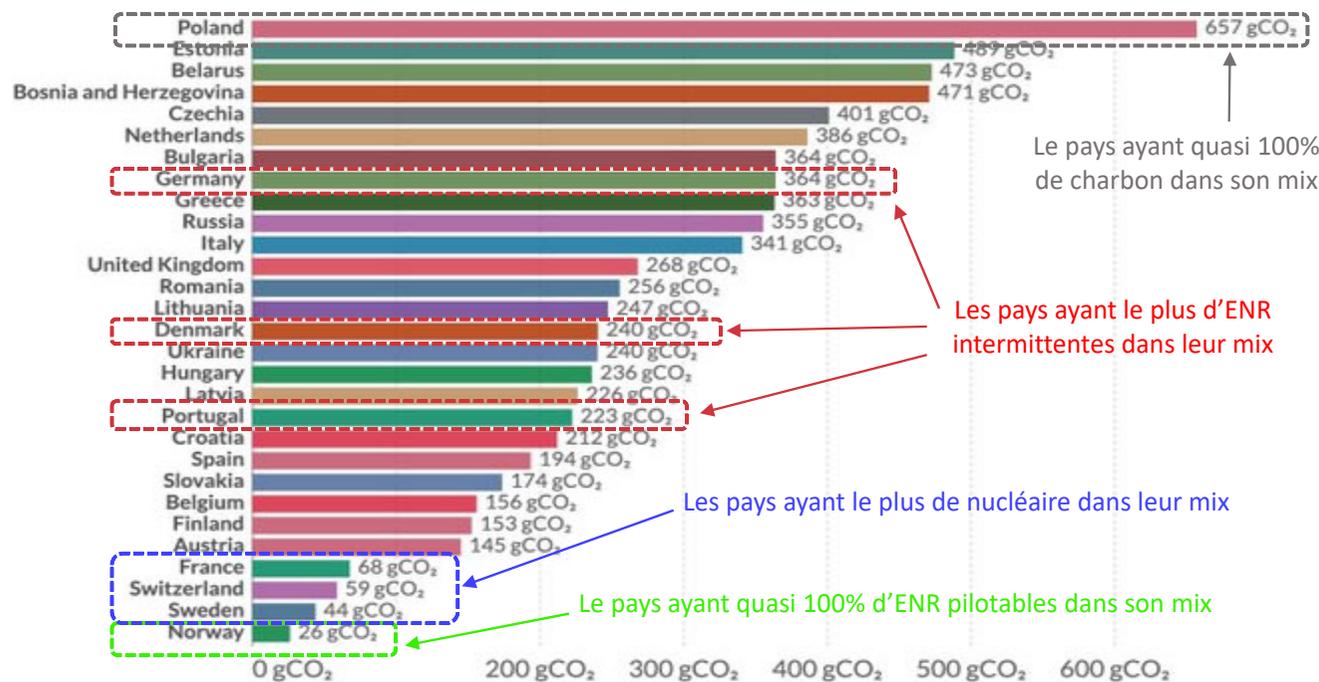
- 6 g CO₂/kWh selon L'ADEME (2014), 5,29 g CO₂/kWh selon le CEA (2010), 5 g selon ELSIVER (2014)
- 3,7 g CO₂/kWh selon une étude d'EDF (2022), revue par des experts indépendants, et basée sur la réalité du parc nucléaire français de 2019



2.2 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / CLIMAT : UNE TRÈS FAIBLE EMPREINTE CARBONE



Grace à l'énergie nucléaire (72% de son mix électrique),
la France est le pays le moins émetteur de CO2 des sept plus grands pays industrialisés :



