

early  
makers

em  
lyon  
business  
school

Mastère Spécialisé<sup>®</sup>  
“ Management de la Transition Énergétique ”

Cours  
“ Innovation et géopolitique de l'énergie ”

# 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

---

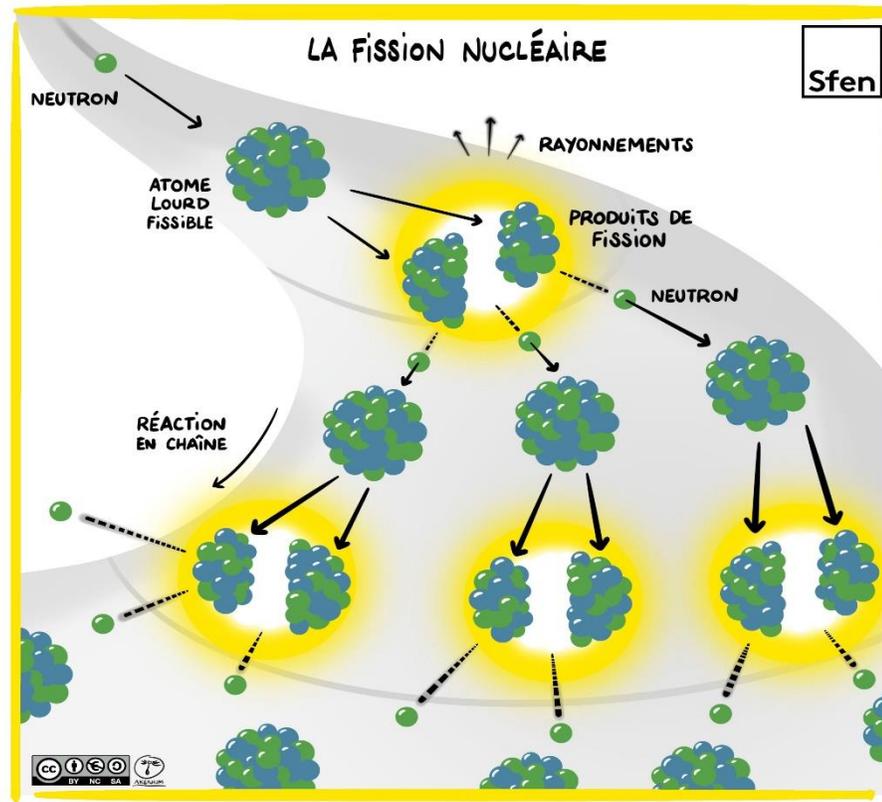
1. La fission : principe et génèse
2. L'essor de l'énergie nucléaire
3. Le fonctionnement d'un réacteur
4. Panorama et perspective du parc mondial

# 1.1

## LA FISSION NUCLÉAIRE : PRINCIPE

- La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd instable fissile (uranium 235 ou plutonium 239), 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.
- 1 g d' $^{235}\text{U}$  libère ainsi autant d'énergie que la combustion de 2,4 tonnes de charbon ou de 1,6 tonne de pétrole.



# LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- C'est en **1938** que **deux chimistes allemands** (Strassmann et Hahn), 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.





# LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- **Le 1<sup>er</sup> 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.



## 1ères réalisations



UNGG  
MAGNOX  
HWGCR

## Réacteurs actuels



REOMG (RBMK)  
REB (BWR)      AGR  
REP (PWR)      PHWR  
VVER (WWER)    CANDU

## Réacteurs évolutionnaires



EPR                      HUALONG One  
AP 600 et AP 1000    CANDU EC6  
VVER AES 2006      APWR  
ABWR et ESBWR      ATMEA  
APR 1400              KERENA

## Réacteurs du futur



RTHT (VHTR)  
RESC (SCWR)  
RSF (MSR)  
RNR (FNR) → { RNR-Na (SFR)  
                          RNR-G (GFR)  
                          RNR-Pb (LFR)  
SMR

## Génération IV

## Génération III et III+

## Génération II

## Génération I



# 1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

La **1<sup>ère</sup> génération** comprend les prototypes et les 1<sup>ers</sup> 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> 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<sup>ème</sup> **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**

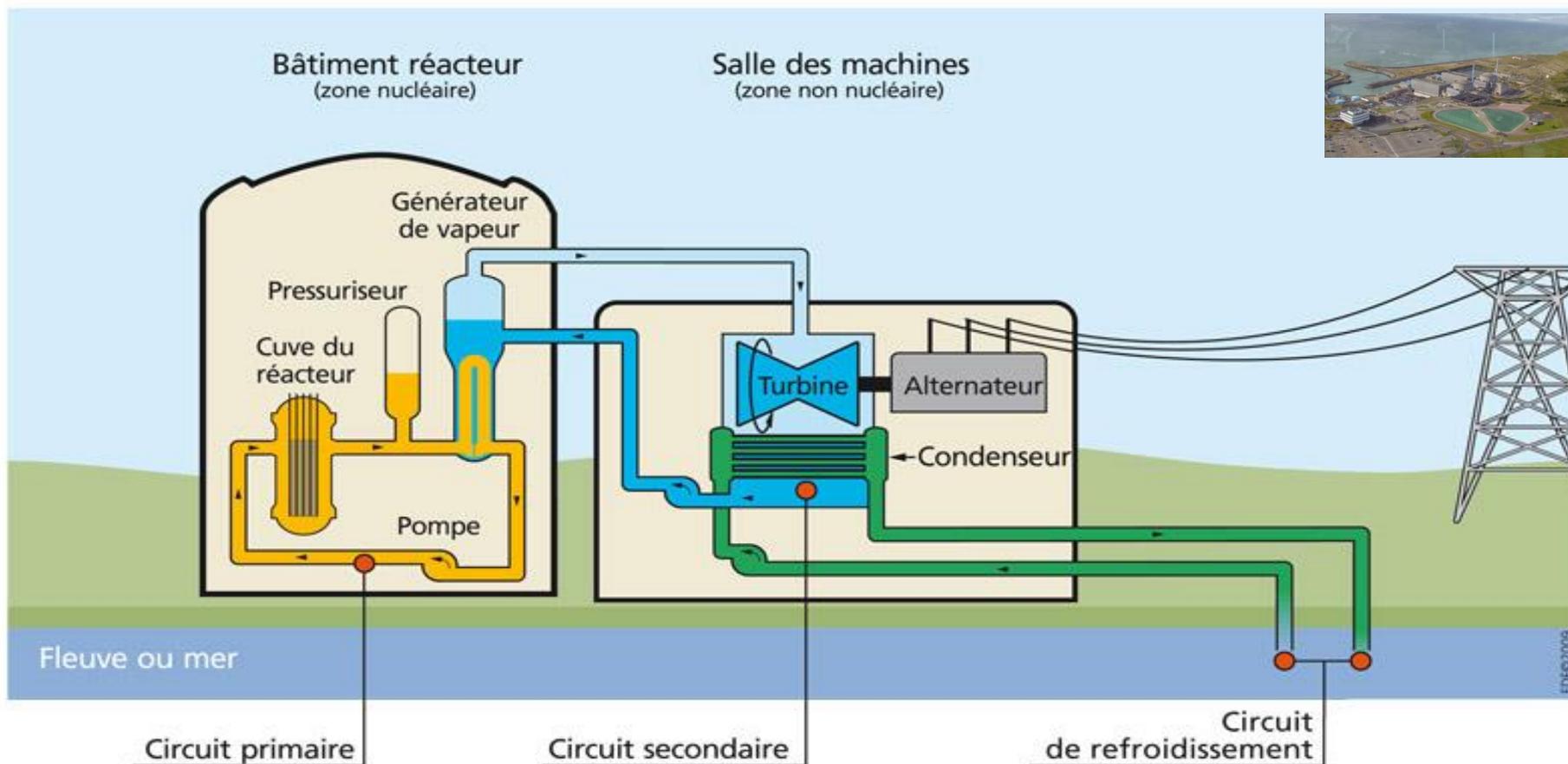
# 1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

- 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 65% du parc mondial, suivi par les réacteurs à eau bouillante (REB) avec 15%.

