

L'électronucléaire, une énergie d'avenir ?

Thierry CAILLON



SOMMAIRE

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

02 – Les inconvénients de l'énergie nucléaire

03 – Les atouts de l'énergie nucléaire



01

L'énergie nucléaire, de A à Z

1. La fission : principe et génèse
2. L'essor de l'énergie nucléaire
3. Le fonctionnement d'un réacteur
4. Panorama et perspective du parc mondial

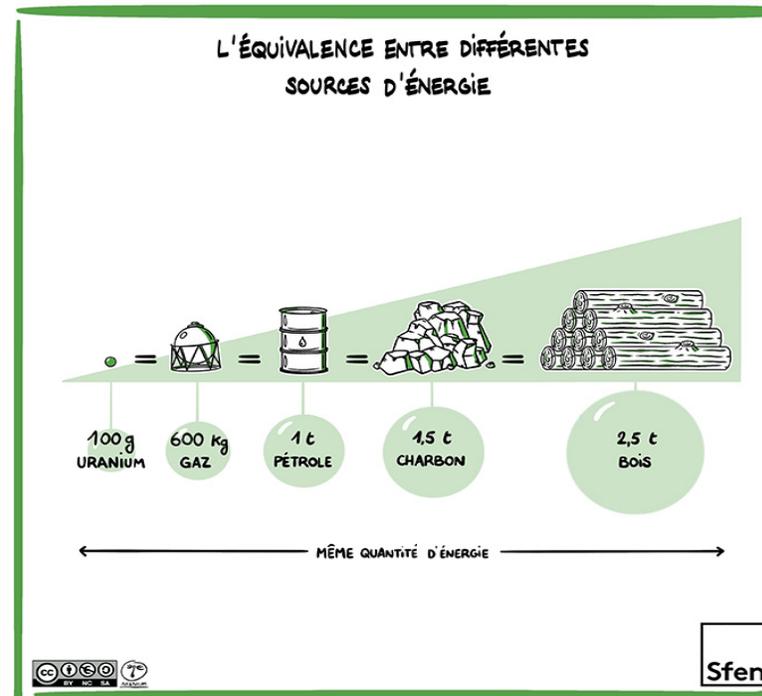
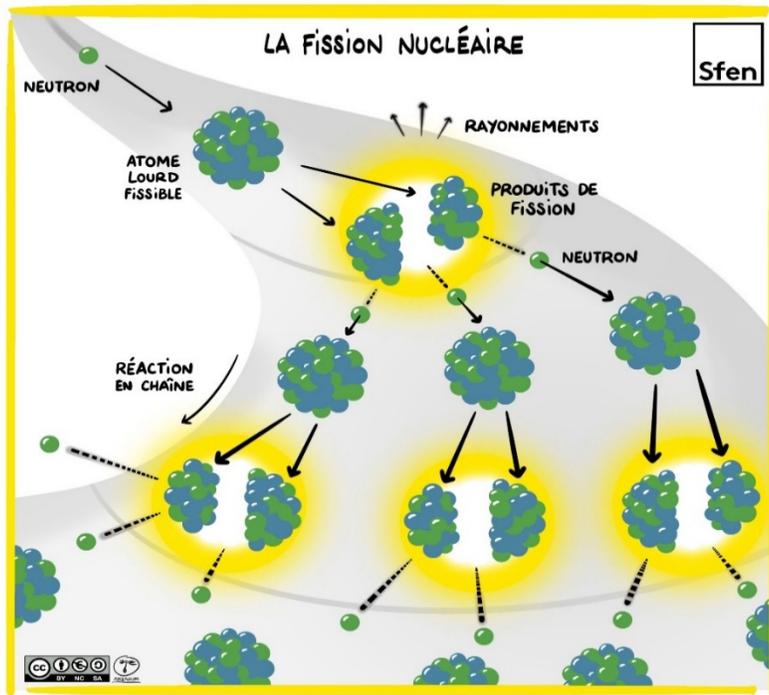
1.1

LA FISSION NUCLÉAIRE : PRINCIPE

La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd instable 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 pdt 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.



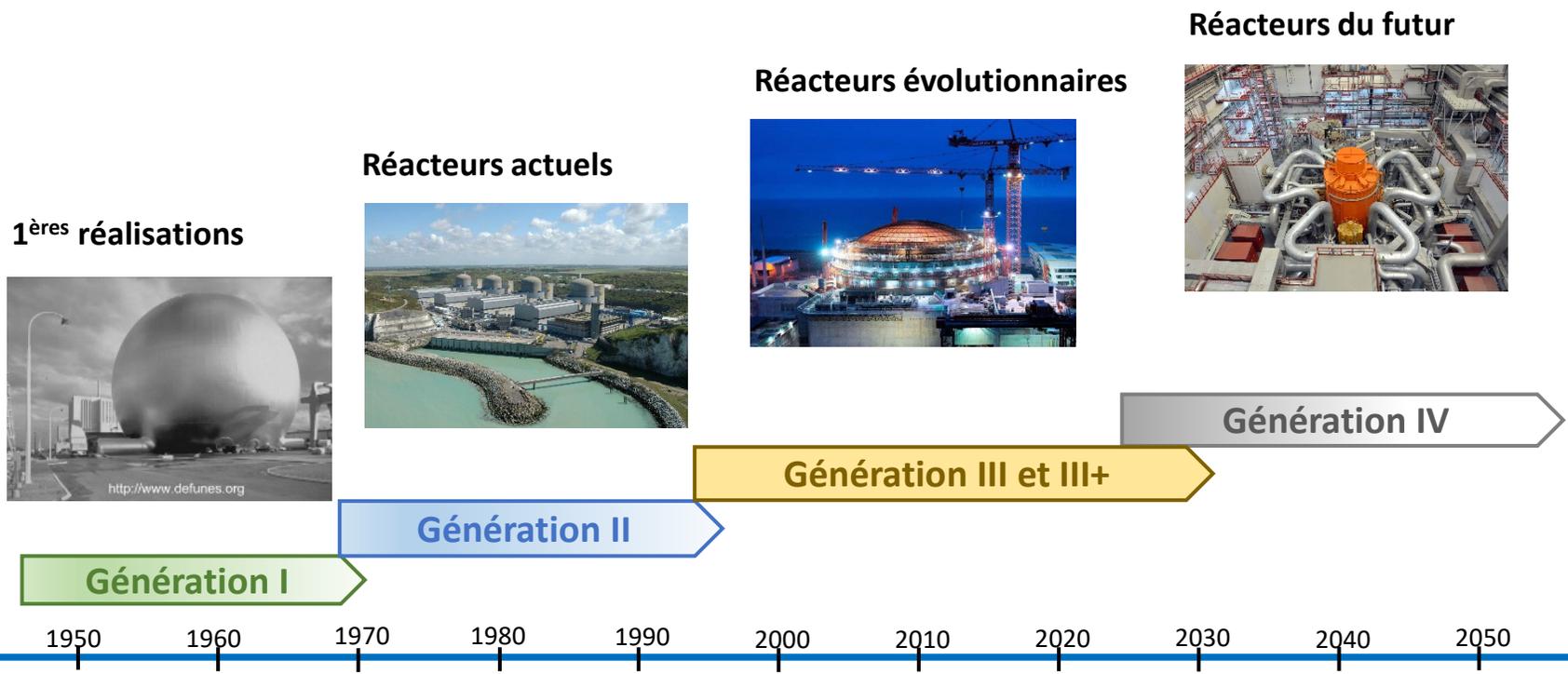
- **Le 1^{er} septembre 1939, la seconde guerre mondiale éclate**
- **D'octobre 1939 à juin 1942, le Projet Manhattan sera mis en place**, dirigé par le général Groves et le physicien Oppenheimer, pour aboutir à la construction de l'arme atomique, qui sera lancée sur Hiroshima et Nagasaki à l'été 1945.
- La découverte de l'énergie nucléaire dégagée par la fission a donc débouché sur 2 applications, les réacteurs nucléaires électrogènes d'une part et la bombe A d'autre part,
- Et le **contexte très spécifique de l'époque a fait que les recherches se sont concentré en premier 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.**



1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

Une génération correspond à un saut technologique, et **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.



1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

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)

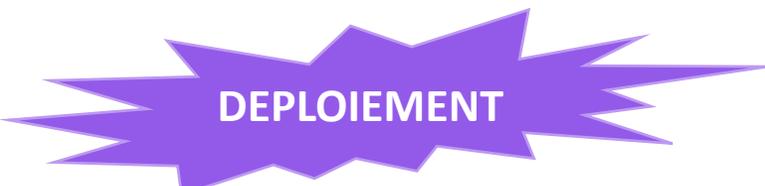


FAISABILITE

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

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



DEPLOIEMENT

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

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 (european pressurized reactor) français (Framatome)
 - l'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 (dérivé de la GEN II), le canadien EC6 (dernier modèle du CANDU), le japonais APWR ou encore les français ATMEA et KERENA conçus par Framatome en collaboration avec d'autres électriciens



OPTIMISATION

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

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)



DURABILITE

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

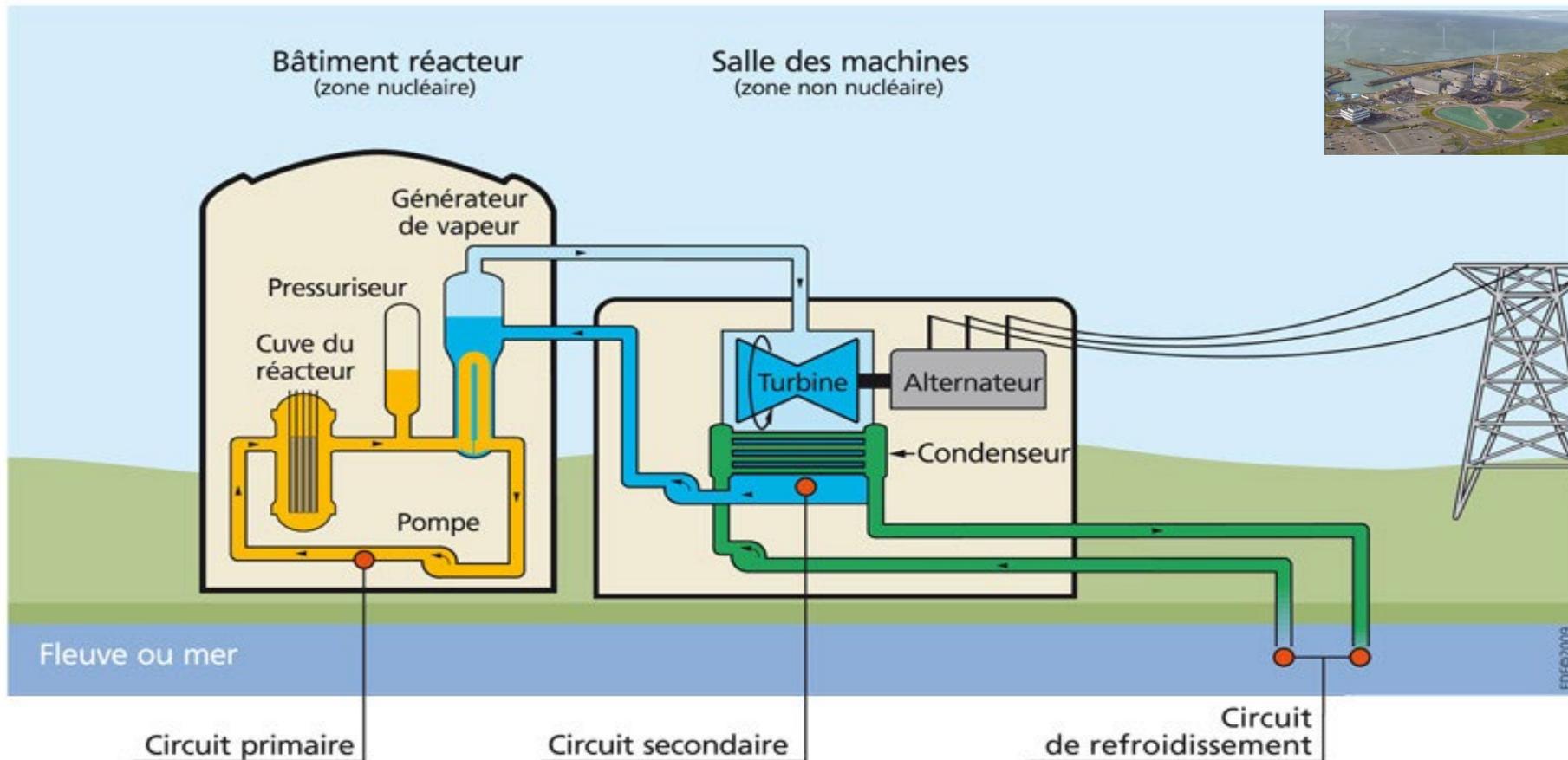
- On trouve 6 grands types de réacteurs en exploitation dans le monde. La concentration en uranium du combustible utilisé, le modérateur utilisé pour ralentir le processus de fission, et le caloporteur utilisé pour transférer la chaleur, varient d'un modèle à l'autre.
- Sur les 444 réacteurs en exploitation dans le monde en 2020, 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 (RELPS)	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