Carbon intensity of electricity, 2021

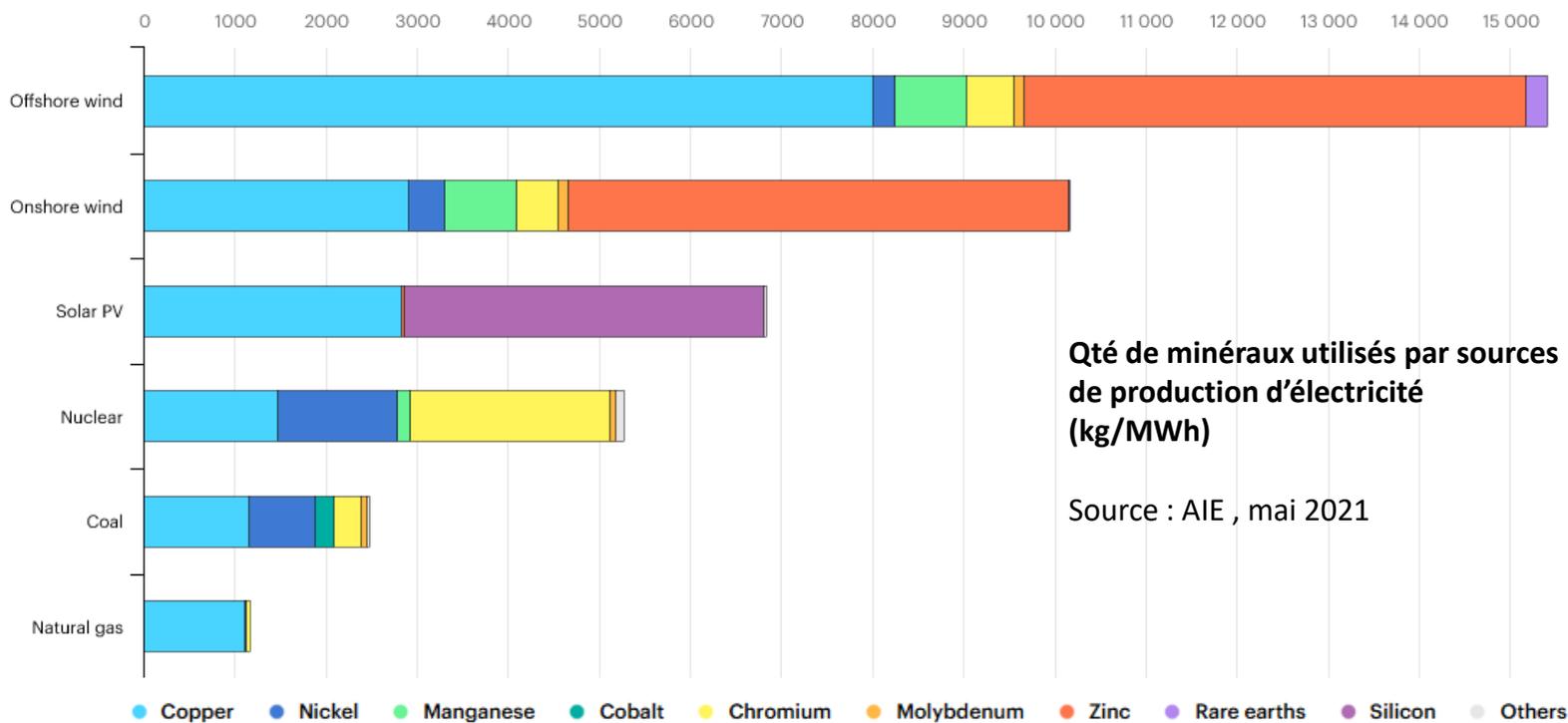
Méthodologie : ACV

Source : Ember,
in Our World in Data, 2022

- La France a déjà atteint les objectifs que l'AIE a fixé pour 2050

2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANÈTE : UNE FAIBLE EMPREINTE EXTRACTIVE

L'énergie nucléaire consomme peu de matières premières (minéraux, métaux) et de matériaux de construction (béton, acier,...), comparativement aux autres sources d'énergie électrique (toujours en raisonnant en ACV) :



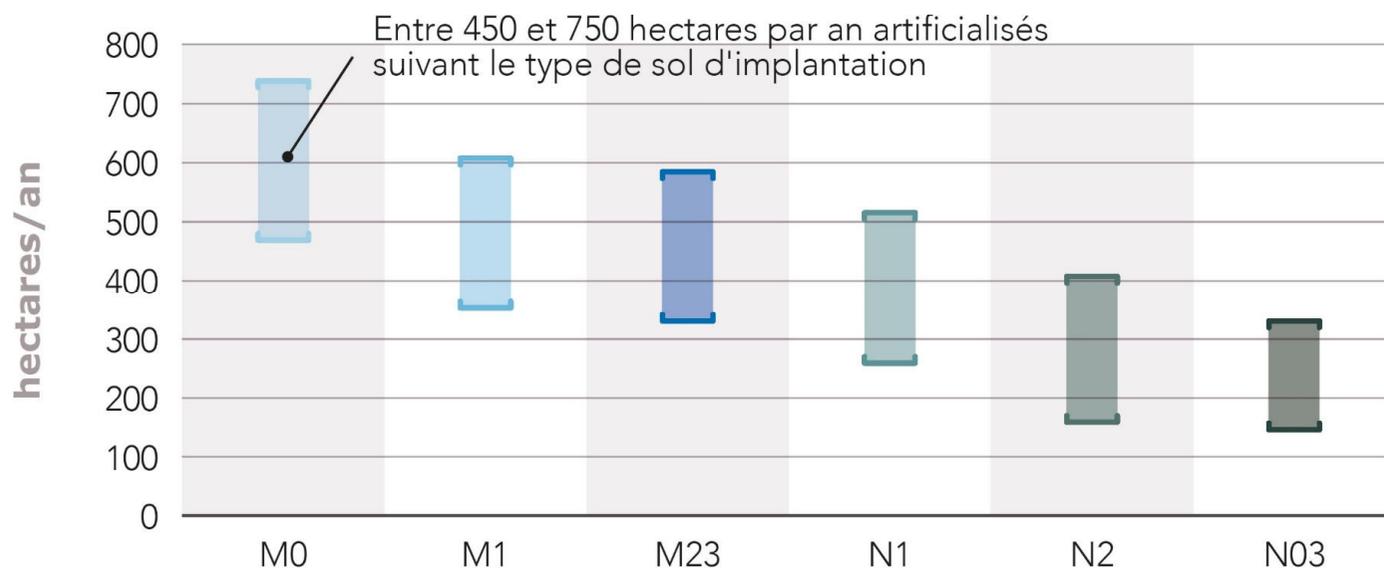
Qté de minéraux utilisés par sources de production d'électricité (kg/MWh)

