

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

Thierry CAILLON



SOMMAIRE

01 – L'énergie nucléaire, de A à Z : génèse, fonctionnement, développement et perspectives

02 – Les inconvénients de l'énergie nucléaire

03 – Les atouts de l'énergie nucléaire

04 – Quelle place du nucléaire face au défi climatique ?



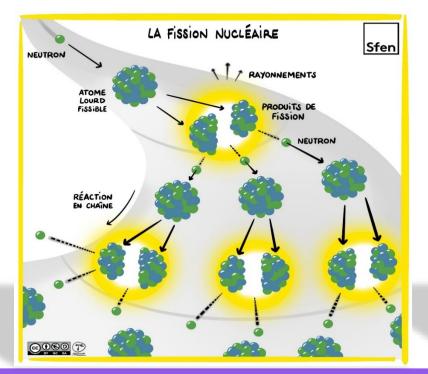


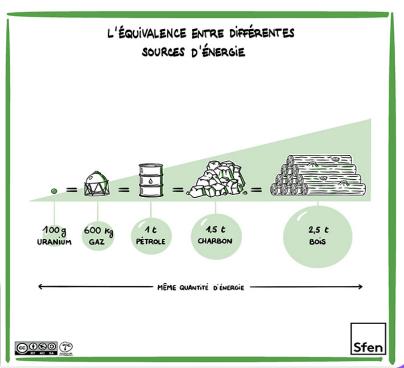
LA FISSION NUCLÉAIRE : PRINCIPE

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 :







LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

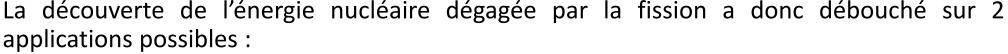
- C'est en 1938 que trois chimistes allemands (Hahn, Meitner et Strassmann), mettent en évidence le phénomène de fission nucléaire, montrant qu'un neutron peut casser un noyau d'uranium en 2 noyaux plus petits.
- En 1939, trois français (Joliot, Halban et Kowarski) mettent en évidence, outre les produits de fission et une grande quantité d'énergie, la production de 2 ou 3 neutrons de haute énergie dans la fission de l'uranium.
- Ils imaginent la possibilité d'une réaction en chaîne et déposent trois brevets, pour réaliser un réacteur nucléaire électrogène, au nom du CNRS.
- Le 2 août 1939, Einstein écrit au président américain Roosevelt, sur la demande de deux physiciens hongrois (Szilard et Wigner) qui redoutaient que l'Allemagne nazi se dote d'une bombe atomique, pour attirer son attention sur la nouvelle source d'énergie que représente l'uranium et sur la possibilité de construire une bombe.





LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- Le 1^{er} septembre 1939, la seconde guerre mondiale éclate.
- D'octobre 1939 à juin 1942, le Projet Manhattan sera mis en place, dirigé par le général Groves et le physicien Oppenheimer, pour aboutir à la construction de l'arme atomique, qui sera lancée sur Hiroshima et Nagasaki à l'été 1945.



- > les réacteurs nucléaires électrogènes d'une part,
- la bombe A d'autre part...

Et le contexte très spécifique de l'époque a fait que les recherches se sont concentrées d'abord et exclusivement sur l'application militaire, dont le monde entier a découvert les conséquences avec effroi,

Marquant ainsi jusqu'à aujourd'hui la perception du nucléaire civil, et son association, consciente ou non, au nucléaire militaire.





Une génération correspond à un saut technologique (en matière de sureté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité) mais aussi **répond à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception**.

Cette notion est différente de celle de filière ou de type de réacteur : on trouve

plusieurs technologies dans chaque génération.

Réacteurs actuels







Réacteurs du futur

1ères réalisations





Génération IV

Génération III et III+

Génération II

Génération I

1950 1960 1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

2040

2050



La **1**ère **génération** comprend les prototypes et les 1^{ers} réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960, et entrés en service avant les années 1970.

- Conçu dans l'immédiat après-guerre 39-45, ces réacteurs devaient faire la démonstration du potentiel de la puissance atomique mise au service de l'énergie civile.
- Il s'agit généralement de réacteurs refroidis à l'eau et modérés au graphite, d'une puissance comprise entre 50 et 500 MW.
- L'enrichissement de l'uranium n'étant pas encore développé, la majorité de ces réacteurs utilisaient l'uranium naturel comme combustible.
 - UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) en France
 - MAGNOX (MAGnesium-Non OXidizing) au Royaume-Uni
 - > HWGCR (Réacteur à eau lourde refroidi au gaz)





Les réacteurs nucléaires de **2**^{ème} **génération** sont entrés en service à partir de 1970.

- Ils correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier).
- La plupart des réacteurs de 2^{ème} génération sont des réacteurs à eau pressurisée (REP ou PWR). Ils utilisent de l'uranium enrichi à 3-4 % et sont modérés à l'eau. En France, les REP seront issus d'une technologie américaine (Westinghouse) adaptée par EDF.
- La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de génération 2 :
 - > REP (PWR) : réacteur à eau pressurisée
 - > REB (BWR) : réacteur à eau bouillante
 - > RRG (AGR) : réacteur avancé refroidi au gaz
 - > RELP (PHWR) : réacteur à eau lourde pressurisée
 - > VVER (WWER) : réacteur à eau pressurisée de conception soviétique
 - RBMK (REOMG) : réacteur de grande puissance à tubes de force à eau bouillante, modéré au graphite, de conception soviétique
 - > CANDU : réacteur à l'uranium naturel et à eau lourde de conception canadienne





La **3**ème **génération** de réacteurs nucléaires, conçus à partir des années 1990, et qui prend aujourd'hui progressivement le relais, met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité.

