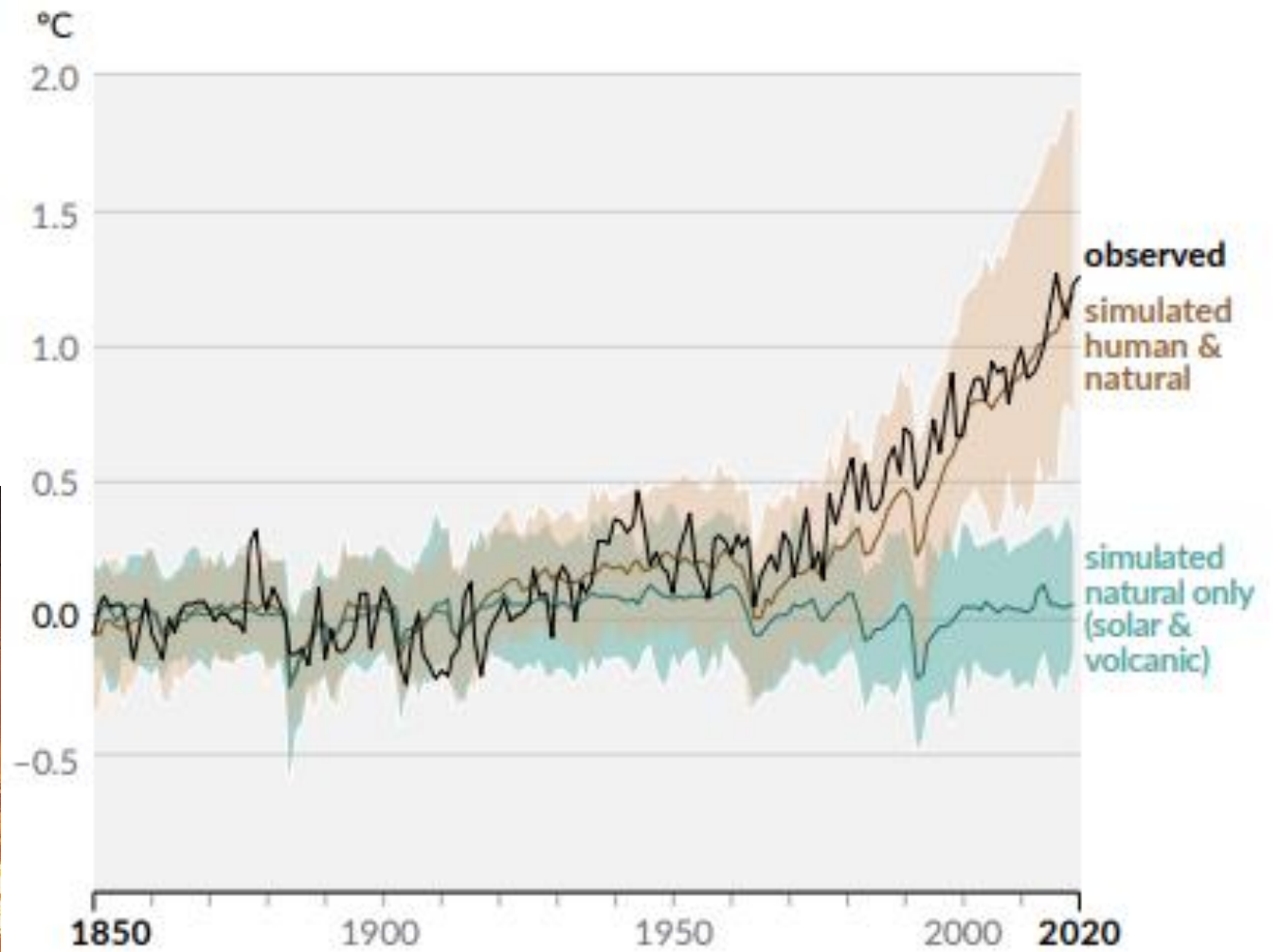


L'urgence du nucléaire durable



Source : National Geographic/ Lynsey Addario



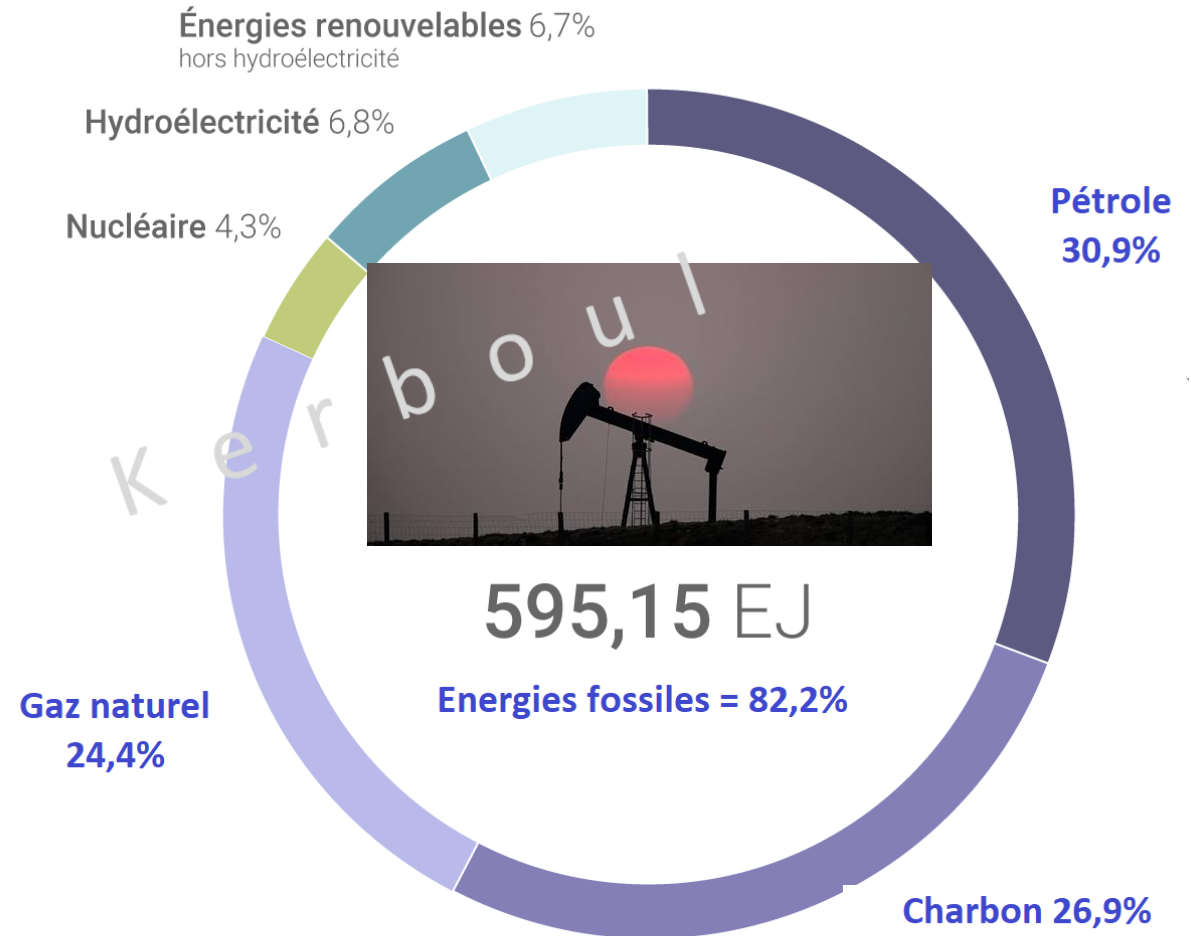
Source : Rapport Giec 2021

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

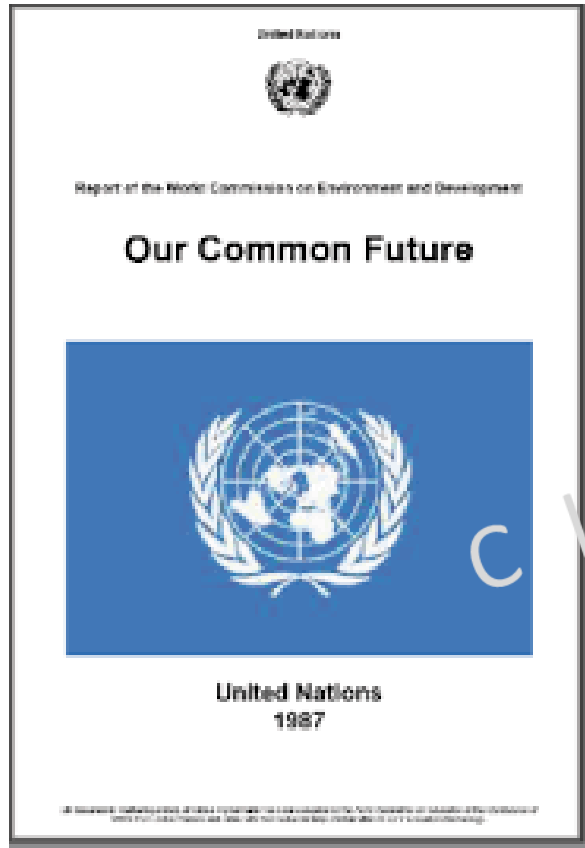
| Field | Country | Location | Year of discovery | Peak annual production | | 2007 production kb/d |
|-----------|--------------|----------|-------------------|------------------------|-------|-------------------------|
| | | | | Year | kb/d | |
| Ghawar | Saudi Arabia | Onshore | 1948 | 1980 | 5 588 | 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



