

Énergie et Nucléaire, parlons-en

Régis BAUDRILLART

Groupe régional Sfen Bourgogne Franche-Comté

Thierry CAILLON et Régis MILAN

Groupe régional Sfen Rhône-Ain-Loire

**Festival de la transition
écologique et numérique 2023**

CONFERENCE

Énergie et Nucléaire,
parlons-en



1ER
DÉCEMBRE 2023
9H - 11H



Château de la Verrerie dans le
petit Théâtre, 72100, LE CREUSOT

Entrée libre

SOMMAIRE

01 - L'énergie :

- L'énergie, c'est quoi ?
- Pourquoi en avons nous si besoin ?

02 – L'impact de l'énergie sur le climat :

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

03 – Le rôle de l'énergie nucléaire dans la transition :

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



1.

L'énergie :

- c'est quoi ?
- pourquoi en avons nous autant besoin ?



QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

Le mot « énergie » vient du Grec Ancien « énergeia », qui signifie « La force en action »

Aujourd'hui, l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations »

Ne pas confondre énergie et puissance

$$\text{Puissance} = \text{Energie} / \text{temps}$$



Unités

- le Watt (W) et ses multiples (kilo, méga, giga...)



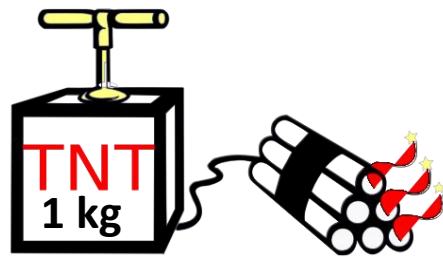
Unités

- le Joule (1 Watt par seconde),
- le Watt x heure (Wh) et ses multiples (kilo, méga, giga...)
- la tonne équivalent pétrole (Tep) qui vaut 11630 kWh.



UN EXEMPLE “PERCUTANT” D’ENERGIE EQUIVALENTE

Quelle quantité de concombres pour la même énergie ?



Il y a autant d’énergie dans 1 kg de TNT que dans 1,6 kg de concombres !