- Ces réacteurs dits « évolutionnaires » tirent les enseignements du REX de l'exploitation des réacteurs de génération 2, des accidents de Three Miles Island (1979), de Tchernobyl (1986), des attentats du 11 septembre 2001, puis ensuite de l'accident de Fukushima (2011).
- Ils intègrent des systèmes de récupération du corium en cas de fonte du cœur ainsi que des redondances accrues pour les systèmes de sécurité interne et externe et de contrôle commande.
- La majorité des réacteurs actuellement en construction dans le monde sont des réacteurs de génération 3 :
 - > l'EPR, l'EPR2 et l'EPR1200 (european pressurized reactor) français (Framatome)
 - ➤ I'AP 600 et AP 1000 (advanced pressurized) américano-japonais (Westinghouse)
 - ► l'AES 2006, dernier modèle de 1 200 MWe du VVER russe
 - > l'ABWR et l'ESBWR (réacteurs à eau bouillante) (GE Hitachi Toshiba)
 - ➢ Il y a aussi : le coréen APR 1400, le chinois HUALONG 1, le canadien EC6 (dernier modèle du CANDU), le japonais APWR





La **4**ème **génération** correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2030-2050.

- Ils sont en **rupture technologique totale** avec tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi 4 critères auxquels ils devront répondre : la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire.
- 6 technologies ont été retenues, dont 3 sont des réacteurs à neutrons rapides (RNR), une technologie qui permettrait de produire 50 à 100 fois plus d'électricité que les réacteurs actuels, et qui limiterait la durée de vie des déchets radioactifs à quelques centaines d'années :
 - > RNR (FNR): RNR-Na (SFR) / RNR-G (GFR) / RNR-Pb (LFR): réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, au gaz, ou au plomb
- Les trois autres technologies sont :
 - > RESC (SCWR) : réacteurs à eau supercritique
 - > RTHT (VHTR) : réacteurs à très haute température
 - > RSF (MSR): réacteurs à sels fondus
- Il y a également en développement, depuis quelques années :
 - > SMR: réacteurs compacts modulaires, de petite puissance (300-400 MW)



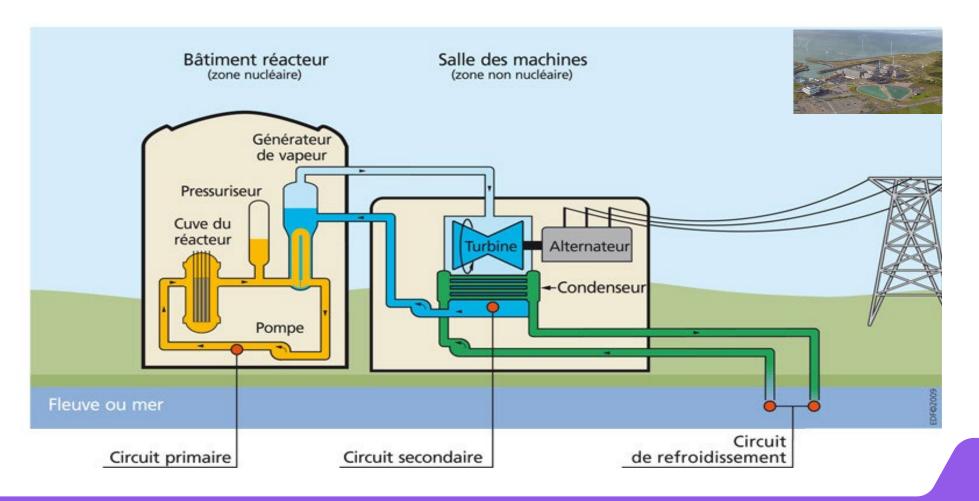


- On trouve 6 grands types de réacteurs en exploitation dans le monde. La concentration en uranium du combustible utilisé, le modérateur utilisé pour ralentir le processus de fission, et le caloporteur utilisé pour transférer la chaleur, varient d'un modèle à l'autre.
- Sur les 444 réacteurs en exploitation dans le monde à fin 2021, les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont le type le plus répandu, avec 66% du parc mondial

Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Caloporteur	Nombre
Réacteur à eau sous pression (REP)	UO2 enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	292
Réacteur à eau bouillante (REB)	UO2 enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	75
Réacteur à eau lourde sous pression (RELP)	UO2 naturel	Eau lourde	Eau lourde	49
Réacteur à eau ordinaire modéré au graphite (REOMG)	UO2 enrichi	Graphite	Eau ordinaire	15
Réacteur refroidi par gaz (RRG)	U naturel et UO2 enrichi	Graphite	Dioxyde de carbone	14
Réacteur à neutrons rapides (RNR)	PuO2 et UO2	Aucun	Sodium liquide	3

LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR

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

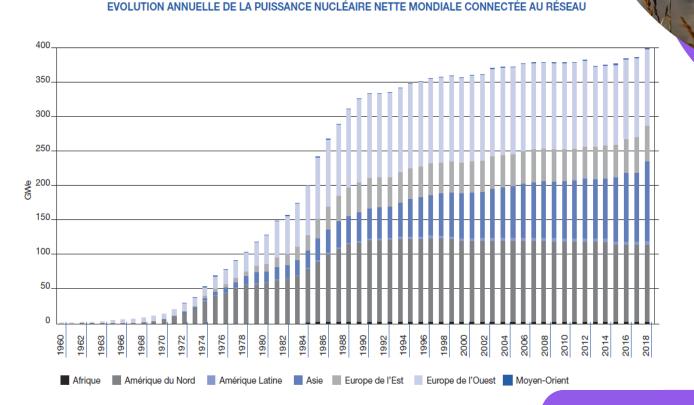




PANORAMA DU PARC MONDIAL

L'énergie nucléaire contribue pour 5% à la consommation mondiale d'énergie primaire, et pour 10% à la production mondiale d'électricité (en évitant 40% des émissions de CO2).

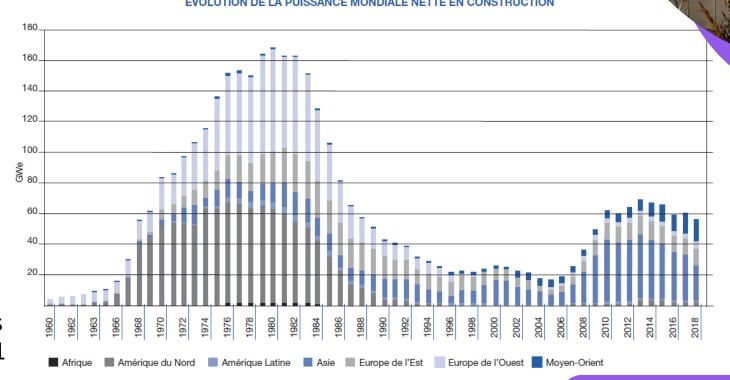
- En 2021, le parc nucléaire civil mondial comptait 447 réacteurs dans 32 pays.
- En 2019, ce sont les Etats-Unis qui ont produit le plus d'électricité nucléaire avec 96 réacteurs,
- devant la France avec 58 réacteurs,
- la Chine avec 47 réacteurs,
- et la **Russie** avec 38 réacteurs.



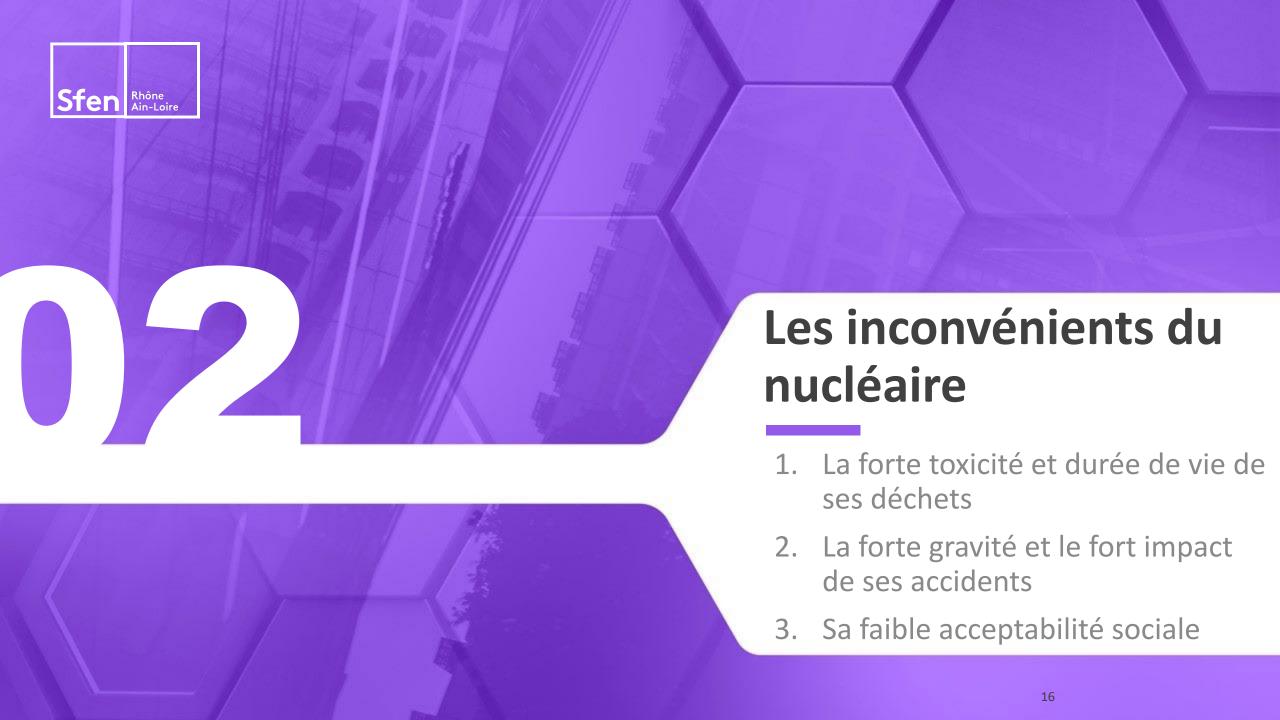
PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

Après deux décennies de tassement de l'activité de construction, les chantiers de centrales nucléaires reprennent :