Crédits : Andrey Sharpilo

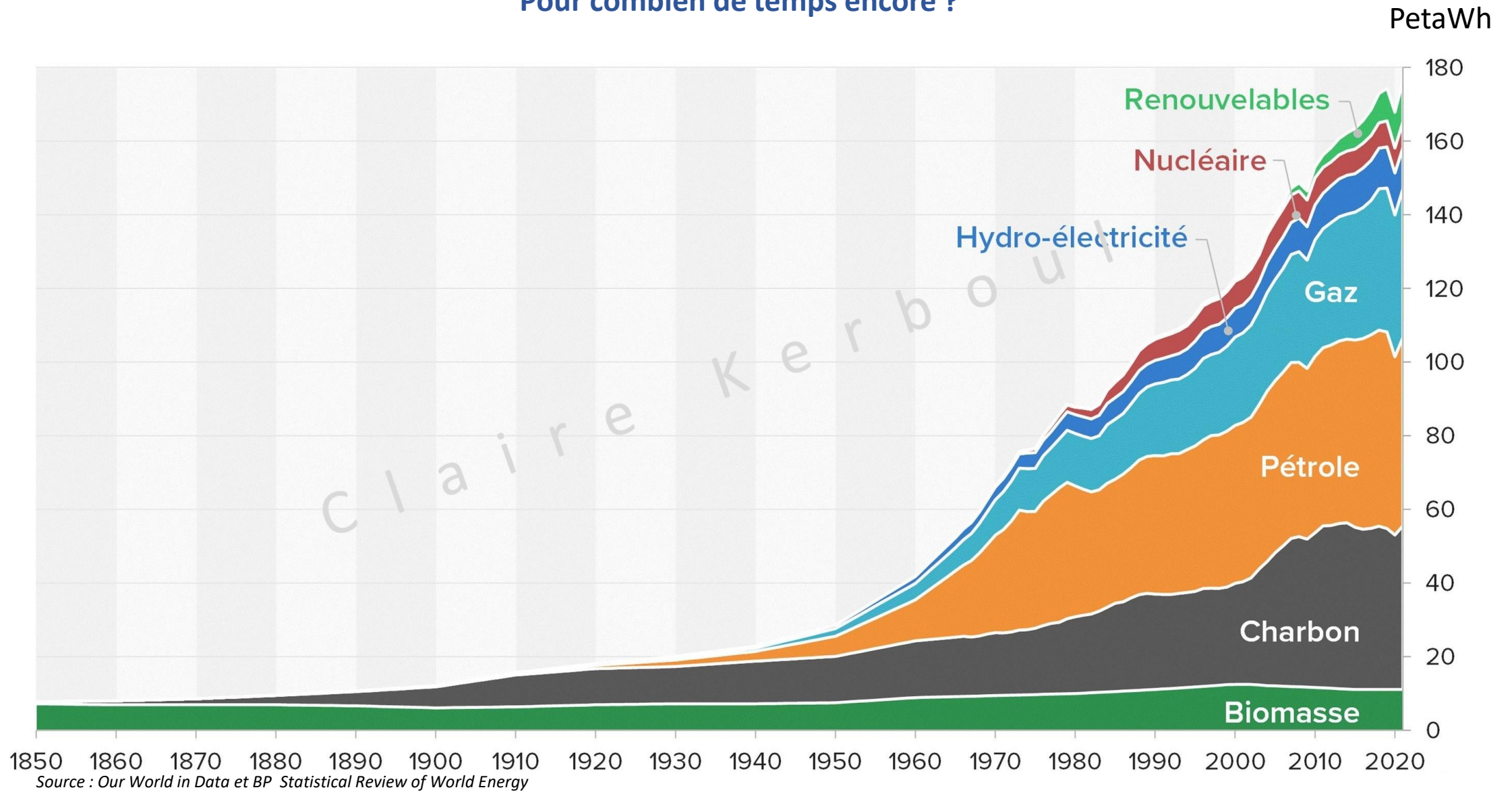


Puissance électrique fournie par type d'installation

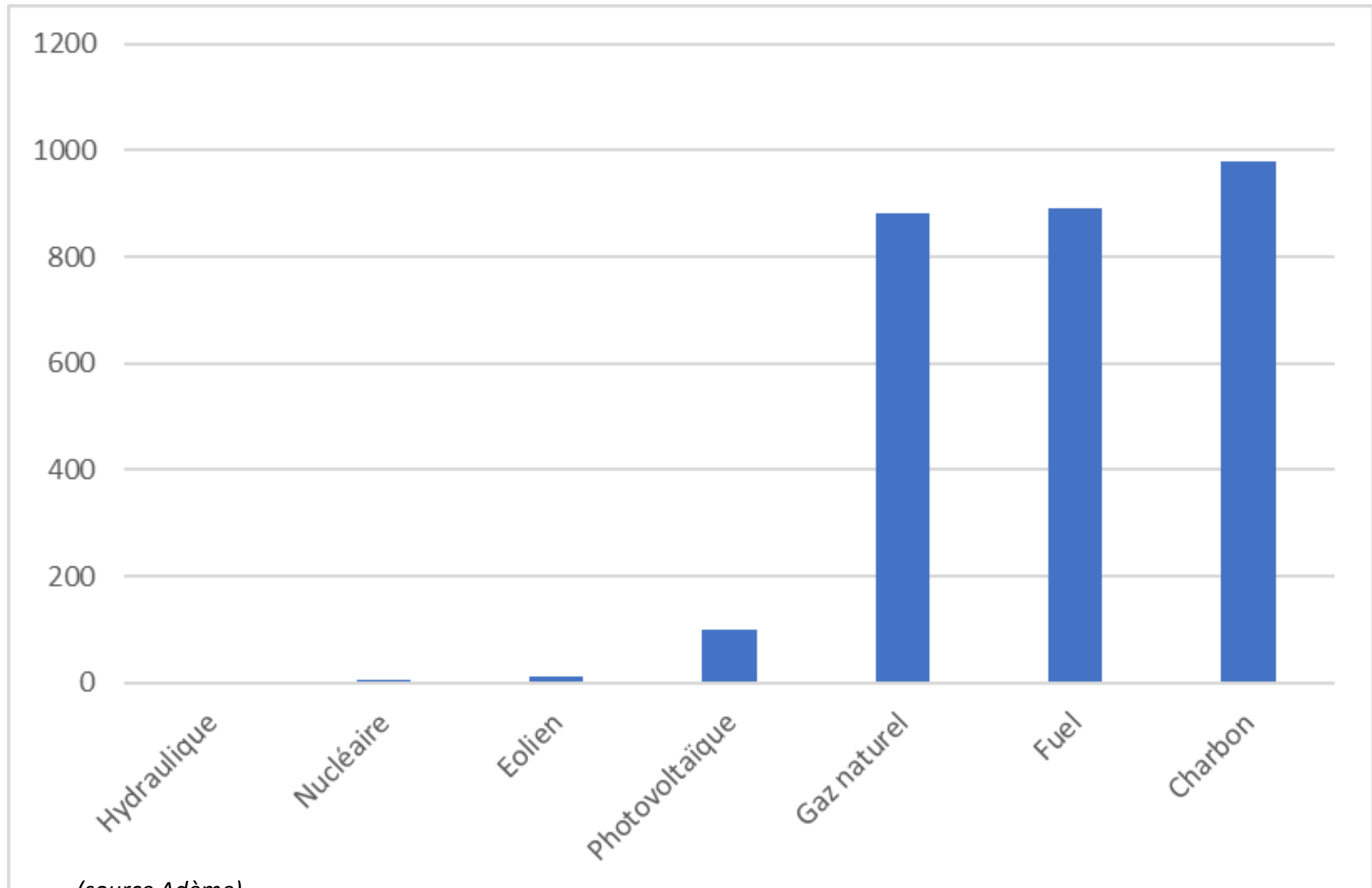
| Type d'installation | Moyenne | |
|--|------------------------------|--------------------------|
| Barrage | 1 000 MW à 22 000 MW | Barrage des Trois Gorges |
| Centrale thermique (charbon, fioul, gaz) | 1 000 MW | |