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

# 1.3 LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR

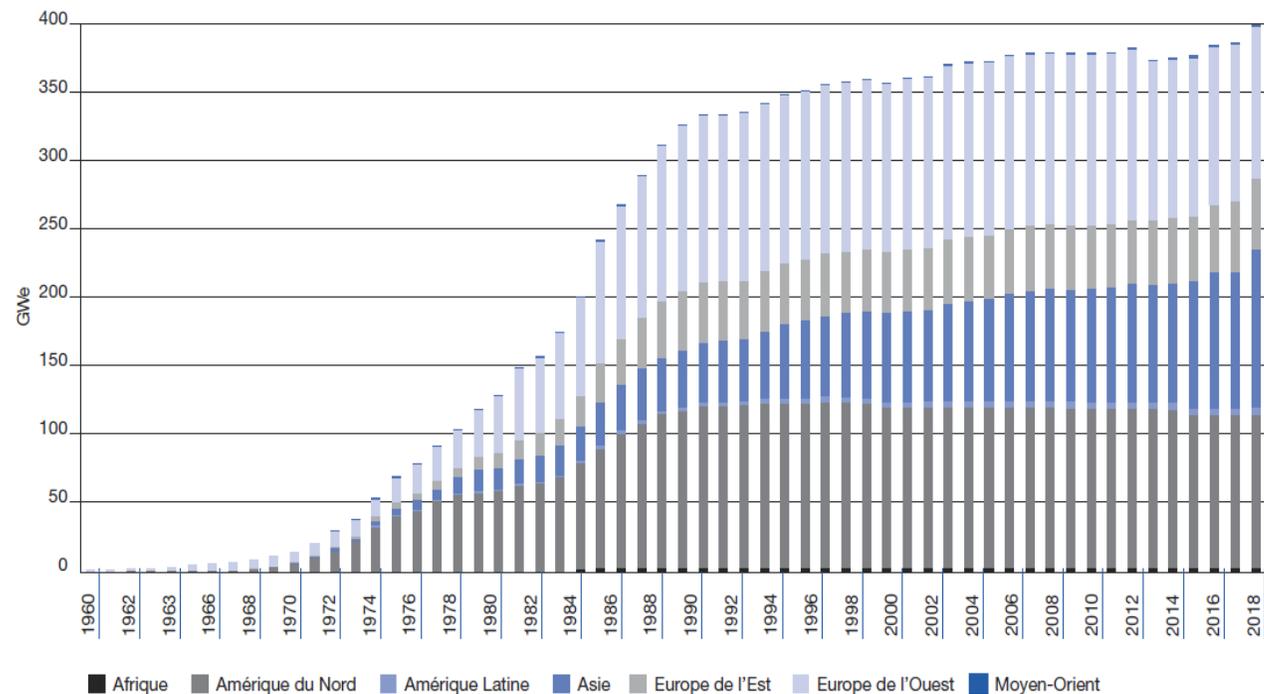
Réacteur à Eau Pressurisée (REP ou PWR) : 65% du parc mondial (100% du parc français)



# 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 CO<sub>2</sub>).

EVOLUTION ANNUELLE DE LA PUISSANCE NUCLÉAIRE NETTE MONDIALE CONNECTÉE AU RÉSEAU



- 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.



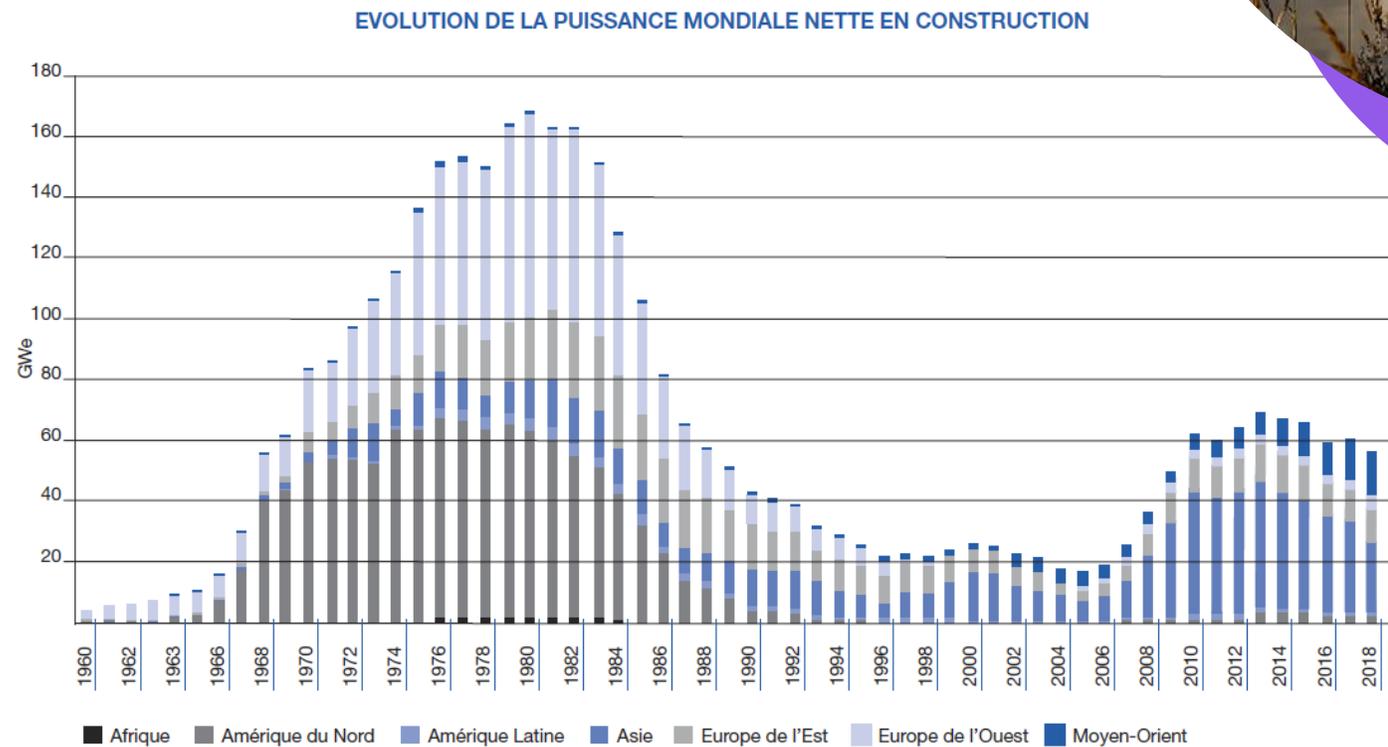
# 1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

