

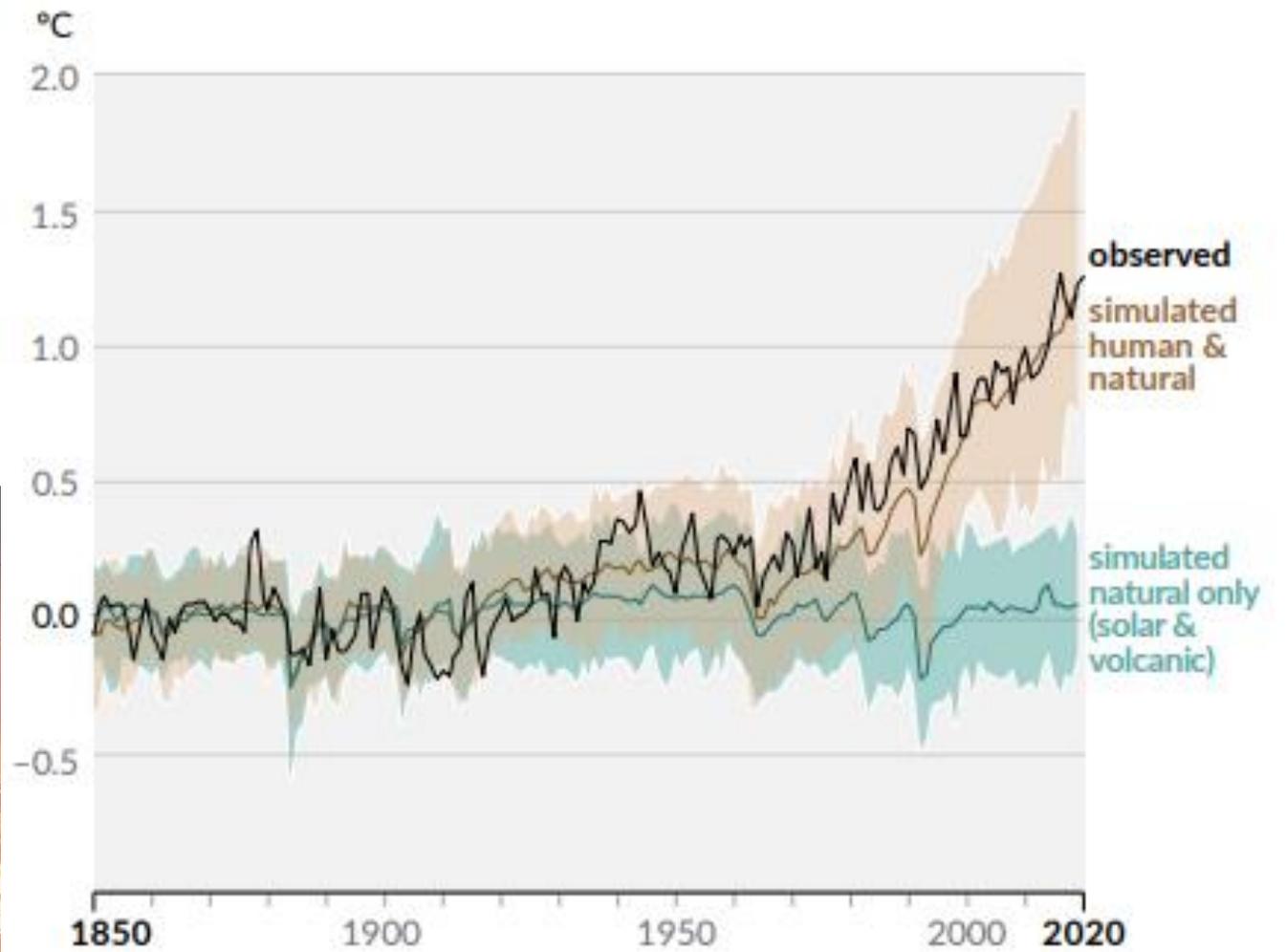
# L'urgence du nucléaire durable



Photo credit: © Zhongheng Jiao



Source : National Geographic/ Lynsey Addario



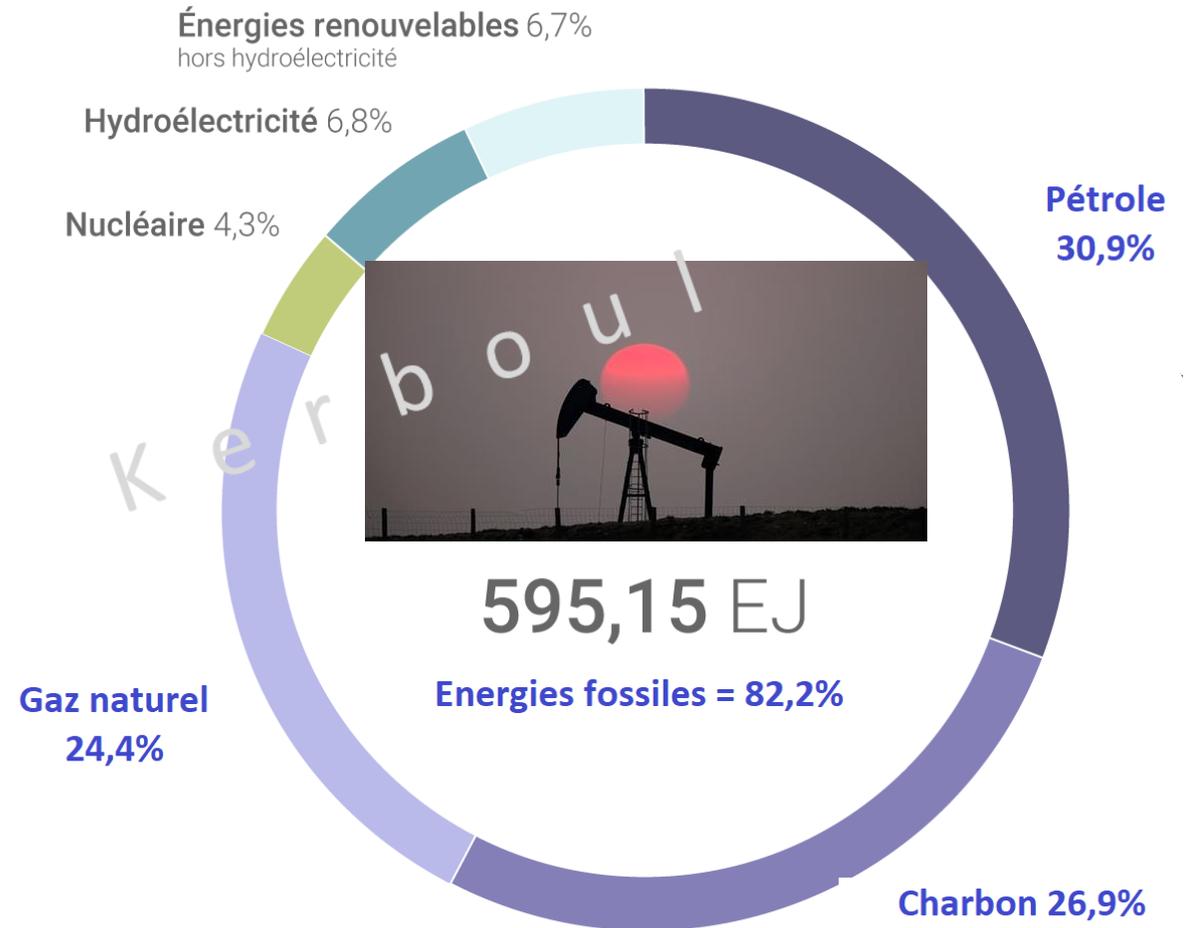
Source : Rapport Giec 2021

## Une relation linéaire inexorable entre les émissions de CO2 et la montée de la température globale



Source : SIPA/ Martin Meissner

**Une civilisation construite quasi exclusivement par les énergies fossiles**



Connaissance des Énergies | Sources : BP Statistical Review of World Energy, juin 2022.

## Les plus gros sites mondiaux de production pétrolière ont passé leur pic de production

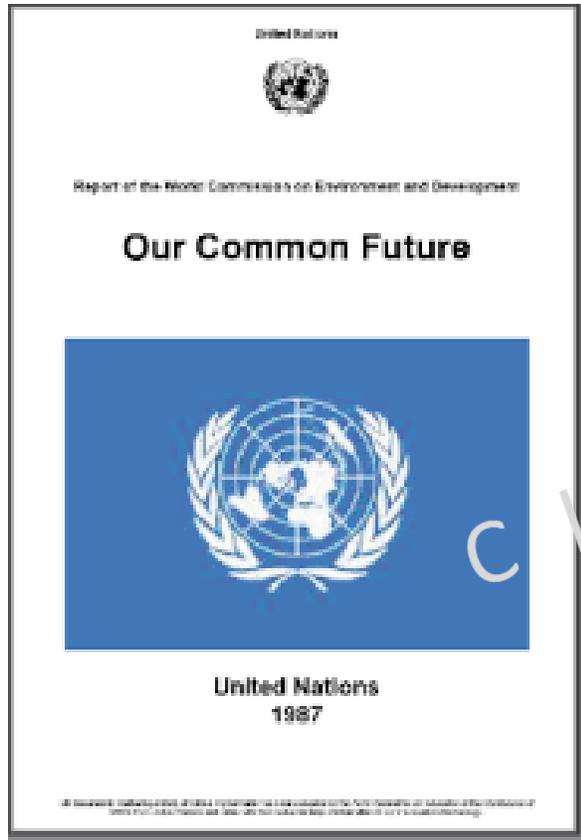
Field	Country	Location	Year of discovery	Peak annual production		2007 production kb/d
				Year	kb/d	
Ghawar	Saudi Arabia	Onshore	1948	1980	5 588	5 100
Cantarell	Mexico	Offshore	1977	2003	2 054	1 675
Safaniyah	Saudi Arabia	On/off	1951	1998	2 128	1 408

TABLEAU N° 8 : IEA WEO 2008 – THE WORLD’S BIGGEST OILFIELDS BY PRODUCTION (excerpts) - 2008

# Un monde durable ?

## Définition du concept de « durabilité\* /sustainability »

1987 : Rapport Brundtland\* « **Our Common Future/Notre avenir à tous** »



*Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs (cf. p 40) :*

- Préserver les ressources de la Terre ;
- Minimiser les déchets, gaz à effet de serre, pollutions, ...;
- Assurer l'acceptabilité sociale et la faisabilité économique.