- Fin 2021, il y avait 56 réacteurs en construction, dans 19 pays (dont 16 en Chine),
 après 52 en 2020
- Et **70 constructions planifiées**, dans 8 pays (dont 31 en Chine, 21 en Russie, et 9 au Japon), après 67 en 2020
- En 2022, 6 nouvelles tranches ont été mises en service (toutes en Asie : 3 en Chine, 1 en Inde, 1 au Pakistan, et 1 aux EAU), après 6 en 2021, et 5 en 2020







LA FORTE TOXICITÉ ET DURÉE DE VIE DE SES DÉCHETS

Deux paramètres caractérisent les déchets radioactifs : leur activité et leur durée de vie :

Période radioactive*	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		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	VTC	FMA-VC	Stockage à faible profondeur à l'étude		
Moyenne activité (MA) de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g	Gestion par décroissance radioactive	Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	Stockage géologique profond en projet		
Haute activité (HA) de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	re de plusieurs Non applicable		(projet Cigéo)		

 La radioactivité se mesure en Béquerel/gramme (un humain de 80 kg dégage 8 000 Bq/s)

Déchet vitrifié (sans plutonium & uranium) Déchet vitrifié (sans plutonium & uranium) Déchet vitrifié sans actinides mineurs Années

Combustible usé

La durée de vie des déchets HA (en France) est très importante :

• 10 000 ans pour revenir au niveau de l'uranium naturel



LA FORTE GRAVITÉ ET LE FORT IMPACT DE SES ACCIDENTS

Le nucléaire civil a occasionné 3 accidents majeurs : TMI, Tchernobyl, Fukushima. Sans entrer dans le détail précis du scénario de chaque catastrophe, il est cependant utile d'aborder en 1^{er} lieu leurs causes majeures et les caractéristiques différenciantes des install-lations, afin de mieux comprendre leurs conséquences sanitaires, sociales et économiques :

Three Miles Island

(1979, USA):

- REP
- 2 défaillances matérielles
- 3 erreurs humaines
- Fusion partielle du coeur
- Faibles rejets sur qq heures
- **0** décès différé
- **0** morbidité induite

Tchernobyl (1986, Ukraine):

- RBMK
- 3 non respects volontaires des règles de conduite
 + 3 inhibations volontaires de systèmes de sûreté
- Absence enceinte de confinement
- Explosion du cœur + Incendie du graphite
- Rejets continus pendant 10j
- Dépots des rejets sur 13 000 km2
- **50** décès immédiats
- **7 000** cancers thyroide (+ 9 000 autres cancers potentiels ?)
- Augmentation morbidité

Fukushima (2011, Japon):

- REB
- Perte totale source refroidissement et source électrique (suite au tsunami)
- Absence recombineur d'hydrogène
- Fusion partielle de 3 cœurs + Explosion de l'hydrogène ds 3 BK
- 15 rejets discontinus sur 2 sem
- Dépot des rejets sur 250 km (600 km2)
- **0** décès immédiat
- 1 décès différé ?
- Augmentation morbidité



2 3 SA FAIBLE ACCEPTABILITÉ SOCIALE

L'énergie nucléaire est impopulaire aux yeux de certains, pour 3 raisons principales :

- L'inquiétude légitime sur le niveau de sûreté (Tchernobyl, Fukushima),
- L'inquiétude légitime sur les déchets radioactifs (toxicité/l'environnement et passif transmis aux générations futures),
- L'association, consciente ou inconsciente, entre le nucléaire civil et le nucléaire militaire (Hiroshima).

Ces 3 sujets d'inquiétudes, sont amplifiés et déformés par les phénomènes suivants :

- La complexité des questions scientifiques et techniques qui sont liées à l'énergie nucléaire, ce qui ne facilite pas son appropriation par le grand public, mais aussi par les médias (la filière nucléaire n'ayant pas dans le passé été très efficace en terme de communication et vulgarisation),
- Un traitement par les médias souvent médiocre, voire parfois éronné (plus centré sur le "buzz" que sur l'argumentation scientifique),
- Un traitement par certains politiques et ONG environnementales basé sur des positions dogmatiques, et non sur des faits avérés.



2 3 SA FAIBLE ACCEPTABILITÉ SOCIALE

Non, pas vraiment 26%

(2019:13%)

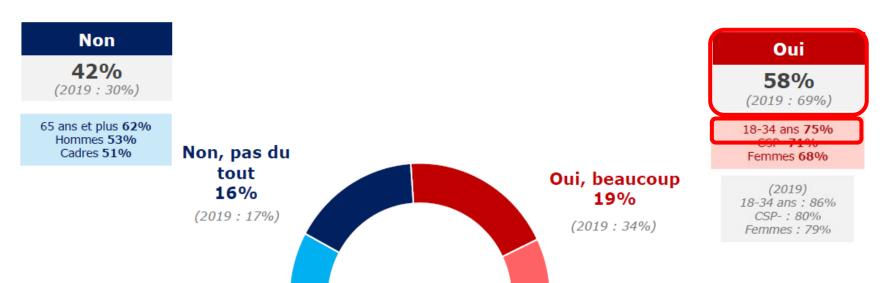
• Avec pour résultat une perception du public éloignée de la réalité des faits :

Q4. Selon vous, le nucléaire contribue-t-il à la production de gaz à effet de serre (CO2) et au dérèglement climatique ?