Source : AIE , mai 2021



2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANÈTE : UNE FAIBLE EMPREINTE AU SOL

Du fait de sa forte densité énergétique, l'énergie nucléaire a une forte densité surfacique d'énergie (c'est-à-dire l'énergie par unité de surface), et de ce fait, sur l'ensemble de son cycle de vie (de l'extraction du minerai jusqu'à la restauration des sols post-démantèlement), l'énergie nucléaire a une empreinte très limitée sur l'utilisation des sols :



Flux d'artificialisation projeté à 2050 dans les scénarios et à l'échelle de la France

Source : rapport RTE « Futurs énergétique 2050 », octobre 2021

Nb : scénario M0 = 100% ENR jusqu'à scénario N03 = 50% nucléaire / 50% ENR

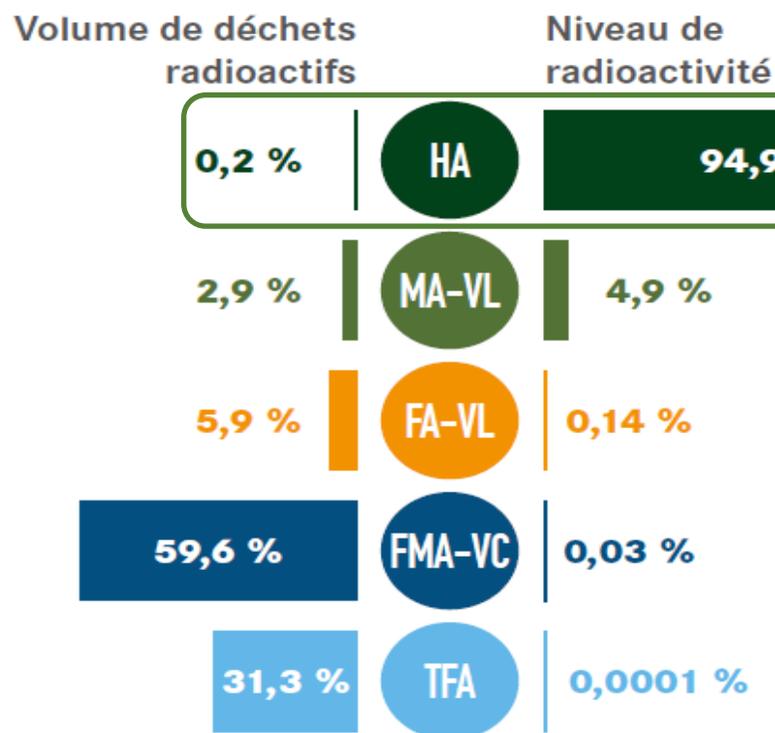


2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANÈTE : UN FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

Les déchets radioactifs : des montagnes de déchets ?