\* *Commission mondiale sur l'environnement et le développement créée par l'ONU en 1983.*

# Quelle énergie pour un monde durable ?

# Le renouvelable



Source : Smola, Norvège © Kjell J. Hansen CC



Crédits Christian Pinatel de Salvator



Crédits : Andrey Sharpilo



Copyright EDP



Crédits : Sam Judy



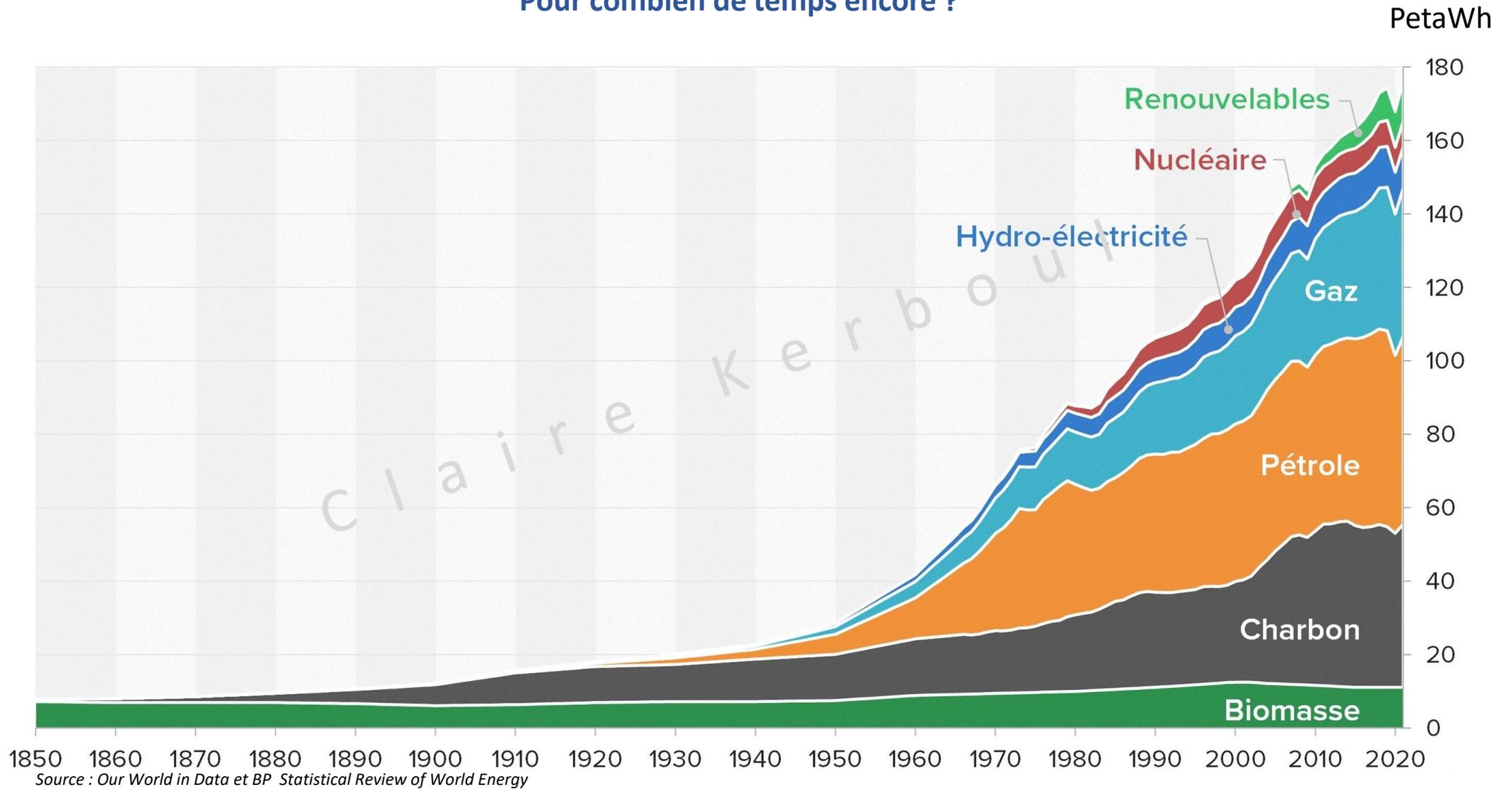
Source : BPI France

## Puissance électrique fournie par type d'installation

Type d'installation	Moyenne	
Barrage	1 000 MW à 22 000 MW	Barrage des Trois Gorges
Centrale thermique (charbon, fioul, gaz)	1 000 MW	
Centrale nucléaire	1 600 MW	EPR
Eolienne terrestre	3 MW	
Eolienne marine	6 MW	
Panneau Photovoltaïque	100 - 300 W <sub>crête</sub>	

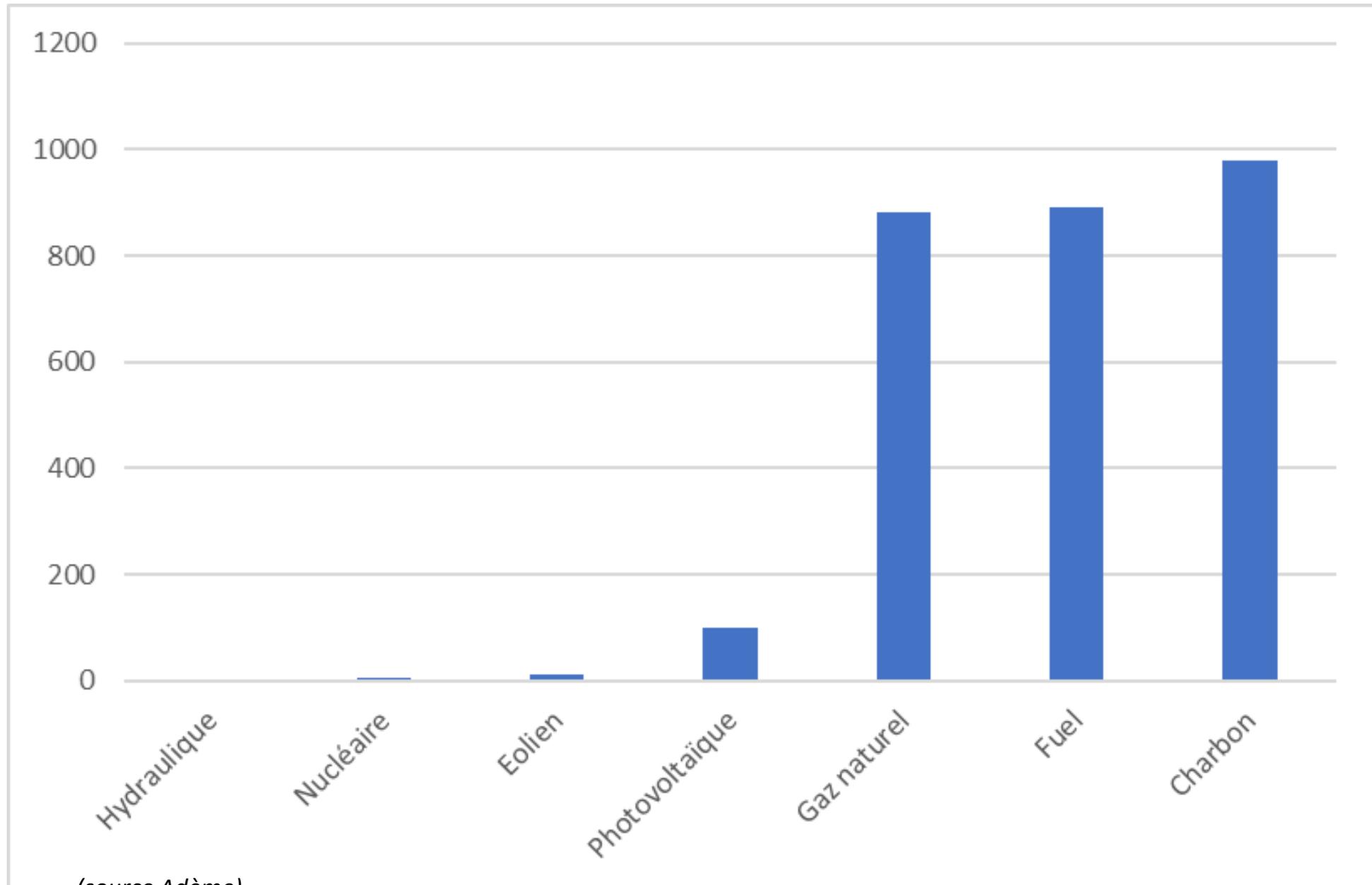
# Consommation mondiale d'énergie primaire par source