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

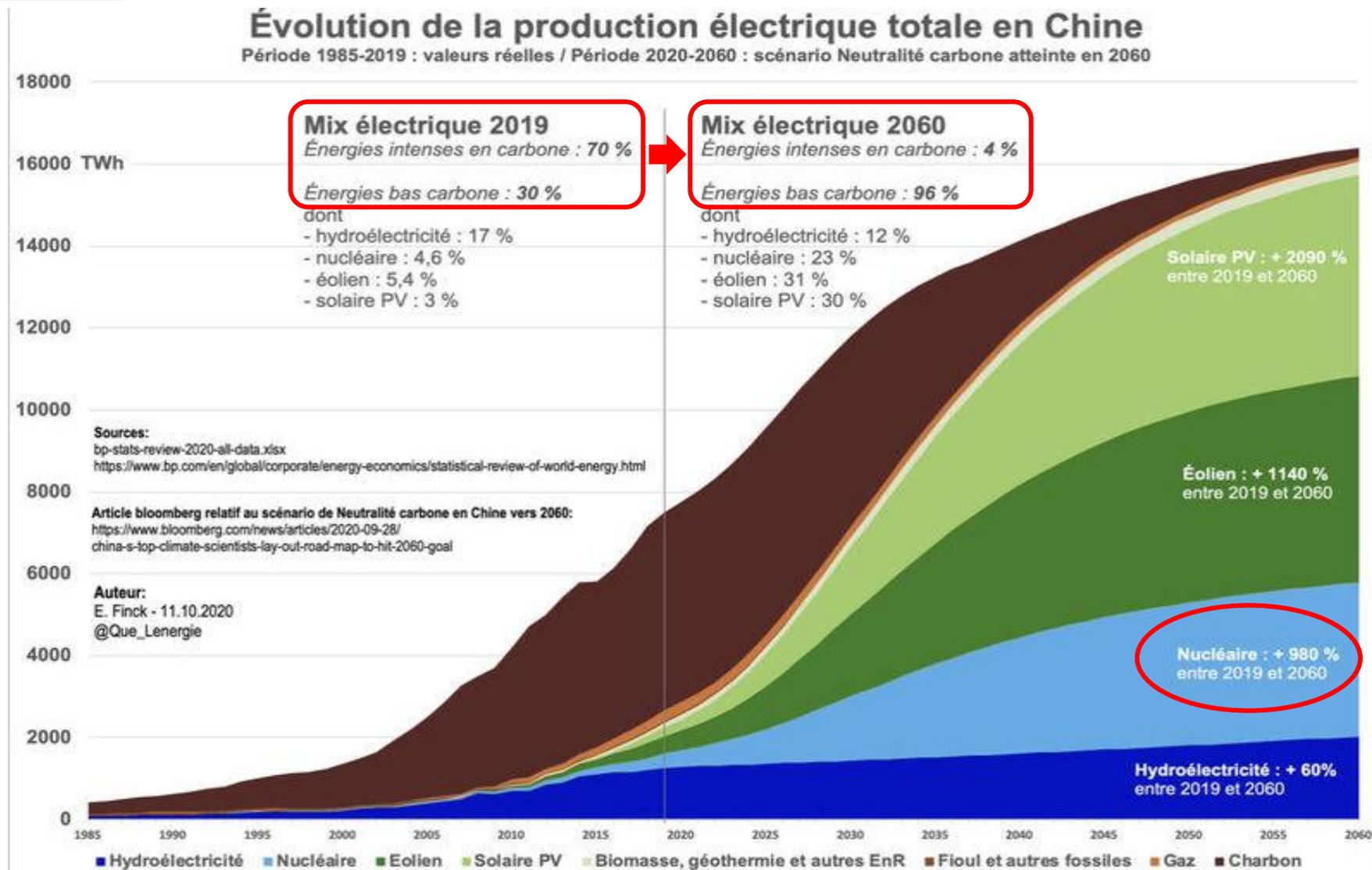
- En 2020, il y a **54 construction de réacteurs en cours**, dans 16 pays ( dont 12 en la Chine)
- Et **119 à l'état de projet** (yc dans une vingtaine de pays primo-accédants)

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.

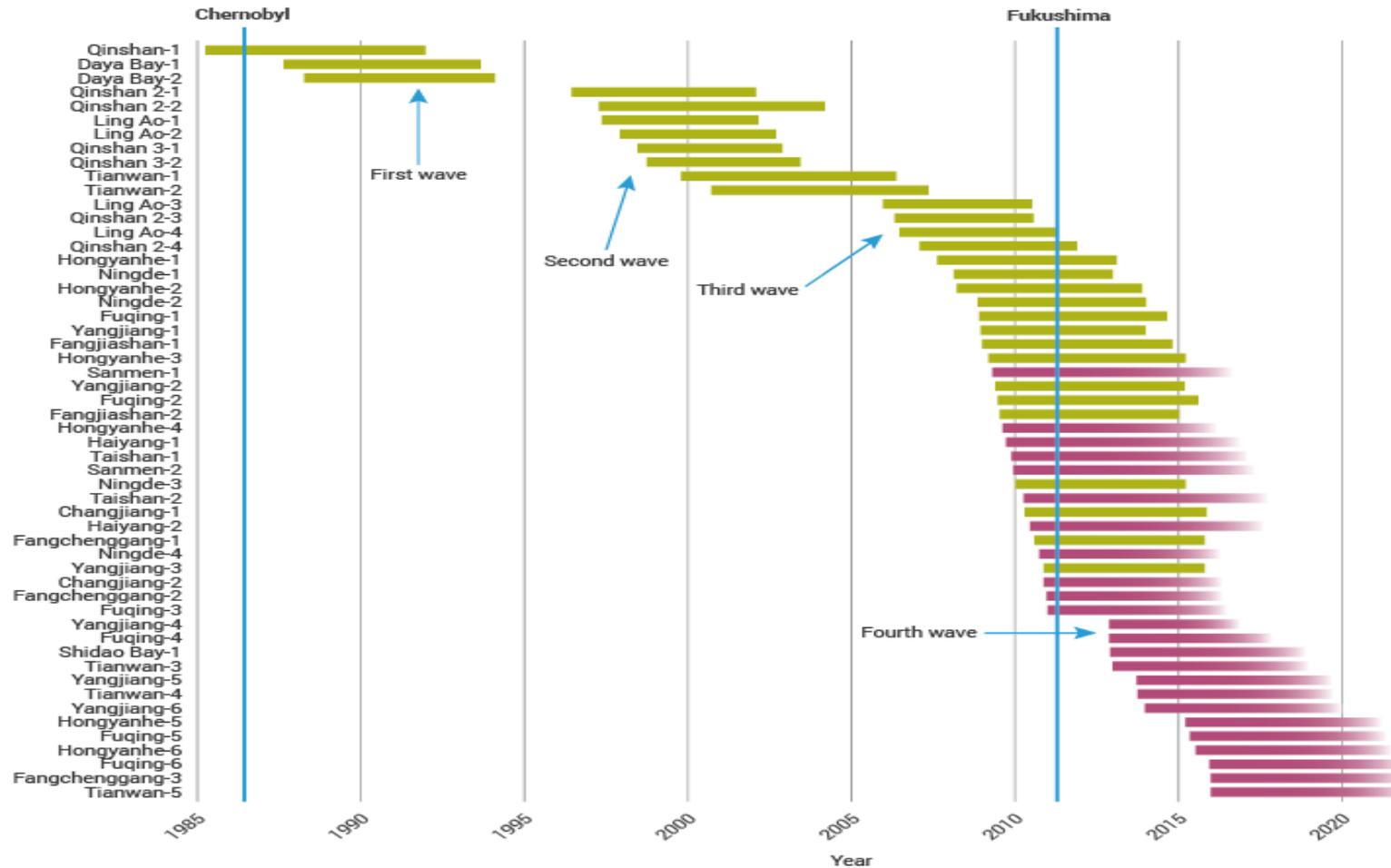


# 1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL



# 1.4 PANORAMA DU PARC MONDIAL

## Le programme nucléaire chinois



# 02

## Les inconvénients du nucléaire

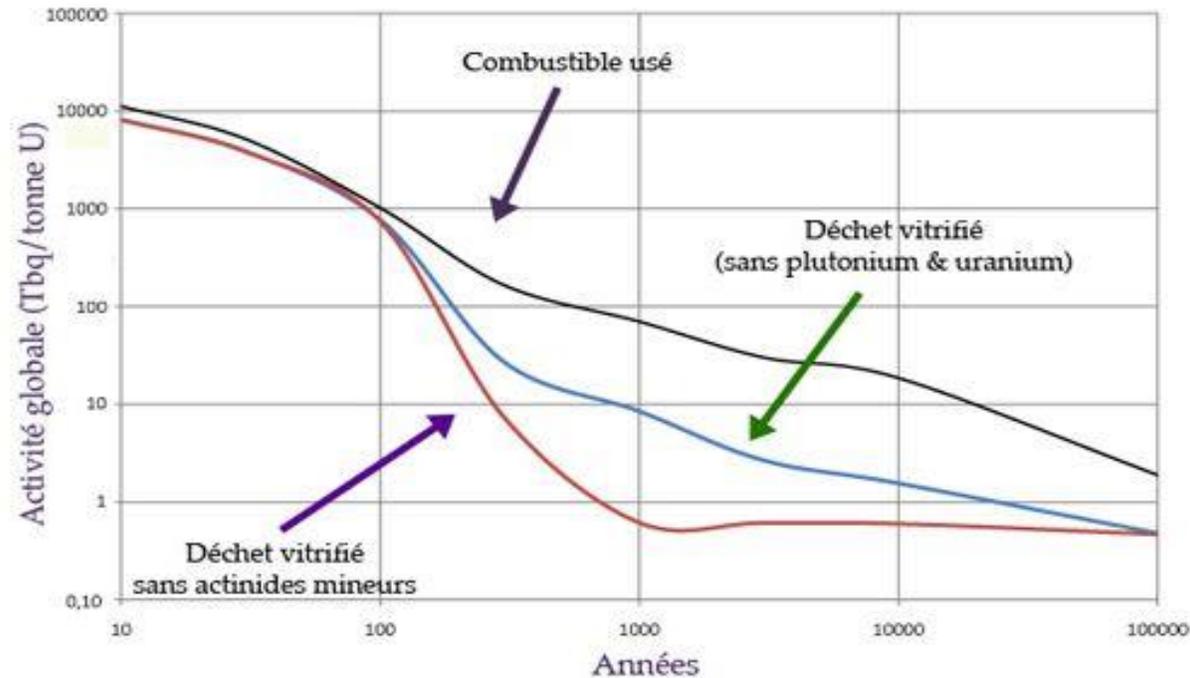
---

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. Sans entrer dans le détail précis du scénario de chaque catastrophe, il est cependant utile d'aborder en 1<sup>er</sup> lieu leurs causes majeures et les caractéristiques différenciantes des installations, afin de mieux comprendre leurs conséquences sanitaires, sociales et économiques :