Tous les déchets HA issus des 58 réacteurs français tiennent dans une piscine olympique



Inventaire national des déchets radioactifs en France

Source : ANDRA, 2018

- HA : Haute Activité (à Vie Longue)
- MA-VL : Moyenne activité à Vie Longue
- FA-VL : Faible Activité à Vie Longue
- FMA-VC : Faible et Moyenne Activité à Vie Courte*
- TFA : Très Faible Activité (à Vie Courte*)

* Vie Courte = période radioactive ≤ 31 ans

2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANÈTE : UN FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

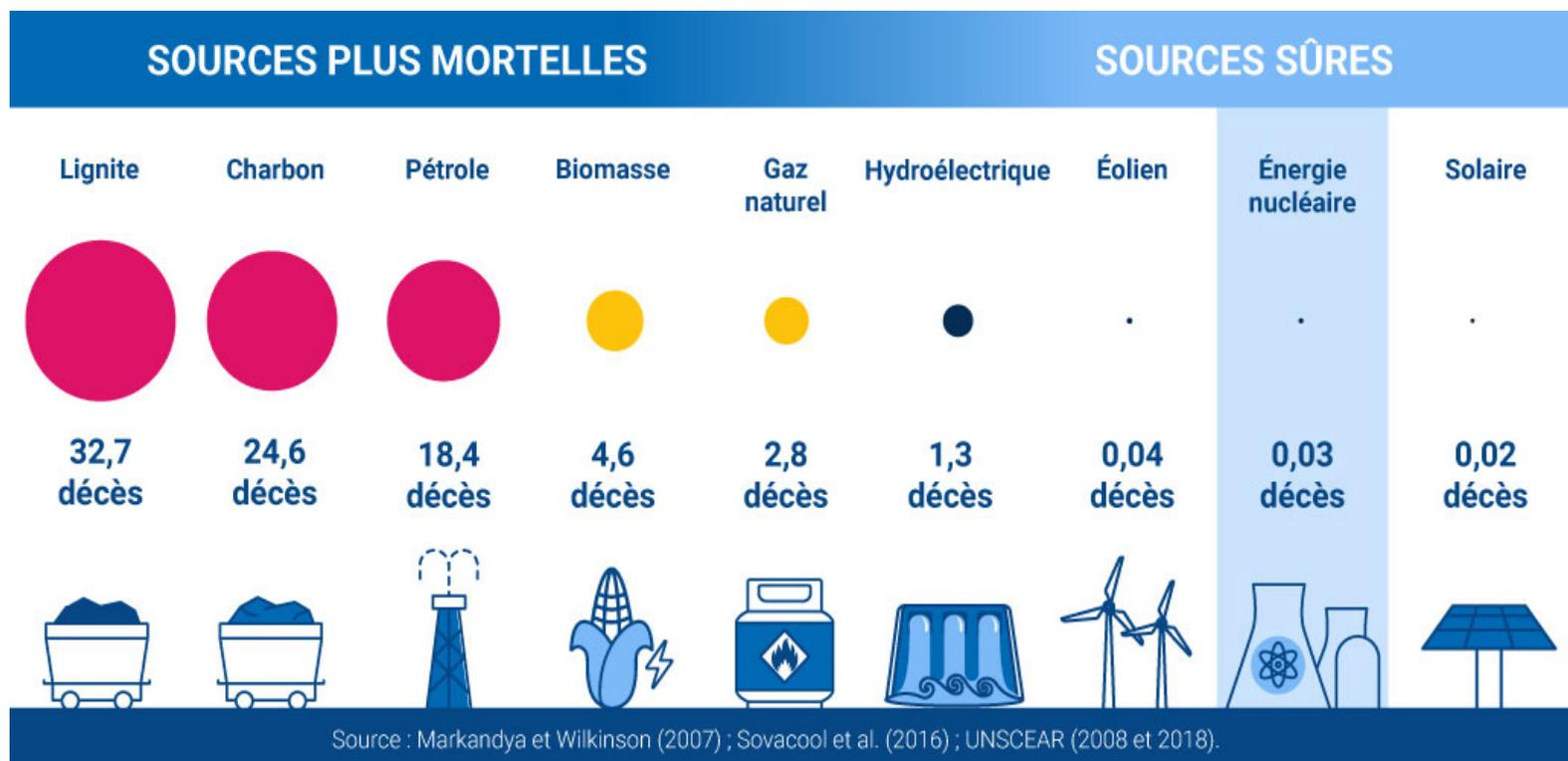
Les volumes de déchets, selon les # scenarios d'évolution du parc nucléaire français :