Oui, un peu

39%

(2019:35%)



Sondage BVA, mai 2021:

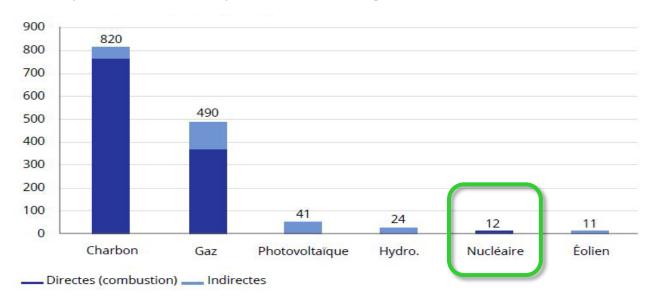
« Les français et le nucléaire : connaissances et perceptions »





SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

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

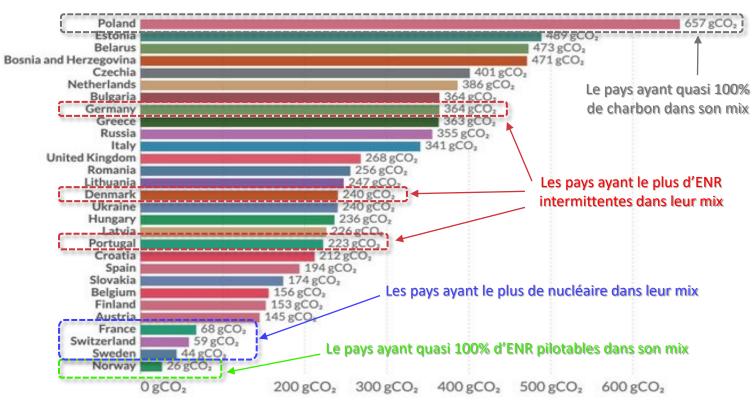
En France, compte tenu de la faible empreinte carbone de l'électricité utilisée pour l'étape de l'enrichissement de l'uranium, le niveau d'émissions est beaucoup plus faible :

- ➢ 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



SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

Grace à l'énergie nucléaire (70% 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

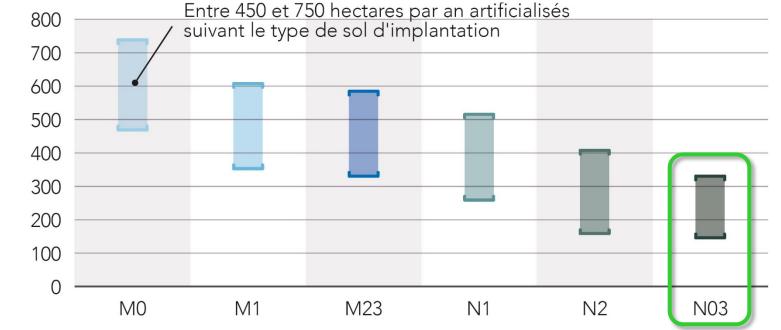
 La France est le seul pays de l'OCDE a avoir déjà atteint un des objectif de l'AIE fixé pour 2050 (mini 80% de décarbonation du mix électrique)



SON FAIBLE IMPACT SUR LES ECOSYSTÈMES

hectares/an

Du fait de sa forte dénsité énérgétique, 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 à une emprise très limitée sur l'utilisation des sols :



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

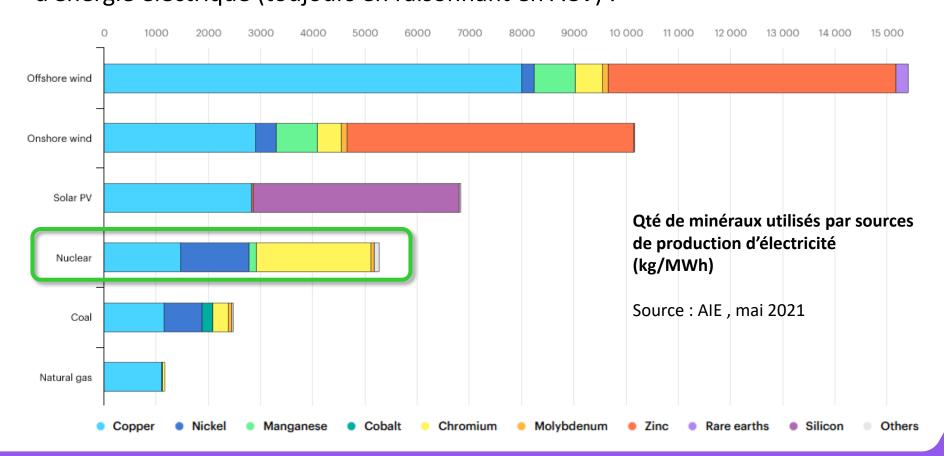
Source : rapport RTE « Futurs énergétique 2050 », octobre 2021

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



SON FAIBLE IMPACT SUR LES ECOSYSTÈMES

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) :