## Three Miles Island (1979, USA) :

- qq insuffisances de conception (filiale REP pas encore mature)
- 2 défaillances matérielles
- 3 erreurs humaines
- Présence d'enceinte de confinement
- Fusion partielle du cœur, réaction exothermique zirconium-eau, production d'hydrogène

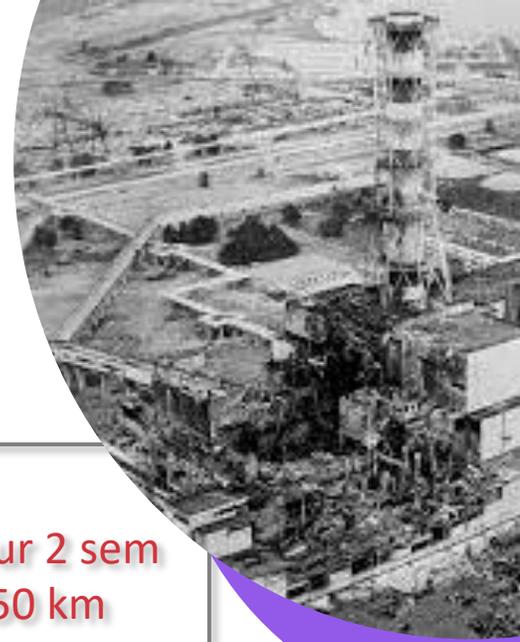
## Tchernobyl (1986, Ukraine) :

- Nbreux défauts de conception (filiale russe RBMK)
- 6 erreurs humaines graves (3 non respects volontaires des règles de conduite + 3 inhibitions volontaires de systèmes de sûreté)
- Absence d'enceinte de confinement
- Explosion du cœur
- Incendie du graphite

## Fukushima (2011, Japon) :

- Résistance au séisme (8,9)
- qq insuffisances de conception
- Perte totale source refroidissement et source électrique (suite au tsunami)
- Absence recombineur d'hydrogène
- Réaction héroïque des opérateurs
- Fusion partielle de 3 cœurs, réaction exothermique zirconium-eau, production d'hydrogène
- Explosion de l'hydrogène ds 3 BK

# 2.2 LA FORTE GRAVITÉ ET LE FORT IMPACT DE SES ACCIDENTS



Conséquences sanitaires, sociales et économiques de ces 3 catastrophes :

## Three Miles Island (1979, USA) :

- Faibles rejets sur qq heures
- Stress et confusion de la population / recommandations contradictoires (140 000 pers s'enfuient, embouteillages monstres)
- 0 décès immédiat
- 0 décès différé
- 0 morbidité induite
- Arrêt de la filière nucléaire aux USA pendant 20 ans

## Tchernobyl (1986, Ukraine) :

- Rejets continus pendant 10j
- Dépôts des rejets sur tte l'Europe (13 000 km<sup>2</sup>)
- Contamination des denrées alimentaires
- 270 000 pers évacuées
- 50 décès immédiats
- 7 000 cancers thyroïde (+ 9 000 autres cancers potentiels ?)
- Augmentation morbidité / angoisse, maladies psychosomatiques, sentiment de non reconnaissance et d'abandon par les nvx Etats de la CEI, alcool, drogue, augmentation des suicides

## Fukushima (2011, Japon) :

- 15 rejets discontinus sur 2 sem
- Dépot des rejets sur 250 km (600 km<sup>2</sup>)
- Contamination des denrées alimentaires
- 150 000 pers évacuées
- 0 décès immédiat
- 1 décès différé (cancer du poumon d'un travailleur sur la centrale)
- 1 000 décès ds l'évacuation (parmi les 30 000 décès dus au séisme + tsunami)
- Augmentation morbidité / recours au charbon, pénurie d'électricité (1 000 morts de froid ?)

# 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 :**

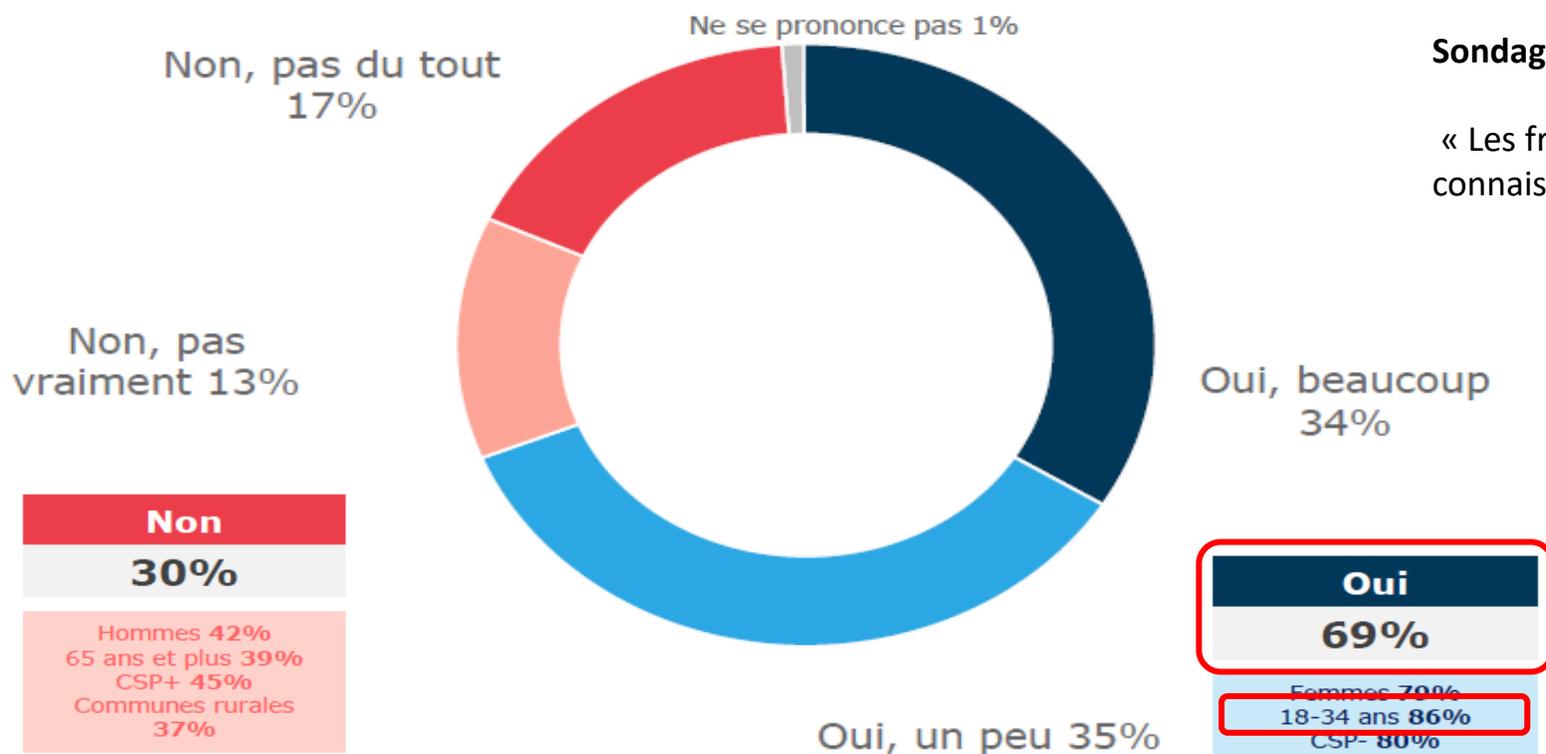
- La complexité des questions scientifiques et techniques qui sont liées à l'énergie nucléaire, ce qui ne facilite pas son appropriation par le grand public, mais aussi par les médias (la filière nucléaire n'ayant pas dans le passé été très efficace en terme de communication et vulgarisation),
- Un traitement 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 sureté