## Pour combien de temps encore ?



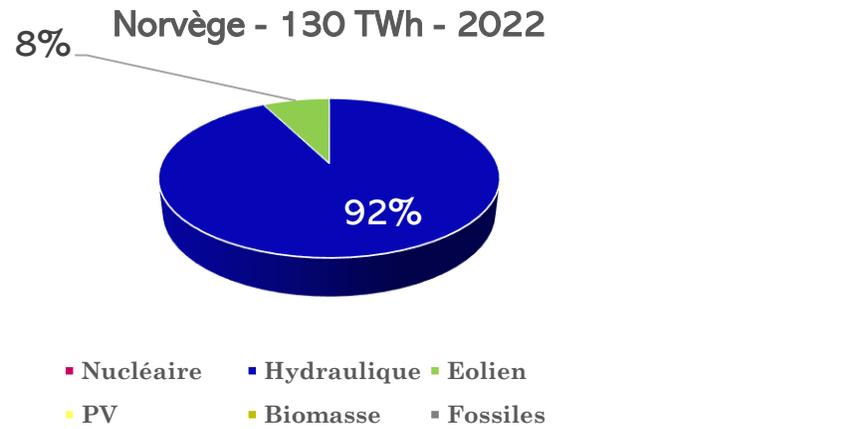
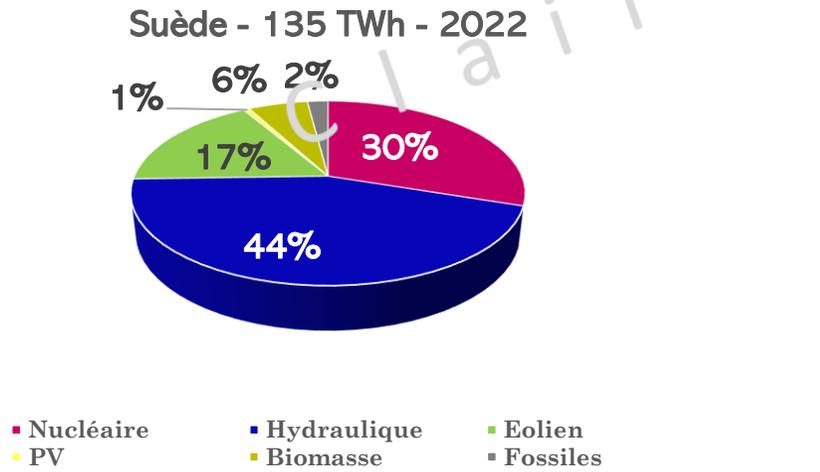
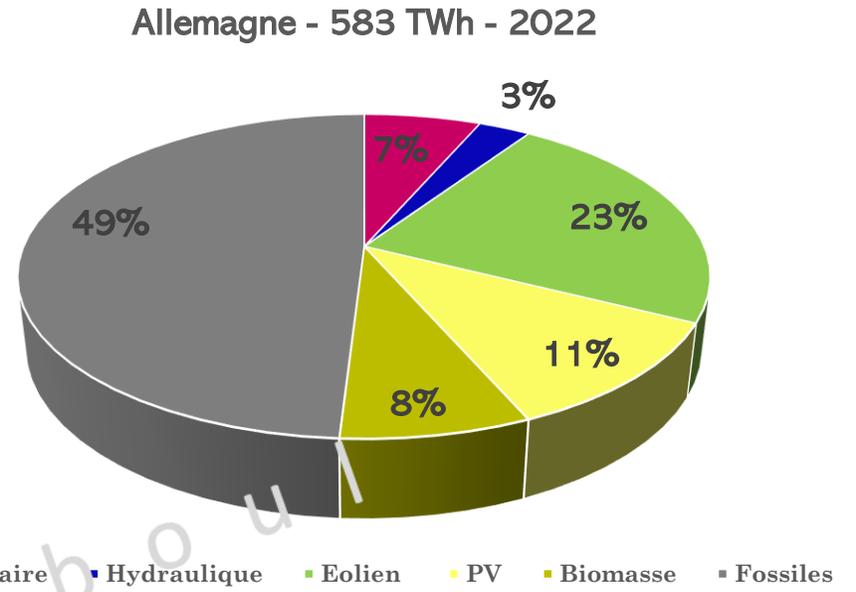
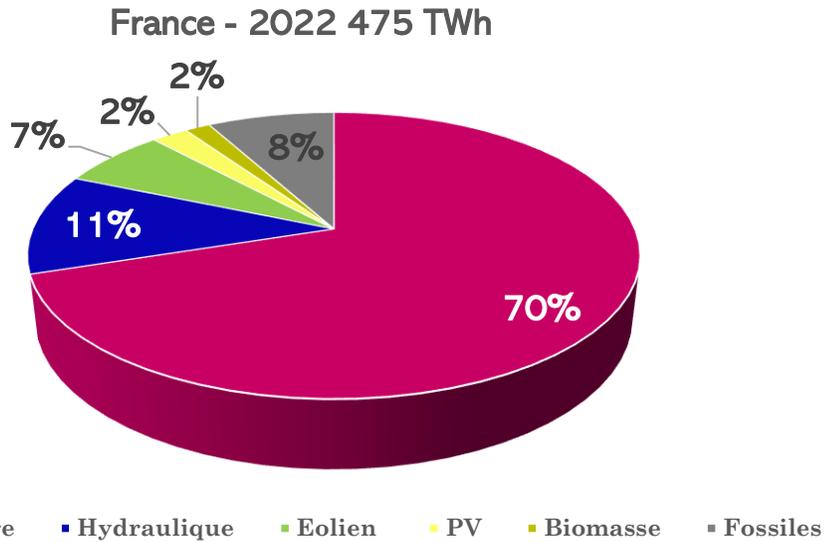
Source : Our World in Data et BP Statistical Review of World Energy

## Emission de CO2 en grammes par kWh

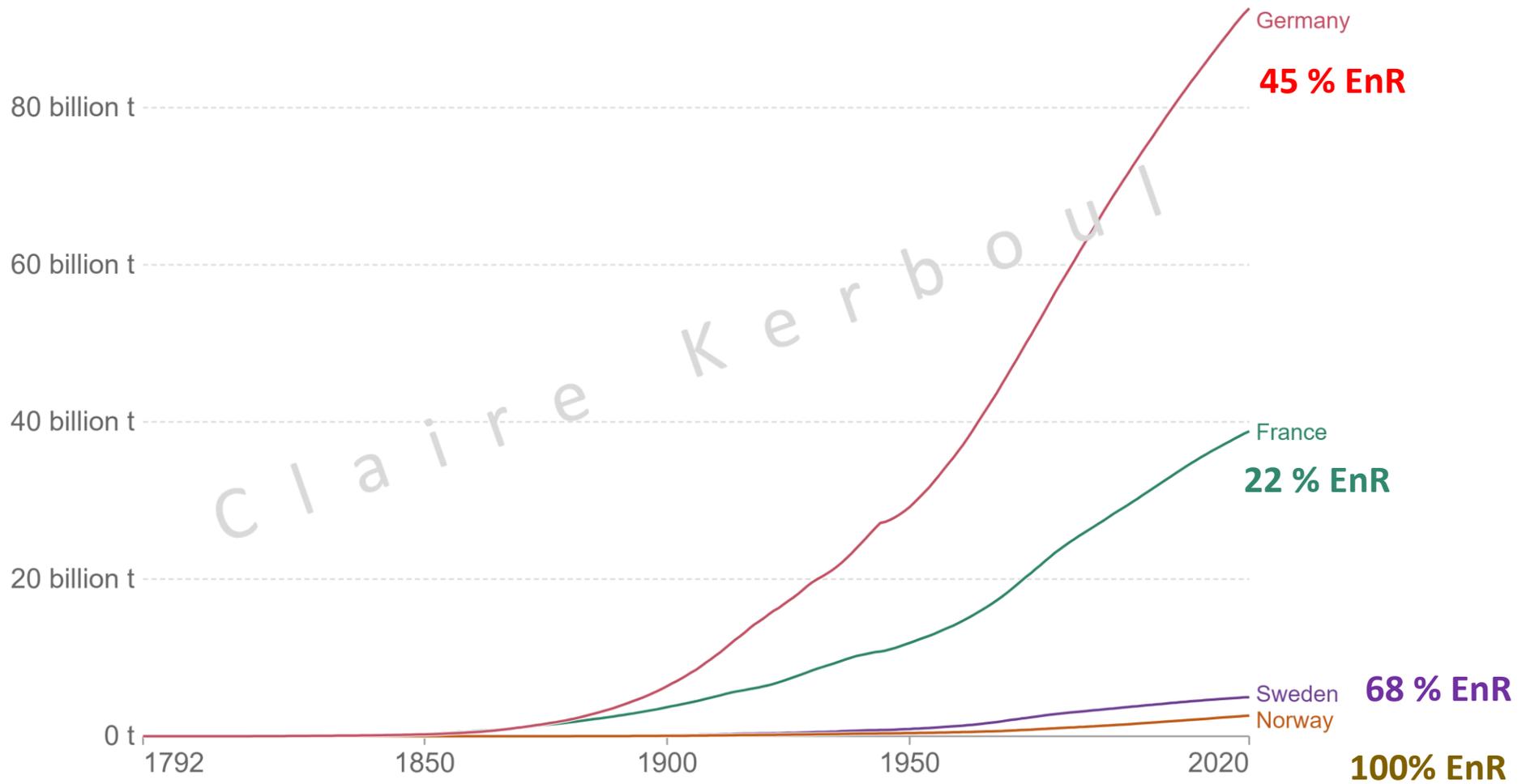


(source Adème)