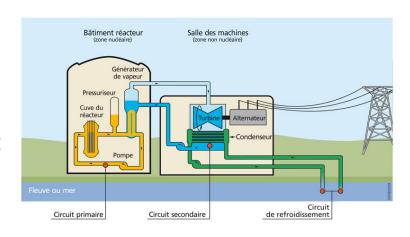


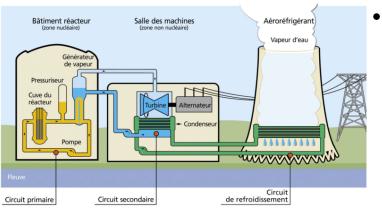


SON FAIBLE IMPACT SUR LES ECOSYSTÈMES

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

Pour un réacteur en circuit ouvert (c'est-àdire refroidi avec l'eau de rivière ou de mer), si la quantité prélevée est importante (150 à 180 L/kWh, cad 50 m3/s), cette eau est intégralement restituée à la rivière ou à la mer



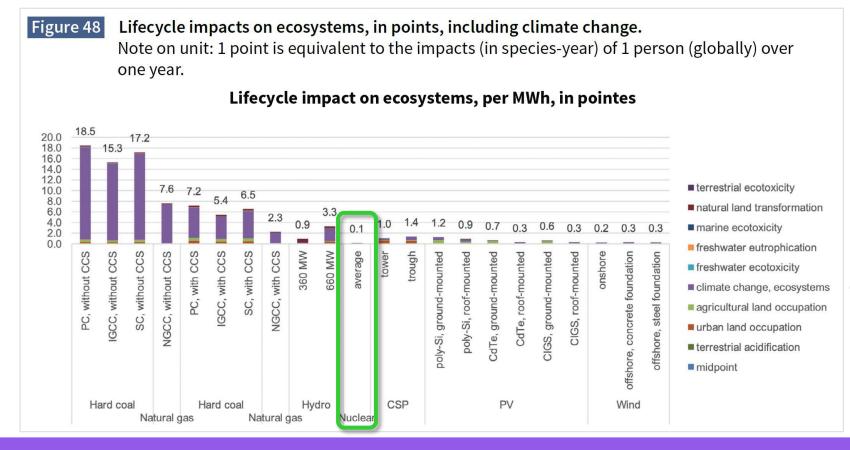


 Pour un réacteur en circuit fermé (c'est-à-dire refroidi à l'air via des tours aéroréfrigérantes), la quantité d'eau prélevée est modeste : 6 à 8 L/kWh, cad 2 m3/s, et 40% est restituée à l'atmosphère via le panache de vapeur d'eau des aéro-réfrigérants (0,8 m3/s)



SON FAIBLE IMPACT SUR LES ECOSYSTÈMES

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 :





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



SON FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

Les déchets radioactifs : des montagnes de déchets ?

Volume de déchets Niveau de radioactifs radioactivité HA 0,2 % 94,9 % 2,9 % 0,03 % 59,6 % TFA 31,3 % 0,0001 %

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 a Vie Courte*

TFA: Très Faible Activité (à Vie Courte*)



^{*} Vie Courte = période radioactive ≤ 31 ans

3 Son faible volume de déchets

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

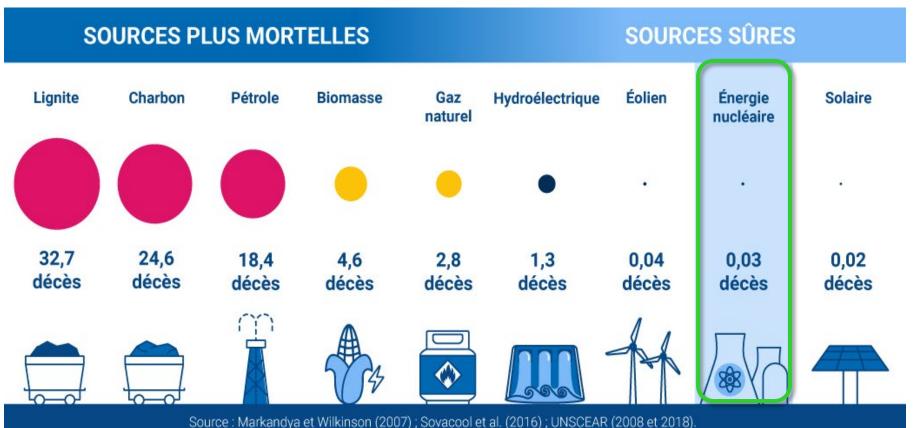
		SR1	SR2 ^t	SR3	SNR
Poursuit	te ou arrêt de la production électronucléaire	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement de 50 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Arrêt au bout de 40 ans (sauf EPR™ au bout de 60 ans)
Type de	réacteurs déployés dans le futur parc	EPR puir RNR	EPR puis RNR	EPR	1
Retraitement des combustibles usés		Tous UNE, URE, MOX et RNR	Tous UNE, URE, MOX et RNR	UNE seuls	Arrêt anticipé du retraitement des UNE
	ication des combustibles usés ranium en déchets	Aucune	Aucune	URE, MOX, RNR et uranium appauvri	Tous combustibles usés, uranium appauvri et URT
НА	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	-	-	е д	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*		2 300 000 m ³	2 200 000 m ³	2 300 000 m ³	2 100 000 m ³