# 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
<b>Uranium-235</b>	<b>Fission nucléaire</b>	<b>22 083 333</b>
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 )

- 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 :

Type de production d'électricité	Empreinte au sol m2 / MWh
Fission nucléaire	0,78
Eolien	entre 2 et 13
Charbon	entre 16 et 33
Solaire	entre 3 et 57



# 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).

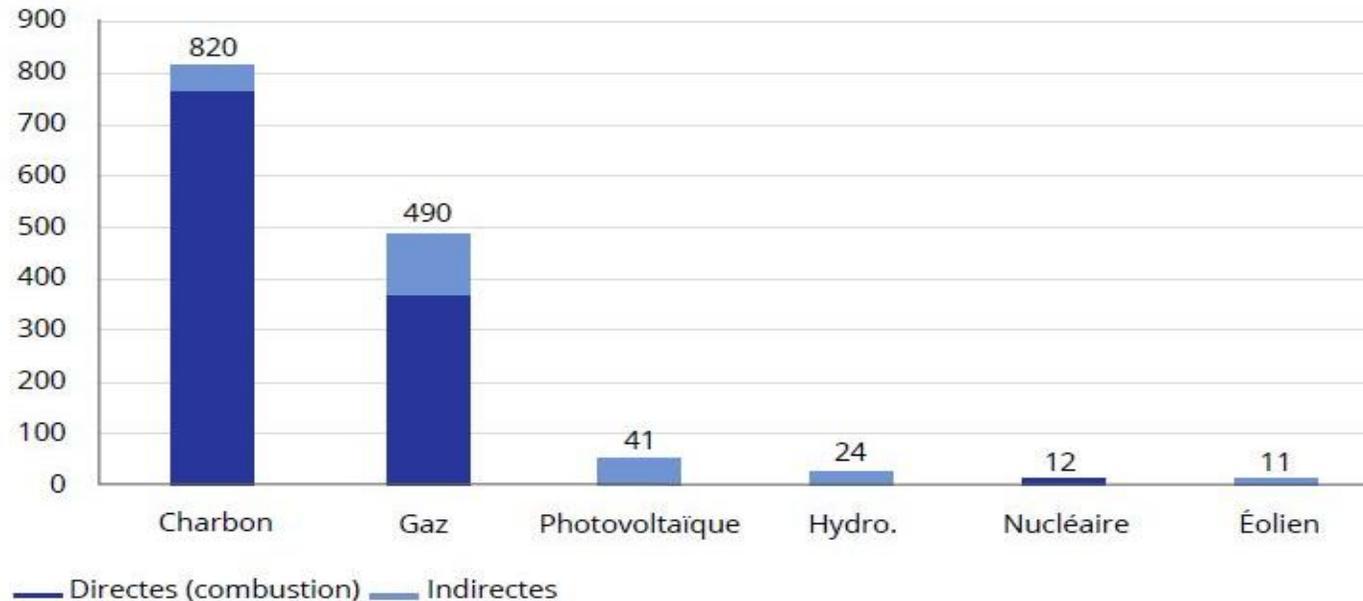
Comparons une éolienne et un réacteur nucléaire, tout deux de dernière génération :

- Une éolienne terrestre VESTAS :
  - puissance installé de 2 MW,
  - avec un facteur de charge de 23% (soit 2 000 heures par an),
  - avec une durée de vie de 20 ans (soit une production totale de 80 GWh)
  - Sa construction nécessite 425 m<sup>3</sup> de béton (soit 1 000 tonnes) et 40 tonnes d'acier.
  - Il faut donc 5 m<sup>3</sup> de béton et 0,5 tonne d'acier par GWh pour une éolienne
- Un réacteur nucléaire EPR :
  - Puissance installé de 1650 MW,
  - avec un facteur de charge de 85% (soit 7 440 heures par an),
  - avec une durée de vie de 60 ans (minimum prévu) (soit une production totale de 737 000 GWh)
  - Sa construction nécessite 385 000 m<sup>3</sup> de béton (près d'1 million de t) et 74 000 tonnes d'acier.
  - Il faut donc 0,5 m<sup>3</sup> de béton et 0,1 tonne d'acier par GWh pour un EPR



# 3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

- Les experts du GIEC placent l'énergie nucléaire au niveau mondial à 12 g de CO<sub>2</sub>/kWh :



Bilan gaz à effet de serre  
(g eq CO<sub>2</sub>/kWh)

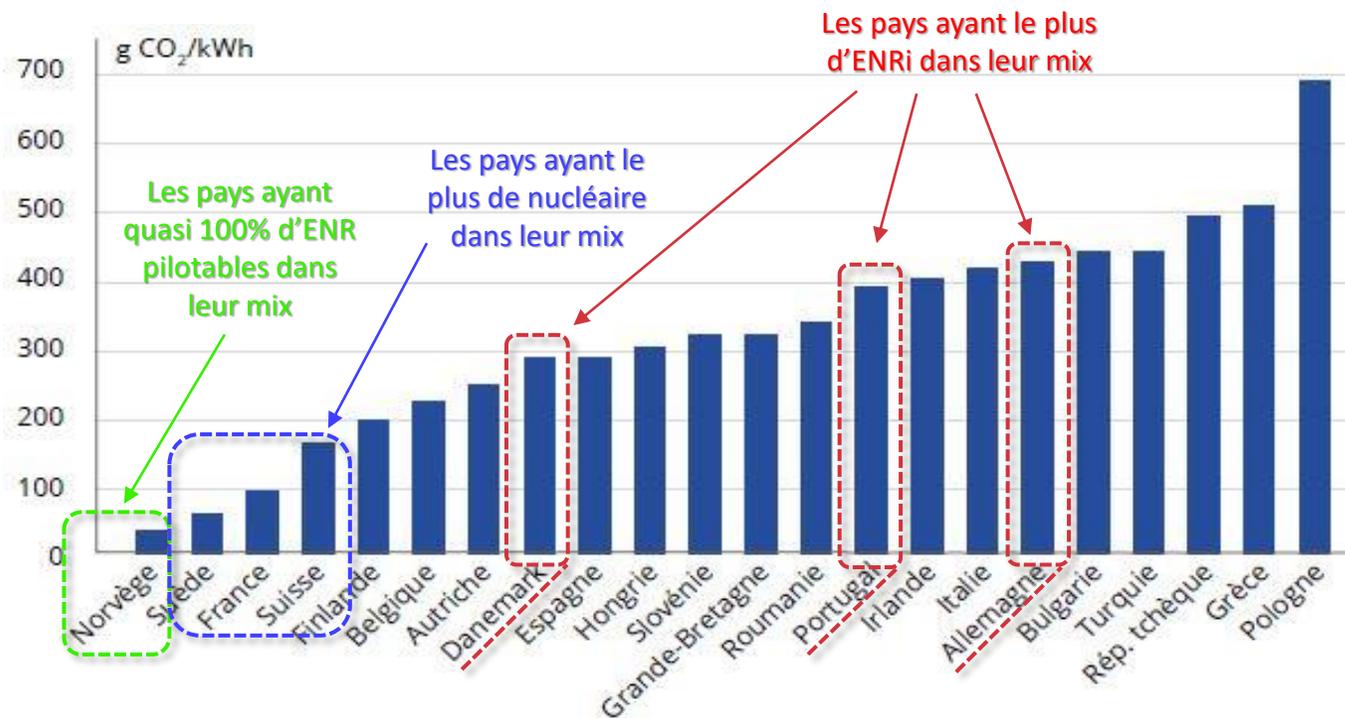
Méthodologie : ACV

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 CO<sub>2</sub>/kWh et 5,29 g CO<sub>2</sub>/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

- 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)