1.3 LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR

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

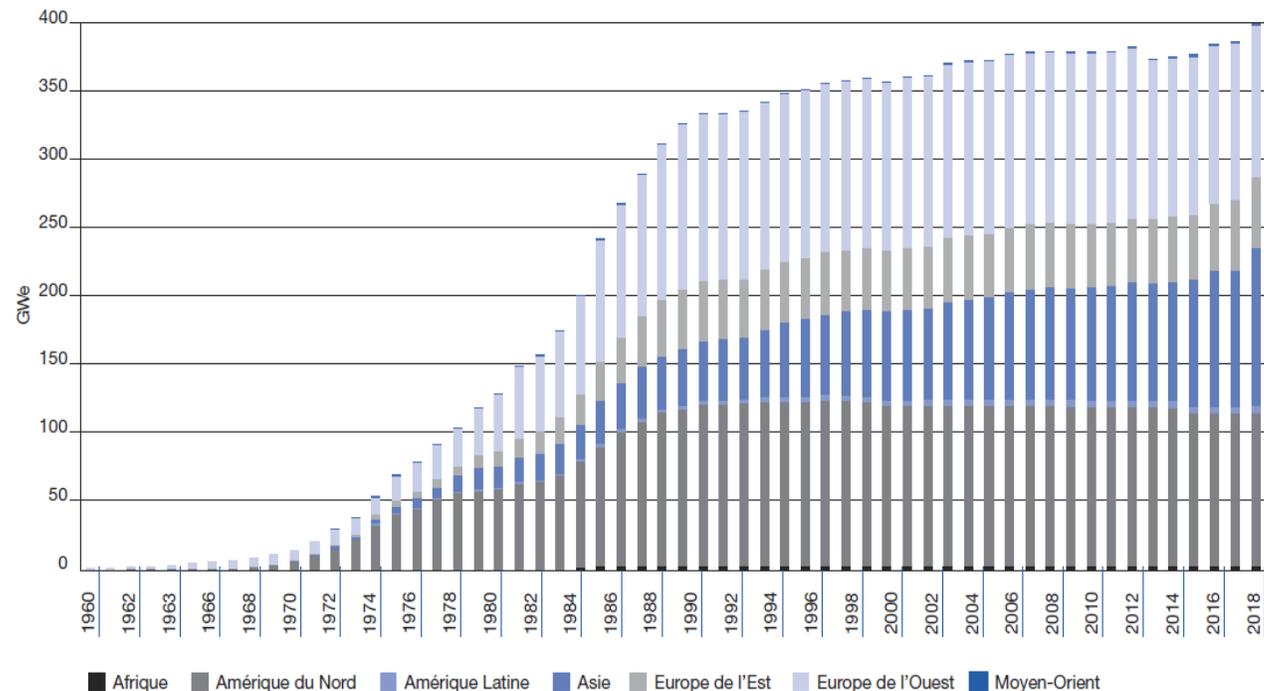


1.4 PANORAMA DU PARC MONDIAL

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).

- Au début de l'année 2020, le parc nucléaire civil mondial comptait **444 réacteurs** dans **31 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.

EVOLUTION ANNUELLE DE LA PUISSANCE NUCLÉAIRE NETTE MONDIALE CONNECTÉE AU RÉSEAU



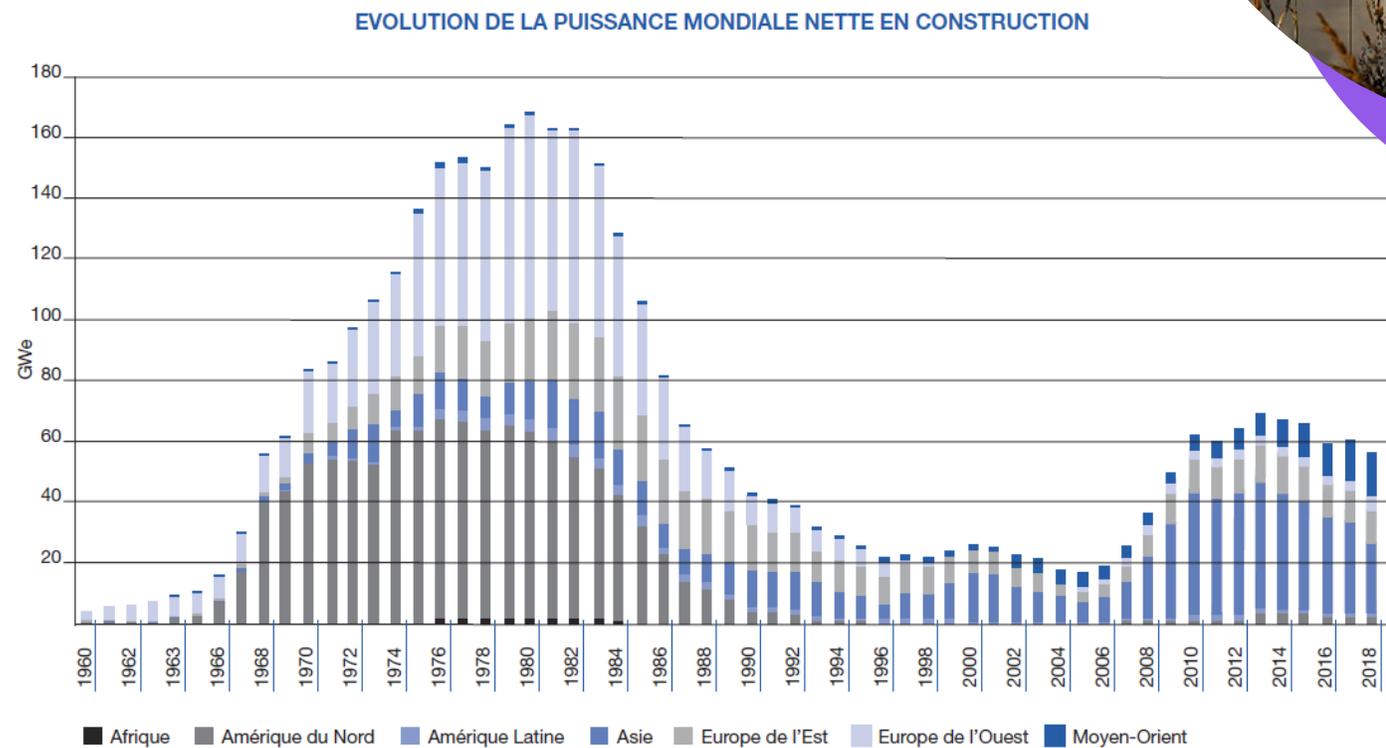
1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

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

- En 2020, il y a **54 construction de réacteurs en cours**, dans 16 pays (dont 12 en la Chine)
- Et **119 à l'état de projet** (yc dans une vingtaine de pays primo-accédants)

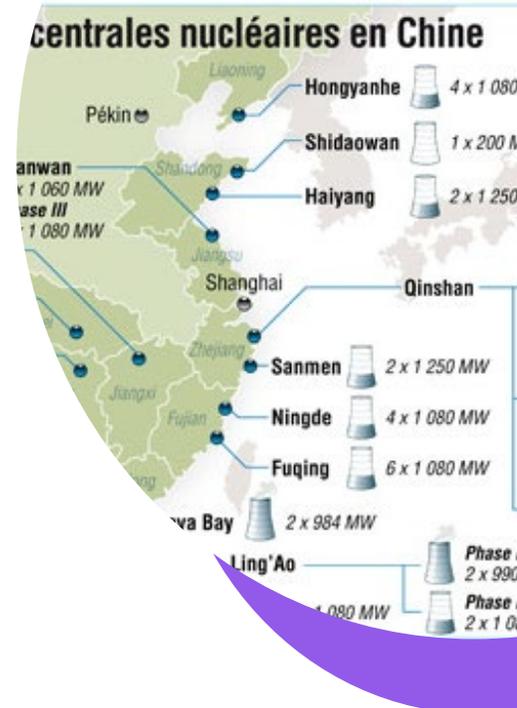
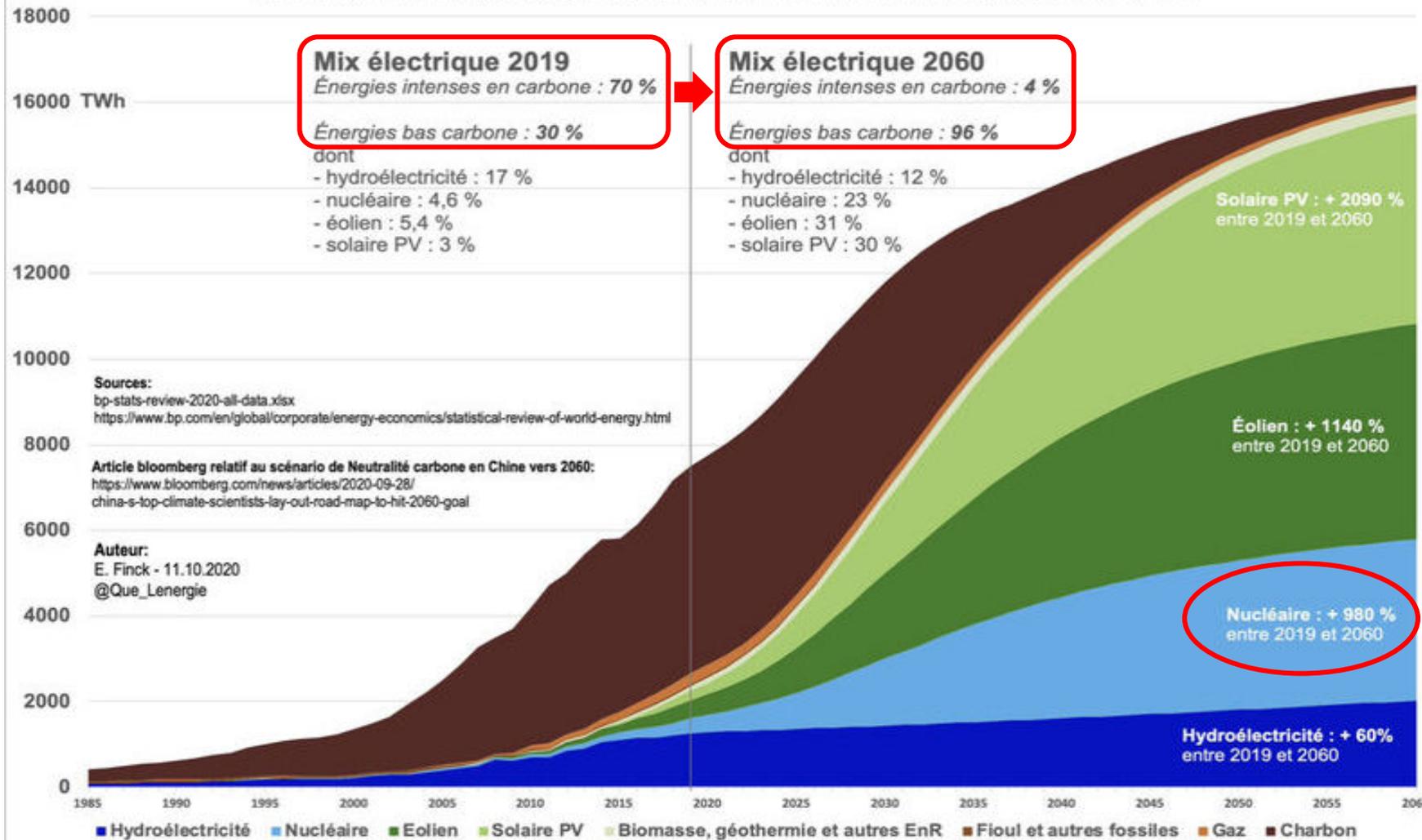
6 nouvelles tranches ont été mises en service en 2019 (après 9 en 2018) :

- 3 en Russie,
- 2 en Chine, (après 7 en 2018)
- et 1 en Corée du Sud.