# Les énergies renouvelables sont-elles durables ?



# Emissions de CO<sub>2</sub> cumulées (G<sub>tonnes</sub>)



Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

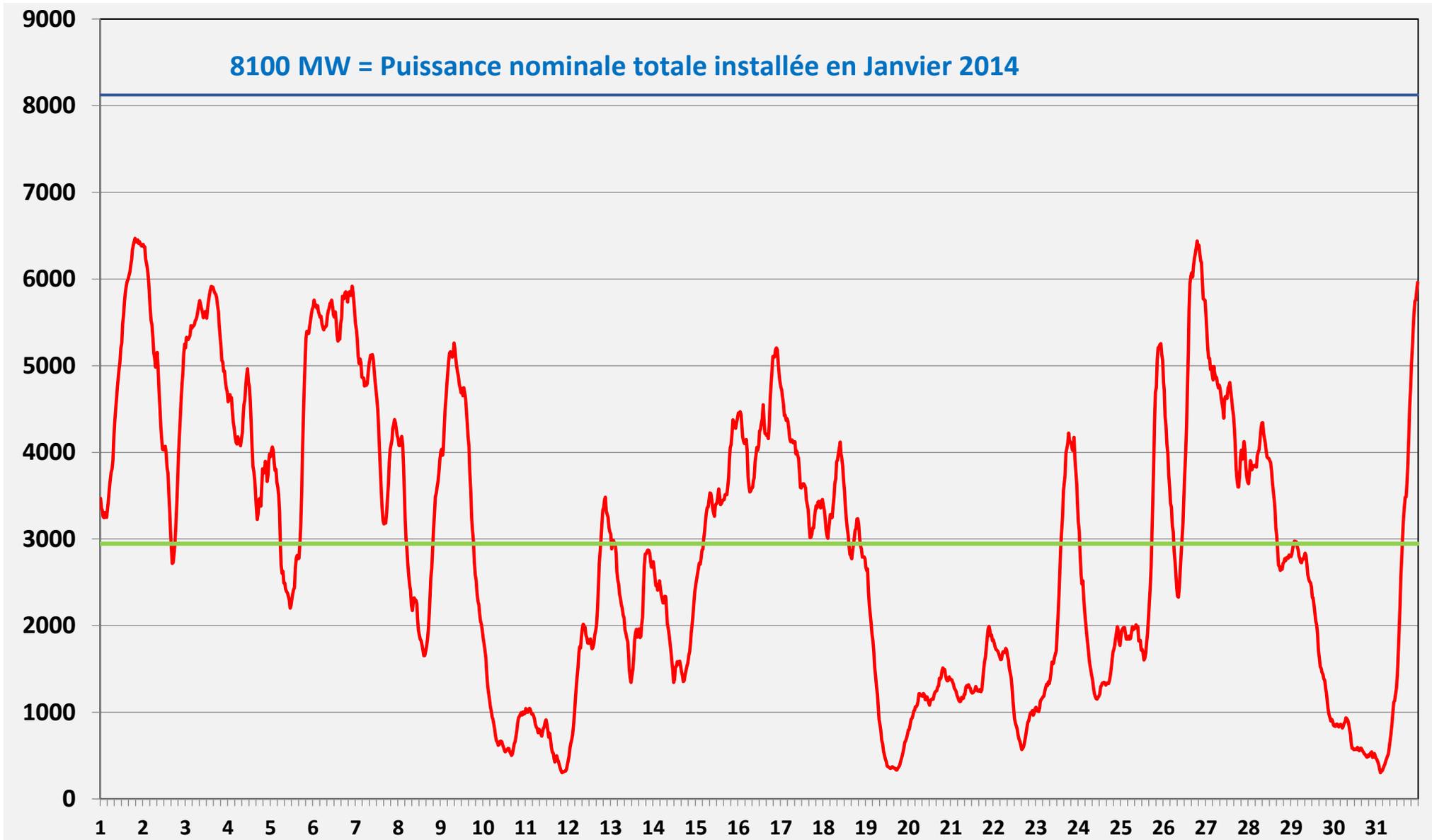
## Eoliennes en mer du banc de Guérande –Saint-Nazaire