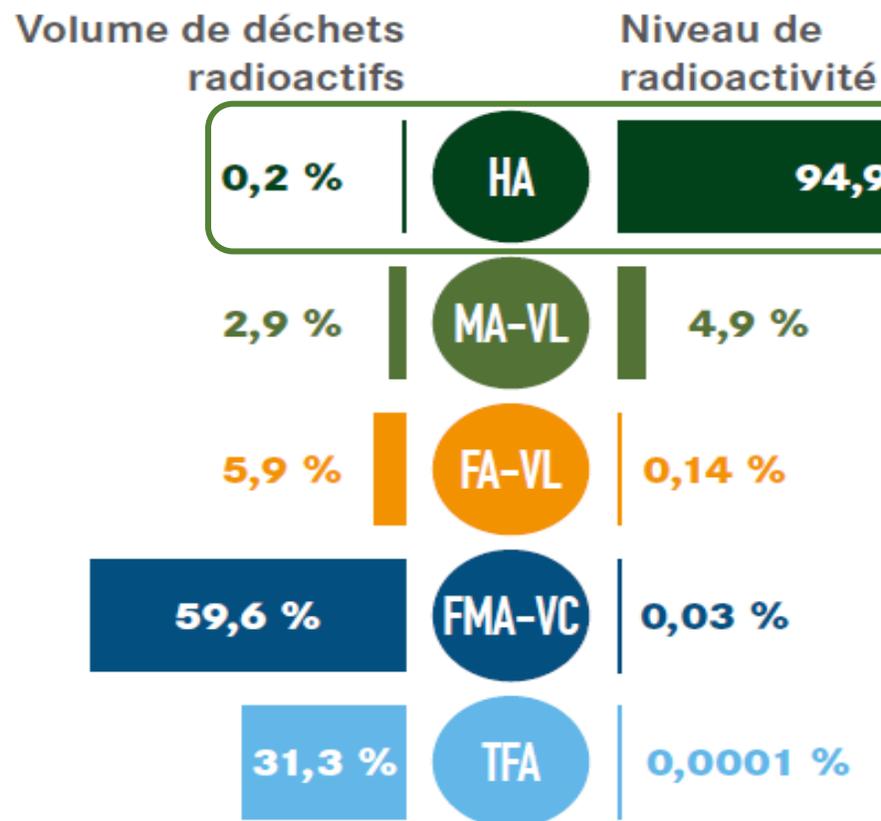
Méthodologie : ACV

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

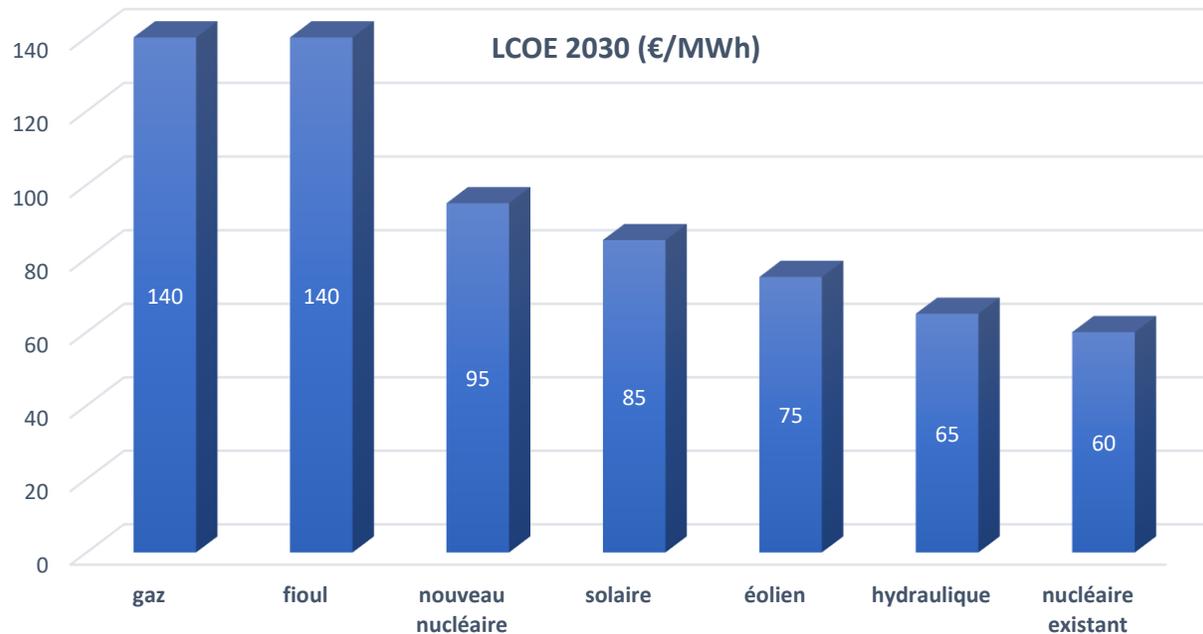
HA : Haute Activité (à Vie Longue)  
MA-VL : Moyenne activité à Vie Longue  
FA-VL : Faible Activité à Vie Longue  
FMA-VC : Faible et Moyenne Activité à Vie Courte\*  
TFA : Très Faible Activité (à Vie Courte\*)

\* Vie Courte = période radioactive  $\leq 31$  ans



# 3.5 SON COUT COMPÉTITIF

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



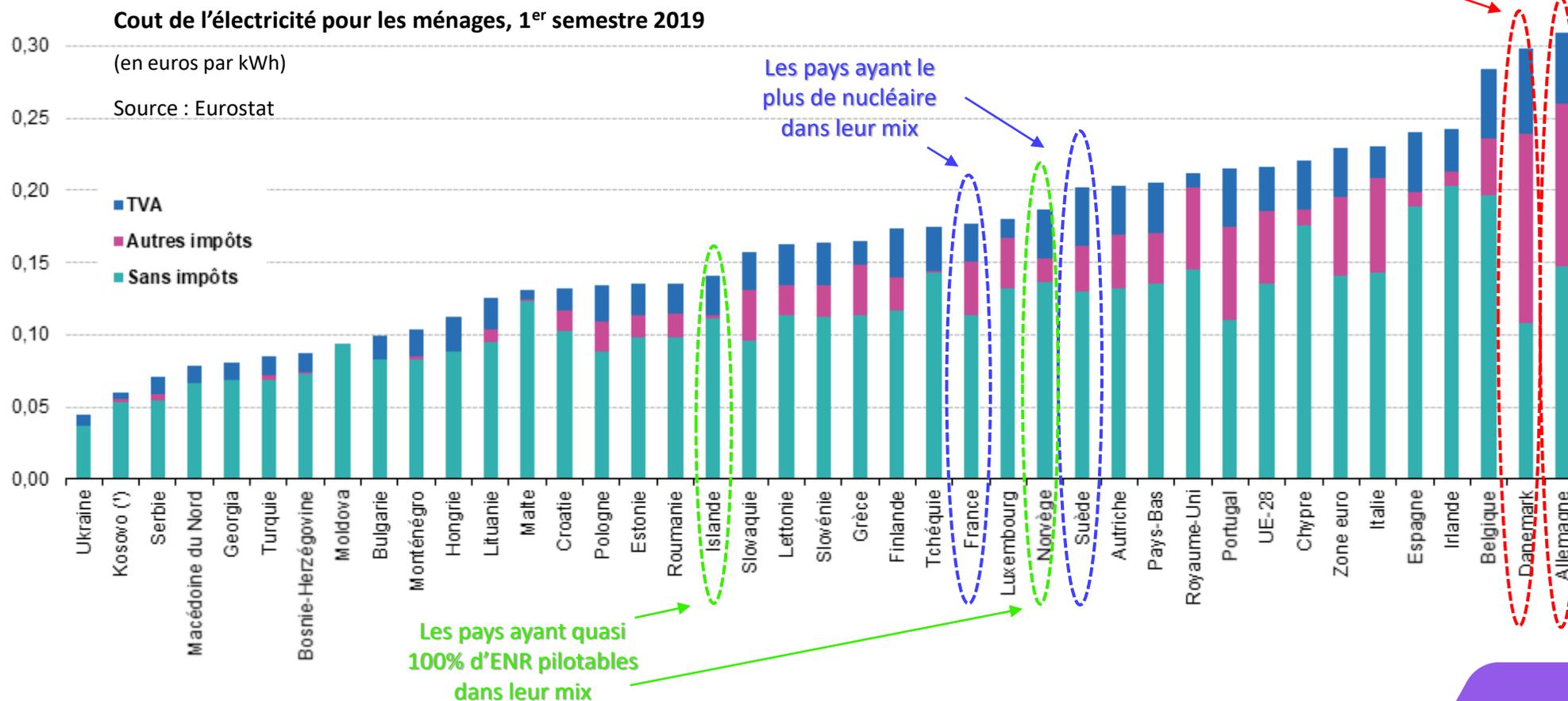
Rapport de la Commission Européenne  
janvier 2019