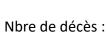




3 4 SA FORTE SURETÉ

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





- 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



3 5 SON COUT COMPÉTITIF

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





Rapport de la Commission Européenne janvier 2019

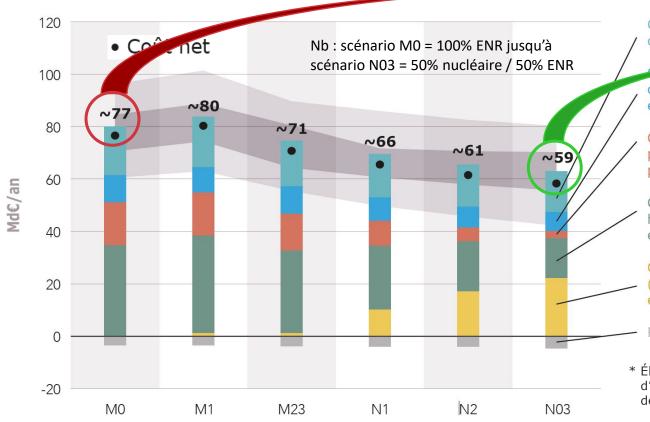
Basé sur l'étude « Energy Prices and Costs in Europe »

 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 interconnexions supplémentaires.



3 Son cout compétitif

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



Coûts du réseau de distribution, y compris ouvrages de raccordement

Coûts du réseau de transport, y compris ouvrages de raccordement et interconnexions

Coûts des flexibilités*, y compris production renouvelable utilisée pour produire de l'hydrogène

Coûts de la production renouvelable hors production visant à stocker/déstocker et hors ouvrages de raccordement

Coûts du nucléaire y compris l'aval du cycle (retraitement et stockage des déchets) et provisions pour démantèlement

Recettes d'exports

* Électrolyse et logistique de stockage d'hydrogène associée, flexibilités de la demande, batteries et stockage hydraulique 18 milliards d'€ d'écart par an entre le scénario 100% ENR et le scénario 50% nucléaire!

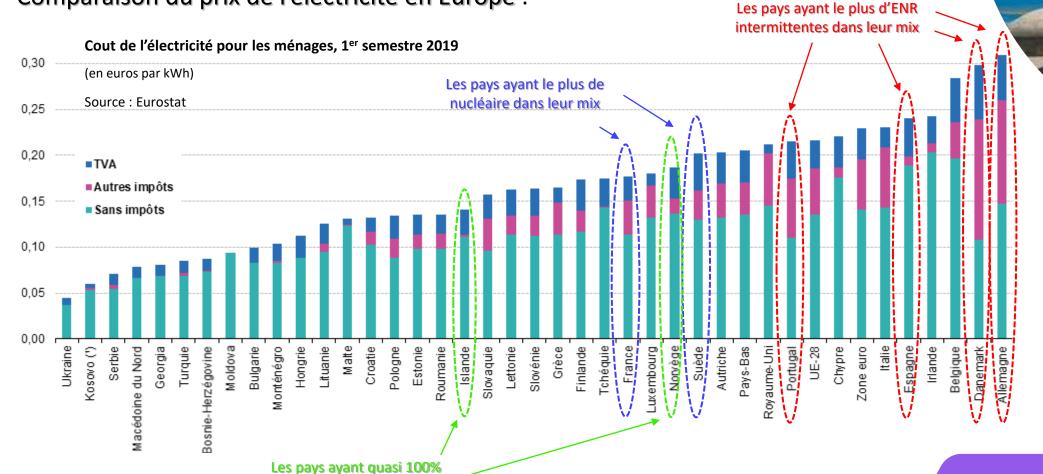
Soit 500 milliards d'écart à l'horizon 2050!



Son cout compétitif

Comparaison du prix de l'électricité en Europe :

d'ENR pilotables dans leur mix



3 6 SON DEGRÉ DE SOUVERAINETÉ ELÉVÉ

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)
- « 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

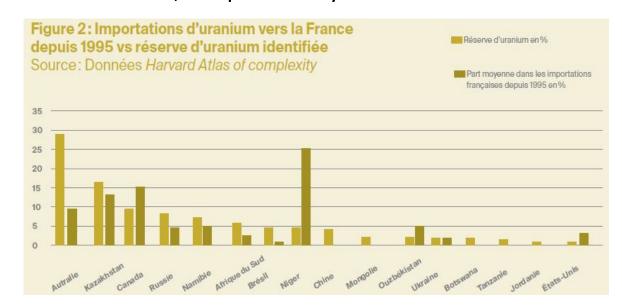


Son degré de souveraineté elévé

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.





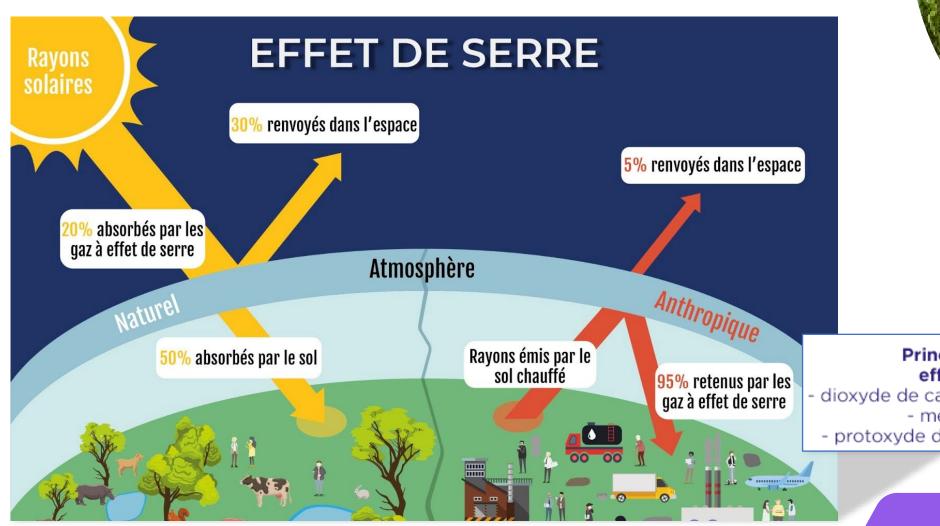
Par ailleurs, la France dispose d'un stock d'uranium appauvri qui peut se substituer à **7 ou 8 ans** de consommation d'uranium naturel (source : Orano), soit un total de **10 ans** de stock.