| Centrale nucléaire | 1 600 MW | EPR |
| Eolienne terrestre | 3 MW | |
| Eolienne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

Consommation mondiale d'énergie primaire par source

Pour combien de temps encore ?

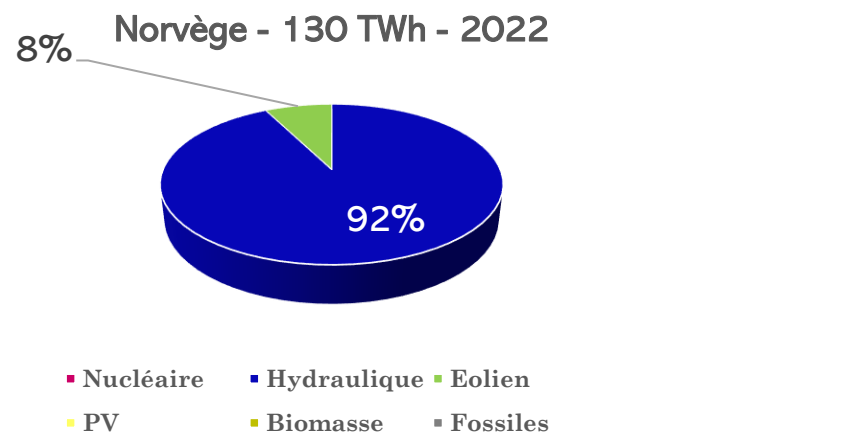
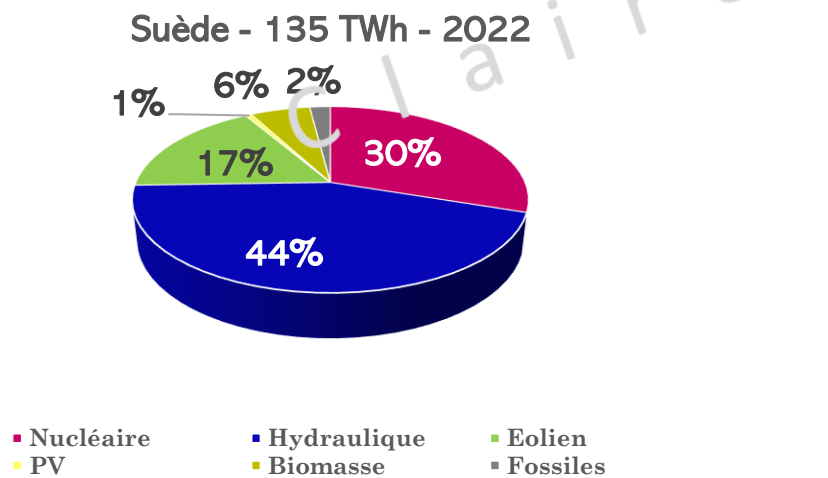
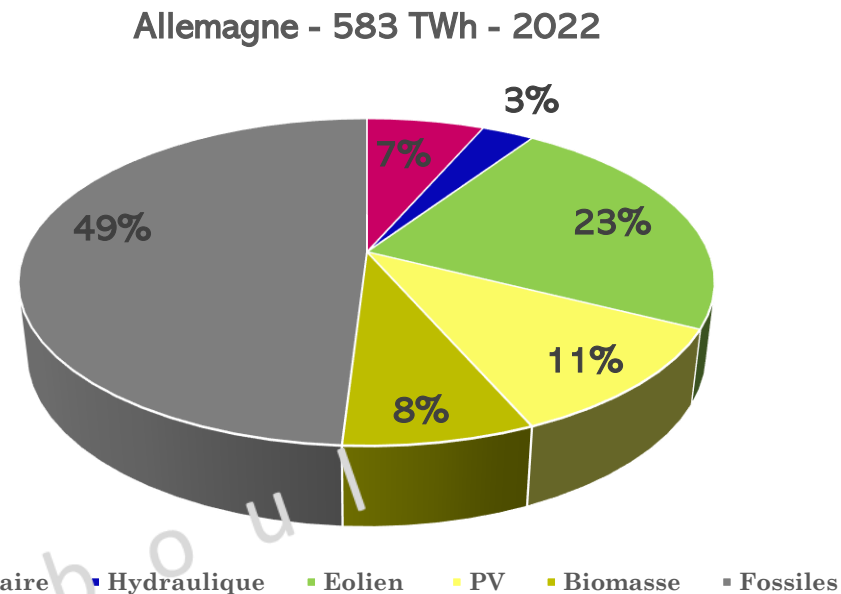
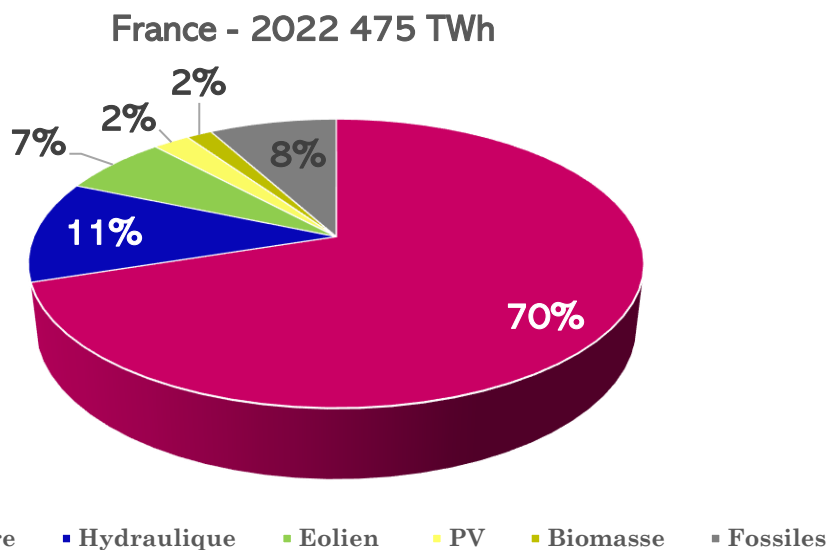