1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

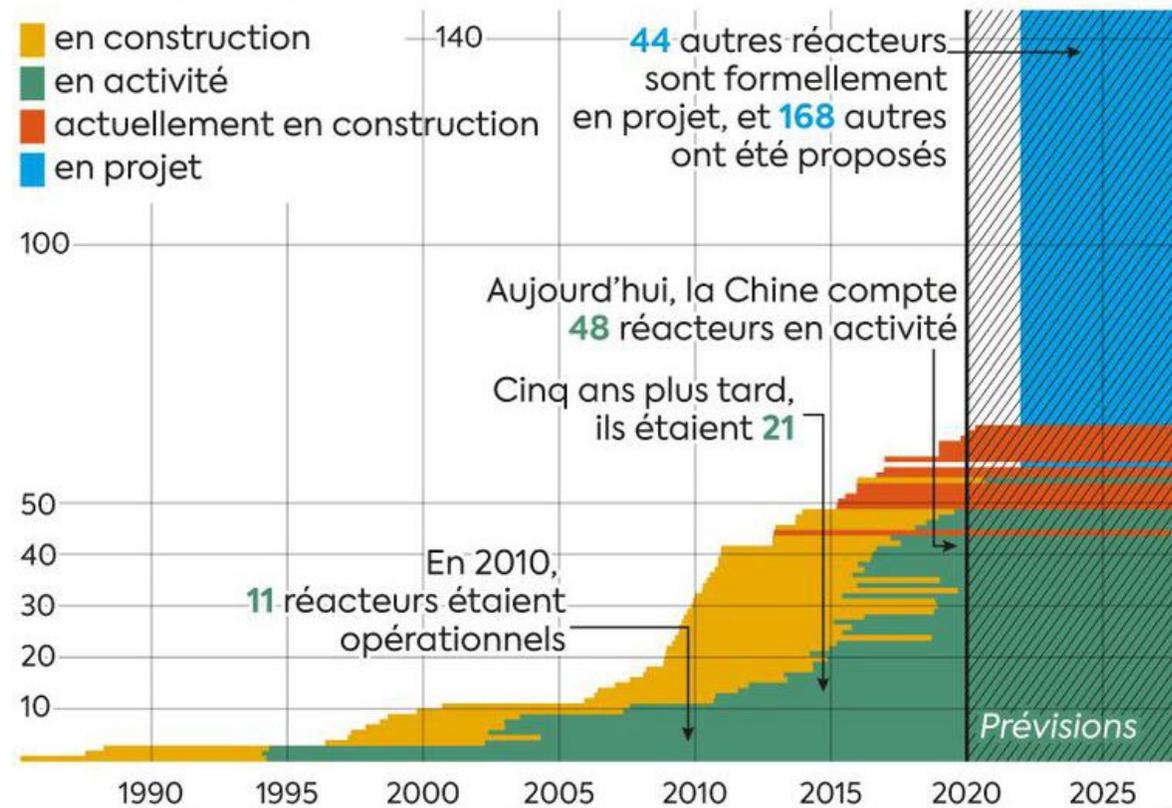
Évolution de la production électrique totale en Chine
 Période 1985-2019 : valeurs réelles / Période 2020-2060 : scénario Neutralité carbone atteinte en 2060



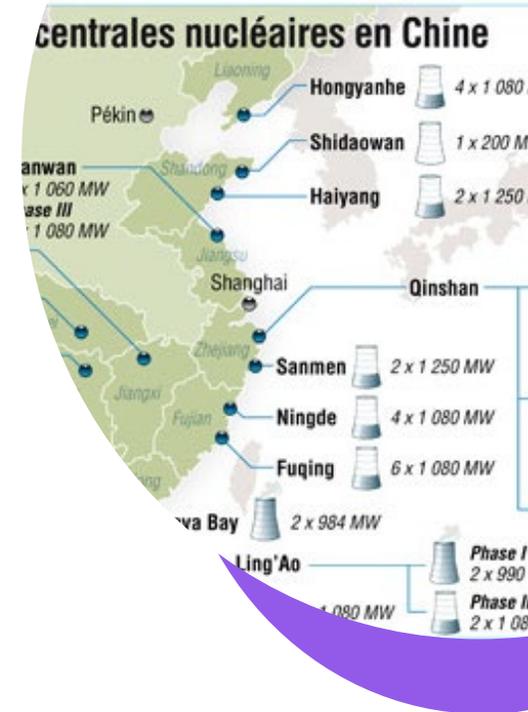
1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

Le programme nucléaire chinois

Nombre de réacteurs nucléaires en Chine



SOURCE : WORLD NUCLEAR ASSOCIATION



Hypothèse de référence : 13ème plan quinquennal 2016-2020

- En 2016 : 36 réacteurs (34 GW)
- En 2020 : 49 réacteurs (58 GW)
- En 2025 : 80 réacteurs (86 GW)
- En 2030 : 121 réacteurs (120 GW)

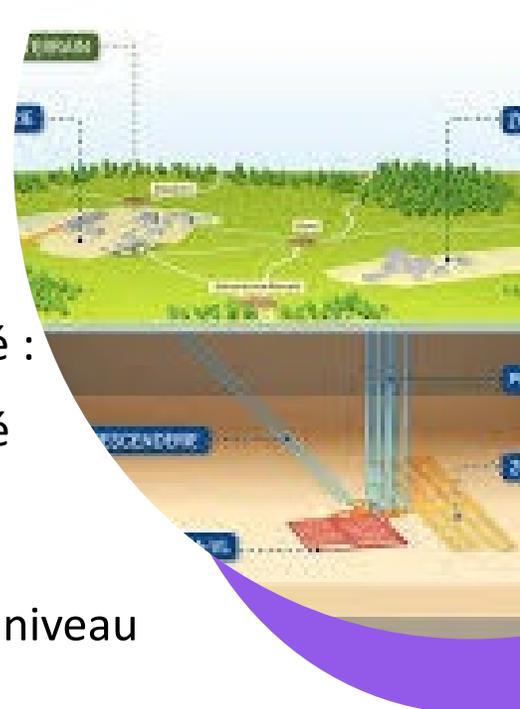
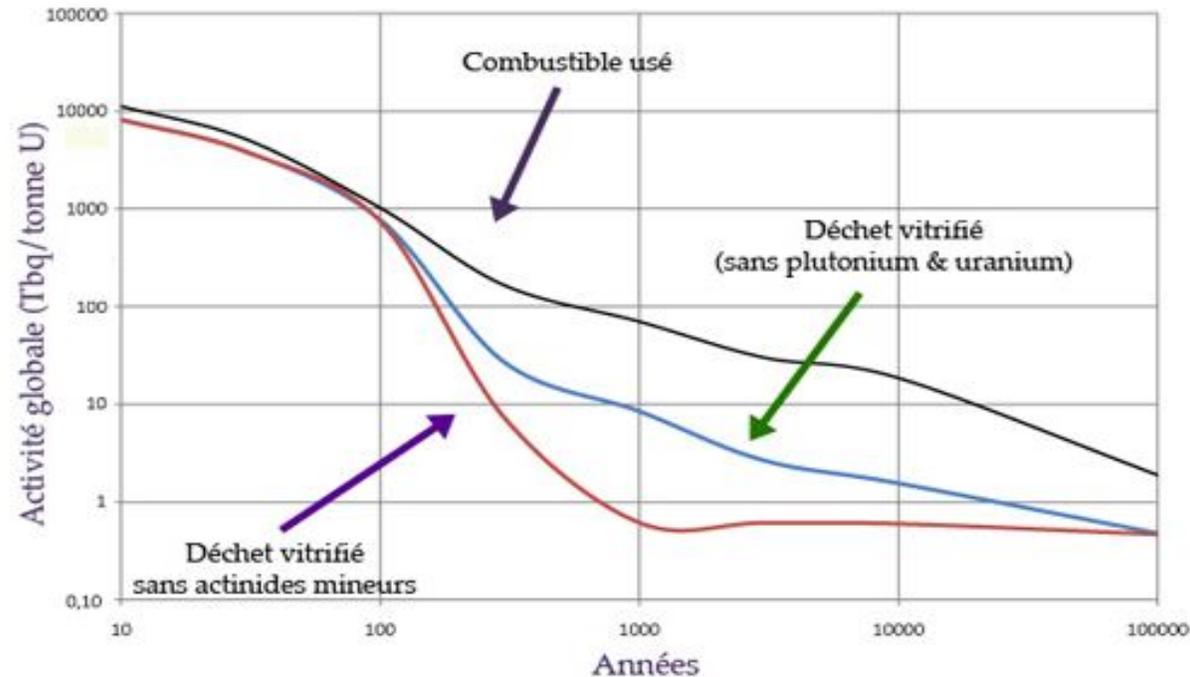
02

Les inconvénients du nucléaire

1. La forte toxicité et durée de vie de ses déchets
2. La forte gravité et le fort impact de ses accidents
3. Sa faible acceptabilité sociale

2.1 LA FORTE TOXICITÉ ET DURÉE DE VIE DE SES DÉCHETS

- Les déchets Haute Activité (HA), bien qu'en faible volume (0,2%), ont une très forte toxicité :
- La radioactivité se mesure en Béquerel/gramme : en centaines pour les Très Faible Activité (TFA), en millions pour les Moyenne Activité (MA), en milliards de Bq/g pour les HA (pour mémoire, un humain dégage 8 000 Bq)
- La durée de vie des déchets HA en France est très importante : **10 000 ans** pour revenir au niveau de l'uranium naturel :



2.2 LA FORTE GRAVITÉ ET LE FORT IMPACT DE SES ACCIDENTS



Le nucléaire civil a occasionné 3 accidents majeurs : TMI, Tchernobyl, Fukushima.

Regardons les **causes majeures** et les **caractéristiques différenciantes des installations**, 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 cœur
- Faibles rejets sur qq heures
- 0 décès différé
- 0 morbidité induite

Tchernobyl (1986, Ukraine) :

- RBMK
- 3 non respects volontaires des règles de conduite + 3 inhibitions volontaires de systèmes de sûreté
- Absence enceinte de confinement
- Explosion du cœur + Incendie du graphite
- Rejets continus pendant 10j
- Dépôts des rejets sur 13 000 km²
- 50 décès immédiats
- 7 000 cancers thyroïde (+ 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 différentes raisons :

- L'inquiétude légitime sur le niveau de sûreté,
- L'inquiétude légitime sur les déchets radioactifs,
- L'association, consciente ou inconsciente, entre le nucléaire civil et le nucléaire militaire.

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

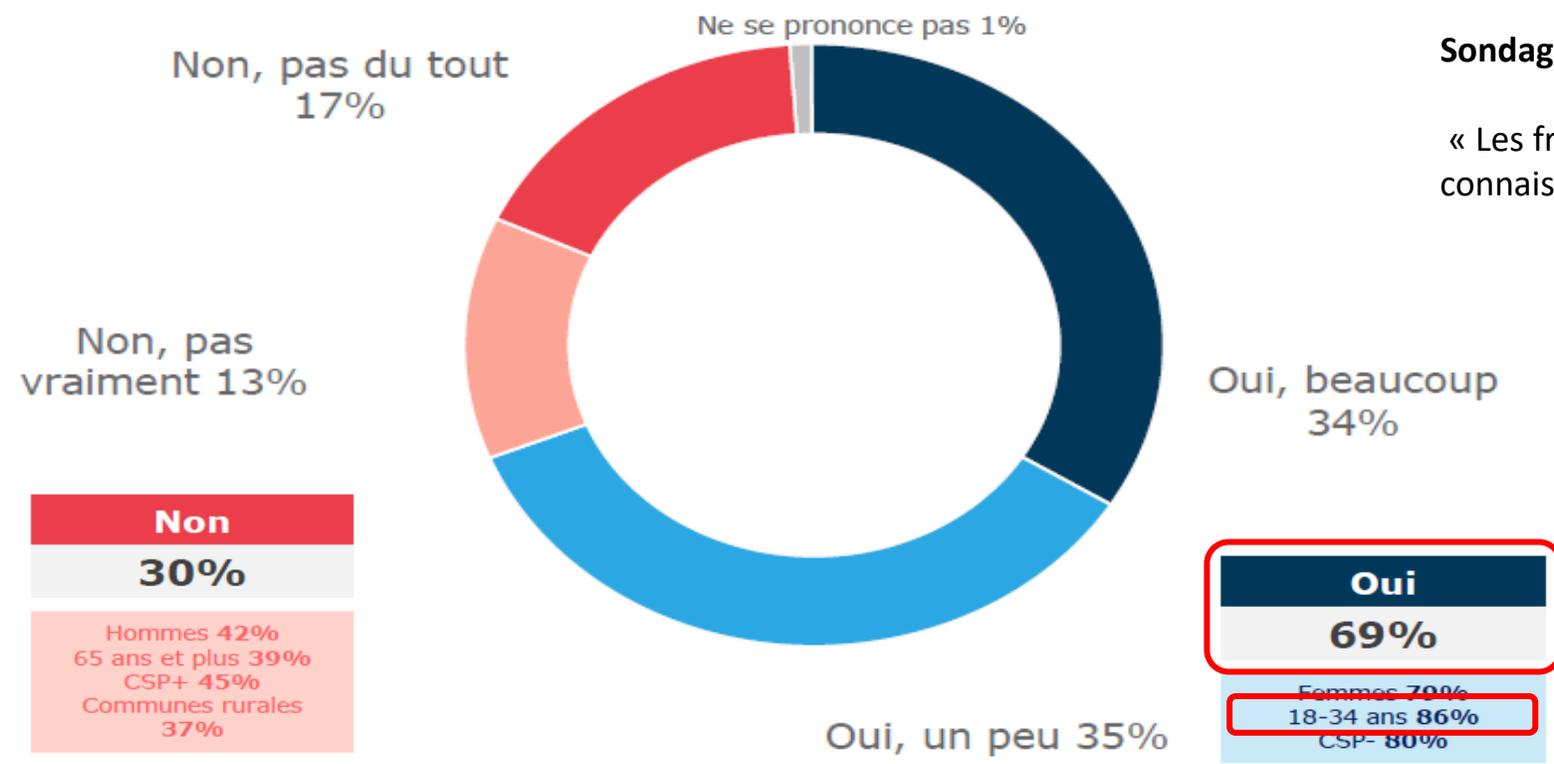
- La complexité des questions scientifiques et techniques qui sont liées à l'énergie nucléaire, ce qui ne facilite pas son appropriation par le grand public, mais aussi par les médias (la filière nucléaire n'ayant pas dans le passé été très efficace en terme de communication et vulgarisation),
- Un traitement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