		SR1	SR2 ^a	SR3	SNR
Poursuite ou arrêt de la production électronucléaire		Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement de 50 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Arrêt au bout de 40 ans (sauf EPR™ au bout de 60 ans)
Type de réacteurs déployés dans le futur parc		EPR puis RNR	EPR puis RNR	EPR	/
Retraitement des combustibles usés		Tous UNE, URE, MOX et RNR	Tous UNE, URE, MOX et RNR	UNE seuls	Arrêt anticipé du retraitement des UNE
Requalification des combustibles usés et de l'uranium en déchets		Aucune	Aucune	URE, MOX, RNR et uranium appauvri	Tous combustibles usés, uranium appauvri et URT
HA	Combustibles usés à base d'oxyde d'uranium des réacteurs électronucléaires (UNE, URE)	-	-	3 700 tML	25 000 tML
	Combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium des réacteurs électronucléaires (MOX, RNR)	-	-	5 400 tML	3 300 tML
	Déchets vitrifiés	12 000 m ³	10 000 m ³	9 400 m ³	4 200 m ³
MA-VL		72 000 m ³	72 000 m ³	70 000 m ³	61 000 m ³
FA-VL	Déchets ^{2,3}	190 000 m ³	190 000 m ³	190 000 m ³	190 000 m ³
	Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	470 000 tML	400 000 tML
	Uranium issu du retraitement des combustibles usés sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	-	34 000 tML
FMA-VC		2 000 000 m ³	1 900 000 m ³	2 000 000 m ³	1 800 000 m ³
TFA ^a		2 300 000 m ³	2 200 000 m ³	2 300 000 m ³	2 100 000 m ³



2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / HUMAINS : UNE FORTE SURETÉ

Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie, par unité d'électricité produite (TWh) :



Nbre de décès :

- liés aux accidents lors des phases d'extraction, transformation et production de l'énergie,
- ainsi que ceux découlant de la pollution de l'air (pendant la production, le transport et l'utilisation des différents combustibles),
- et enfin ceux résultant du changement climatique

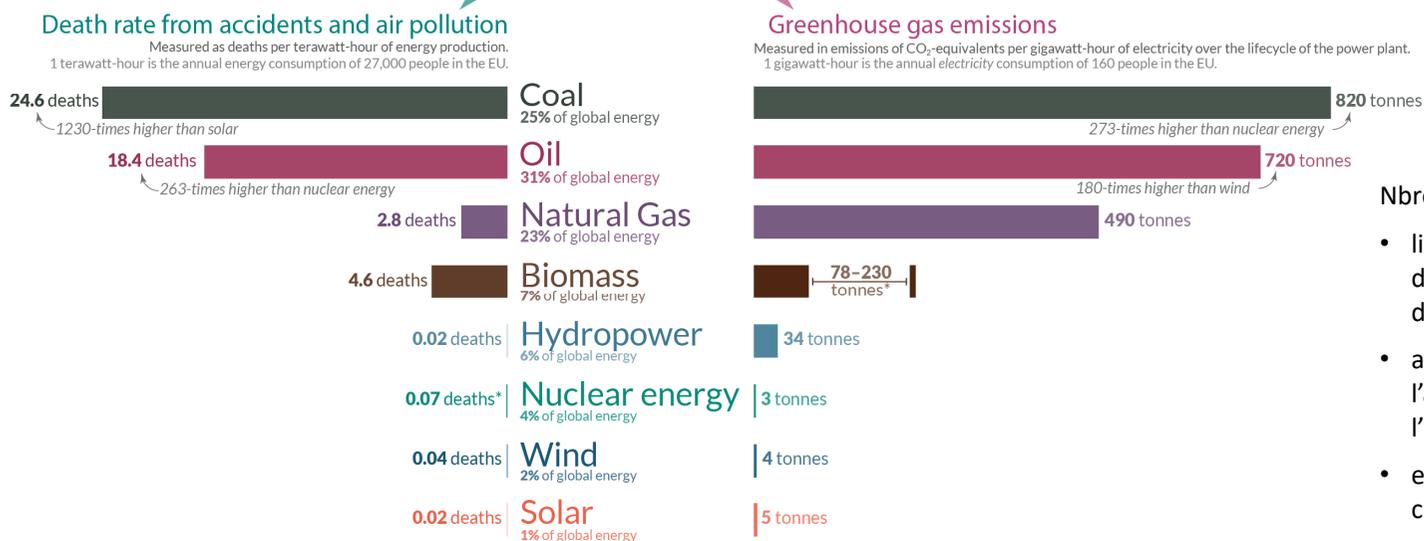
2.3 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / HUMAINS : UNE FORTE SURETÉ

Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie , par unité d'électricité produite (TWh) :



Our World
in Data

What are the **safest** and **cleanest** sources of energy?



Nbre de décès :

- liés aux accidents lors des phases d'extraction, transformation et production de l'énergie,
- ainsi que ceux découlant de la pollution de l'air (pendant la production, le transport et l'utilisation des différents combustibles),
- et enfin ceux résultant du changement climatique

*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop residues vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.