Énergie libérée
quasiment
instantanément



Explosion

Énergie libérée en
plusieurs heures



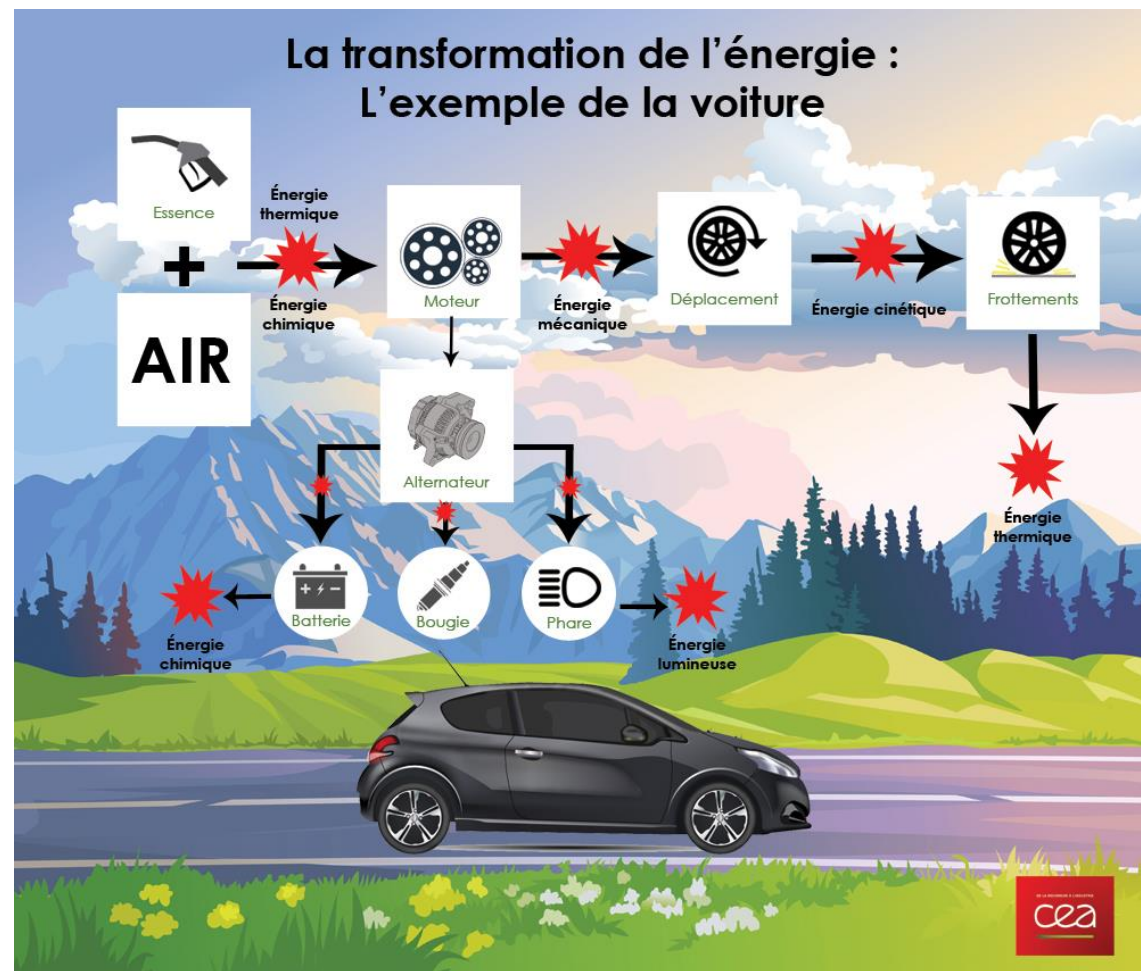
Digestion



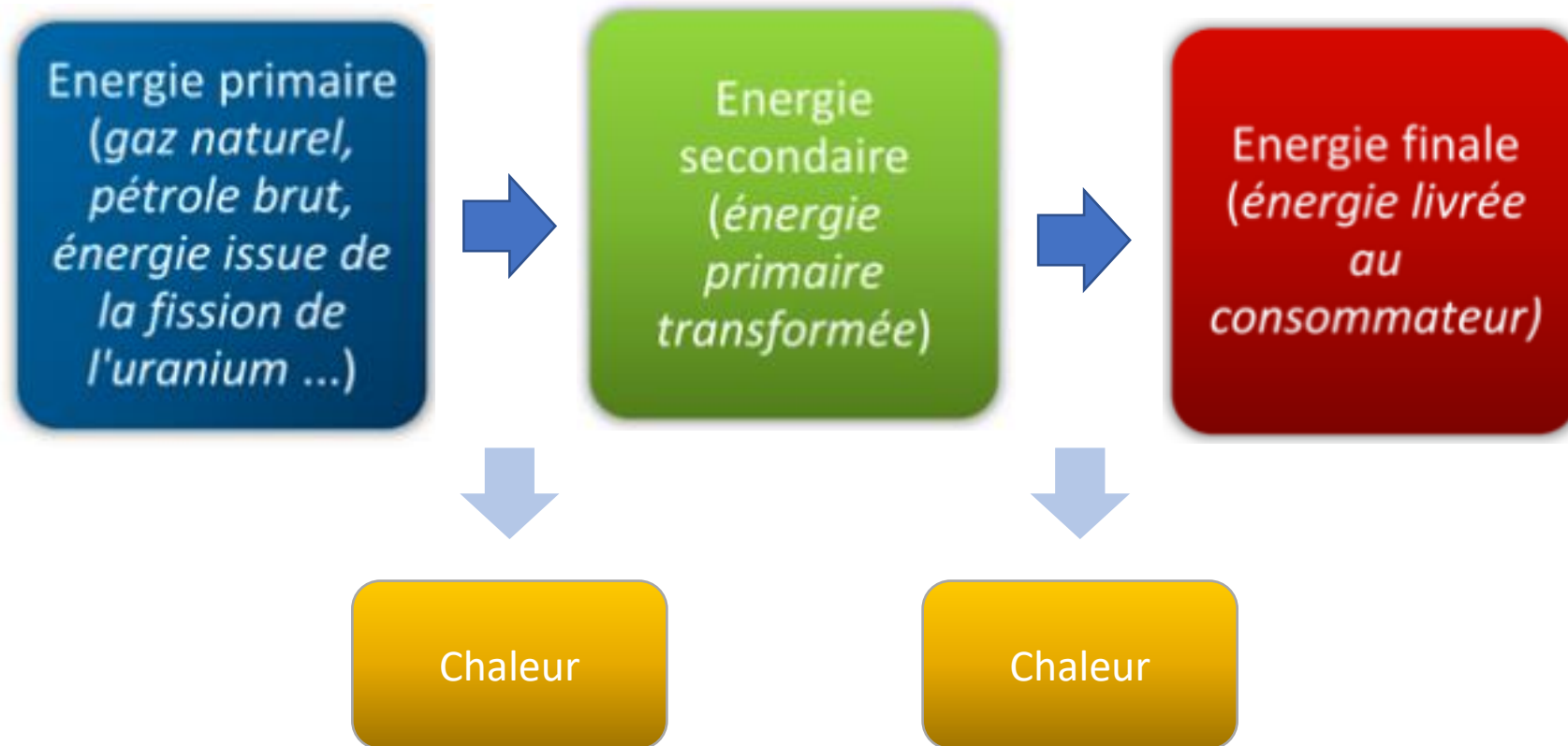
LA LOI DE CONSERVATION DE L'ÉNERGIE



L'ÉNERGIE
ne peut être
ni CRÉÉE
ni DÉTRUITE
seulement
Transformée

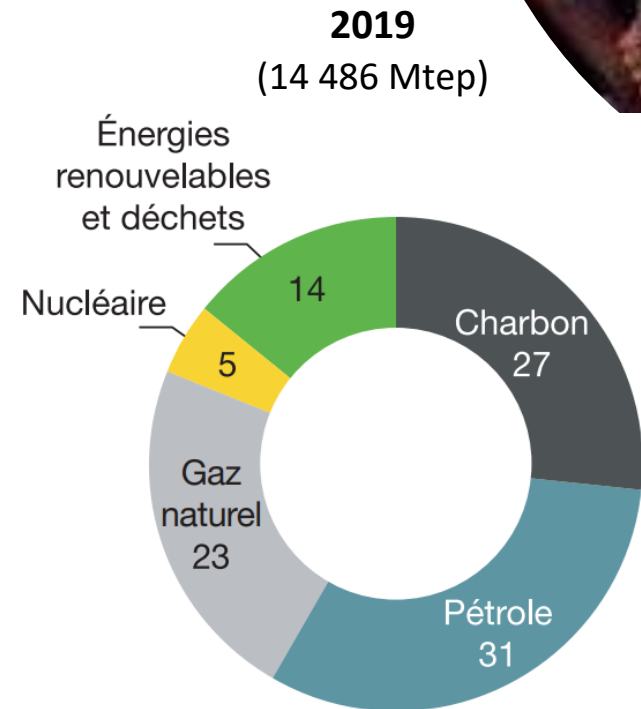
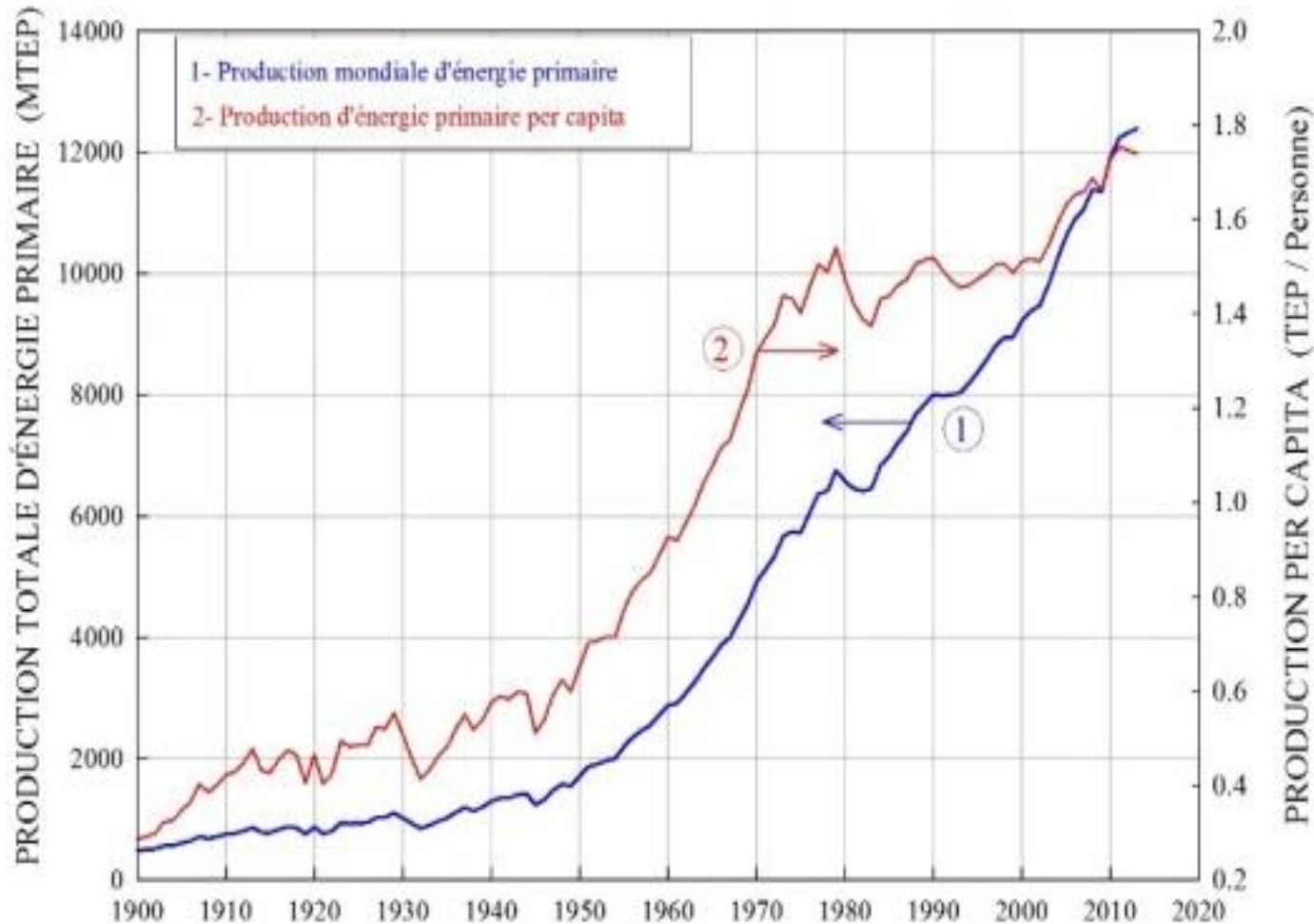


DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE À L'ÉNERGIE FINALE



1.2

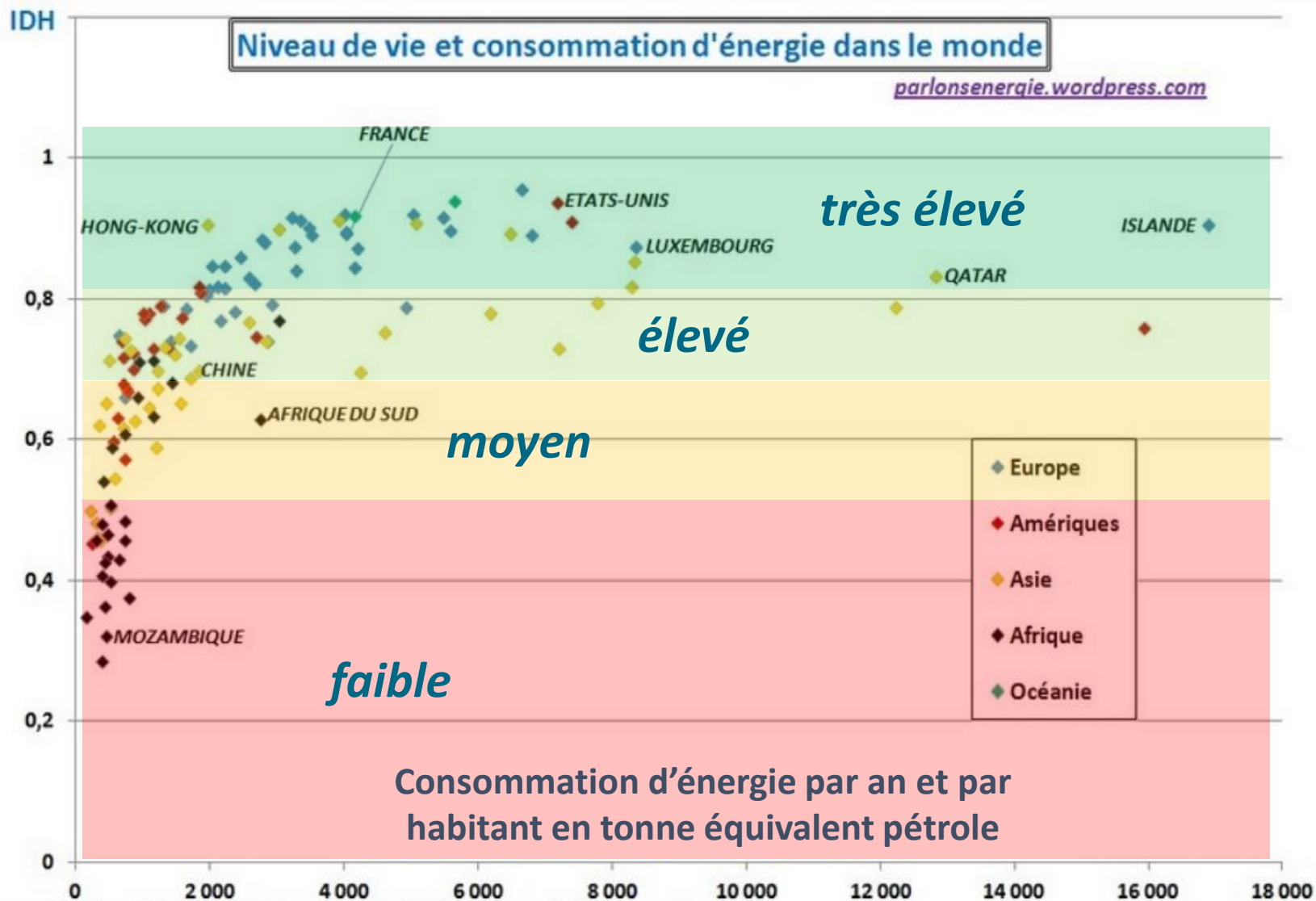
EVOLUTION DE LA CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE



81% provient des énergie fossiles

1.2

POURQUOI SOMMES NOUS ADDICTS À L'ÉNERGIE ?



Sources : Données 2011 de l'AIE et du Programme des Nations Unis pour le développement.



L'Indice de Développement Humain (IDH) prend en compte :

- L'espérance de vie à la naissance,
- Le niveau d'instruction des plus de 17 ans
- Le revenu national brut de la population

1.2

ÉNERGIE ET EQUIVALENCE TRAVAIL HUMAIN

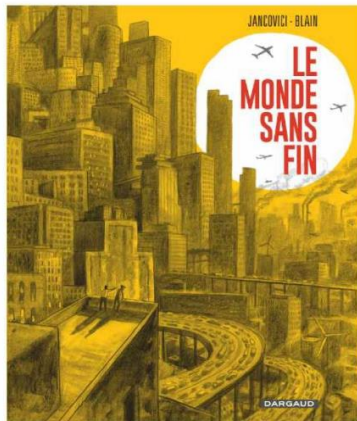


→ Bras : 10 W

→ Jambes : 100 W

Travailleur de force : 10 à 100 kWh/an

Source :



*consommation mondiale d'énergie
primaire en 2019 / habitant
22 000 kWh/hab.*



200 esclaves virtuels



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

1.2

EST-CE QUE L'ÉNERGIE COÛTE CHER ?