2.3 SA FAIBLE ACCEPTABILITÉ SOCIALE

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

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



Sondage BVA, avril 2019 :

« Les français et le nucléaire : connaissances et perceptions »

Mais il y a des raisons d'espérer

- Tristan KAMIN
- Yves CALVI
- Le REVEILLEUR
- Axel De TARLE
- Dr NOZMAN
- VD4 BUGEY
- Pub ORANO
- Pub CNNP



03

Les atouts du nucléaire

1. Sa forte densité énergétique
2. Sa faible conso de ressources
3. Ses faibles émissions de CO2
4. Son faible volume de déchets
5. Son coût compétitif
6. Sa forte sûreté

3.1 SA FORTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

La densité énergétique représente l'énergie par unité de volume (ou de masse)

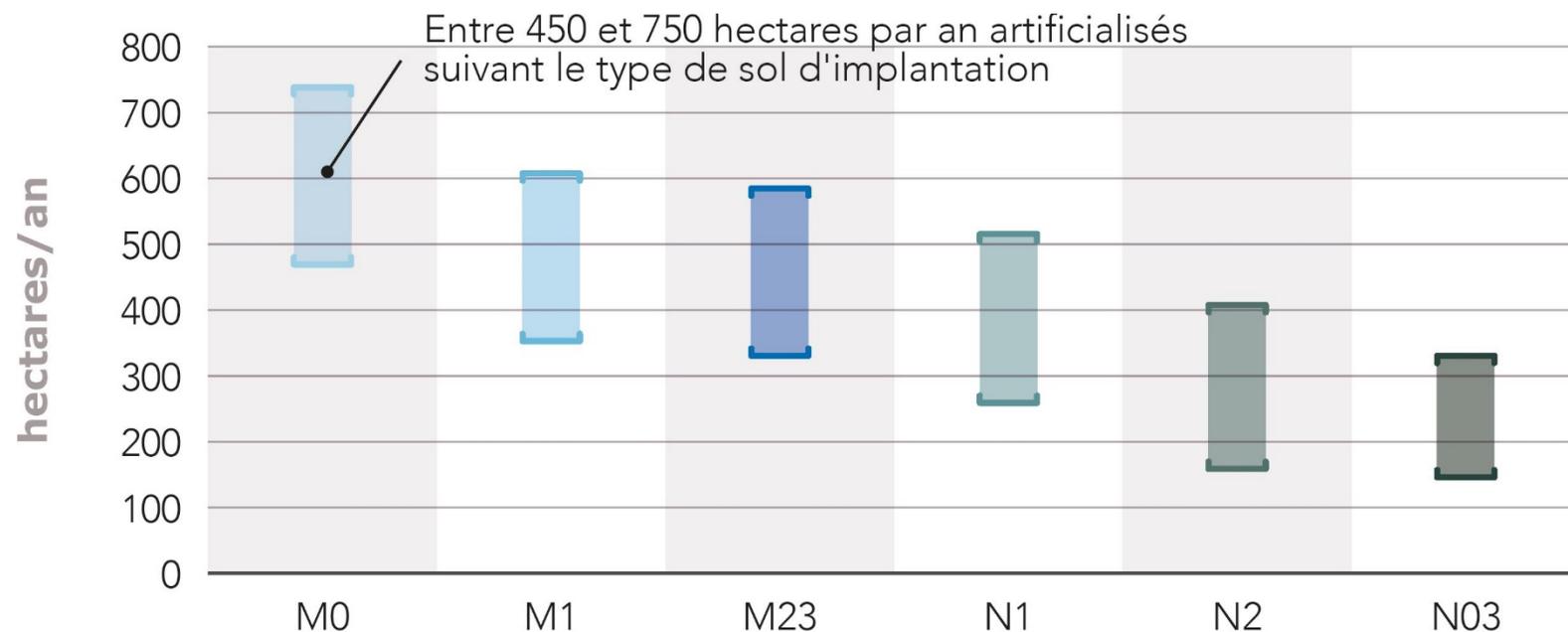
Source	Réaction	Densité Energétique kWh / kg
Antimatière	Annihilation matière-antimatière	24 965 421 631
Deutérium et tritium	Fusion thermonucléaire	6 934 839 342
Uranium-235	Fission nucléaire	22 083 333
Essence	Chimique	13,1
Propane (ou GPL)	Chimique	12,8
Charbon	Chimique	6,6
Bois	Chimique	4,5
Accumulateur lithium-air	Électrochimique	2,5
Accumulateur lithium-soufre	Électrochimique	0,5
Batterie au plomb	Électrochimique	0,3
Accumulateur lithium-ion	Électrochimique	0,2
Volant d'inertie	Mécanique	0,01
Condensateur	Électrique	0,001



3.1

SA FORTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'énergie nucléaire a aussi 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 :



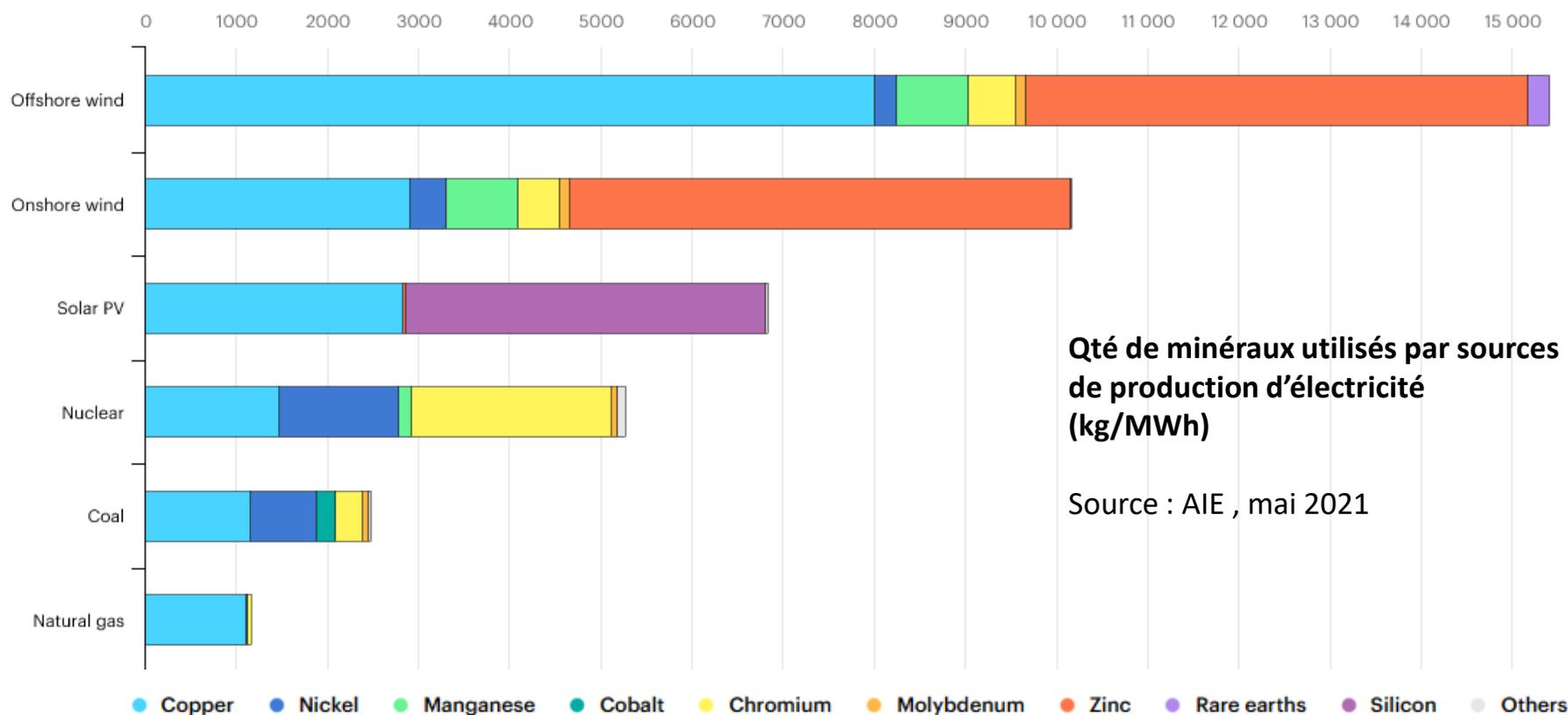
Flux d'artificialisation projeté à 2050 dans les scénarios et à l'échelle de la France

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

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

3.2 SA FAIBLE CONSO DE RESSOURCES

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

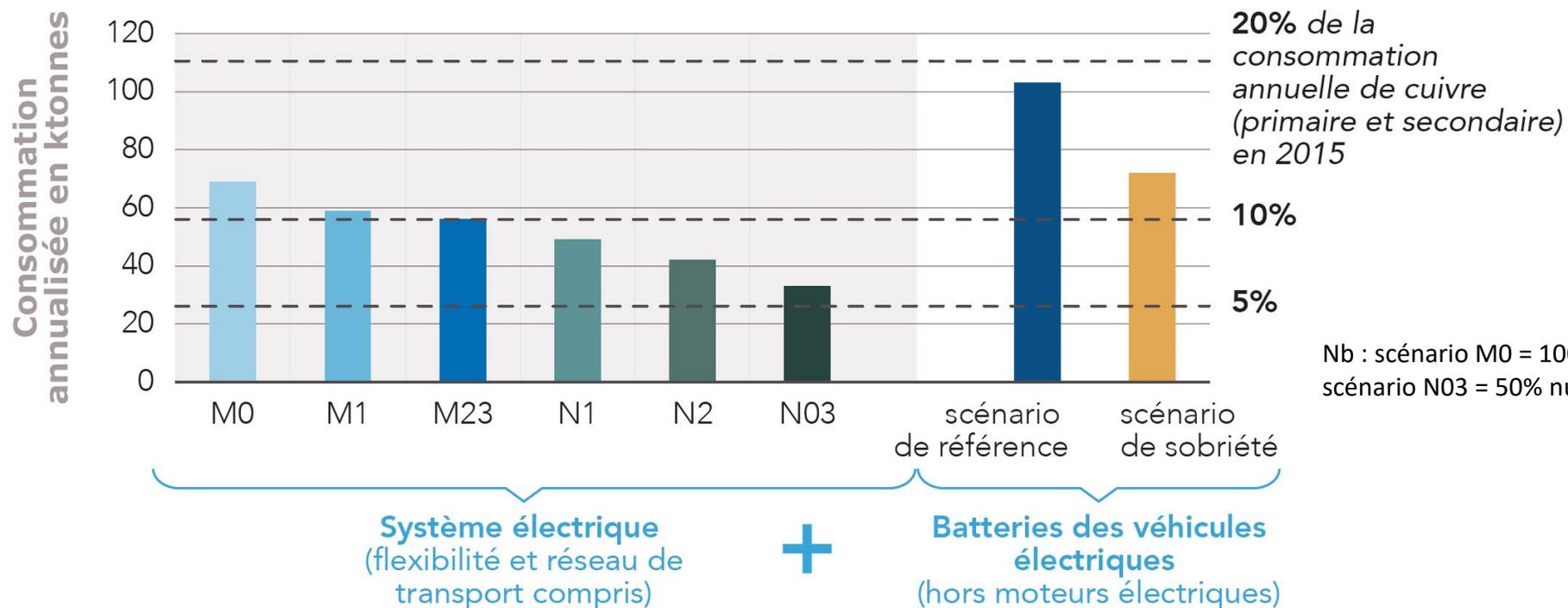


3.2 SA FAIBLE CONSO DE RESSOURCES

Dans le rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 », ce sont les scénarios ayant le plus de nucléaire qui consomment le moins de cuivre