*The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).

Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.

Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*;

Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).

OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.

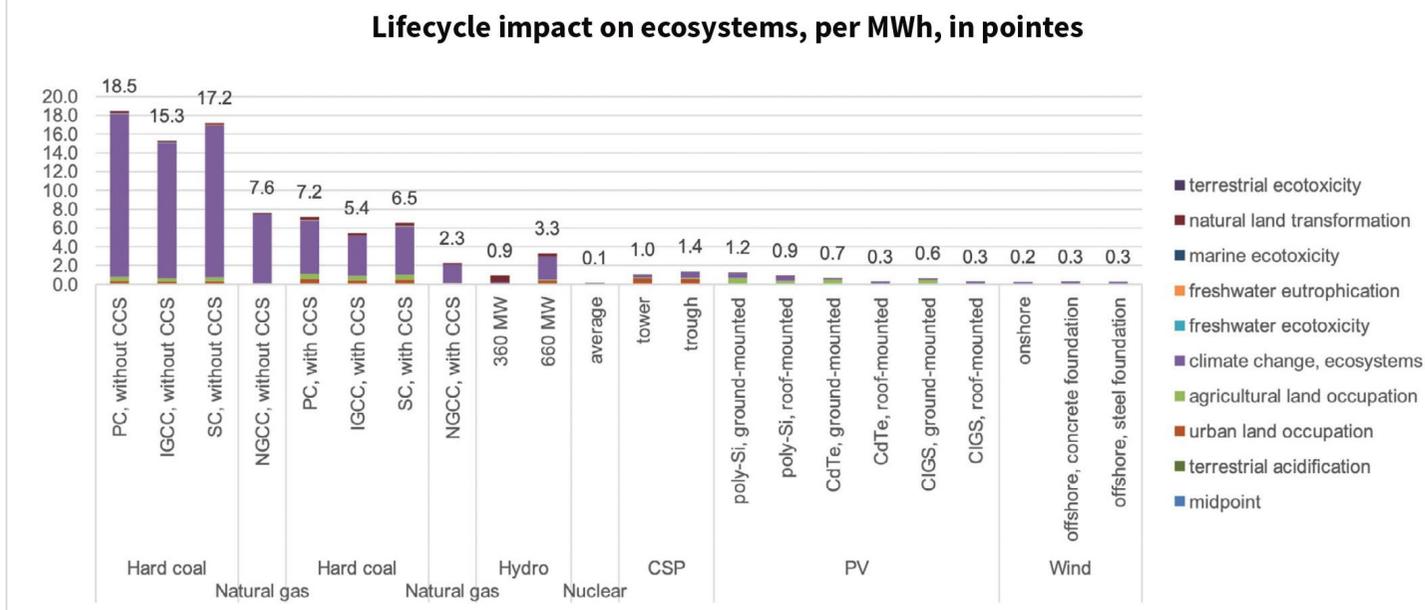
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

2.3 BILAN ÉCOLOGIQUE DU NUCLÉAIRE : UN FAIBLE IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES



En résumé, en prenant en compte TOUT les critères environnementaux, l'énergie nucléaire présente l'impact sur les écosystèmes le plus faible sur cycle de vie complet, par rapport à toutes les autres sources d'énergie :

Figure 48 Lifecycle impacts on ecosystems, in points, including climate change.
 Note on unit: 1 point is equivalent to the impacts (in species-year) of 1 person (globally) over one year.