1 litre d'essence 10 kWh



Énergie mécanique de
3 à 4 kWh



Coût : 1,8 à 2 €



1 travailleur de force



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



Coût au SMIC : de 800 à 8000 €

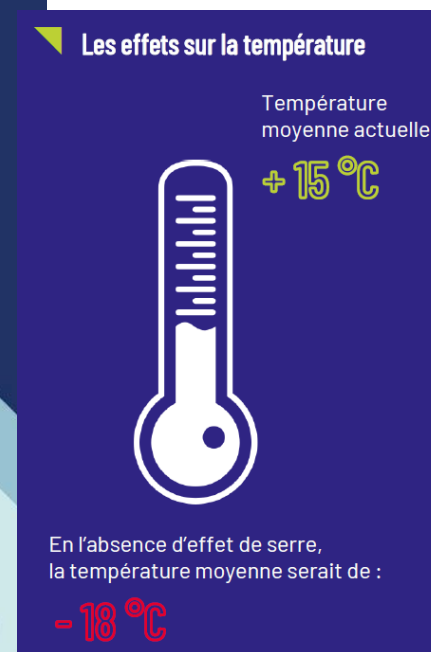
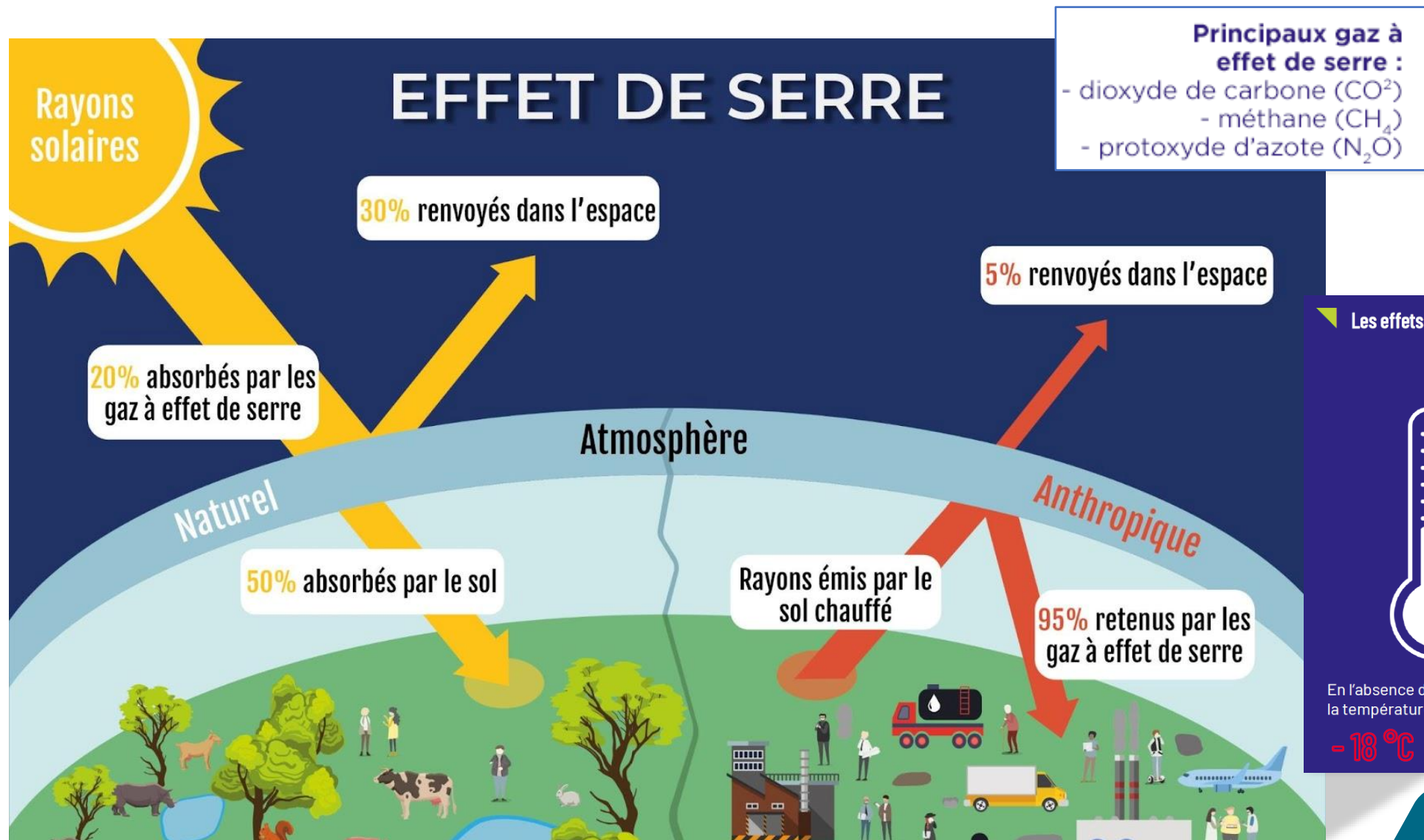
2.

L'impact de l'énergie sur le climat :

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



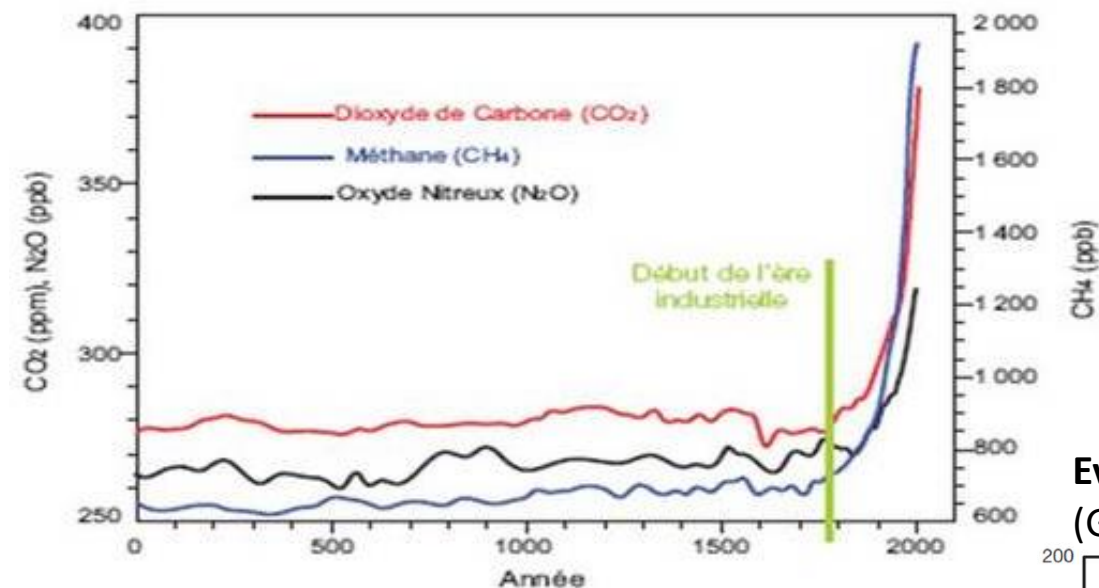
L'EFFET DE SERRE, C'EST QUOI ?



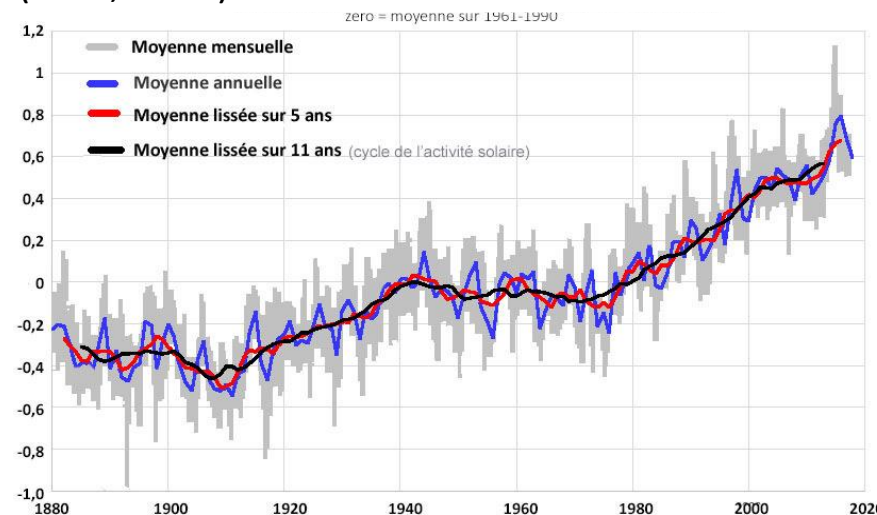
2.1

LES ÉMISSIONS DE GES, EST-CE UN PROBLÈME ?

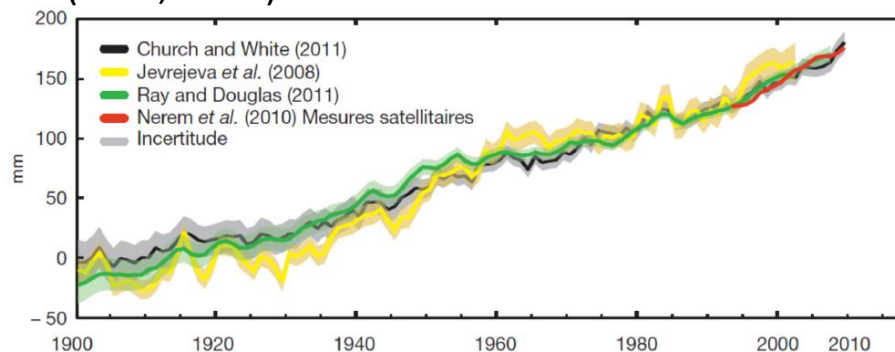
Evolution des concentrations des GES
(GIEC, 2007)



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

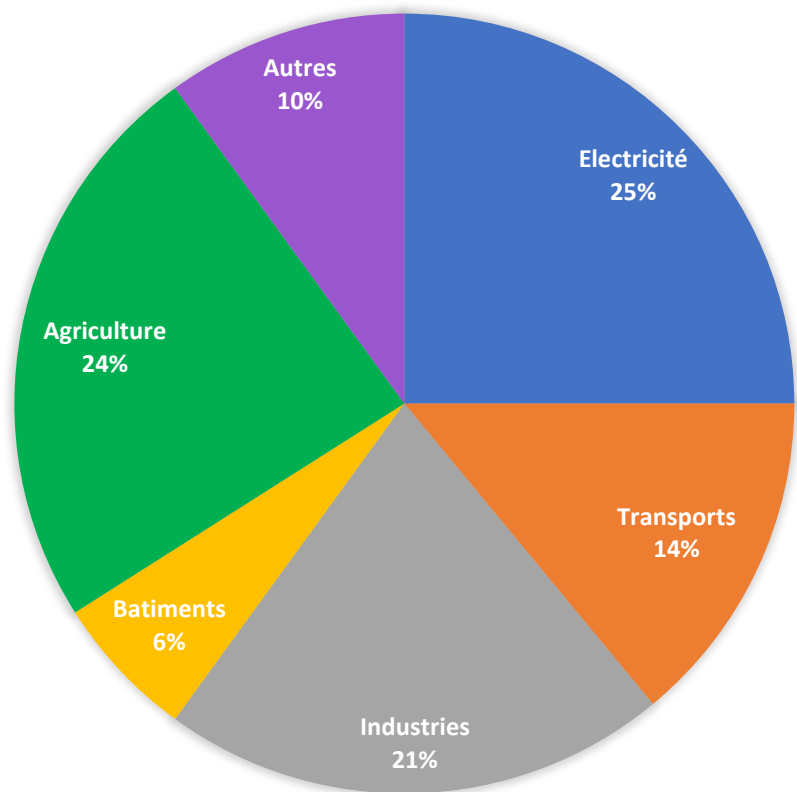


Evolution du niveau moyen des mers, de 1900 à 2010
(GIEC, 2013)