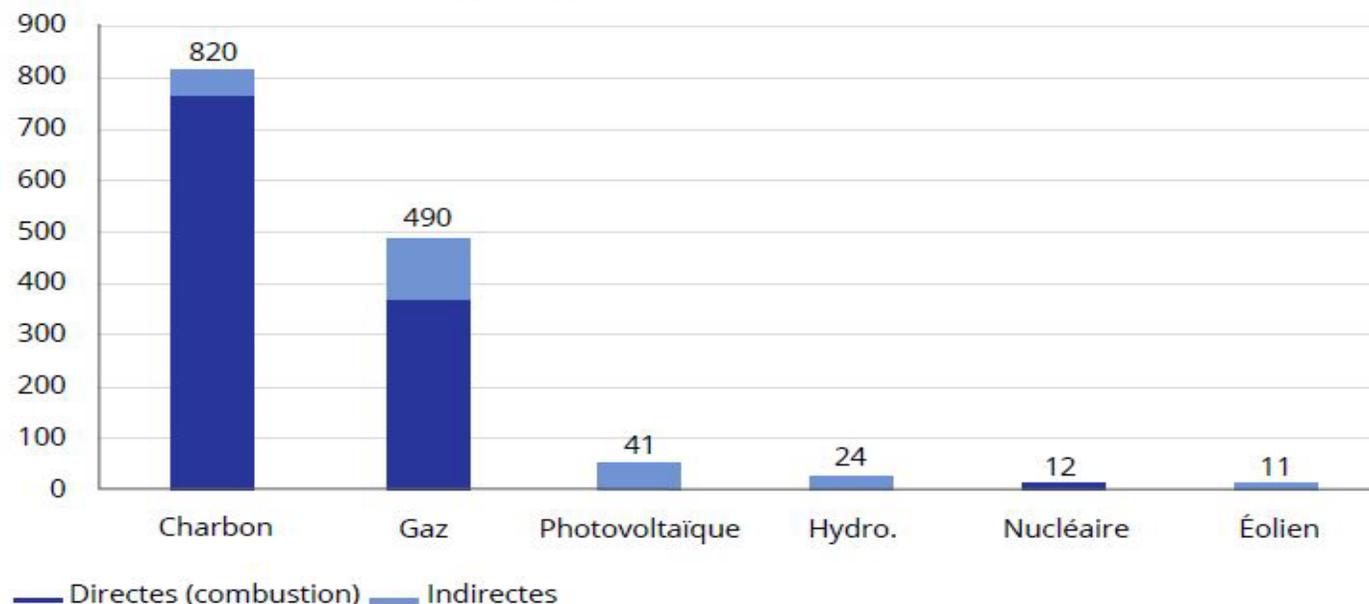


Consommation annuelle de cuivre projetée à 2050 dans les scénarios (et pour les batteries de véhicules électriques)



3.3 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

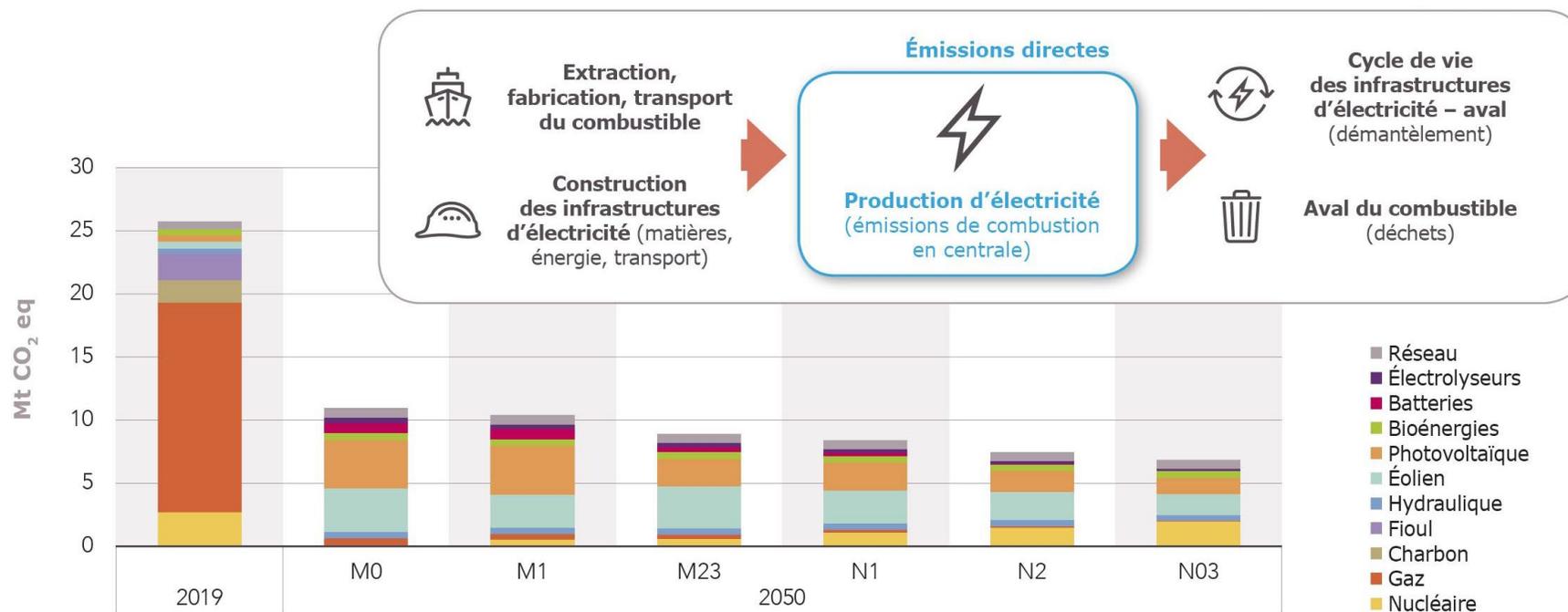
- L'ADEME ainsi que le CEA s'accordent sur un niveau d'émissions du nucléaire français de respectivement 6 g CO2/kWh et 5,29 g CO2/kWh (du fait du faible contenu carbone de l'électricité utilisée pour l'étape d'enrichissement de l'uranium)

3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

Dans le rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 », ce sont les scénarios ayant le plus de nucléaire qui émettent le moins de CO2 :



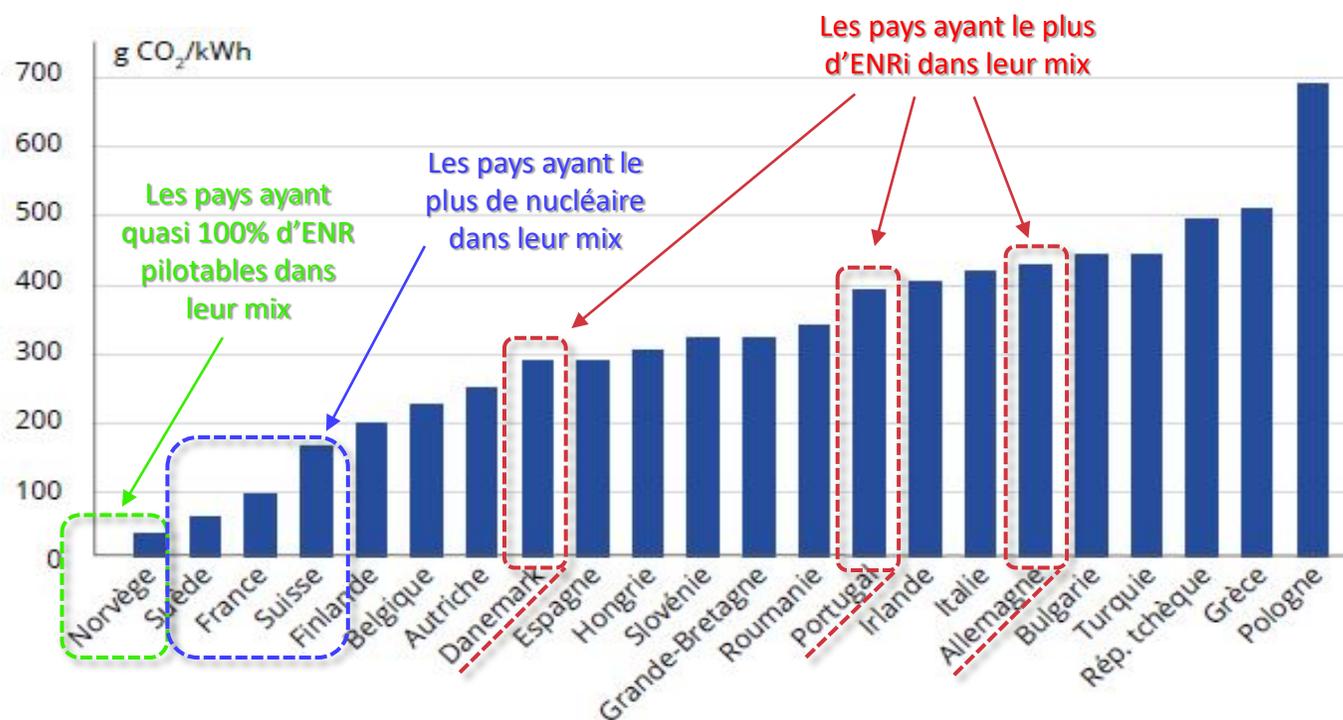
Emissions de gaz à effet de serre en cycle de vie du système électrique



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

3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

- 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 :



Intensité carbone du secteur électrique
(10/2016 à 09/2017)

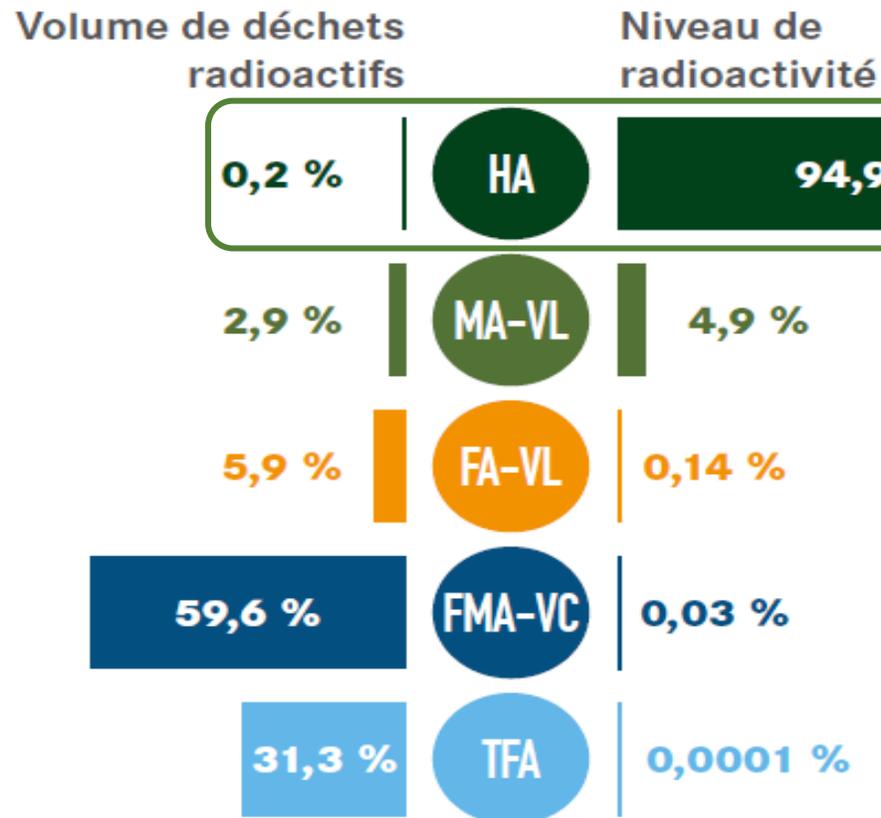
Méthodologie : ACV

Source : MIT, 2018

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

3.4 SON FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

- Les déchets radioactifs, c'est quoi précisément ?