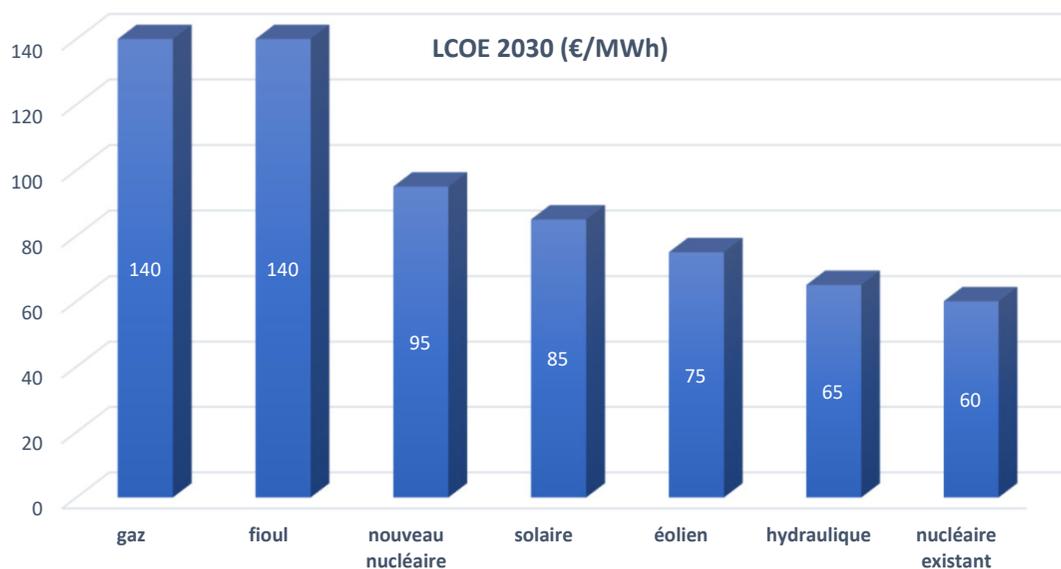


Rapport de la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (UNECE)

« Carbon Neutrality in the UNECE Region : Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources », mars 2022

2.4 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PRIX : UN COUT COMPÉTITIF

Comparaison du coût moyen actualisé à long terme de plusieurs sources d'électricité :



Rapport de la Commission Européenne
janvier 2019

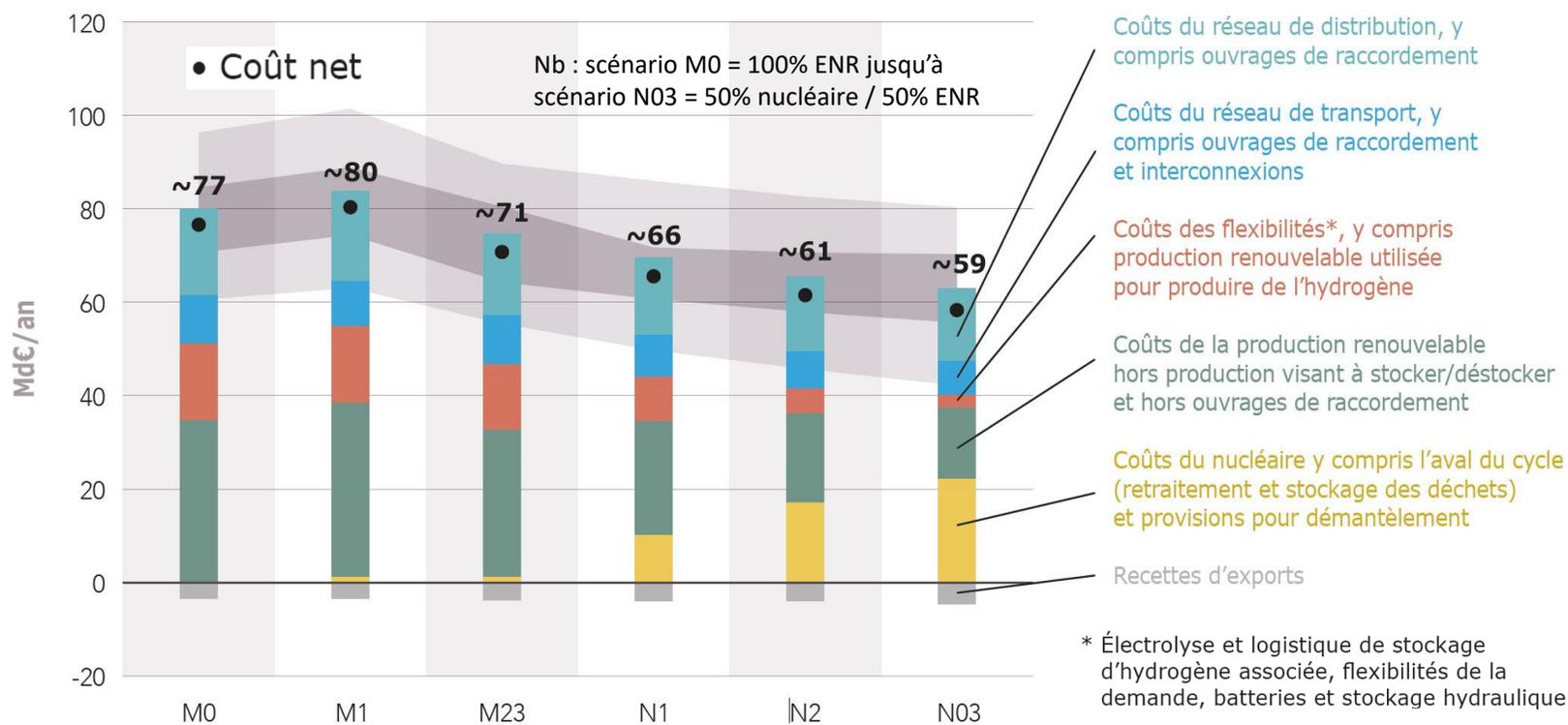
Basé sur l'étude « Energy Prices and Costs in Europe »

- Sachant que le coût moyen actualisé à long terme (ou LCOE) n'inclut pas les coûts induits des énergies intermittentes (solaire, éolien), comme les capacités de production de back-up, le stockage (les flexibilités), et les interconnexions supplémentaires (l'acheminement).