Emission de CO2 en grammes par kWh

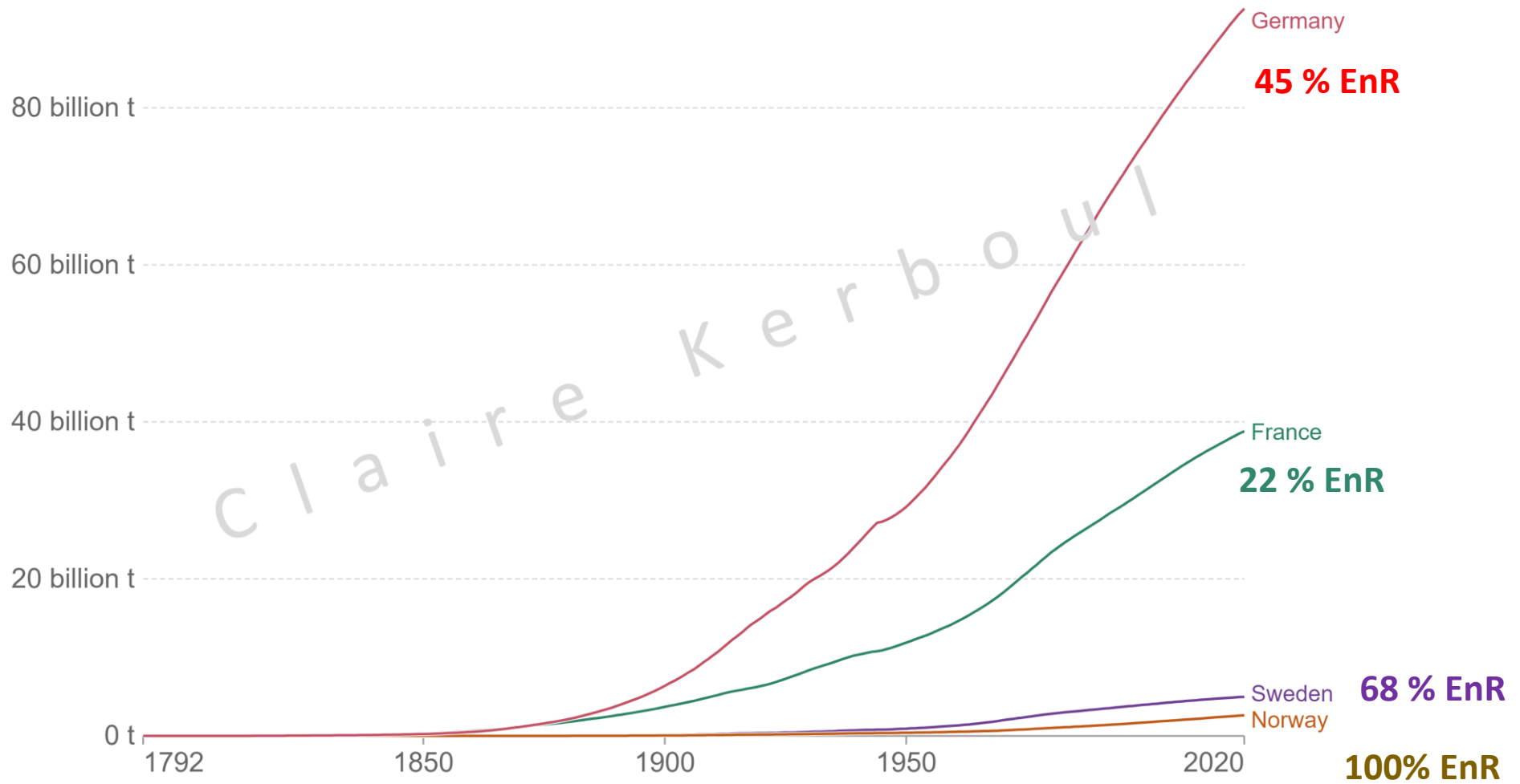


(source Adème)

Les énergies renouvelables sont-elles durables ?