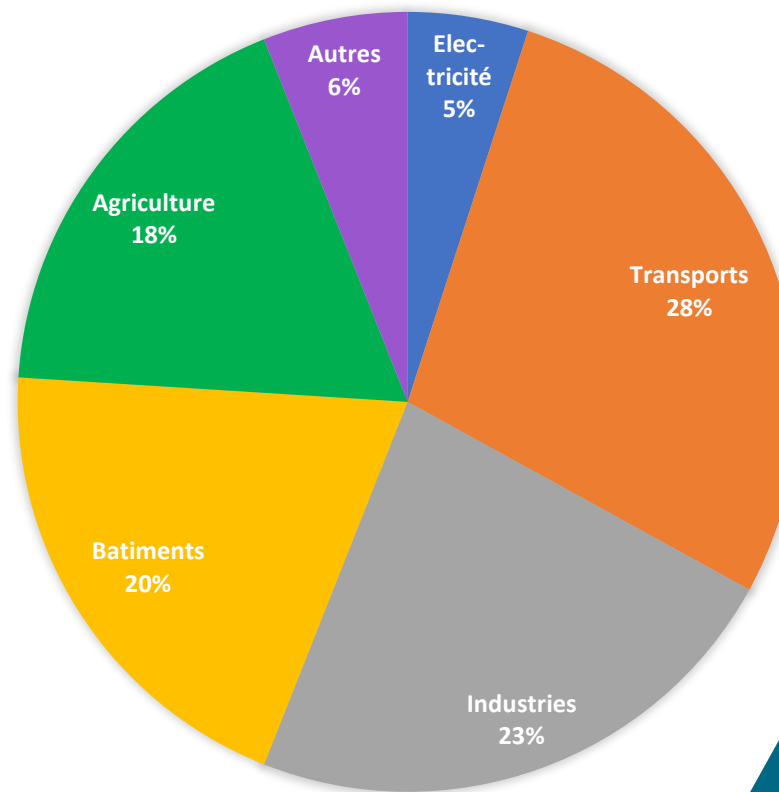


QUELS SONT LES SECTEURS LES PLUS EMETTEURS DE GES ?

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)

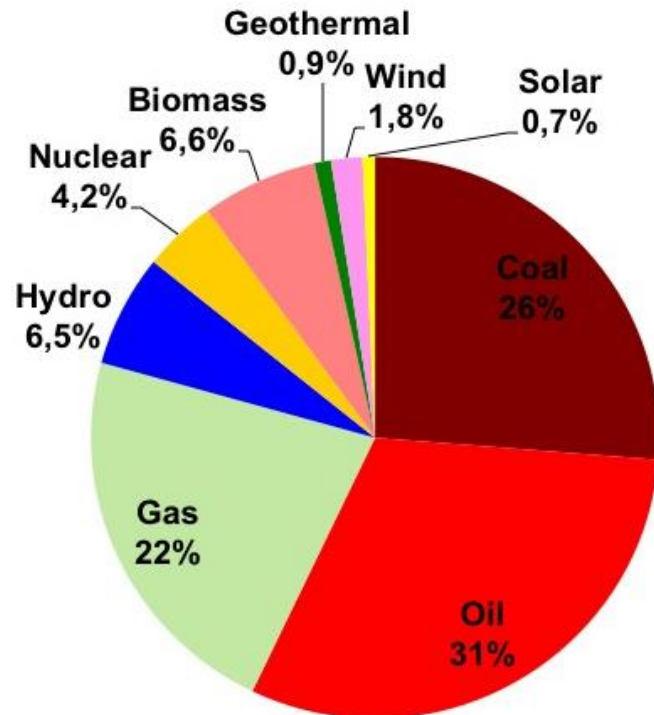


2.1

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

Consommation mondiale d'énergie primaire

(BP Statistical Review, 2017)

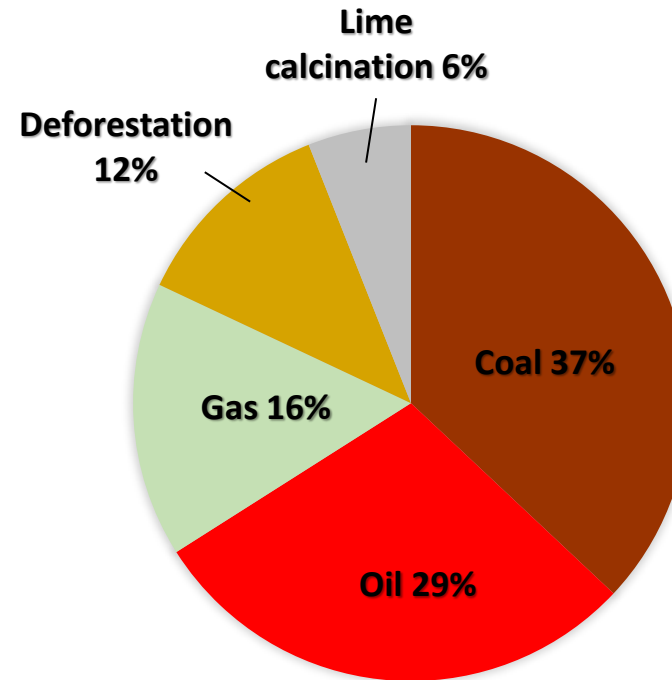


79% de la consommation d'énergie primaire provient de sources fossiles

(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)

2.1

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

La 1^{ère} source anthropique de CO₂ en Europe est la **mine de lignite de HAMBACH**, la plus grande mine à ciel ouvert d'Allemagne. Elle émet **272 000 tonnes de CO₂ / jour**.



2.2

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 et indissociables les uns des autres, sont au nombre de 4 :



Développer toutes les énergies bas carbone



Intensifier l'efficacité énergétique



Electrifier massivement les usages



Promouvoir et engager la sobriété

3.

Le rôle de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique :

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



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 ?

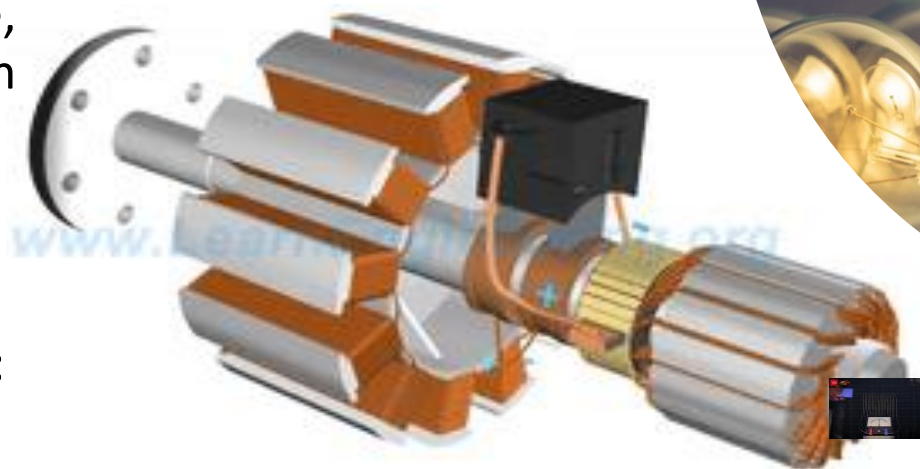
Il y a 2 moyens utilisés pour faire tourner l'alternateur :

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**

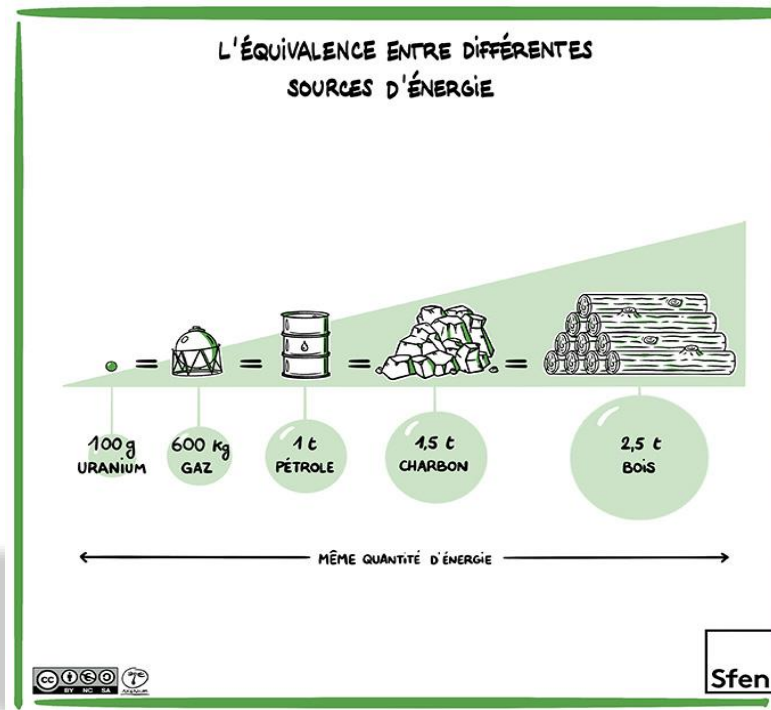
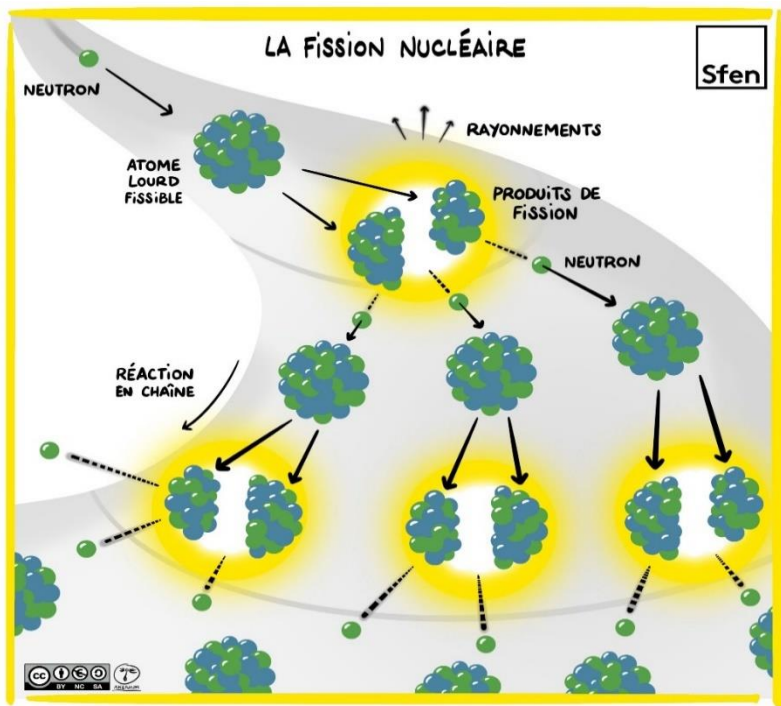


LA FISSION NUCLÉAIRE, C'EST QUOI ?