2.4 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PRIX : UN COUT COMPÉTITIF

Comparaison des coûts complets (production + acheminement + flexibilités) en France selon les scénarios du rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 » :



2.5 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / INDÉPENDANCE : UNE SOUVERAINETÉ ÉLEVÉE



L'indépendance énergétique totale n'existe pas (quelle que soit l'énergie) !

En réalité, on mesure le « taux d'indépendance énergétique » :

- **50 % en France** (il a même atteint 55% en 2020 et 53 % en 2021),
- 33 % en Allemagne,
- 25 % en Espagne,
- 22 % en Italie

(source : Service des données et études statistiques (SDES), rattaché au Ministère de la Transition Ecologique)

En France, ce taux d'indépendance est largement porté par l'énergie nucléaire :

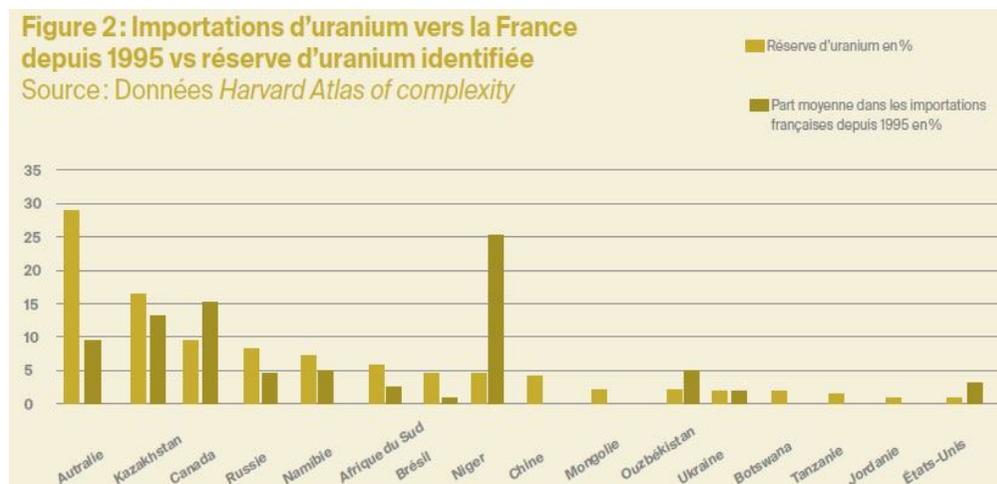
- avant le déploiement du parc nucléaire, le taux d'indépendance énergétique était de 24 % (1973)
- « Si vous voulez que la vie économique et sociale de la France dépende des caprices des autres, alors vous pouvez dire non [au nucléaire], mais vous dites non tout seul ! »
Valéry Giscard d'Estaing, 1981

2.5 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / INDÉPENDANCE : UNE SOUVERAINETÉ ÉLEVÉE



Pour avoir une idée de l'indépendance relative d'un système énergétique, c'est à dire sa résilience face à des « interférences du dehors », on peut analyser selon 3 dimensions : le coût, le stock, et le flux :

- **Coût** : le prix de l'uranium ne représente que 5 % du coût total de l'électricité produite.
- **Flux** : depuis 30 ans, la France s'approvisionne auprès d'une dizaine de pays, répartis sur 3 continents.



- **Stock** : EDF dispose de réserves d'uranium correspondant à **2 ans** de production d'électricité (source : EDF), vs moins de 6 mois de consommation pour les réserves françaises de gaz ou de pétrole.
Par ailleurs, la France dispose d'un stock d'uranium appauvri qui peut se substituer à **7 ou 8 ans** de consommation d'uranium naturel (source : Orano), soit un total de **10 ans** de stock.
Et avec des réacteurs à neutrons rapides, nous disposerions de 2 à 3000 ans de stock.

Merci !

L'énergie nucléaire : une solution face aux crises climatique, environnementale, énergétique ?



Thierry CAILLON  