Emissions de CO₂ cumulées (G_{tonnes})



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

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

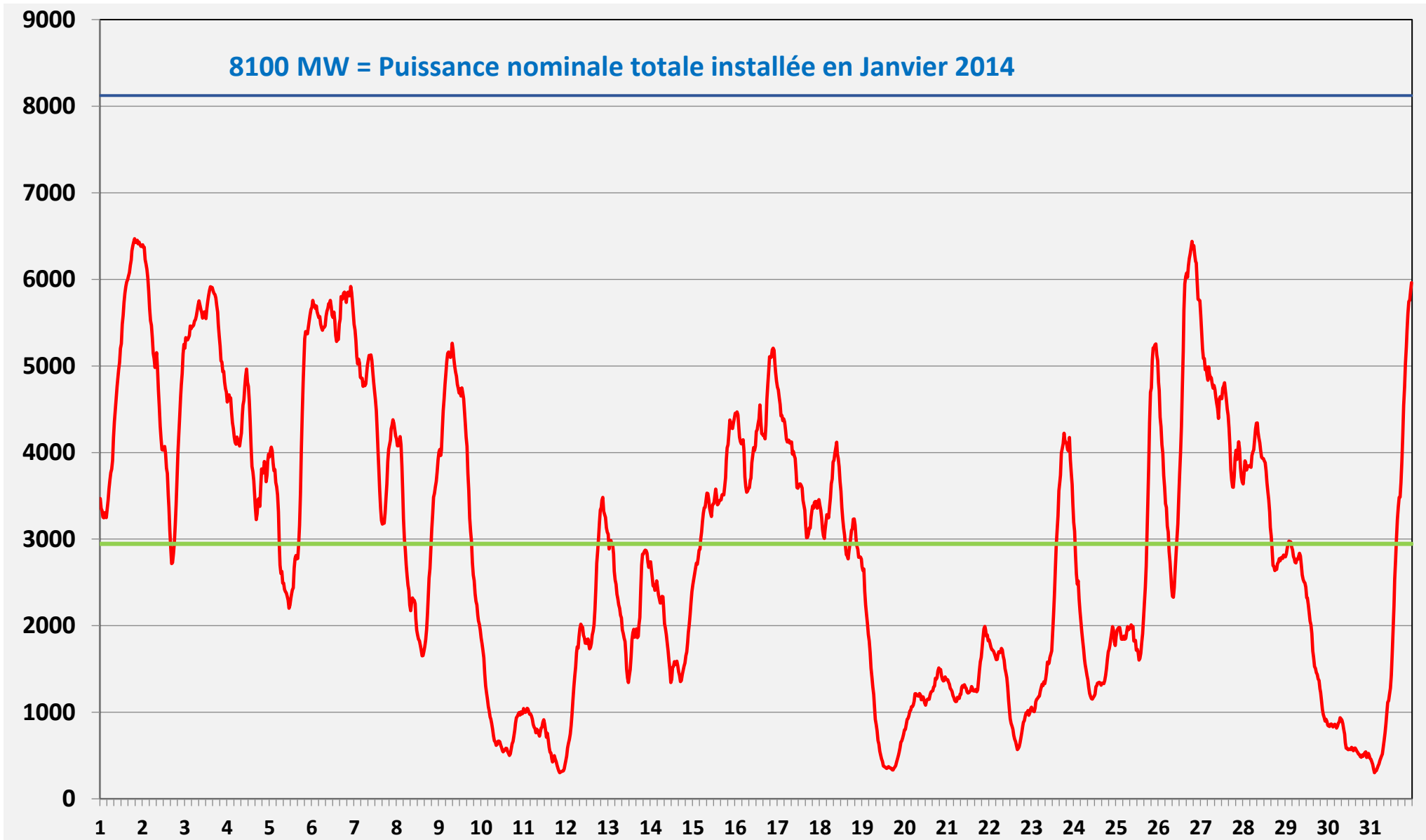
Eoliennes en mer du banc de Guérande –Saint-Nazaire