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**.

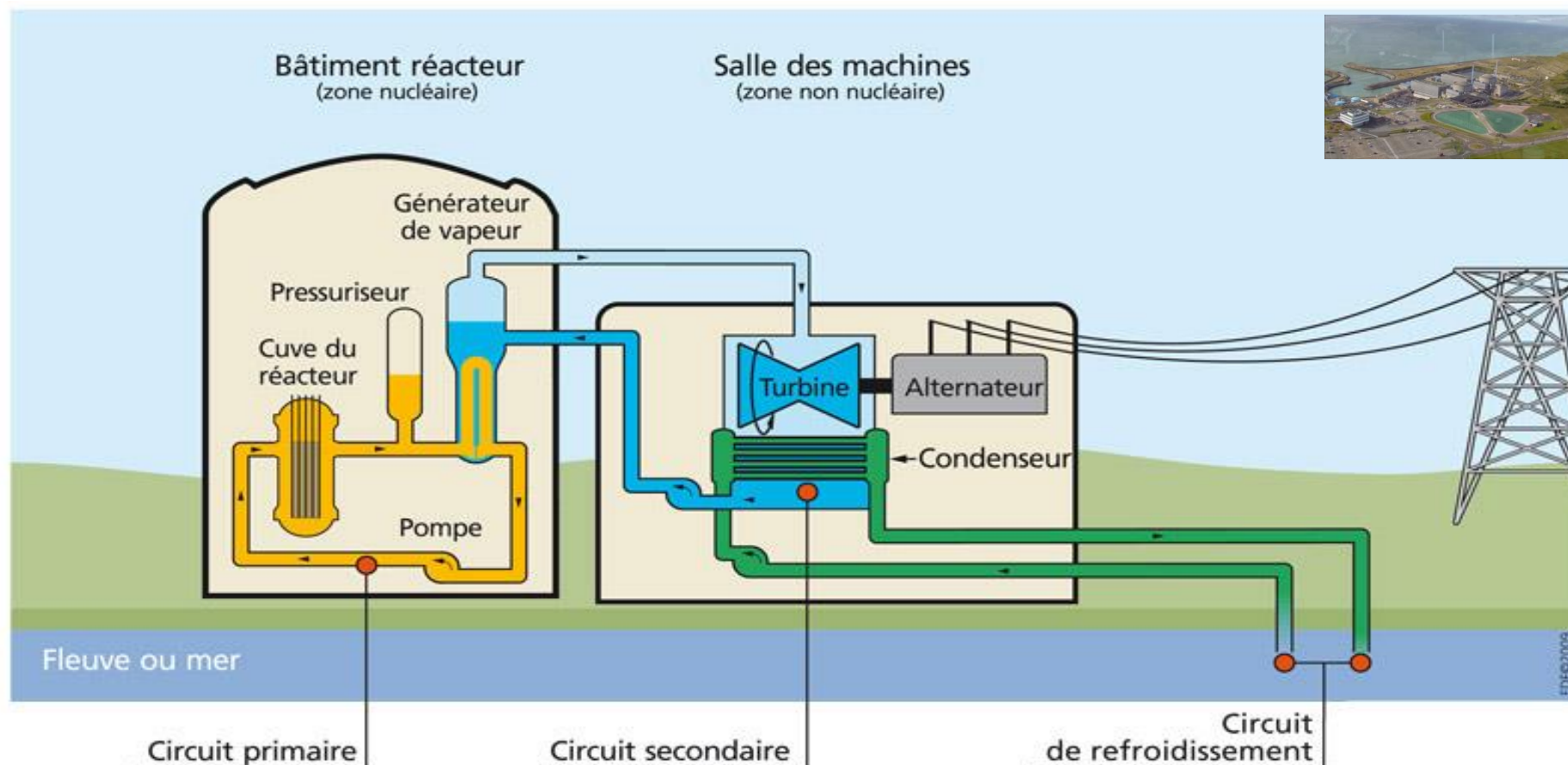
- Cet éclatement s'accompagne d'un **dégagement de chaleur**, c'est à dire d'énergie, très important :



3.1

ET COMMENT FONCTIONNE UN REACTEUR NUCLÉAIRE ?

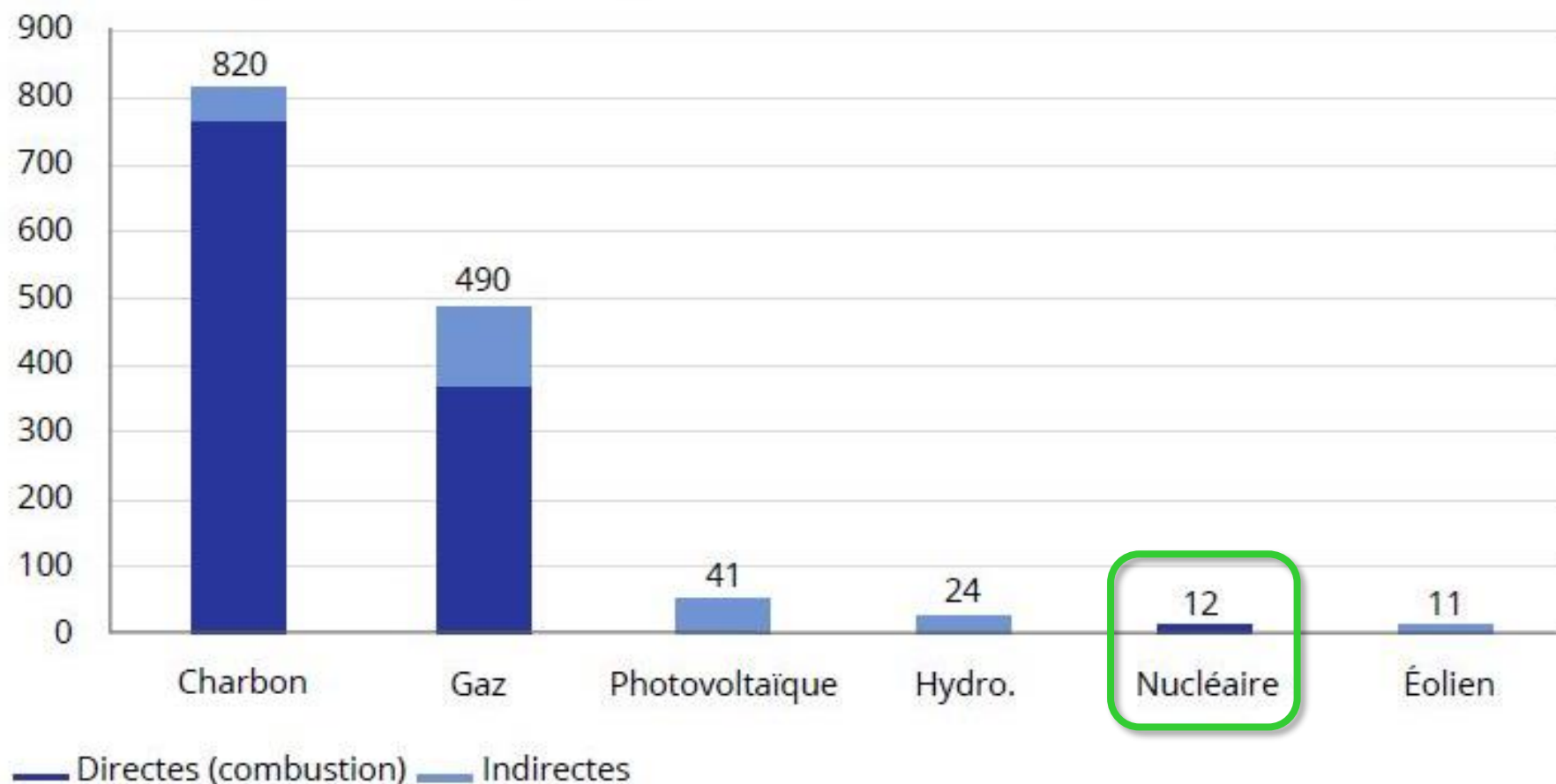
Réacteur à Eau Pressurisée (REP ou PWR) : 66% du *parc mondial* (100% du *parc français*)



3.2

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 :



Emissions de CO₂ des différentes sources d'électricité (g eq CO₂/kWh)

Méthodologie : ACV

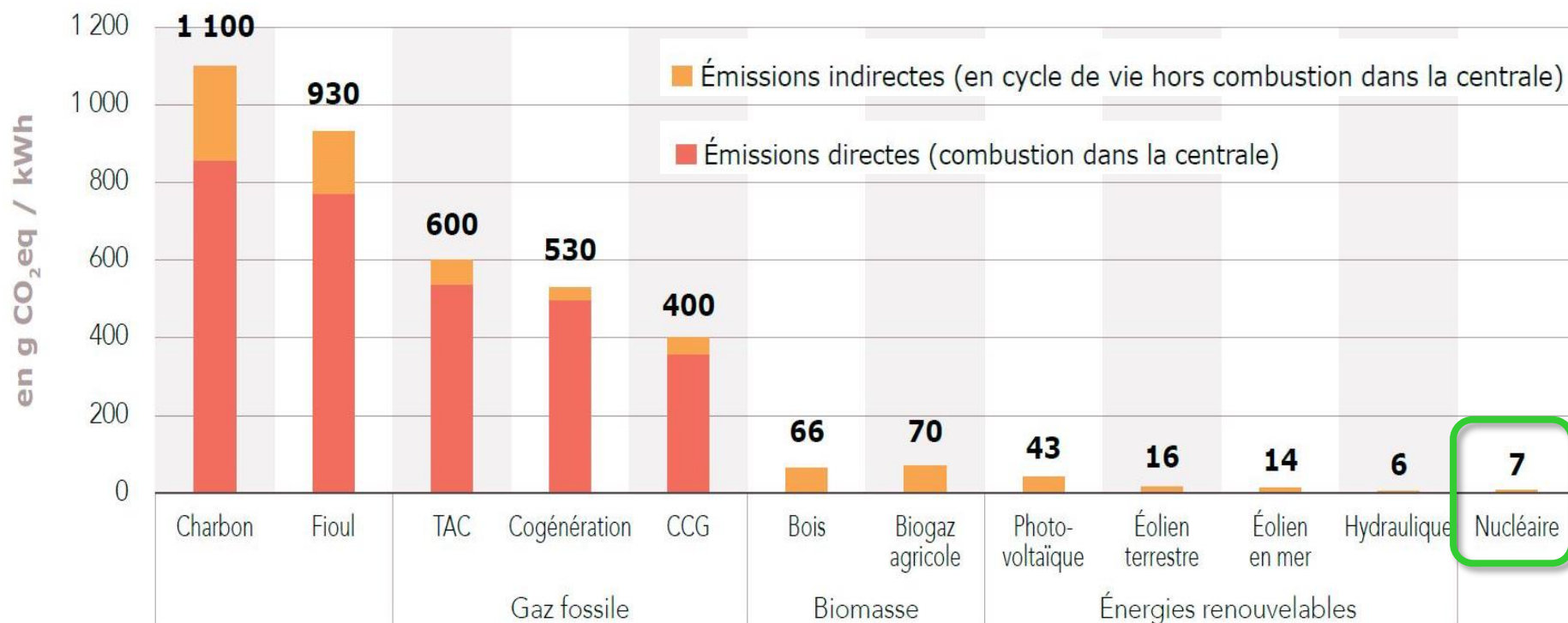
Source : GIEC, 2015

3.2

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

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

- 7 g selon RTE (2021), 6 g CO₂/kWh selon L'ADEME (2015), 5,29 g CO₂/kWh selon le CEA (2014), 3,7 g CO₂/kWh selon une étude d'EDF (2022), revue par des experts indépendants, basée sur la réalité du parc nucléaire français de 2019