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 prix de l'électricité en Europe :



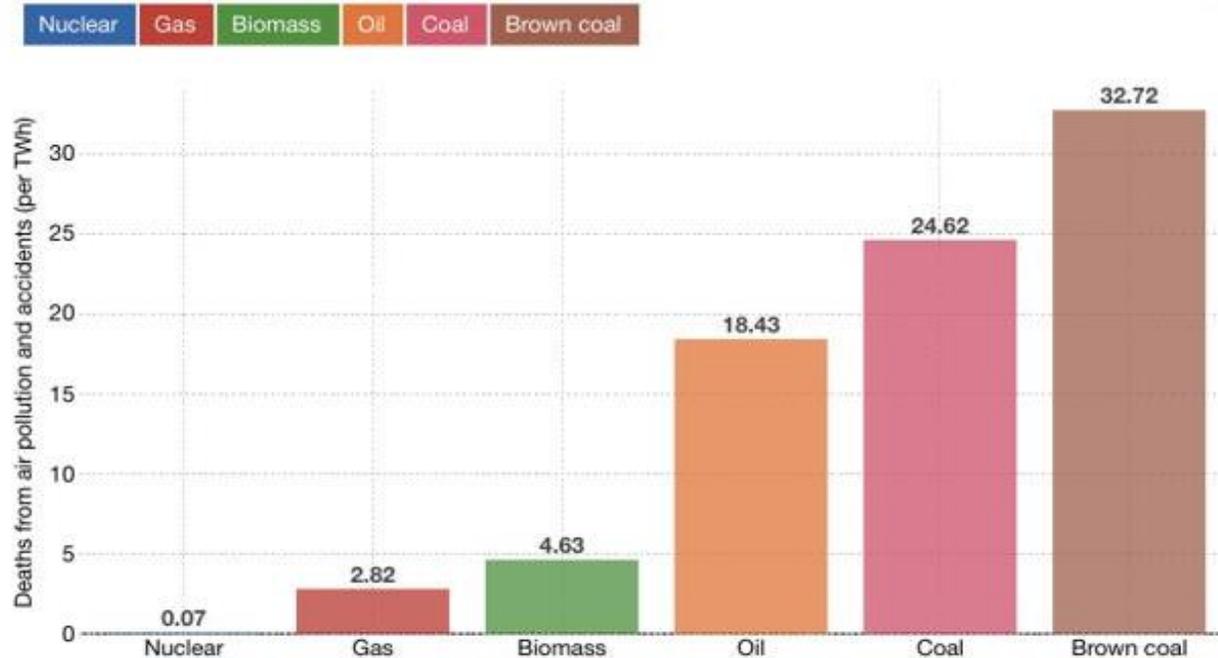
# 3.6 SA FORTE SURETÉ

- Comparaison pour chaque source d'énergie du nombre de décès :

## Death rates from energy production per TWh

Death rates from air pollution and accidents related to energy production, measured in deaths per terrawatt hours (TWh)

Our World  
in Data



Source: Markandya and Wilkinson (2007)

Note: Figures include deaths resulting from accidents in energy production and deaths related to air pollution impacts. Deaths related to air pollution are dominant, typically accounting for greater than 99% of the total.

OurWorldInData.org/what-is-the-safest-form-of-energy/ • CC BY-SA

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

The background features a purple overlay with a faint, repeating pattern of hexagons. On the left side, there is a vertical image of a modern building with a glass facade, partially obscured by the purple overlay. The overall aesthetic is clean and professional.

**Des questions ?**



**Merci !**

# **L'électronucléaire, une énergie d'avenir ?**



Thierry CAILLON

# Bibliographie

**Pour en savoir plus**

# Bibliographie

## Sites web :

- <https://new.sfen.org/academie-235/>
- [https://www.laradioactivite.com/site/pages/Energie\\_nucleaire.htm](https://www.laradioactivite.com/site/pages/Energie_nucleaire.htm)
- [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Pages/Home.aspx](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)

## Livres et revues :

- La technologie des réacteurs à eau pressurisée, Serge Marguet, 1168 pages - EDP Sciences – collection R&D EDF
- Historique et bilan de fonctionnement des RNR-Na, par Joël Guidez et Jean-Guy Nokhamzon, 2014, publié sur le site du CEA
- 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://www.youtube.com/results?search_query=dr+nozman)  
<https://twitter.com/DrNozman>
- Tristan Kamin => [https://www.youtube.com/results?search\\_query=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://www.youtube.com/results?search_query=le+r%C3%A9veilleur+nucl%C3%A9aire)  
[https://twitter.com/Le\\_Reveilleur](https://twitter.com/Le_Reveilleur)

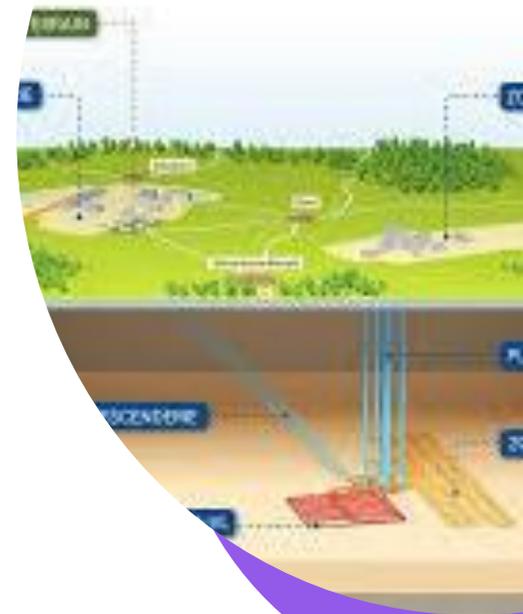
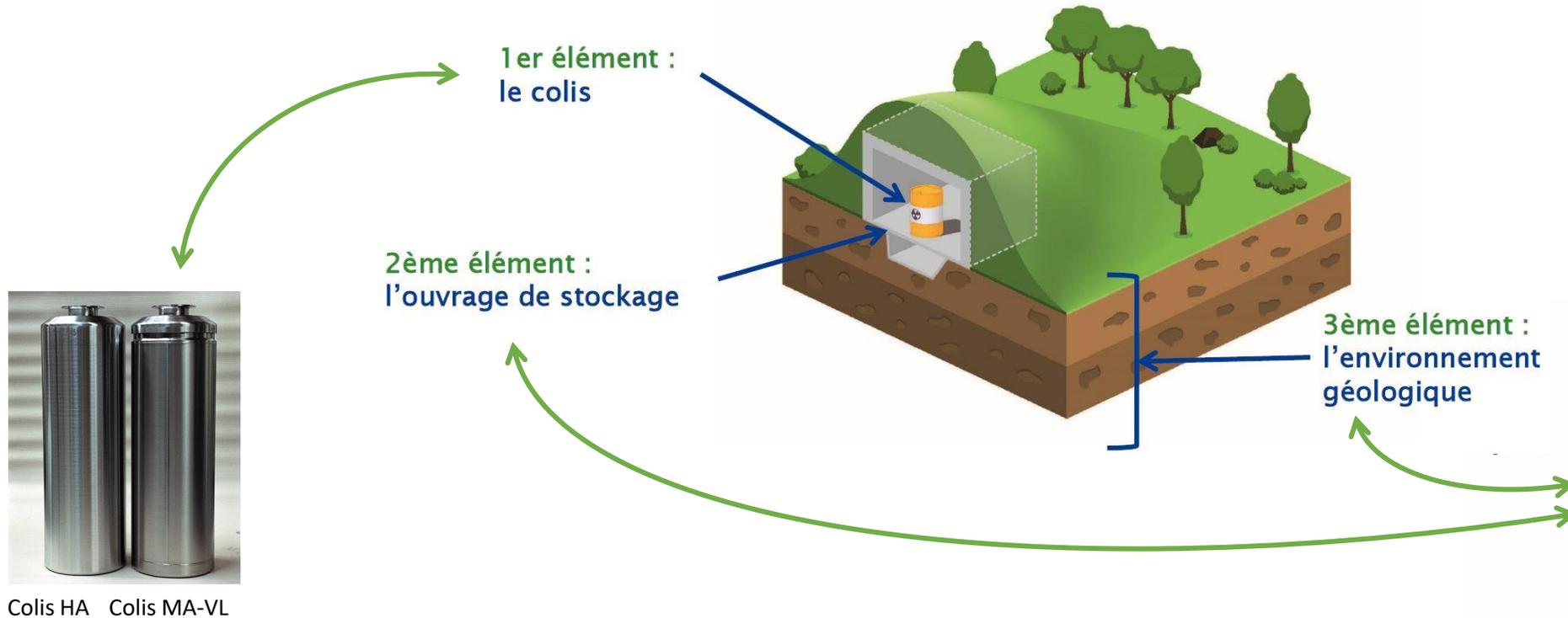