Source Bernard Durand - SLC

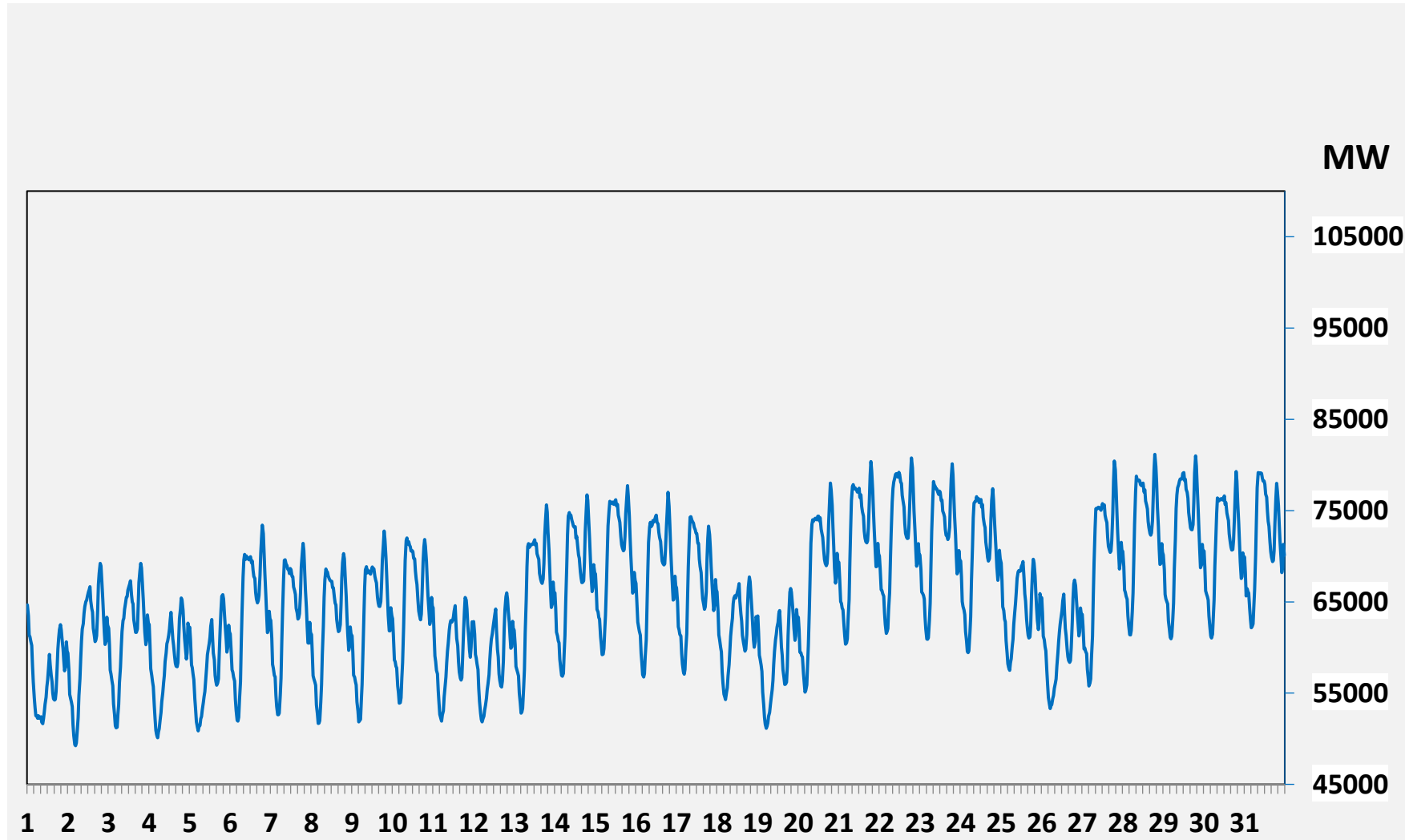
Janvier-février 2023

Puissance éolienne mesurée en France en janvier 2014

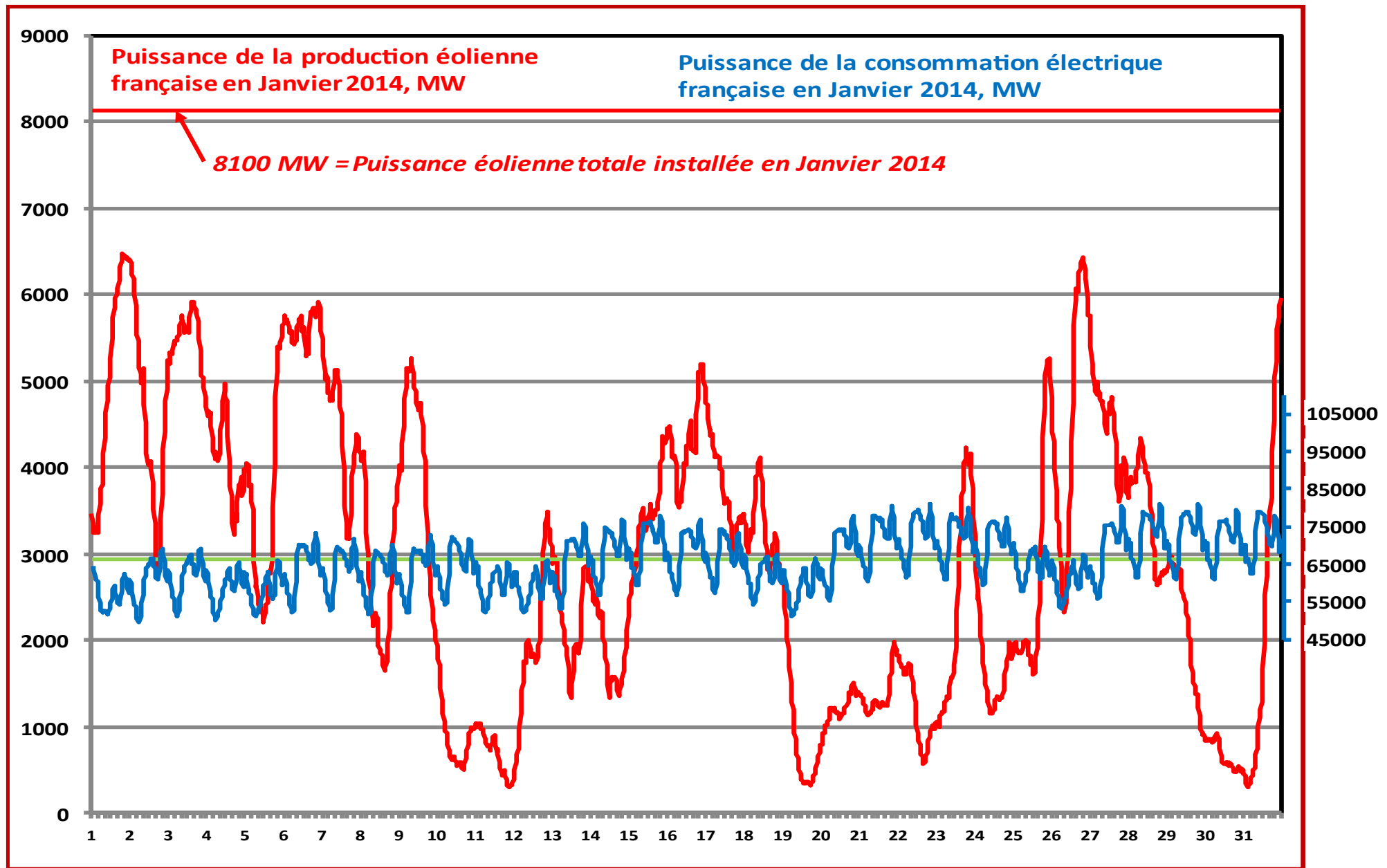


Source : Bernard Durand - SLC