Source Bernard Durand - SLC

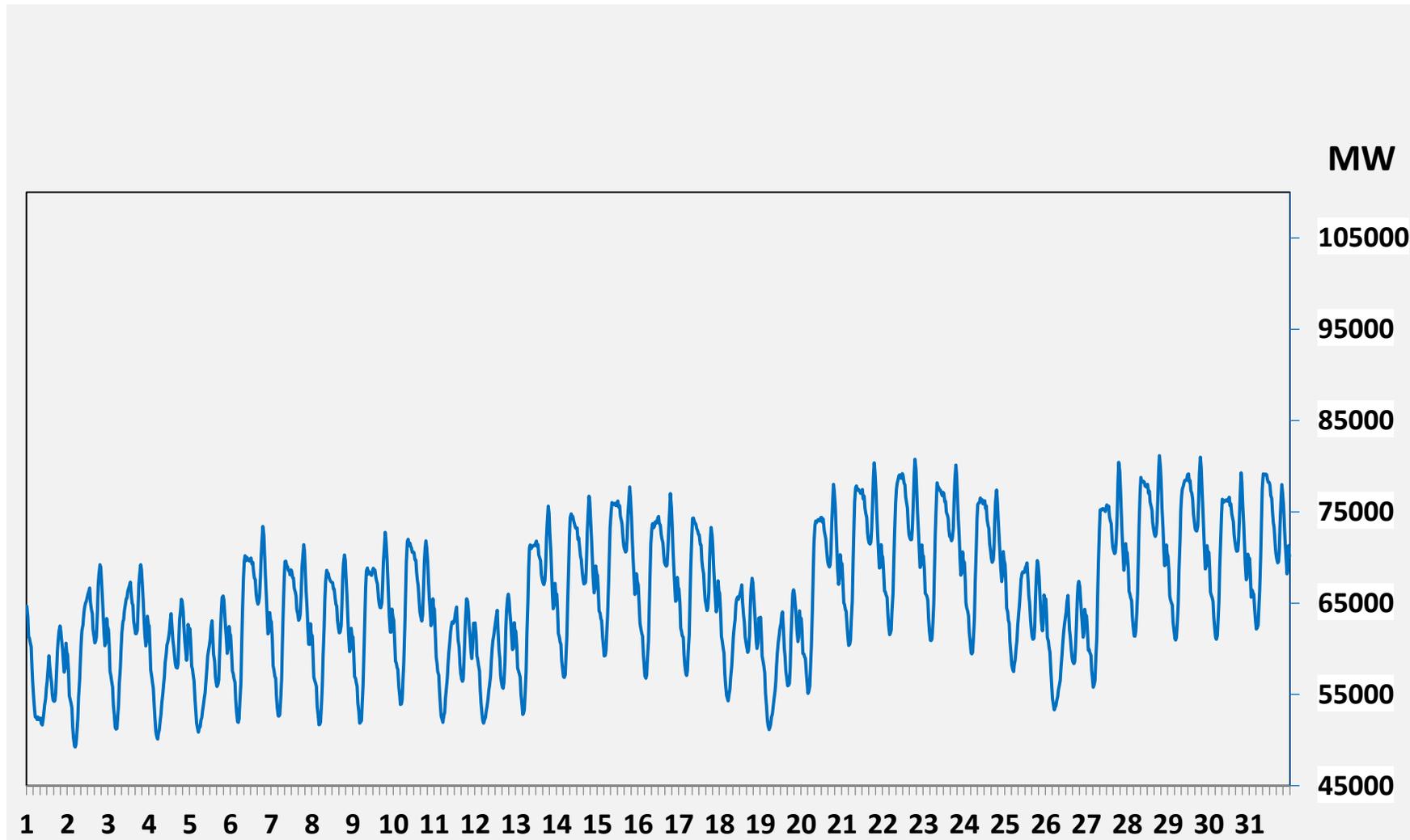
Janvier-février 2023

## Puissance éolienne mesurée en France en janvier 2014

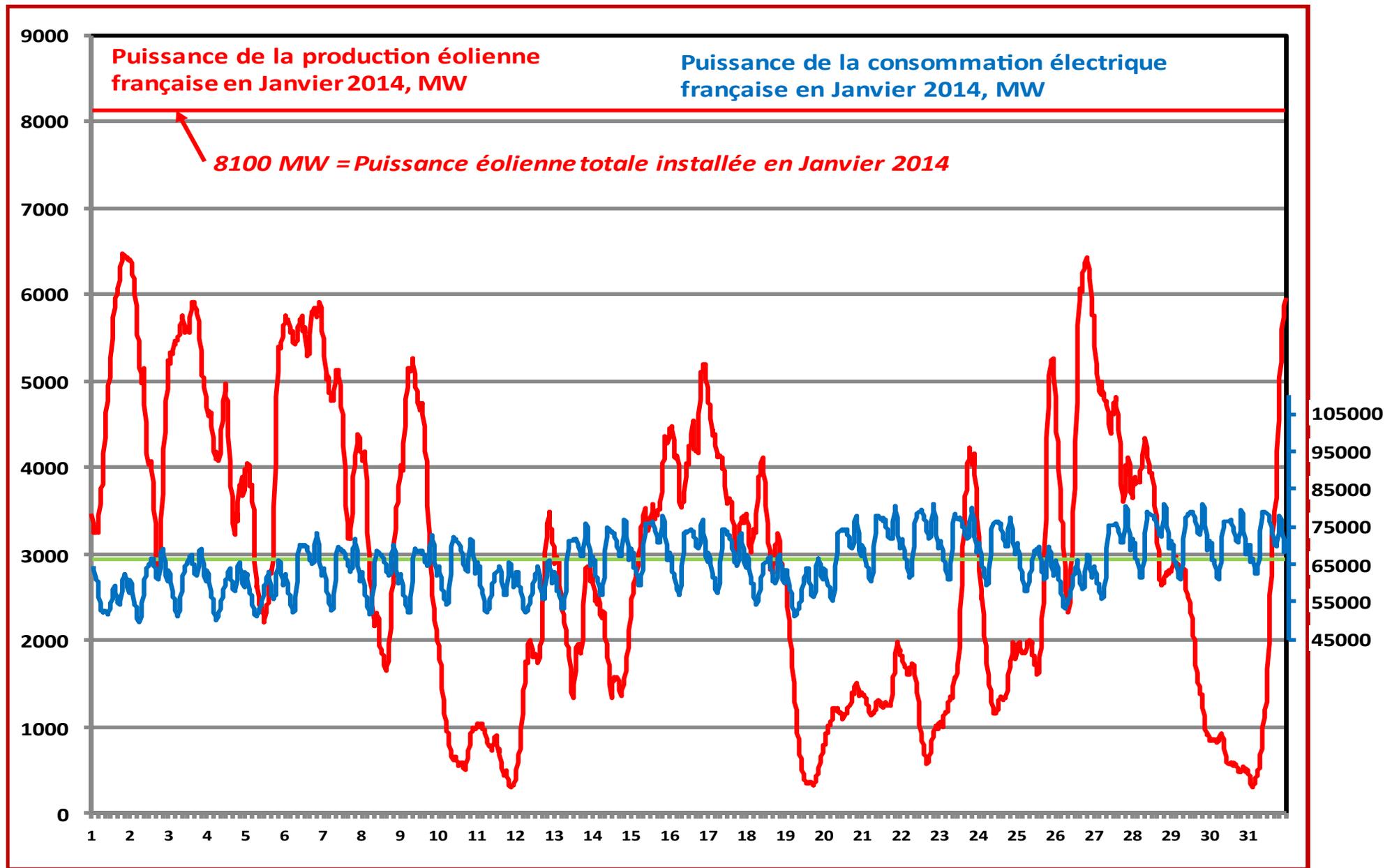


Source : Bernard Durand - SLC

## Consommation totale de puissance électrique en France en 2014



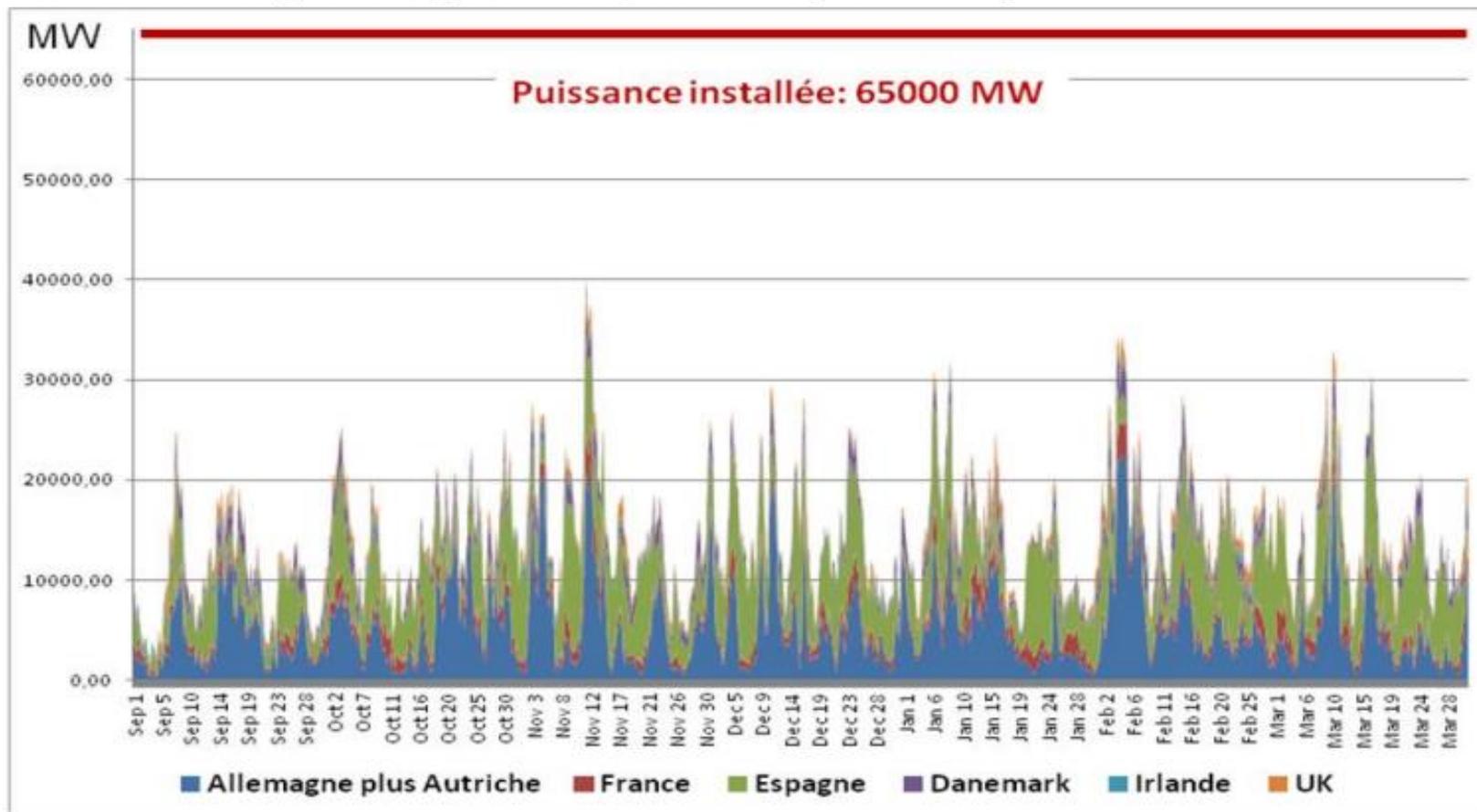
Source : Bernard Durand - SLC



Source : Bernard Durand - SLC

## Exemple du « foisonnement » de la production éolienne en Europe

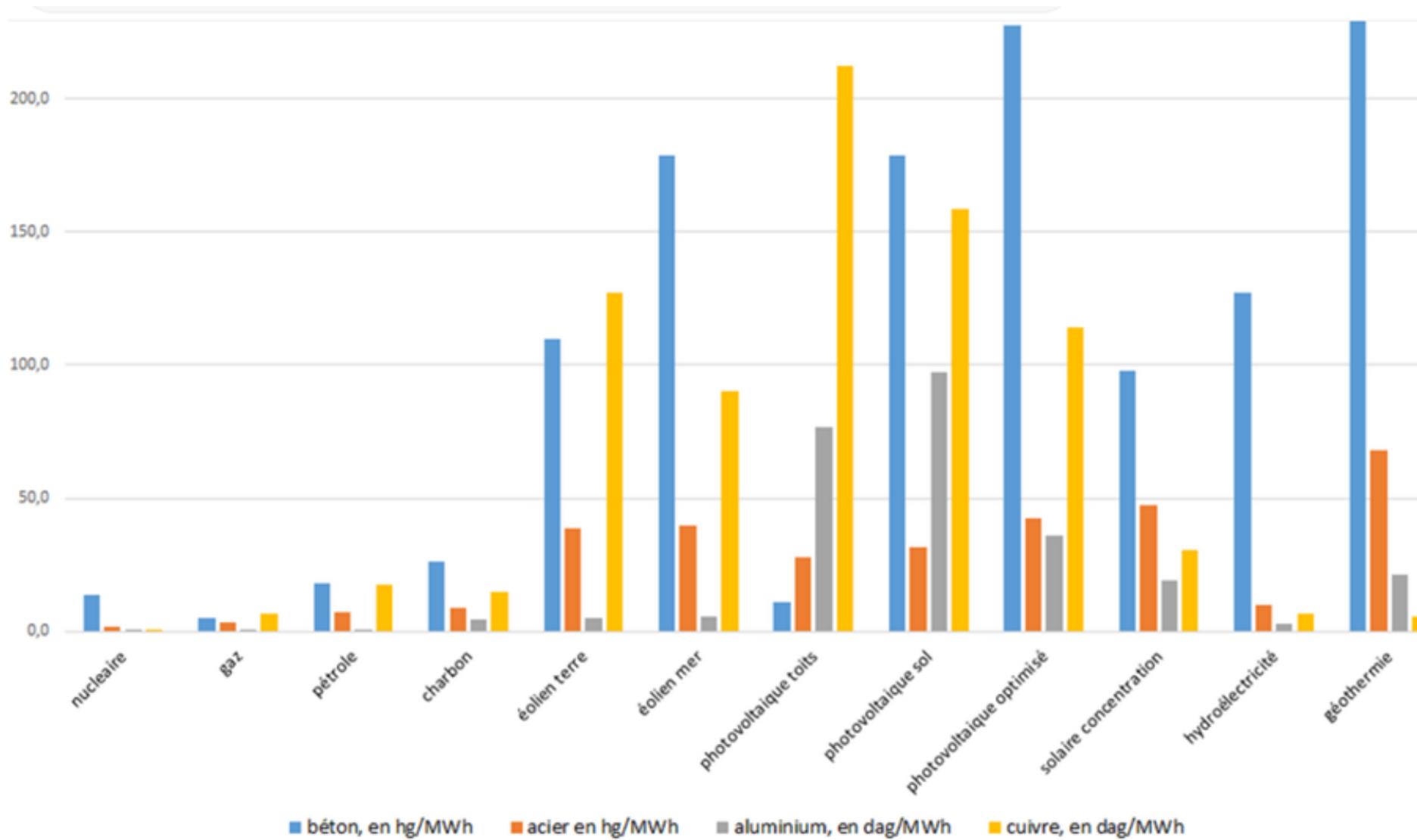
Source : SLC – Jean-Pierre Perves et Hubert Flocard – mars 2012