# Annexes

**Pour en savoir plus**

## 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

## LA GESTION DES DÉCHETS



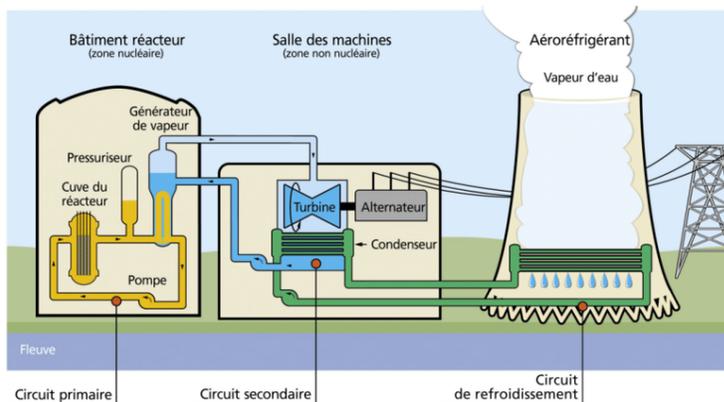
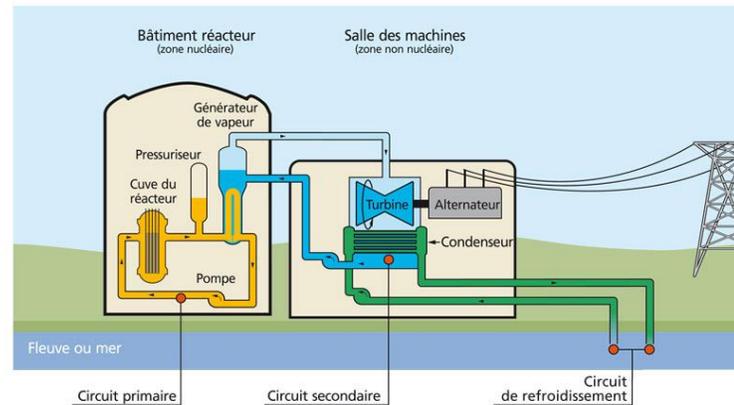
- Les volumes de déchets, selon les # scenarios d'évolution du parc nucléaire français :

		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 <sup>3</sup>	10 000 m <sup>3</sup>	9 400 m <sup>3</sup>	4 200 m <sup>3</sup>
MA-VL		72 000 m <sup>3</sup>	72 000 m <sup>3</sup>	70 000 m <sup>3</sup>	61 000 m <sup>3</sup>
FA-VL	Déchets <sup>2,3</sup>	190 000 m <sup>3</sup>	190 000 m <sup>3</sup>	190 000 m <sup>3</sup>	190 000 m <sup>3</sup>
	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 <sup>3</sup>	1 900 000 m <sup>3</sup>	2 000 000 m <sup>3</sup>	1 800 000 m <sup>3</sup>
TFA*		2 300 000 m <sup>3</sup>	2 200 000 m <sup>3</sup>	2 300 000 m <sup>3</sup>	2 100 000 m <sup>3</sup>

# LE NUCLEAIRE FACE À LA SECHERESSE

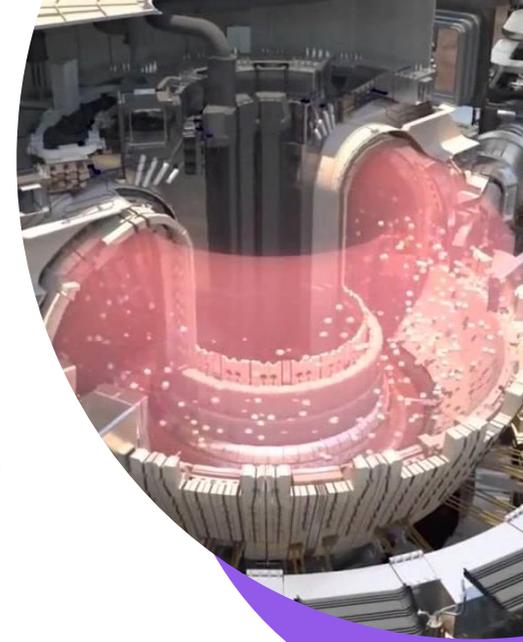
Contrairement à une idée reçue répandue, un réacteur nucléaire consomme peu d'eau :

- 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 m<sup>3</sup>/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 aéro-réfrigérantes), la quantité d'eau prélevée est modeste : 6 à 8 L/kWh, cad 2 m<sup>3</sup>/s, et 40% est restituée à l'atmosphère via le panache de vapeur d'eau des aéro-réfrigérants (0,8 m<sup>3</sup>/s)

## ET APRÈS LA FISSION ?



- Une génération correspond à un saut technologique en matière de sûreté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité.
- Chaque génération répond à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception.

### 1<sup>ères</sup> réalisations



UNGG  
MAGNOX  
HWGCR

### Réacteurs actuels



REOMG (RMBK)  
REB (BWR)    AGR  
REP (PWR)    PHWR  
VVER (WWER)    CANDU

### Réacteurs évolutionnaires



EPR	HUALONG One
AP 600 et AP 1000	CANDU EC6
VVER AES 2006	APWR
ABWR et ESBWR	ATMEA
APR 1400	KERENA

### Réacteurs du futur

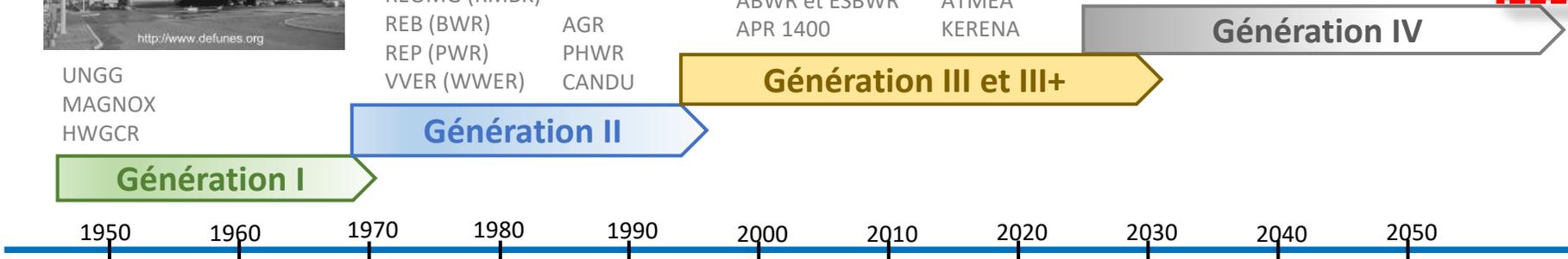


RTHT (VHTR)  
RESC (SCWR)  
RSF (MSR)  
RNR (FNR) → 

}	RNR-Na (SFR)
	RNR-G (GFR)
	RNR-Pb (LFR)

  
SMR

**Et après ?**



## ET APRES LA FISSION ?

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<sup>ème</sup> 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 CO<sub>2</sub>...
- Sans production de déchets...
- Sans risque de fusion du cœur