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

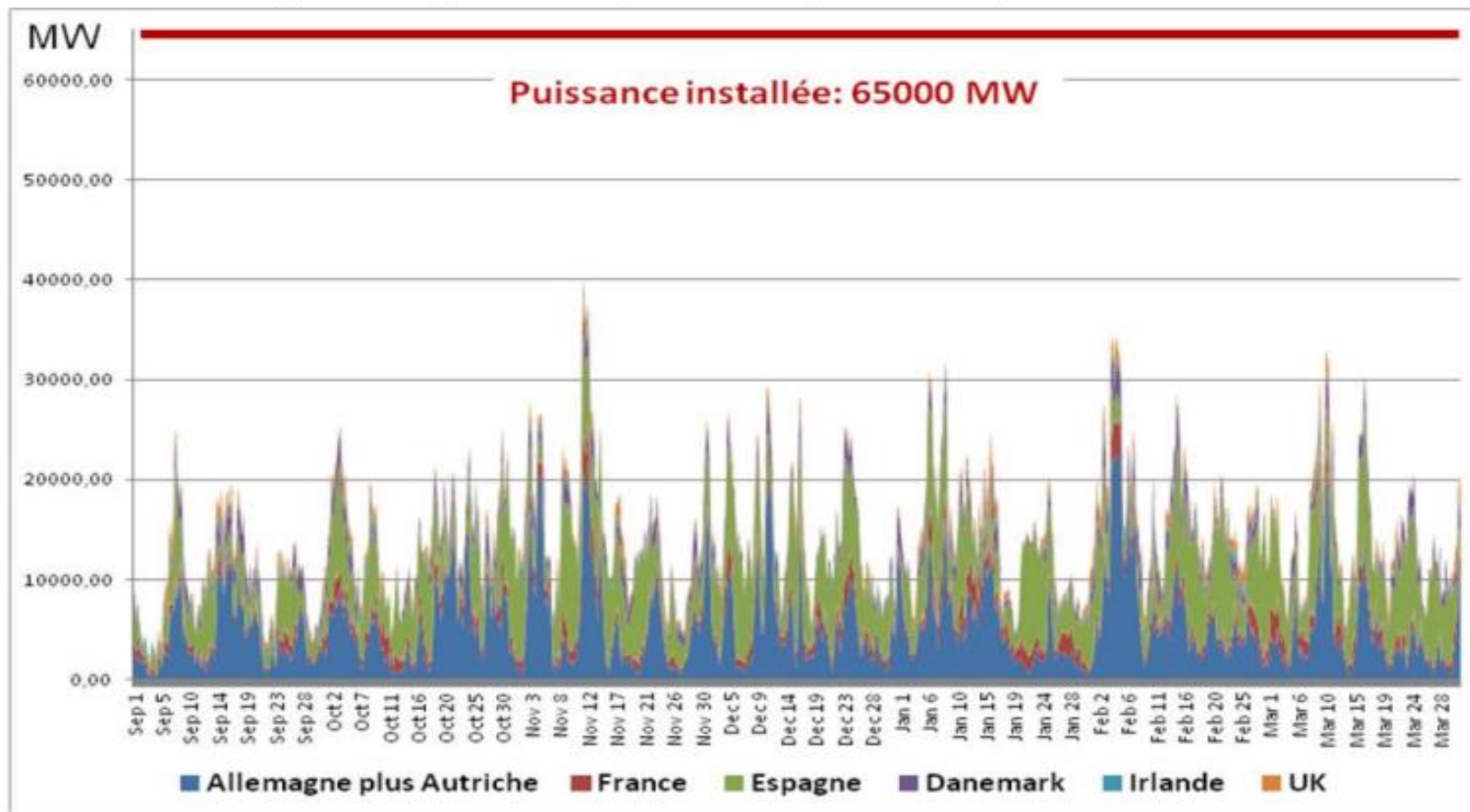
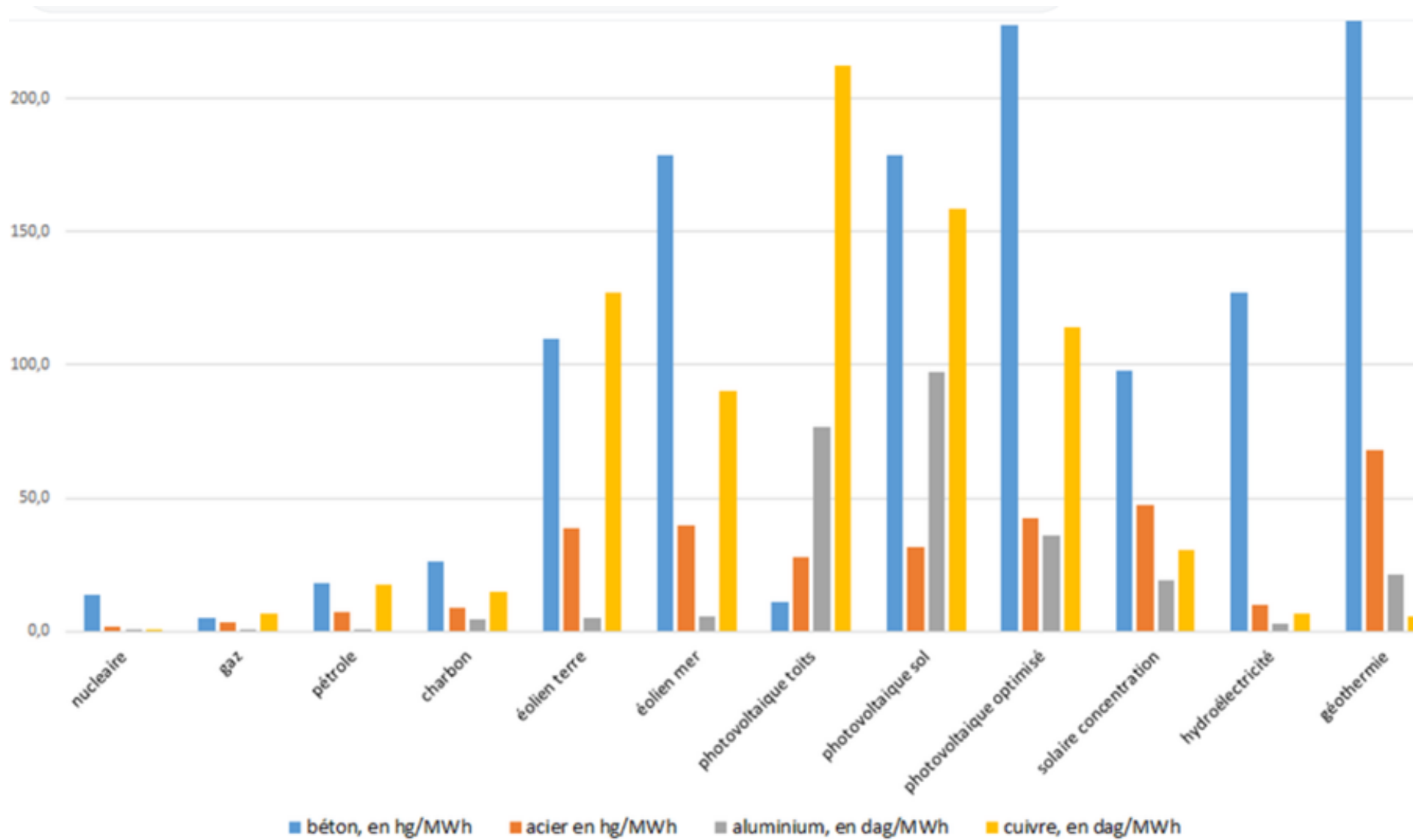


Fig. 7 - Empilement des productions éolienne en Europe de l'Ouest (7 pays), heure par heure et en MW, de septembre 2010 à mars 2011