*Fig. 7 - Empilement des productions éolienne en Europe de l'Ouest (7 pays), heure par heure et en MW, de septembre 2010 à mars 2011*

<sup>2</sup> Puissance éolienne en MW fin 2010 : Allemagne+Autriche 28200, Espagne 20700, France 5700, Danemark 3800, Irlande 1430, UK 5200

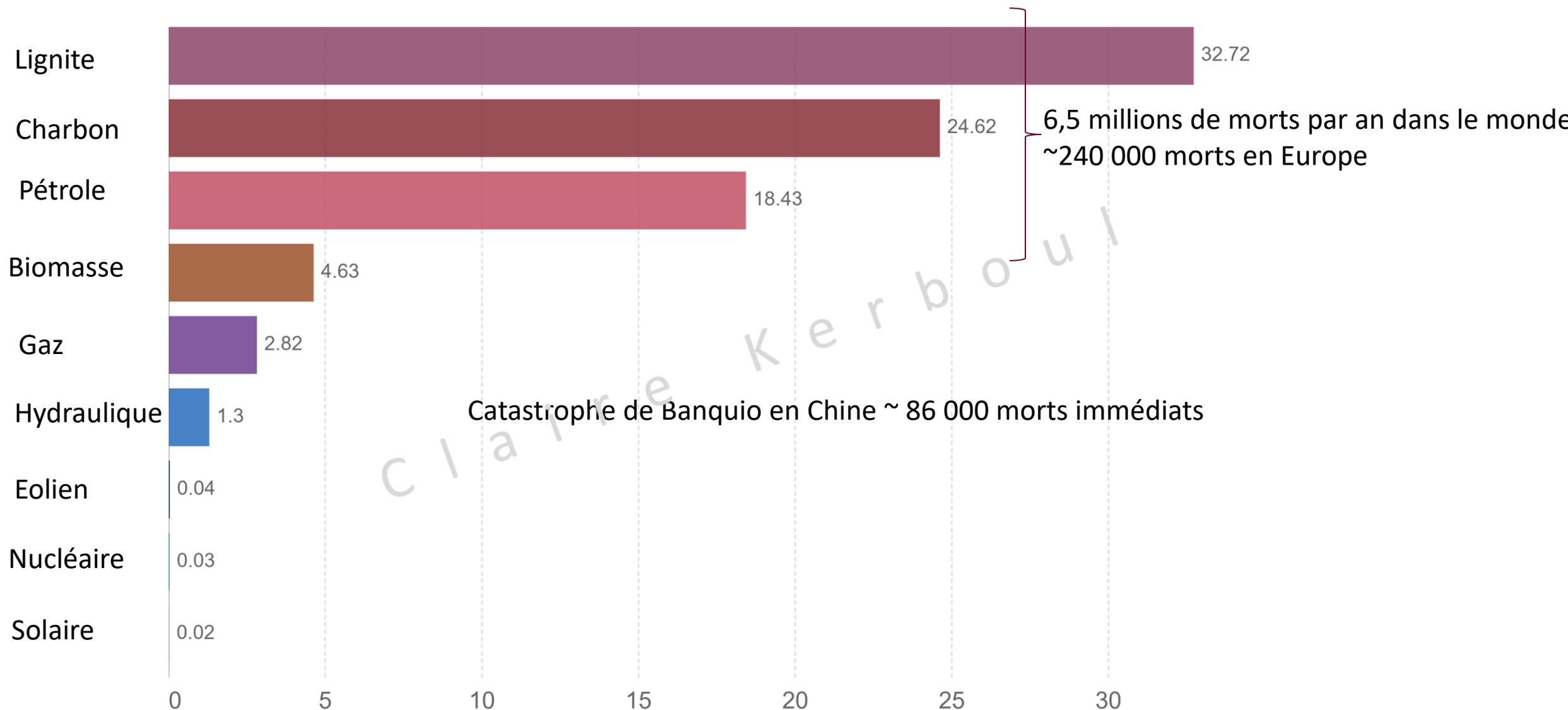
<sup>3</sup> .....



Source « Matières premières et énergies » - Olivier Vidal – ISTE éditions

# Taux de mortalité par TWh d'électricité et par an (accidents et pollution)

Source : Markandya et Wilkinson (2007) ; Sovacool et al. (2016) ; UNSCEAR (2008 & 2018)

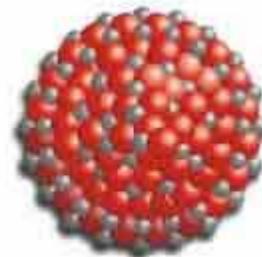


## Analyse des critères de durabilité (/MWh produit)

Installation	Puissance	CO <sub>2</sub> eq	Matériaux critiques	Risque - Mortalités	Renouvelable	Durable
Barrage	1000 à 22 000 MW	+	+	+/-	+	+ ?
Centrale fossile (charbon, fioul, gaz)	1000 MW					
Centrale nucléaire	1000 à 1600 MW	+	+	+	-	?
Eolienne marine	6 MW	-	-	+	+	-
Eolienne terrestre	3 MW	-	-	+	+	-
Photovoltaïque	0,3 MW	-	-	+	+	-

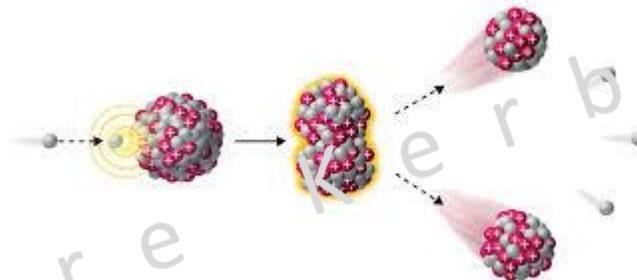
# Le nucléaire est-il durable ?