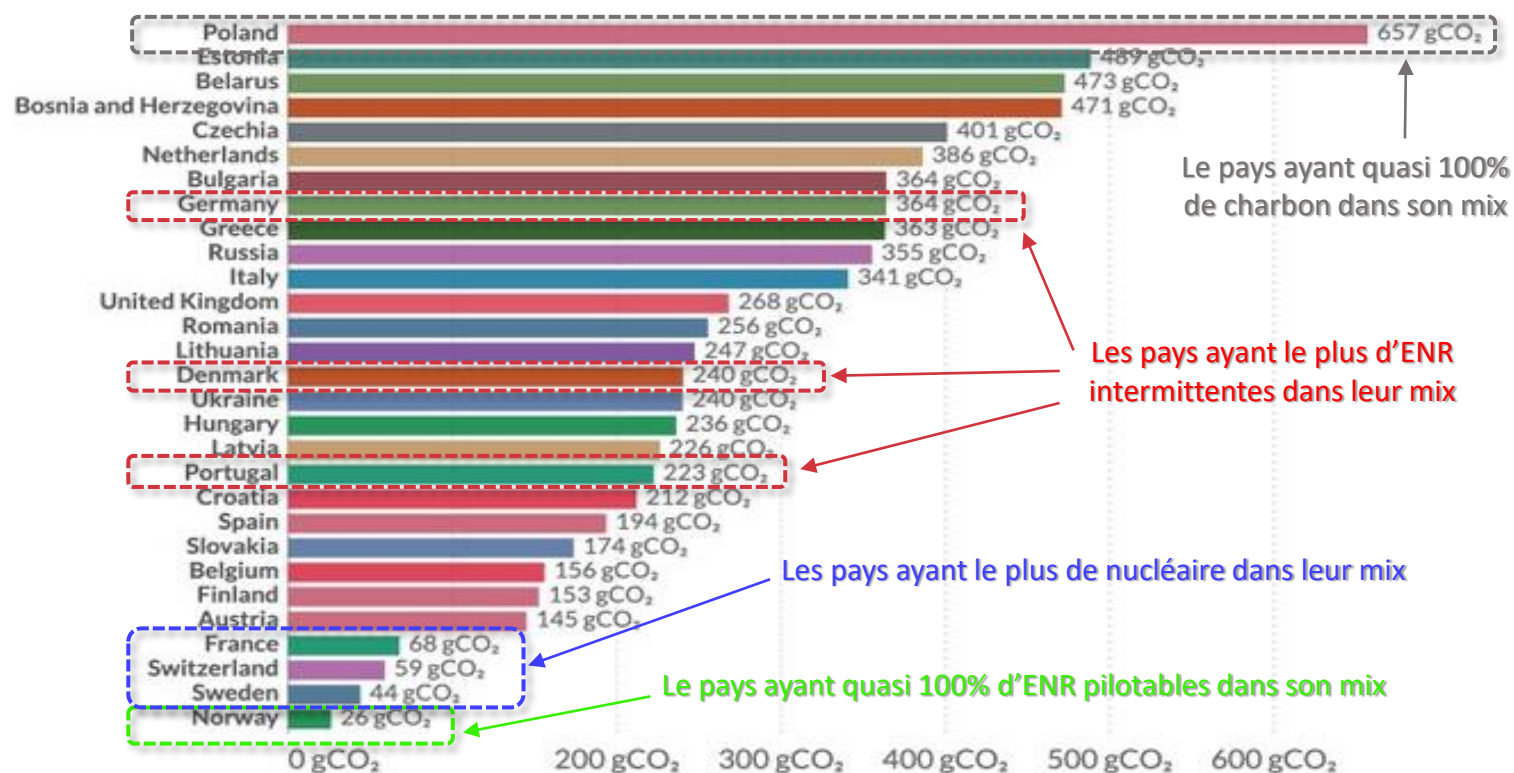


Emissions en cycle de vie pour différentes filières aujourd'hui

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

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

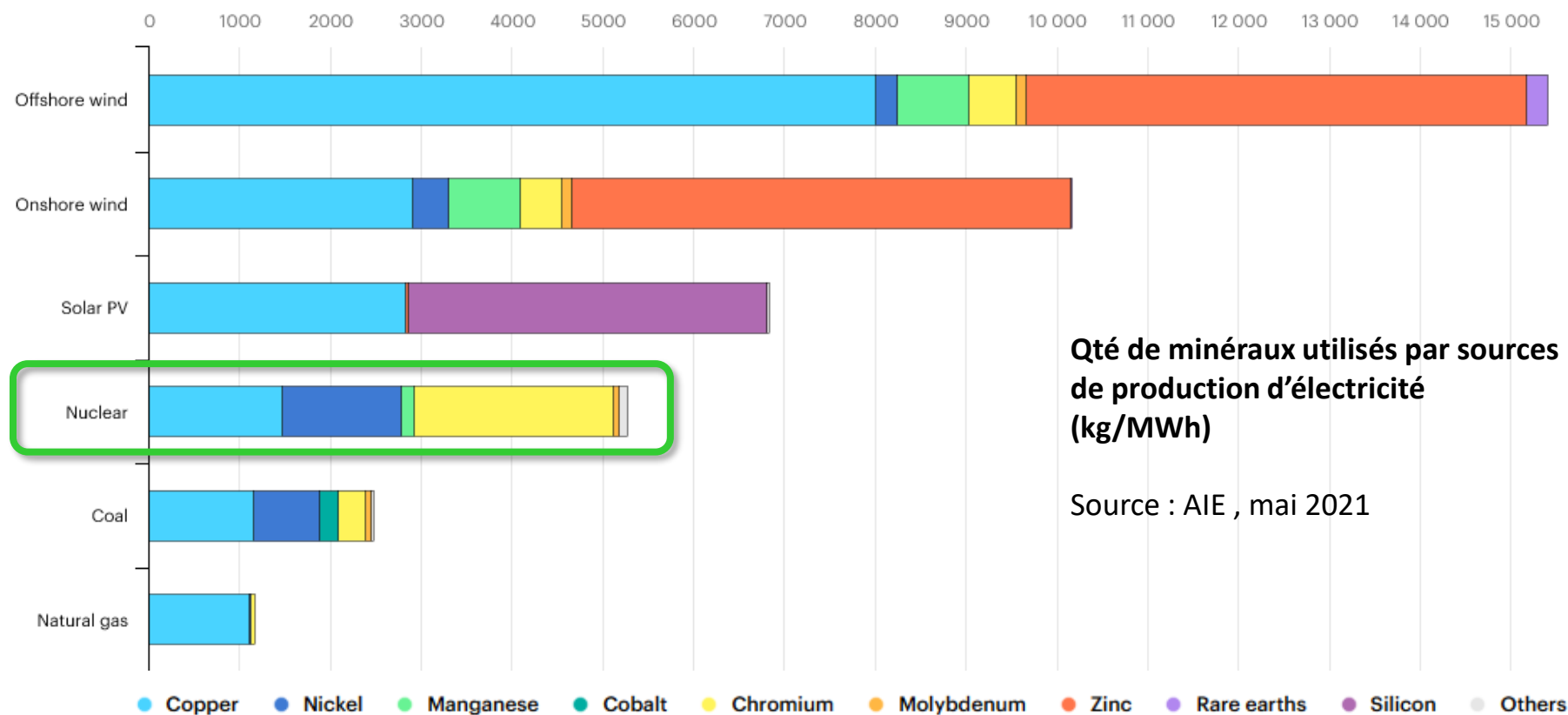
Méthodologie : ACV

Source : Ember,
in Our World in Data, 2022

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

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANÈTE : UNE FAIBLE EMPREINTE EXTRACTIVE

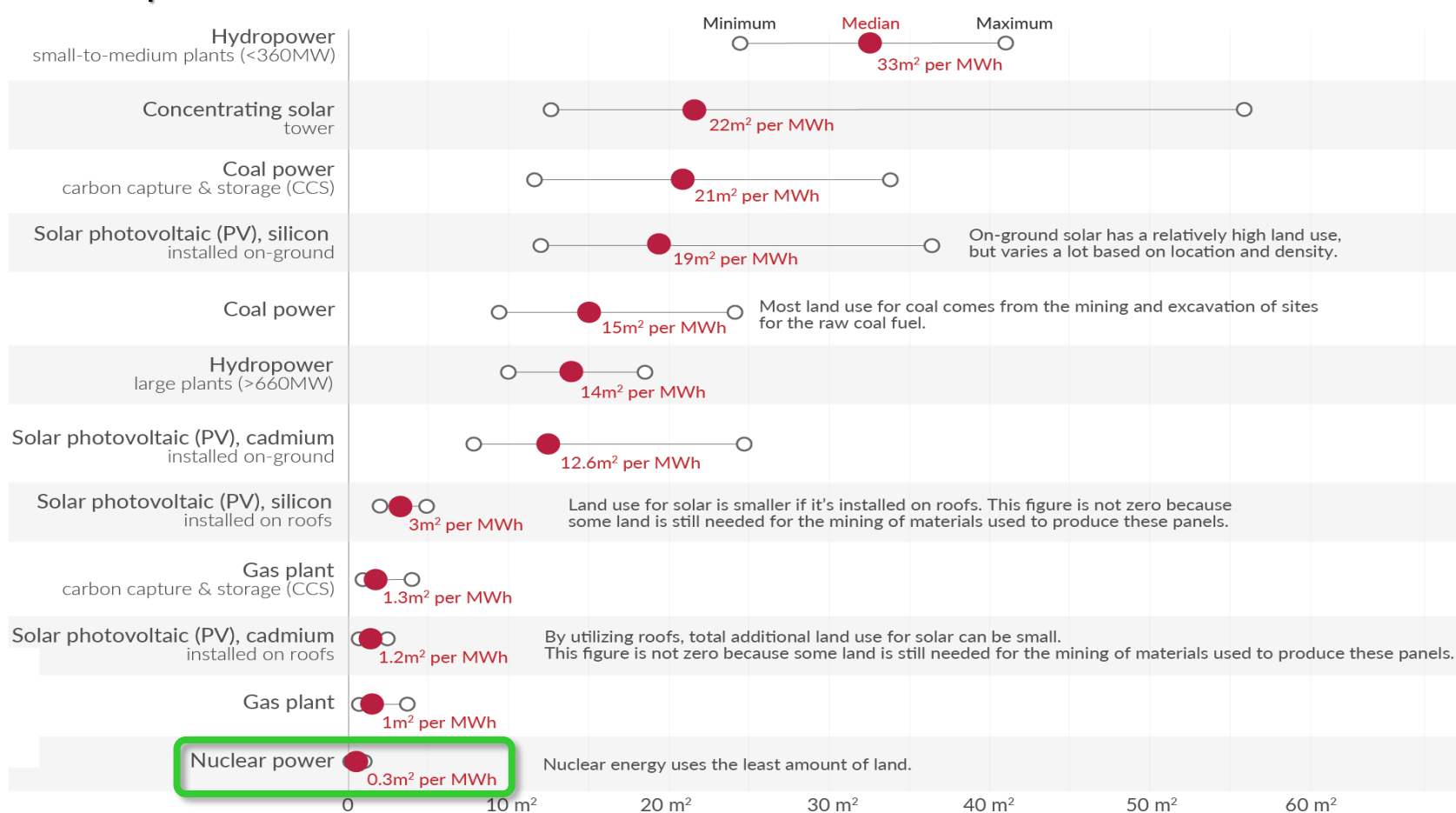
L'énergie nucléaire consomme peu de matières premières (minéraux, métaux) et de matériaux de construction (béton, acier,...), comparativement aux autres sources d'énergie électrique (toujours en raisonnant en ACV) :