Et avec des réacteurs à neutrons rapides, nous disposerions de 2 à 3000 ans de stock.





L'EFFET DE SERRE, C'EST QUOI?







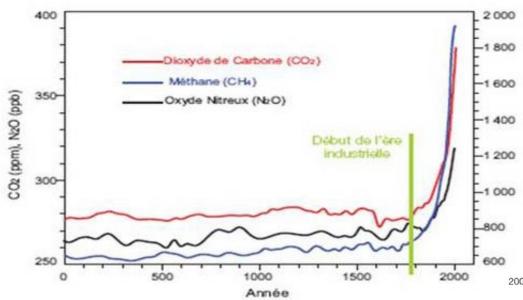
- dioxyde de carbone (CO²) - méthane (CH₄)

- protoxyde d'azote (N₃O)

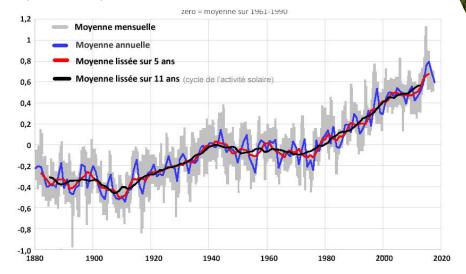


LES EMISSIONS DE GES, EST-CE UN PROBLEME ?

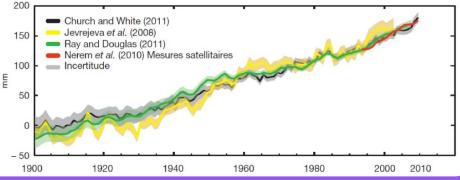
Evolution des concentrations des GES (GIEC, 2007)



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



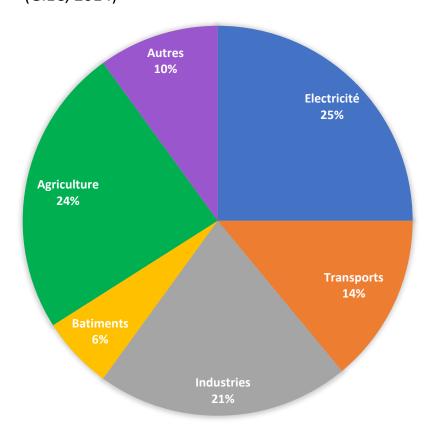
Evolution du niveau moyen des mers, par rapport à la période 1900-1905 (GIEC, 2013)



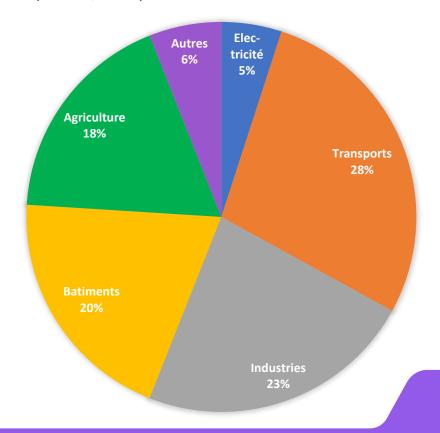


QUELS SONT LES SECTEURS LES PLUS EMETTEURS DE GES ?

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)

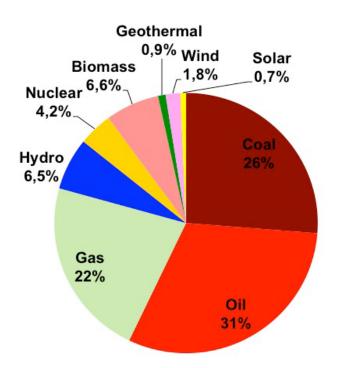




QUEL EST LE ROLE DE L'ENERGIE DANS LES ÉMISSIONS DE GES ?

Consommation mondiale d'énergie primaire

(BP Statistical Review, 2017)

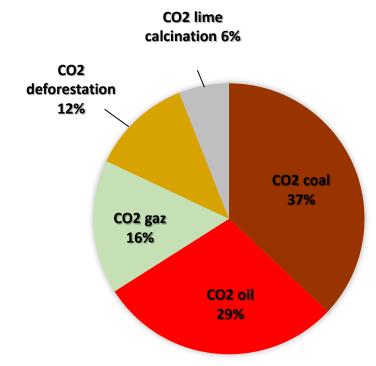


79% de la consommation d'énergie primaire provient de sources fossiles

(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,...)





QUEL EST LE ROLE DE L'ENERGIE 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.**







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 $+1,5\,^{\circ}$ C ou $+2\,^{\circ}$ 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'içi 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



Electrifier massivement les usages



Intensifier l'efficacité énergétique



Promouvoir et engager la sobriété





Merci!

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



Thierry CAILLON in 🗾