# Le seul noyau fissile disponible sur Terre : l'uranium 235



Seul noyau **Fissile** sur Terre

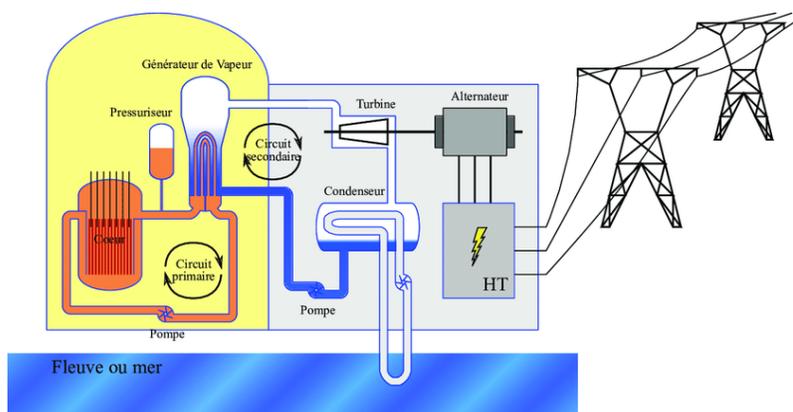
**l'uranium 235 est fissile.**



**200 MeV**

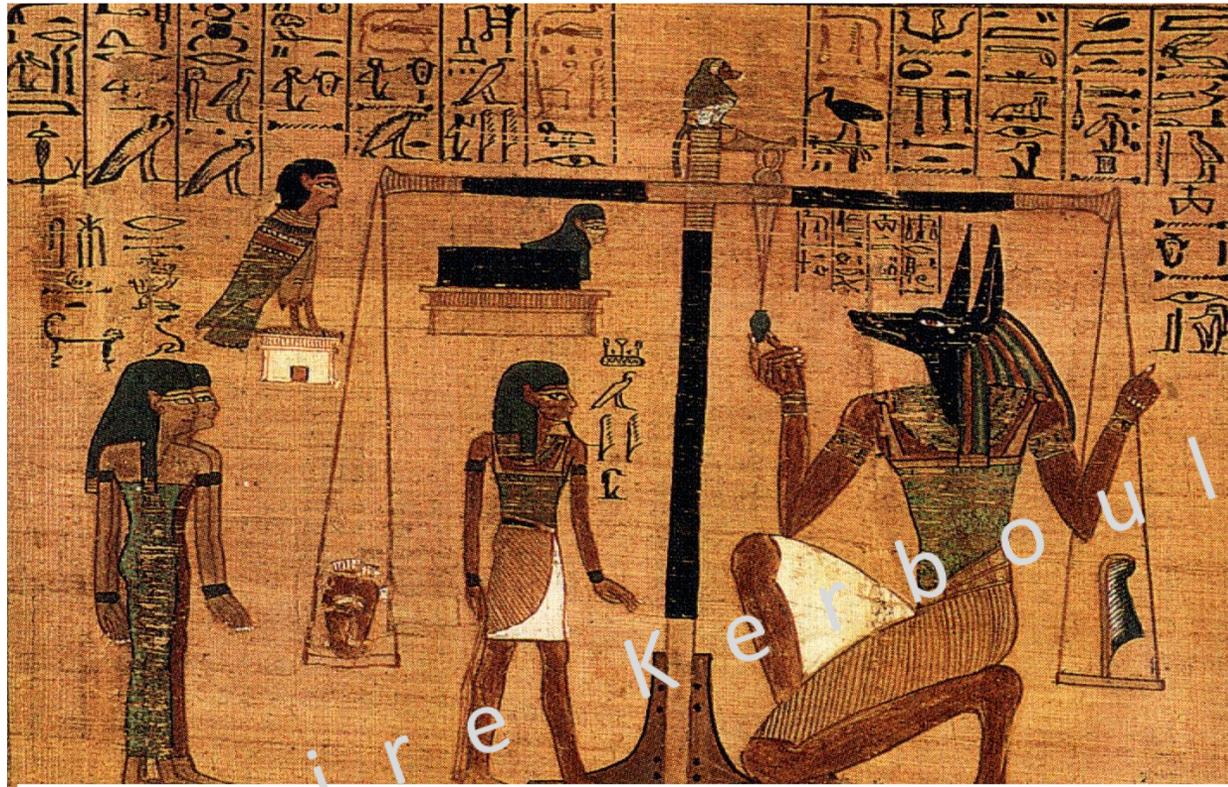
2-3 neutrons de haute énergie  
(2MeV, soit ~20 000km/s)

La fission est d'autant plus facile que le neutron est lent → réacteur à eau pressurisée (REP).



**$7,2 \times 10^{10}$  joules pour 1g d'uranium**

Source : Clavier Remi in Research Gate



1 gramme d'uranium 235

$7,2 \times 10^{10}$  joules

1,7 tonne de pétrole et 

2000 m<sup>3</sup> de gaz et 

2,6 tonnes de charbon et 

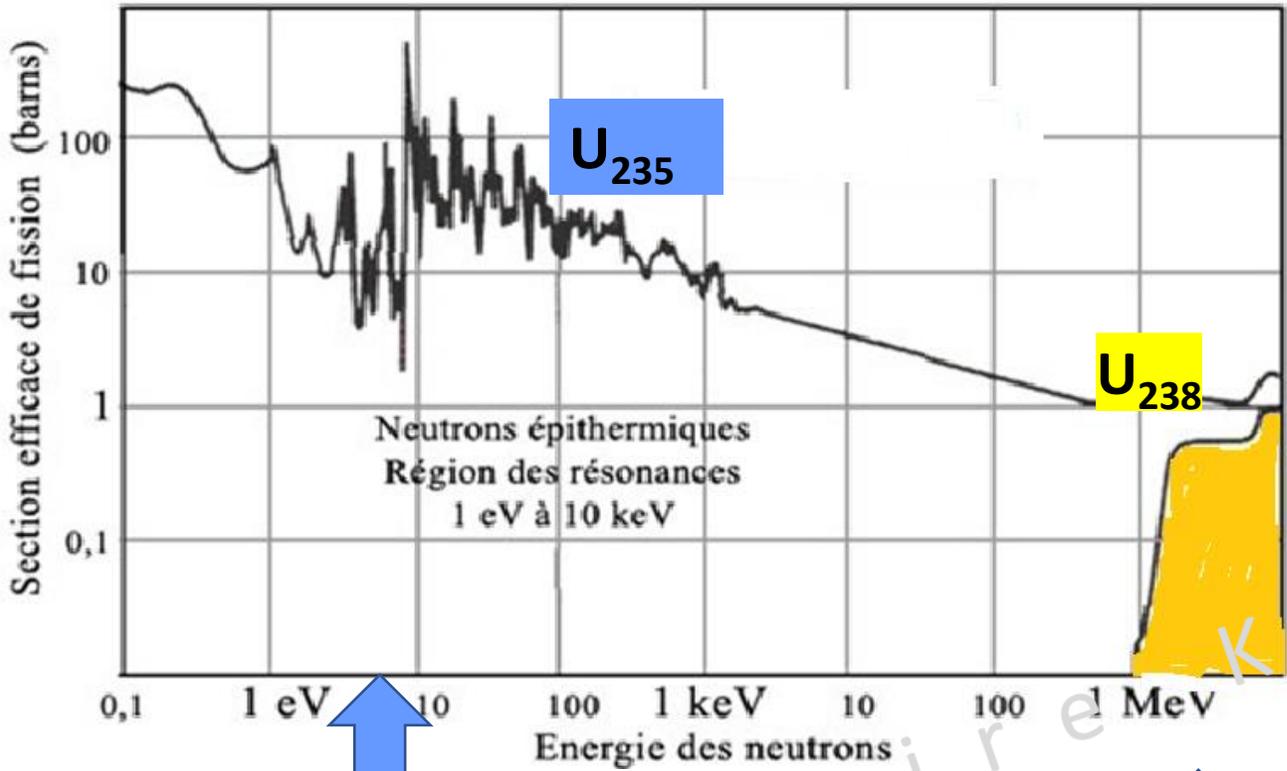
## Le minerai d'uranium



**99,3% uranium 238**

**< 0,7% uranium 235 fissile**

**traces d'uranium 234**



Réacteurs à « neutrons lents »  
REP, EPR

1% de la ressource

Réacteurs à « neutrons rapides »  
Phénix, Superphénix, Astrid

100% de la ressource



Source : © Orano / Larrayadiou Eric

concentré d'uranium sous forme de diuranate de sodium Na<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, calciné et naturel.

**« The country which first develops a breeder will have a great competitive advantage in atomic energy »**

**Enrico Fermi - 1945**



**20 décembre 1951,  
1<sup>er</sup> réacteur expérimental surgénérateur au  
monde  
(*Experimental Breeder Reactor*) EBR-1**

Source : <http://www.ne.anl.gov/About/hn/news961220.shtml> Argonne National Laboratory, Domaine public