3.3

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 l'énergie nucléaire à une emprise très limitée sur l'utilisation des sols :



Emprise au sol des différentes sources d'énergie (en m² par MWh)

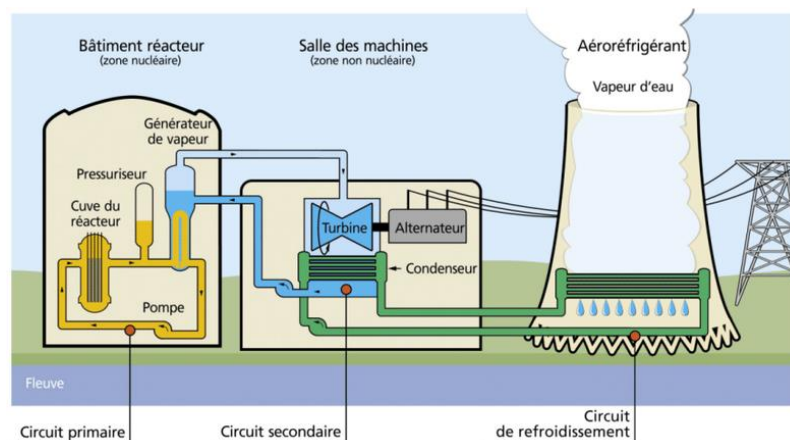
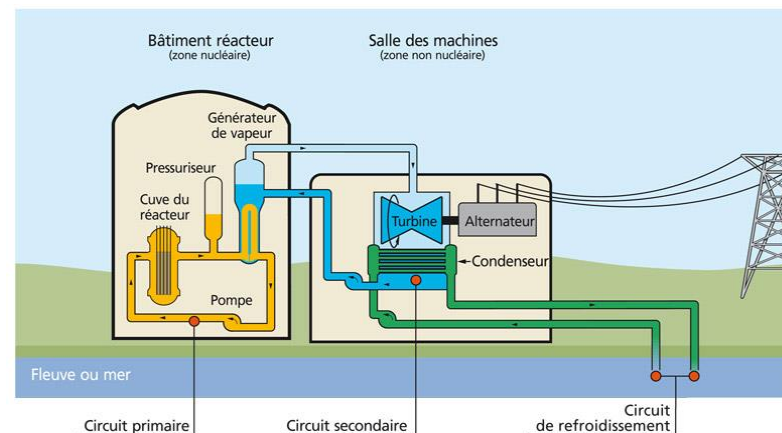
Source : Our World In Data, juillet 2022 (d'après les données de la CCE-ONU (Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies, ou UNECE)

NB : Analyse sur l'ensemble du cycle de vie (de l'extraction du minerai jusqu'à la restauration des sols post-démantèlement)

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANETE : UNE FAIBLE CONSOMMATION D'EAU

Contrairement à une idée reçue répandue, un réacteur nucléaire consomme très peu d'eau :

- Pour un réacteur en circuit ouvert (c'est-à-dire refroidi avec l'eau de rivière ou de mer), si la quantité prélevée est importante ($50 \text{ m}^3/\text{s}$), cette eau est intégralement restituée à la rivière ou à la mer



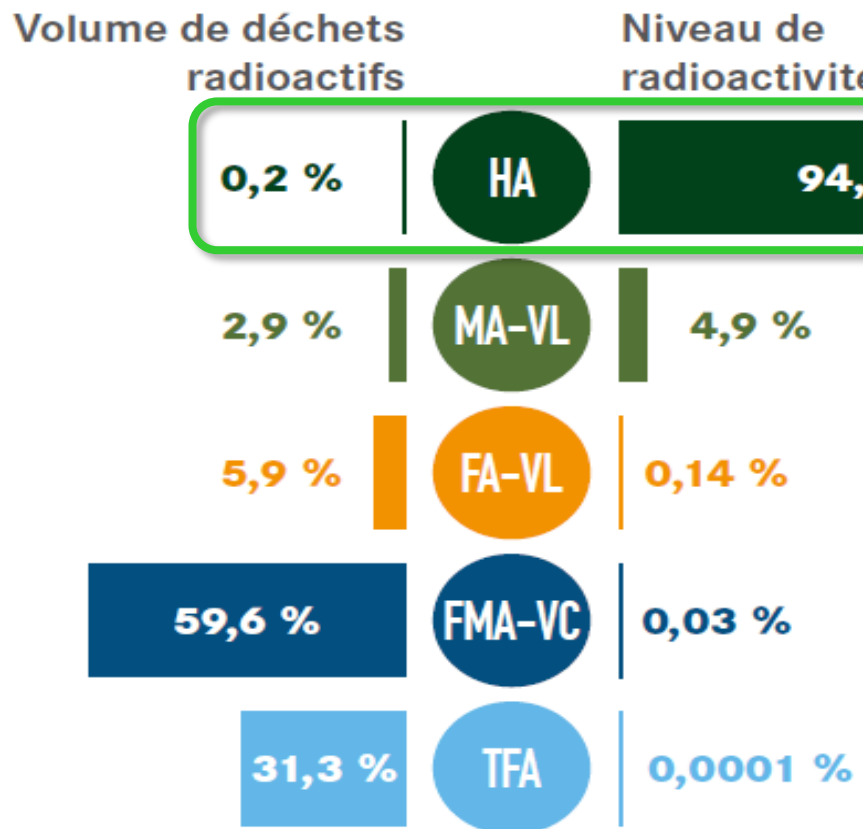
- Pour un réacteur en circuit fermé (c'est-à-dire refroidi à l'air via des tours aéroréfrigérantes), la quantité d'eau prélevée est modeste : $2 \text{ m}^3/\text{s}$, et 40% est restituée à l'atmosphère via le panache de vapeur d'eau des aéroréfrigérants ($0,8 \text{ m}^3/\text{s}$)

98%
de l'eau
prélevée est
restituée

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



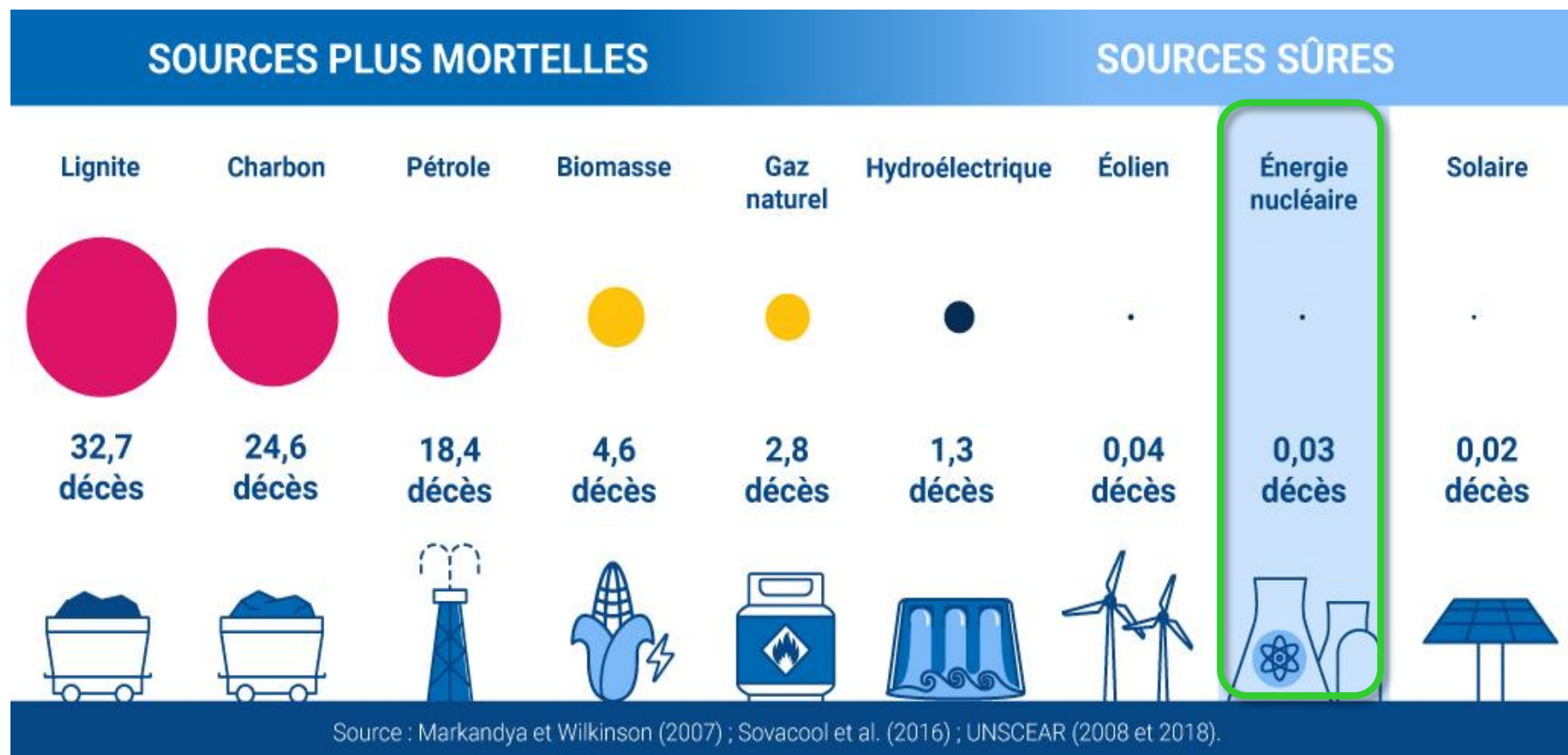
L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE / PLANETE : UN FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