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

Inventaire national des déchets radioactifs en France

Source : ANDRA, 2018

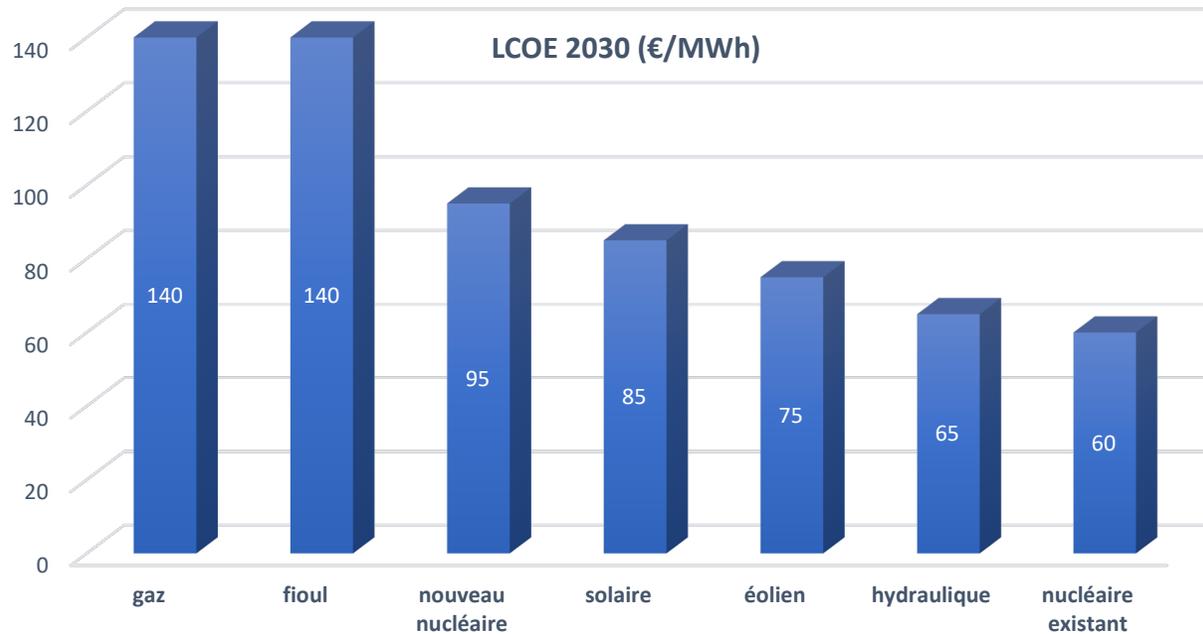
HA : Haute Activité (à Vie Longue)
MA-VL : Moyenne activité à Vie Longue
FA-VL : Faible Activité à Vie Longue
FMA-VC : Faible et Moyenne Activité à Vie Courte*
TFA : Très Faible Activité (à Vie Courte*)

* Vie Courte = période radioactive ≤ 31 ans



3.5 SON COUT COMPÉTITIF

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



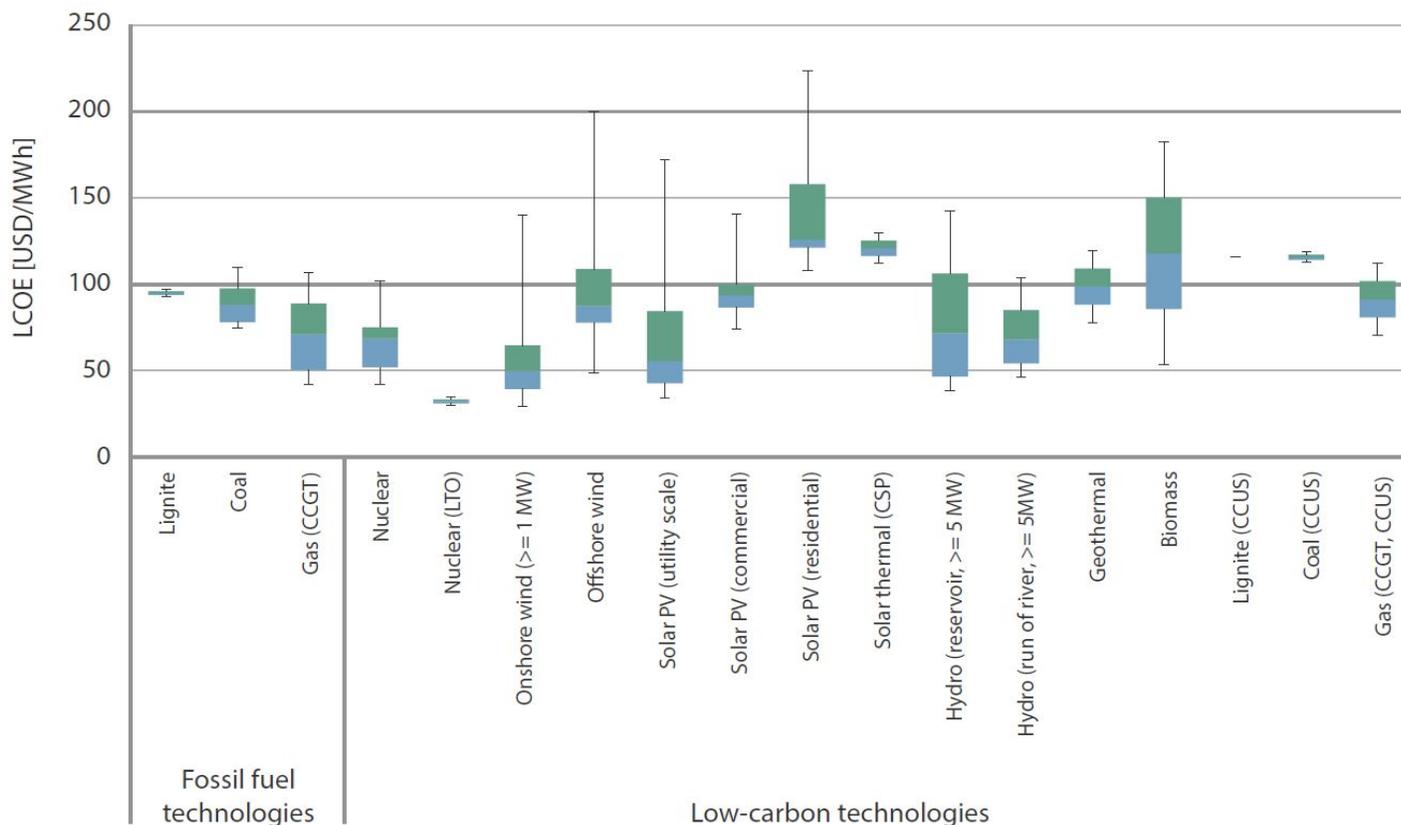
Rapport de la Commission Européenne
janvier 2019

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

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

3.5 SON COUT COMPÉTITIF

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



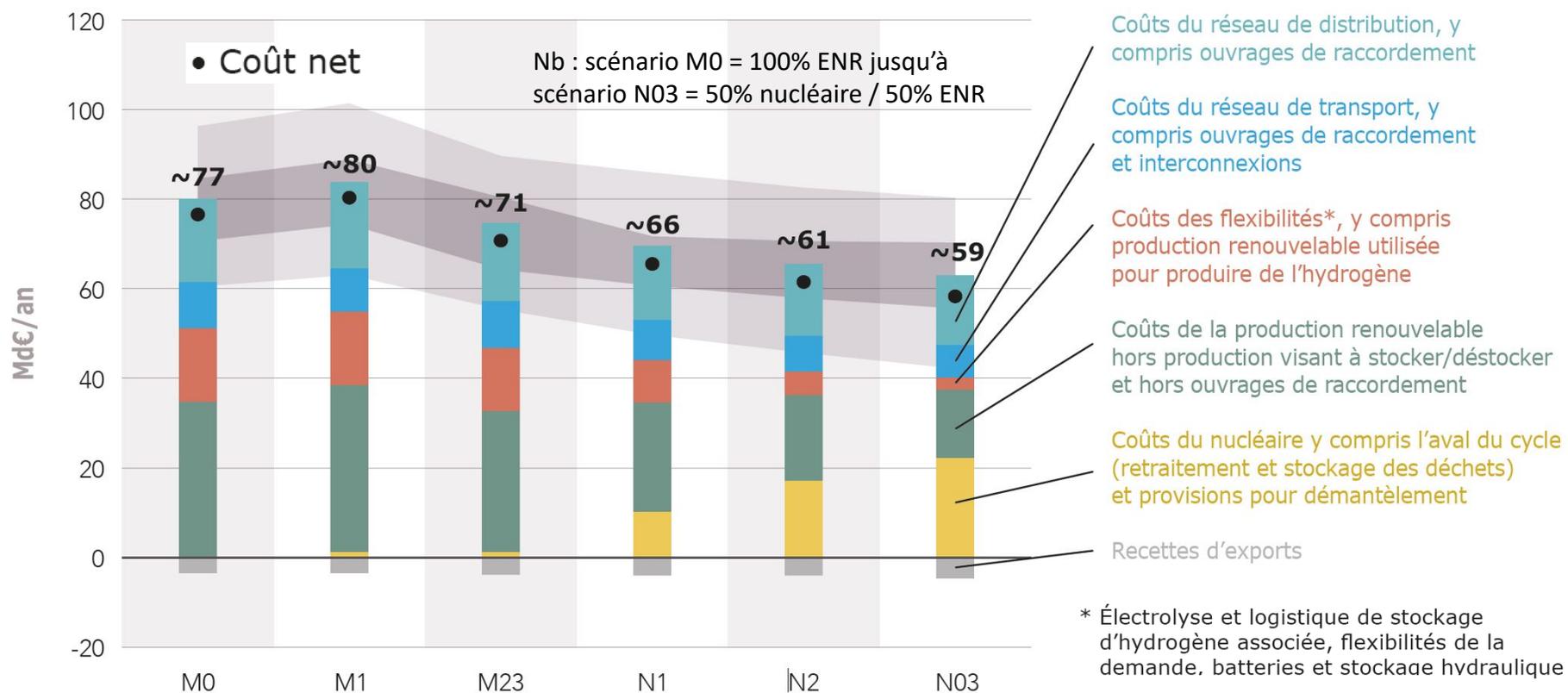
Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)
Décembre 2020

Basé sur l'étude « Projected Costs of Generating Electricity, IEA, December 2020 »

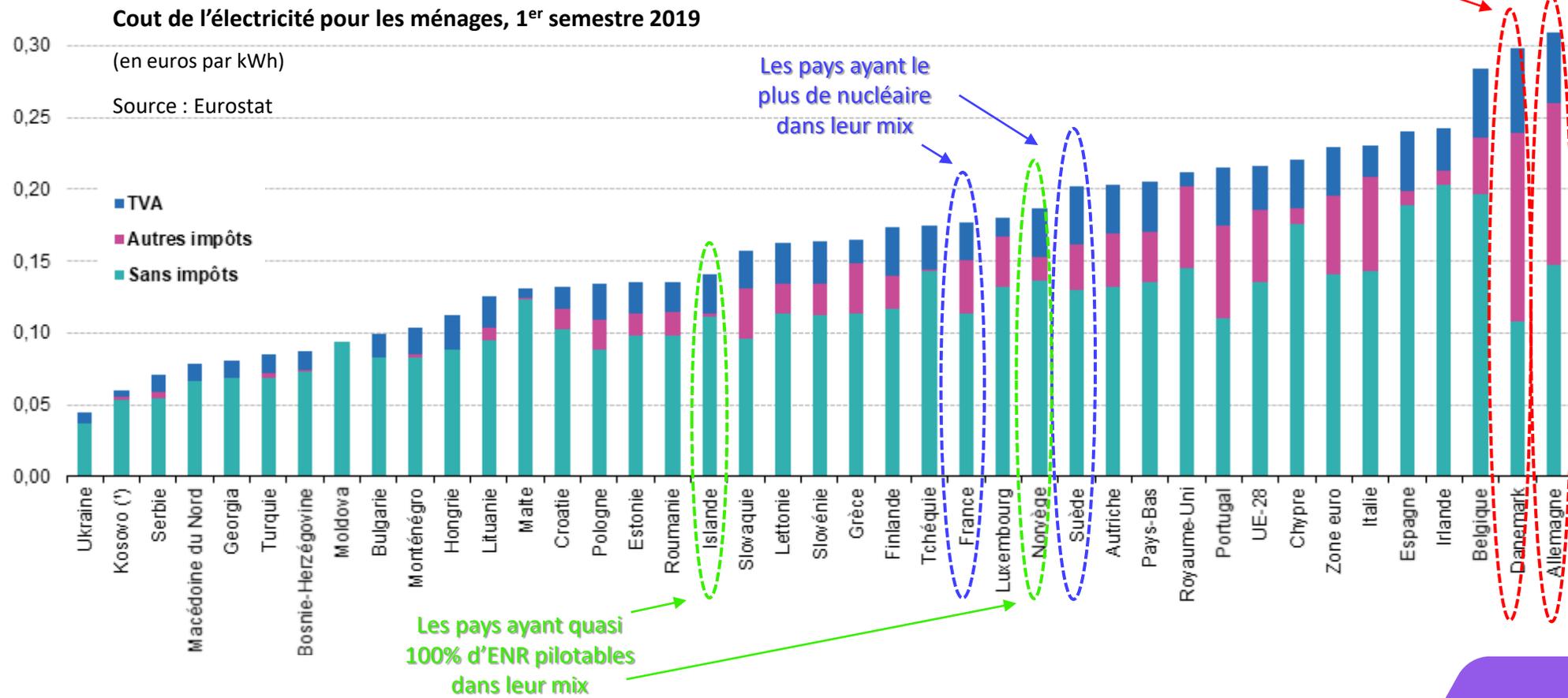
3.5 SON COUT COMPÉTITIF

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



3.5 SON COUT COMPÉTITIF

- Comparaison du prix de l'électricité en Europe :



3.6 SA FORTE SURETÉ



- Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie :

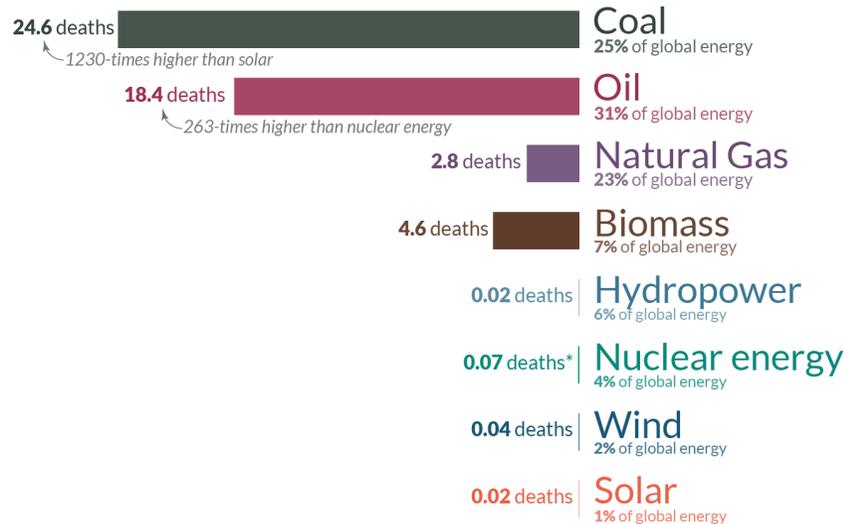
Our World
in Data

What are the safest

sources of energy?

Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of energy production.
1 terawatt-hour is the annual energy consumption of 27,000 people in the EU.



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.

3.6 SA FORTE SURETÉ



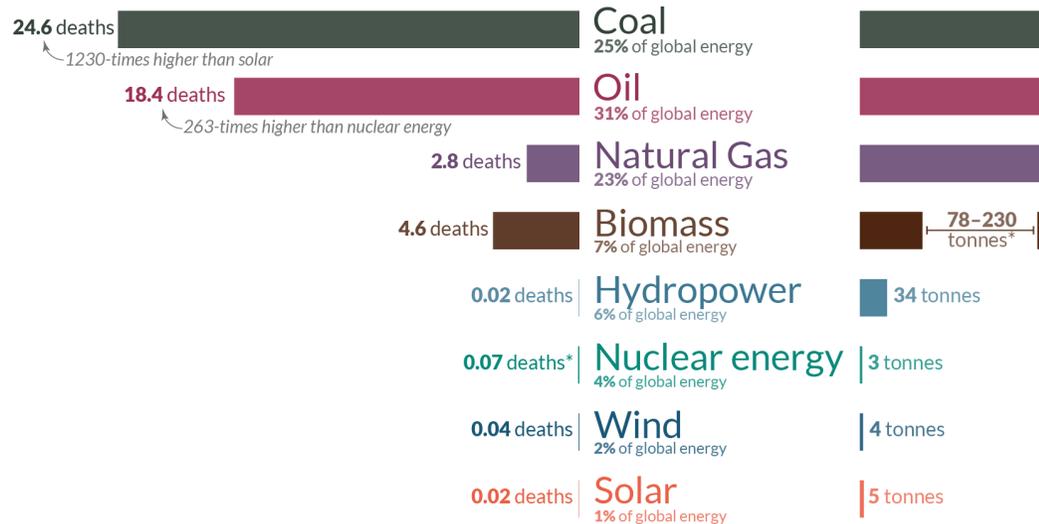
- Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie :

Our World
in Data

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

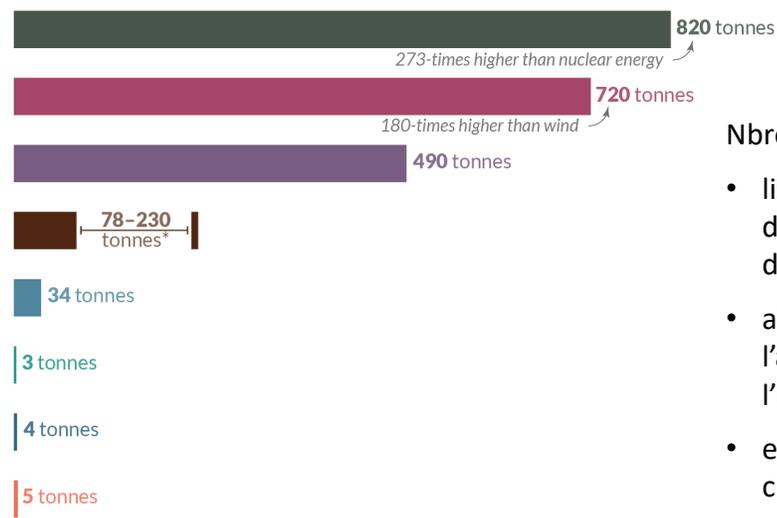
Death rate from accidents and air pollution

Measured as deaths per terawatt-hour of energy production.
1 terawatt-hour is the annual energy consumption of 27,000 people in the EU.



Greenhouse gas emissions

Measured in emissions of CO₂-equivalents per gigawatt-hour of electricity over the lifecycle of the power plant.
1 gigawatt-hour is the annual electricity consumption of 160 people in the EU.



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.

Des questions ?

Merci !

**em
lyon**
business
school

L'électronucléaire, une énergie d'avenir ?



Thierry CAILLON

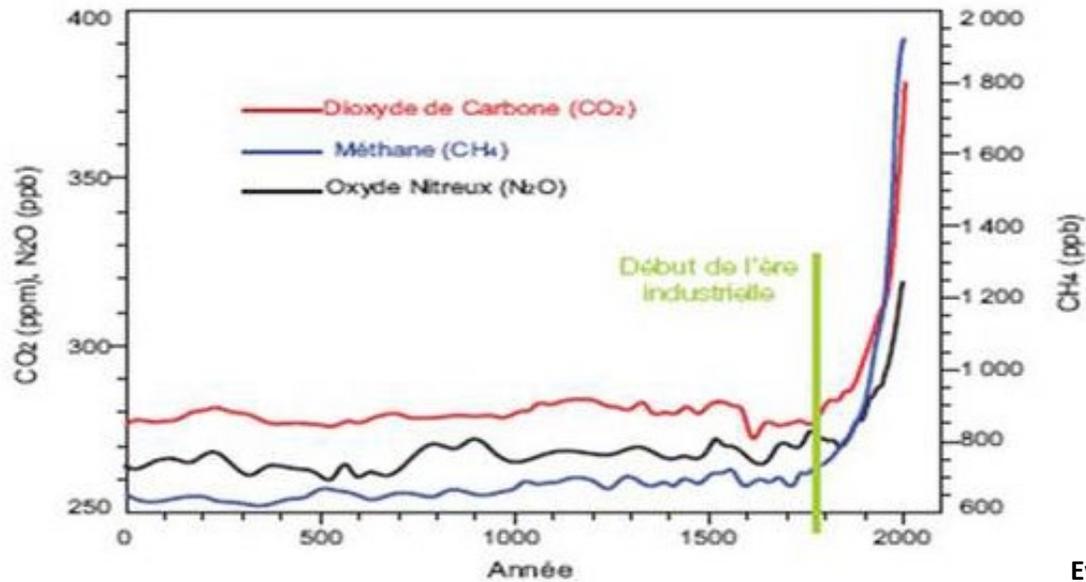
Annexes

Pour en savoir plus

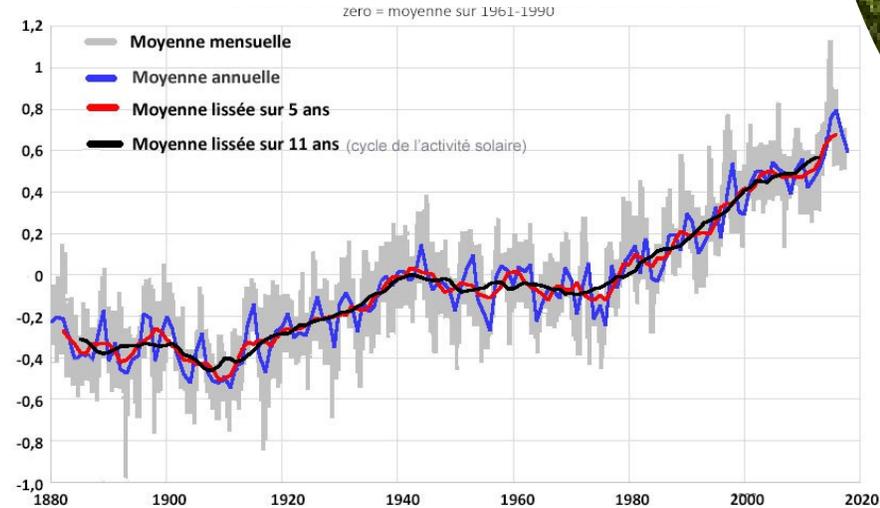
L'ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO₂, ET SES CONSÉQUENCES



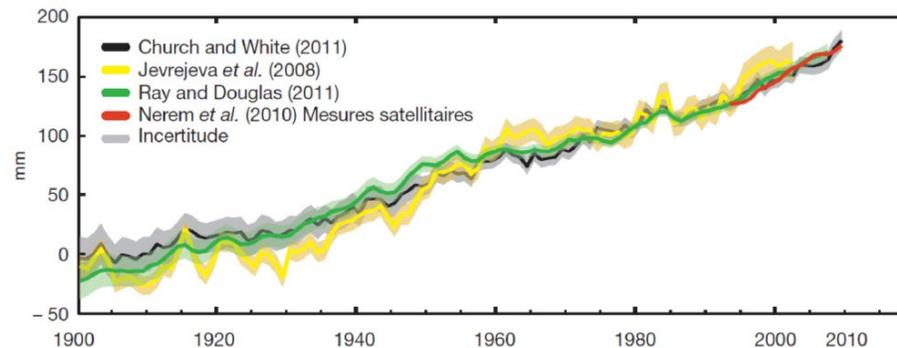
Evolution des concentrations des GES (GIEC, 2007)



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

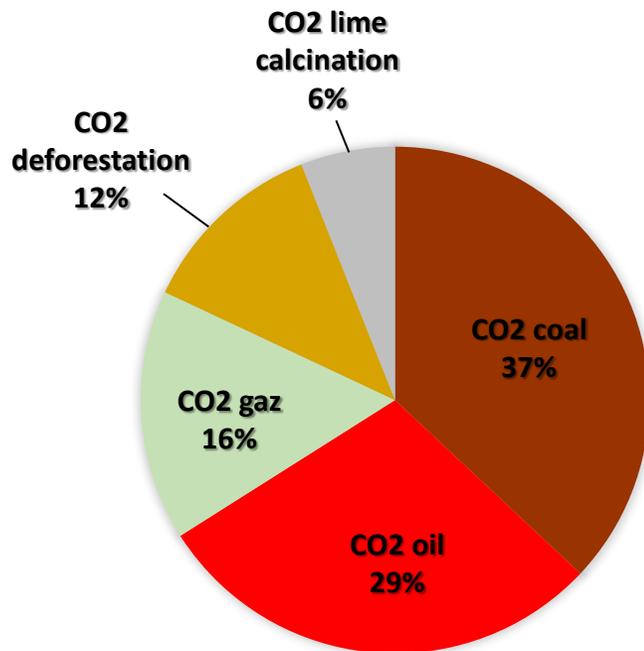


Evolution du niveau moyen des mers, par rapport à la période 1900-1905 (GIEC, 2013)



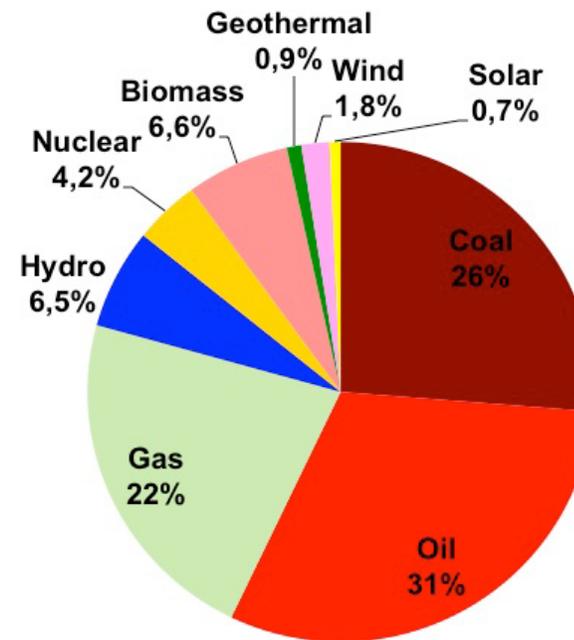
LE ROLE DE L'ÉNERGIE DANS LES ÉMISSIONS DE CO2