**Claire Kerboul - [www.nucleairedurable.fr](http://www.nucleairedurable.fr)**

450 000 tonnes  $\Leftrightarrow$  7000 années de production d'électricité

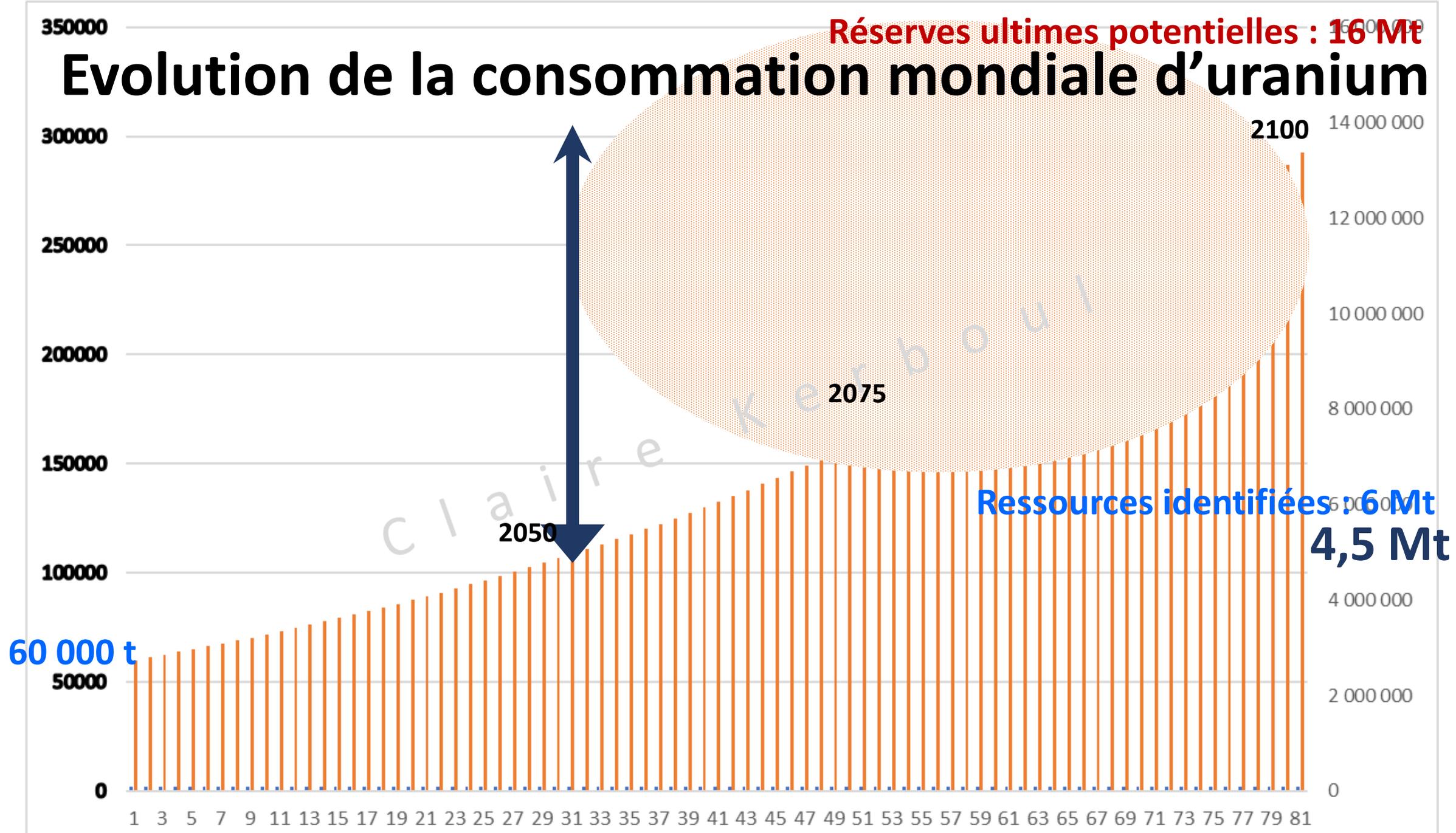


$U_{235}$

$U_{238}$

Claire Kerboul

# Evolution de la consommation mondiale d'uranium



En France, Rapsodie (24MWth puis 40 MWth) : 1<sup>er</sup> réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium conçu en 1957, lancé en 1962, il fonctionne de 1967 à 1978.



**Phénix : 1<sup>ère</sup> réacteur électrogène français à neutrons rapides refroidi au sodium  
250 MWe conçu en 1968 (CEA, EDF)  
Fonctionne de 1973 à 2010**



Source : © A.Gonin/CEA

**Superphénix : 2<sup>ème</sup> réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium**  
**Prototype industriel de 2<sup>ème</sup> génération de 1200 MWe**  
**Conçu en 1974 (EDF avec l'Italie et l'Allemagne)**  
**Fonctionne de 1986 à 1997**



Source : © © France 3 Alpes

- la **conduite** d'un RNR-Na simple : **fluide primaire sans pression**, forte inertie thermique
- pilotage par les barres de commande, pas d'effet xénon, pas de poison neutronique soluble
- **rendement thermique élevé**, **peu d'effluents et de déchets radioactifs**
- **Dosimétrie des intervenants très faible** : PX : 2,5 h.Sv en 35 ans ; SPX 0,25 h.Sv en 12,5 ans



# Rapport d'enquête de l'Assemblée nationale - 26 juin 1998 – sur l'arrêt de Superphénix et la filière des réacteurs à neutrons rapides

N° 1018

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

ONZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 25 juin 1998

Dépôt publié au *Journal Officiel* le 26 juin 1998

**RAPPORT**

FAIT

AU NOM DE LA COMMISSION D'ENQUÊTE (1)

sur SUPERPHÉNIX

et la FILIÈRE des RÉACTEURS à NEUTRONS RAPIDES.

Président

M. Robert GALLEY,

Rapporteur

M. Christian BATAILLE,

Députés.

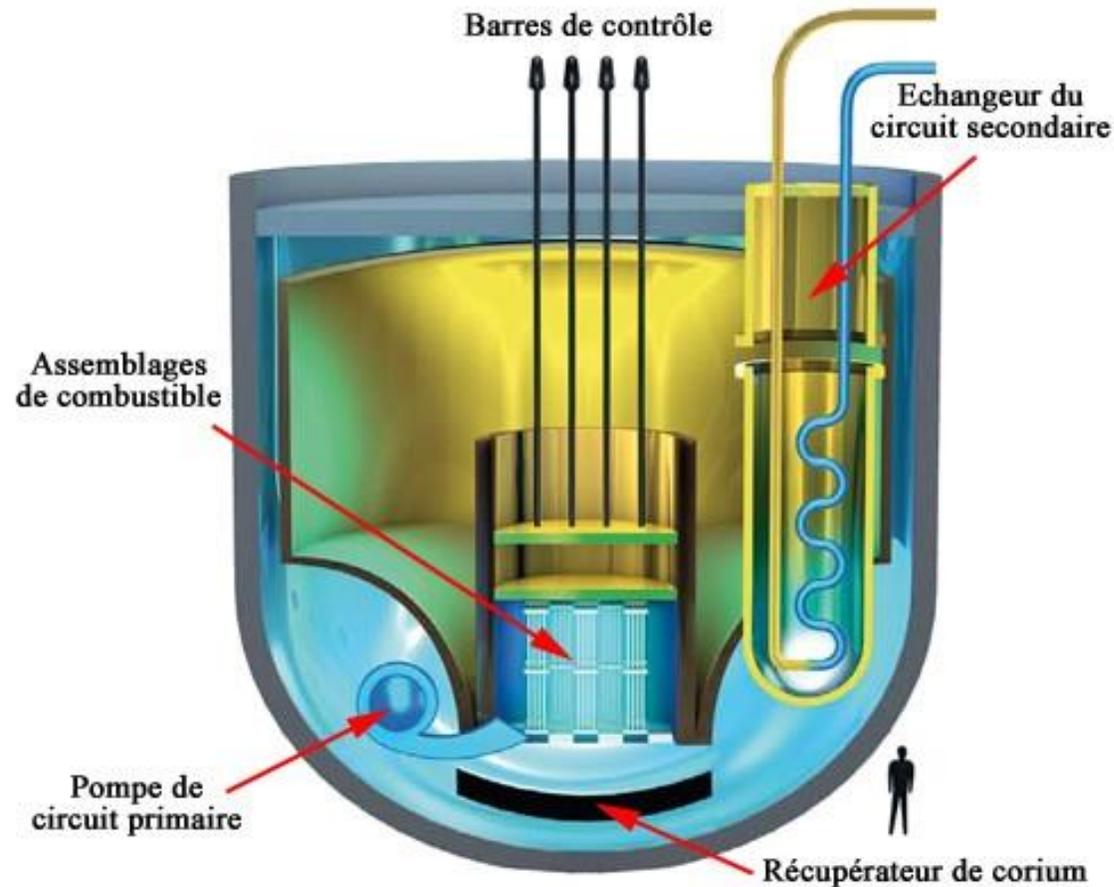
**TOME I**

**RAPPORT**

(1) Cette Commission est composée de : MM. Robert GALLEY, président, Michel DESTOT, Roger MEÏ, vice-présidents, Robert HONDE, Alain MOYNE-BRESSAND, secrétaires, Christian BATAILLE, rapporteur ; MM. Eric BESSON, Claude BILLARD, Claude BIRRAUX, Franck BOROTRA, Alain CACHEUX, Richard CAZENAVE, Bernard CAZENEUVE, Marcel DEHOUX, Eric DOLIGÉ, François DOSÉ, Alain FABRE-PUJOL, Yves FROMION, Jean-Pierre KUCHEIDA, Jean-Claude LENOIR, François LOOS, Noël MAMÈRE, Pierre MICAUX, Joseph PARRENIN, Serge POIGNANT, Ladislas PONIATOWSKI, Jean-Bernard RAIMOND, Gérard REVOL, Mme Michèle RIVASI, M. André VALLINI.

« depuis lors, il a été demandé périodiquement à la DSIN par un certain nombre de ministres – sous les ordres de qui elle travaille – ce que la DSIN pensait de la sûreté de Superphénix, et nous avons chaque fois, après avoir regardé le dossier, **confirmé ce jugement global : la sûreté de Superphénix est cohérente avec celle du parc des réacteurs à eau sous pression qui constituent notre référence** ». André-Claude Lacoste, directeur de la direction des installations nucléaires (DSIN)

**ASTRID : lancé en 2010 - loi du 28 juin 2006**  
**(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)**



Source : © Défis du CEA N°172 ©

**Le Cœur à faible vidange (CFV)** pour améliorer la sûreté en cas d'accident. La fuite des neutrons hors du cœur est favorisée.

**Le récupérateur de corium** : en cas de fusion du cœur, le magma très chaud (+ de 2 000 °C) est étalé afin d'éviter tout emballement de la réaction en chaîne.

**Rapport OPECST sur l'énergie nucléaire du futur  
et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération « Astrid »  
juillet 2021**

C'est au travers d'un article de presse, paru le 29 août 2019, que la décision de ne pas poursuivre le projet ASTRID au-delà de 2019 par la construction d'un prototype a été rendue publique. Elle a été confirmée le lendemain par un communiqué de presse du CEA annonçant le report de cette construction à la fin du siècle.

....le prix de l'uranium durablement bas [ ne justifie ] pas dans l'immédiat d'investir dans de nouveaux réacteurs économes en ressources naturelles

**Les intérêts à long terme du pays, notamment son indépendance énergétique dans un contexte où l'électricité représentera une part croissante de sa consommation d'énergie, ne semblent pas avoir été pris en compte**

# Les fausses bonnes idées

**Le thorium**

**L'uranium de l'eau de mer**

**Les réacteurs à sels fondus**

**La fusion**