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

	SR1	SR2'	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
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
	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 ⁴	2 300 000 m ³	2 200 000 m ³	2 300 000 m ³	2 100 000 m ³



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

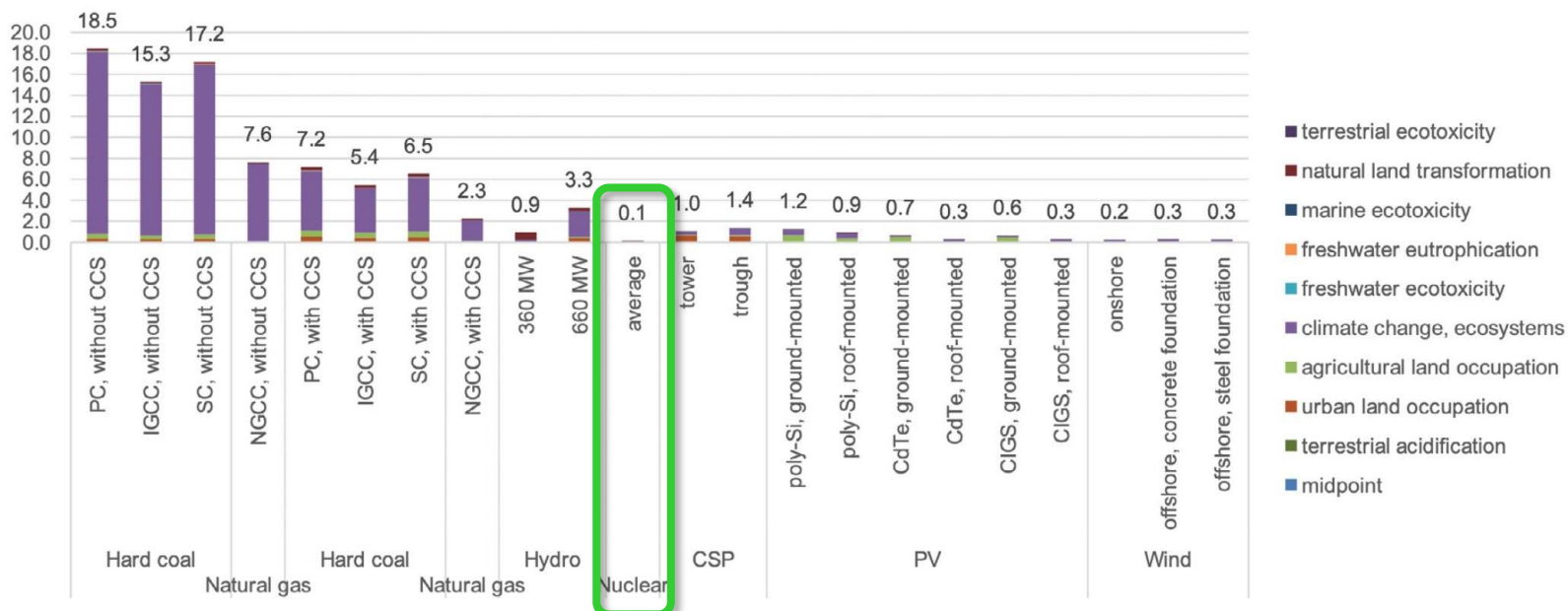
BILAN ÉCOLOGIQUE DU NUCLÉAIRE : UN FAIBLE IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES

En résumé, en prenant en compte TOUS 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.

Lifecycle impact on ecosystems, per MWh, in points



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

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



Rapport de la Commission Européenne
janvier 2019

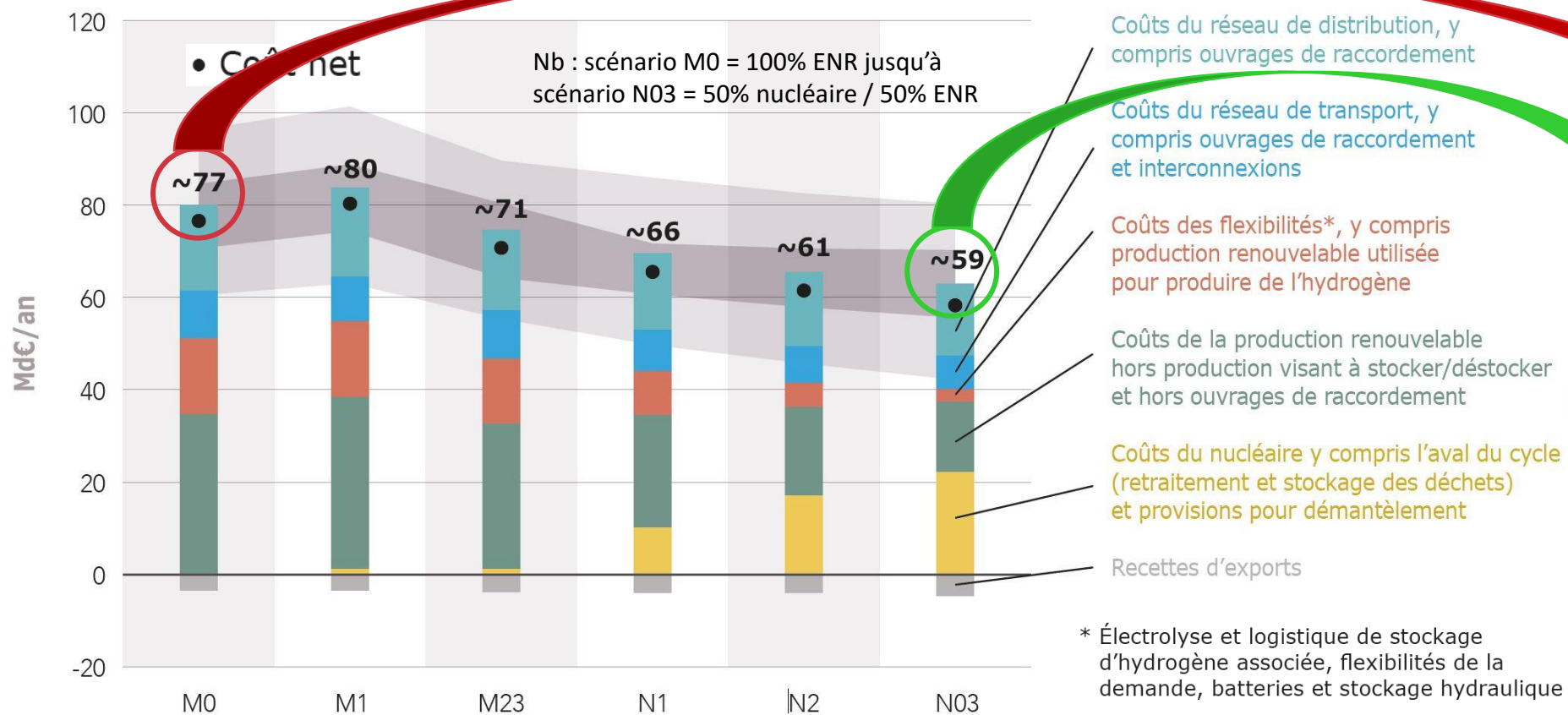
Basé sur l'étude « Energy Prices and Costs in Europe »

- 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).

3.4

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 » :



**18 milliards d'€
d'écart par an entre le
scénario 100% ENR et le
scénario 50% nucléaire !**

**Soit 500 milliards d'écart
à l'horizon 2050 !**



L'indépendance énergétique totale n'existe pas !

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)

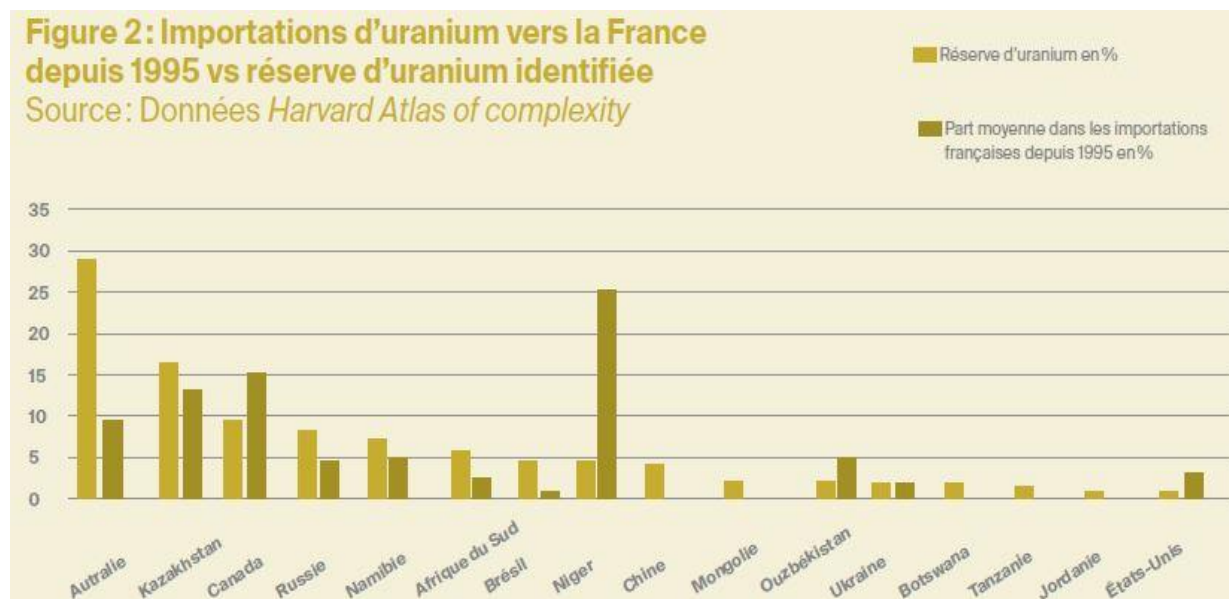
En France, ce taux d'indépendance est largement porté par l'énergie nucléaire :

- avant le déploiement du parc nucléaire,
le taux d'indépendance énergétique était de 24 % (1973)



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.

4.

Des questions ?

Pour en savoir plus :



Energie et nucléaire, parlons-en

Merci !