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



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

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

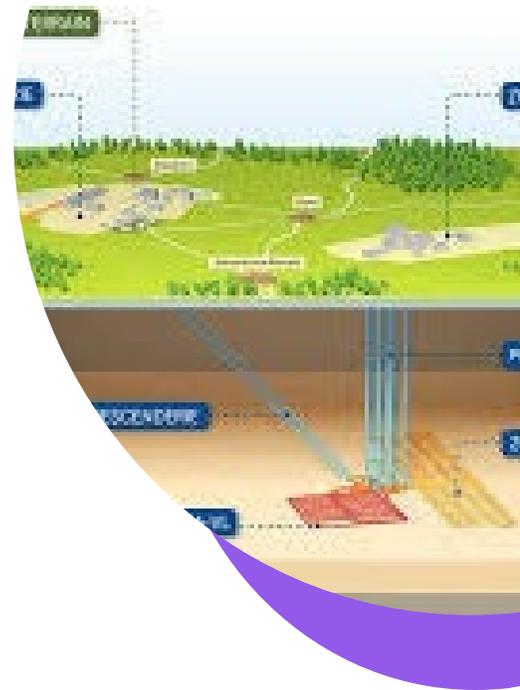
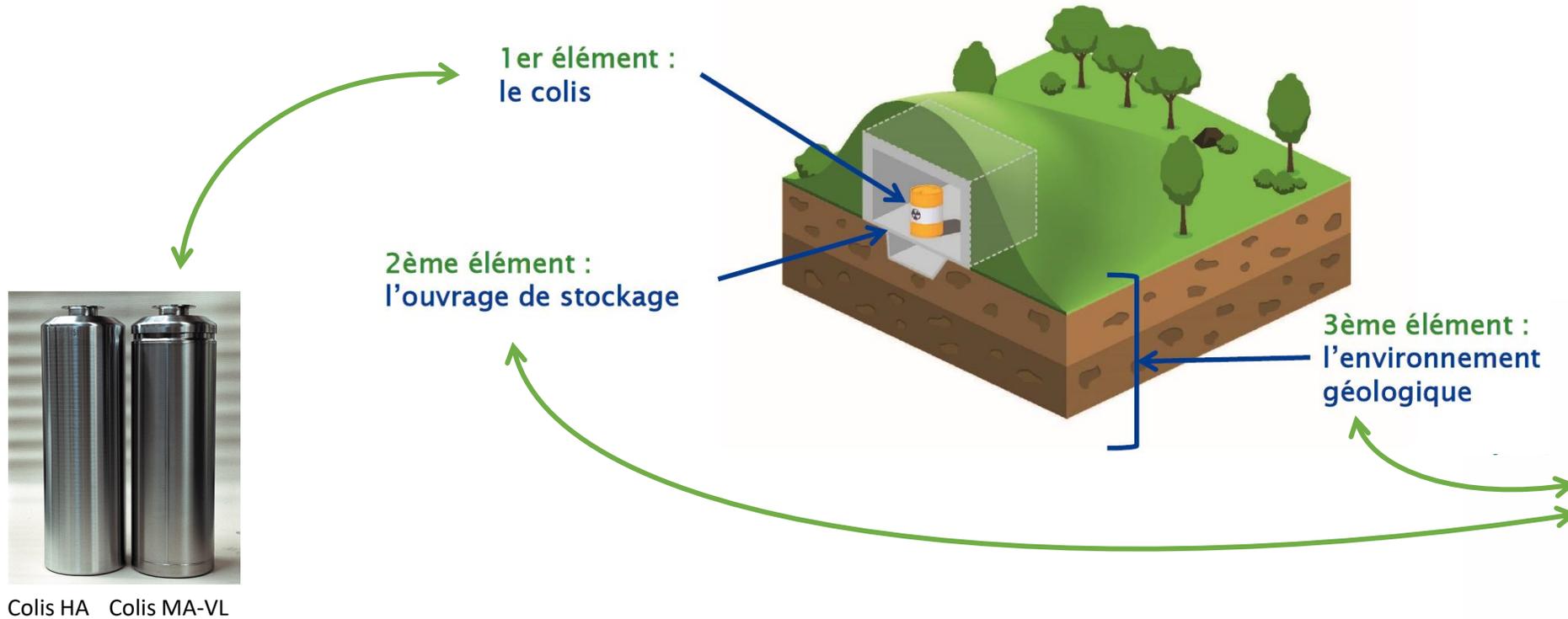


79% de la consommation d'énergie proviennent de sources fossiles
(pétrole, charbon, et gaz)



LA GESTION DES DÉCHETS

- Le niveau de toxicité et la durée de vie des déchets HA et MA-VL nécessite de les **isoler de la biosphère par plusieurs « barrières »** :



CIGÉO
Centre industriel
de stockage réversible profond



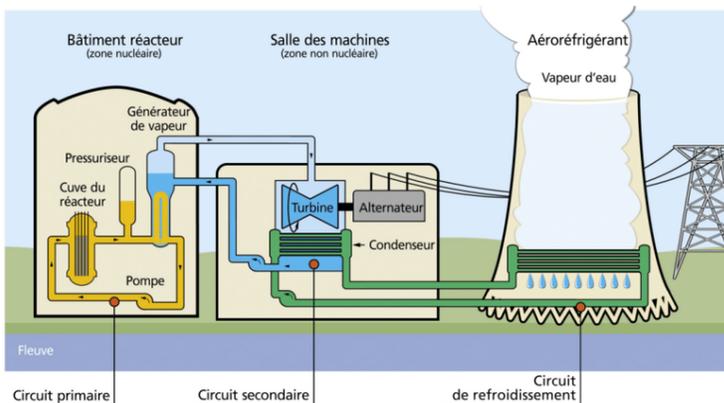
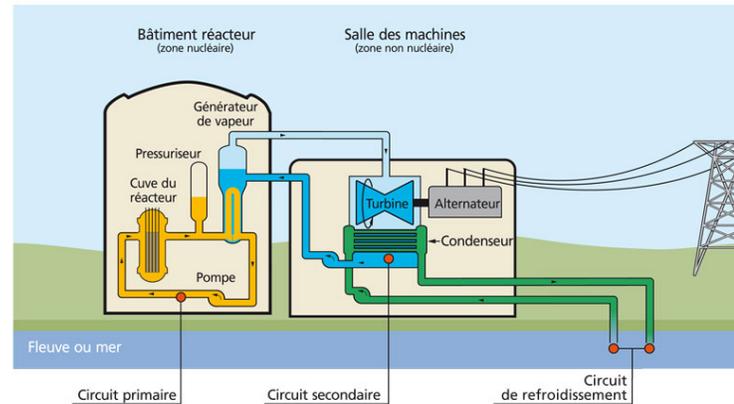
- Les volumes de déchets, selon les # scenarios d'évolution du parc nucléaire français :

		SR 1	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	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 ⁴		2 300 000 m ³	2 200 000 m ³	2 300 000 m ³	2 100 000 m ³

LE NUCLEAIRE FACE À LA SECHERESSE

Contrairement à une idée reçue répandue, un réacteur nucléaire consomme 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 (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 aéroréfrigérants (0,8 m³/s)

LES SMALL MODULAR REACTOR (SMR)

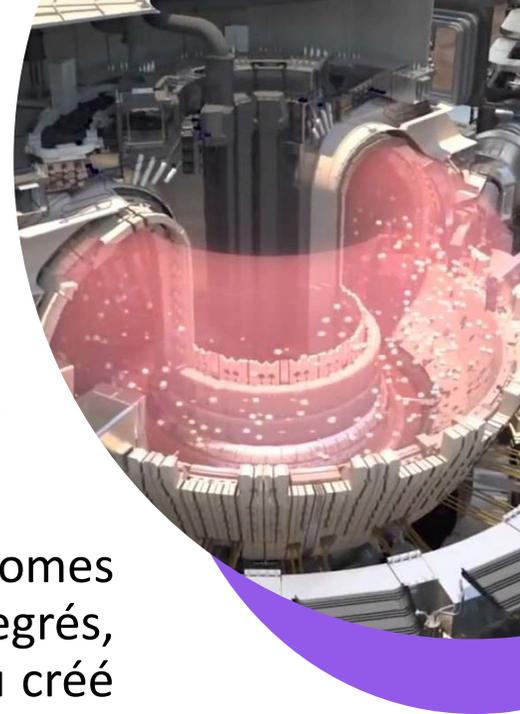
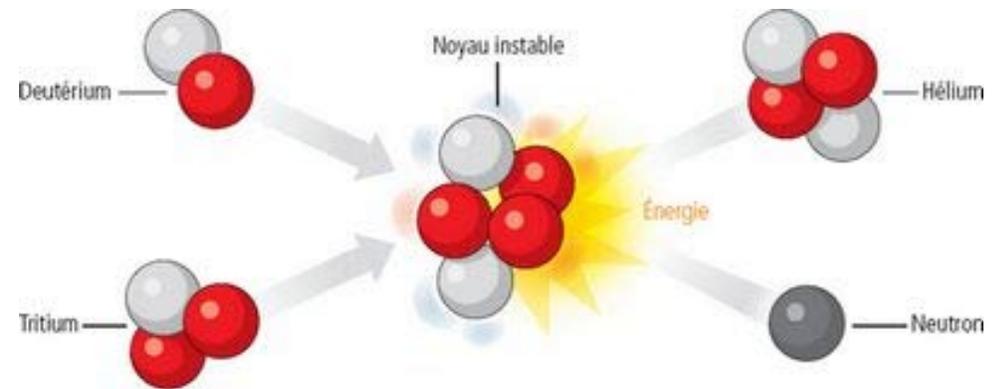


Small Modular Reactor (SMR), et Micro Modular Reactor (MMR) :

- Ces réacteurs de petite et moyenne puissance (10 MW pour les MMR, et jusqu'à 300 MW pour les SMR) ont 2 spécificités : leur taille réduite, et leur modularité.
- Leur compacité autorise une architecture intégrée où tous les composants sont placés dans un équipement sous pression unique, en intégrant des systèmes de sûreté passifs.
- La simplicité du design permet une fabrication standardisée et en série d'un nombre élevé de composants et de systèmes, fabriqués puis testés en usine. Facilement transportables, les modules sont assemblés sur site. Cela permet des délais de construction raccourcis, et un coût optimisé.
- Les SMR et MMR offrent de nouveaux usages, particulièrement adaptés aux enjeux actuels et futurs :
 - Alimenter les sites isolés en électricité (sans réseau robuste et développé)
 - Produire de l'eau douce par dessalement
 - Décarboner la production d'hydrogène et de carburants de synthèse
 - Équilibrer les réseaux électriques
 - Chauffer les villes et les usines

La **fusion nucléaire**, l'énergie qui alimente le soleil et les étoiles... : dans plus de 50 pays, des scientifiques travaillent pour recréer et maîtriser cette énergie, avec pour objectif un déploiement industriel au cours de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle.

- La fusion est en quelque sorte l'opposé de la fission : il s'agit de rapprocher 2 atomes d'hydrogène (deutérium et tritium) à des températures de plusieurs millions de degrés, comme au cœur des étoiles. Lorsque ces noyaux légers fusionnent, le nouveau noyau créé se retrouve dans un état instable ; il tente de retrouver un état stable en éjectant un atome d'hélium et un neutron, en dégageant une quantité d'énergie colossale.
- La fusion libère une énergie 4 millions de fois supérieure à celle de la réaction chimique (combustion du charbon, pétrole, gaz), 4 fois supérieure à celle de la fission...
- Sans émission de CO₂...
- Sans production de déchets...
- Sans risque de fusion du cœur



Bibliographie

Pour en savoir encore plus

Bibliographie



Sites web :

- <https://new.sfen.org/academie-235/>
- https://www.laradioactivite.com/site/pages/Energie_nucleaire.htm
- https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Pages/Home.aspx
- <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energie-nucleaire.aspx>
- <https://app.nuclearplanet.ch/nuclearplanet/kkw-world?lang=fr> (Carte interactive du parc nucléaire mondial)

Revue, rapports et études :

- Rapport RTE , octobre 2021 : "Futurs énergétiques 2050" - Consommation et production : les chemins de l'électricité de RTE pour la neutralité carbone => <https://www.rte-france.com/actualites/futurs-energetiques-neutralite-carbone-2050-principaux-enseignements>
- Revue Générale Nucléaire, nov-déc 2018, dossier « Fusion nucléaire : la recette de demain ? » => <http://www.sfen.org/rgn/2-8-fusion-nucleaire>
- Revue Générale Nucléaire, janv-fév 2019, dossier « Environnement et biodiversité : un grand bol d'air » => <http://www.sfen.org/rgn/3-10-nucleaire-energie-econome-ressources>
- Revue Générale Nucléaire, sept-oct 2019, dossier « GEN IV, vers la boucle énergétique » => <http://www.sfen.org/rgn/dossier-%C2%AB-les-gen-iv,-vers-la-boucle-energetique-%C2%BB>

Vulgarisateurs, youtubeurs :

- Dr Nozman => https://www.youtube.com/results?search_query=dr+nozman
<https://twitter.com/DrNozman>
- Tristan Kamin => https://www.youtube.com/results?search_query=tristan+kamin
<https://twitter.com/TristanKamin>
- Le Réveilleur => https://www.youtube.com/results?search_query=le+r%C3%A9veilleur+nucl%C3%A9aire
https://twitter.com/Le_Reveilleur