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

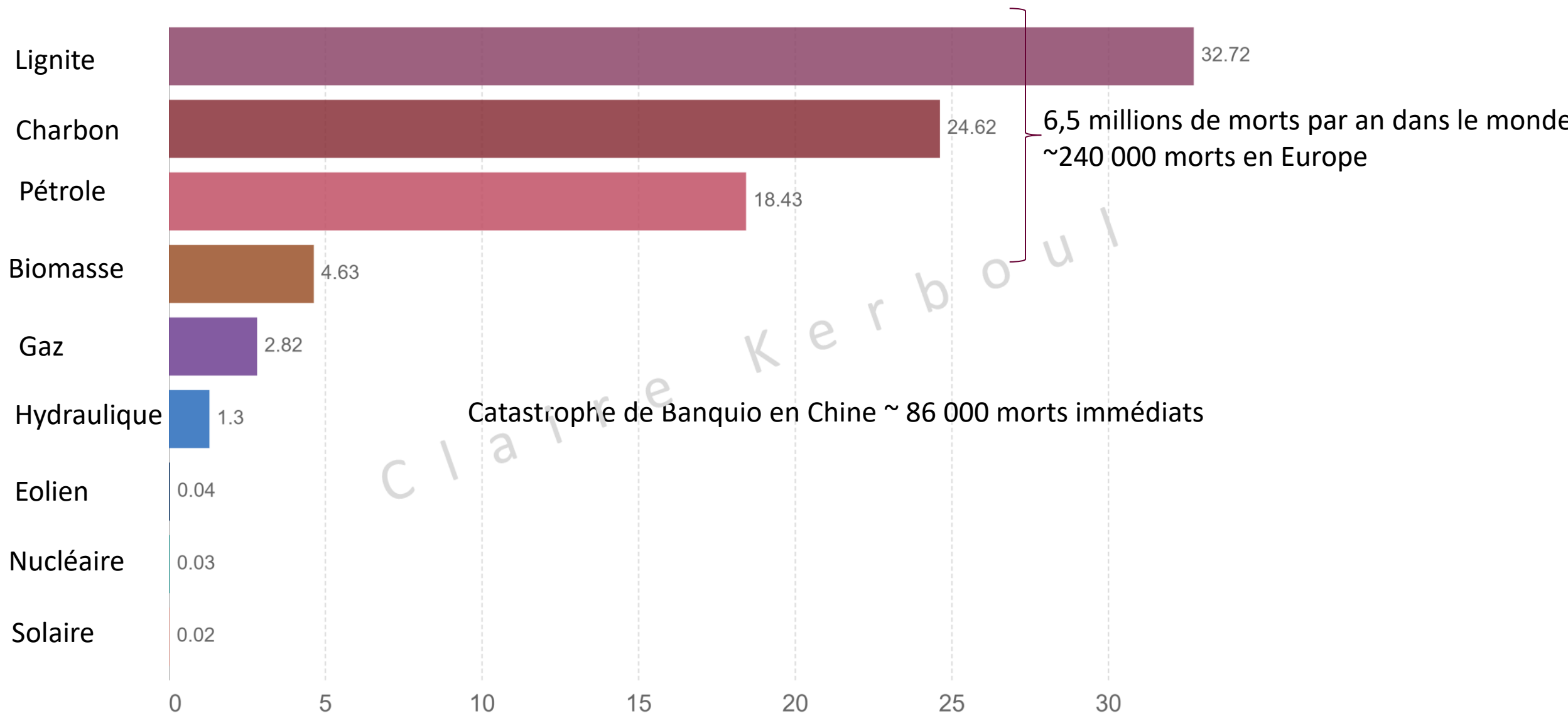
³



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)

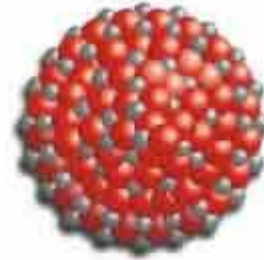
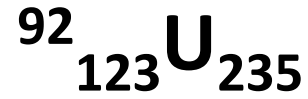


Analyse des critères de durabilité (/MWh produit)

| Installation | Puissance | CO ₂ 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 | - | - | + | + | - |

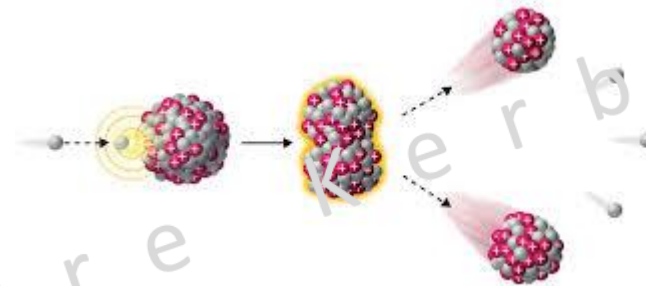
Le nucléaire est-il durable ?

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



Seul noyau **Fissile** sur Terre

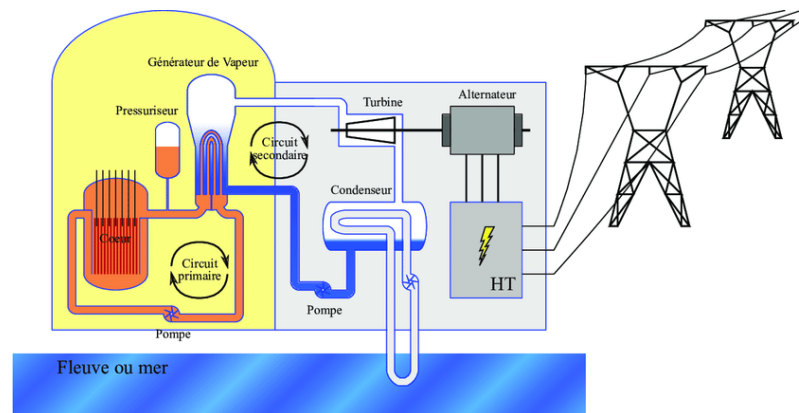
l'uranium 235 est fissile.



200 MeV

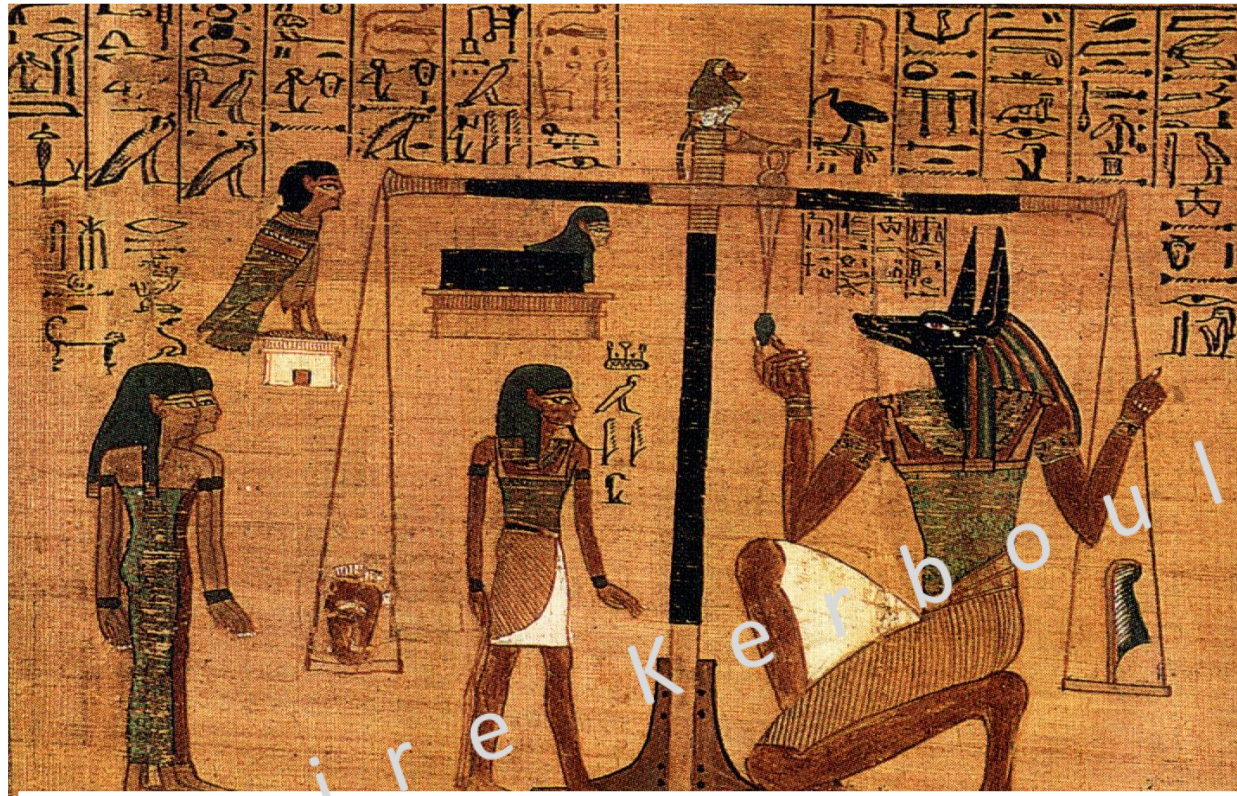
2-3 neutrons de haute énergie
(2MeV, soit ~20 000km/s)

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 m³ de gaz et 

2,6 tonnes de charbon et 

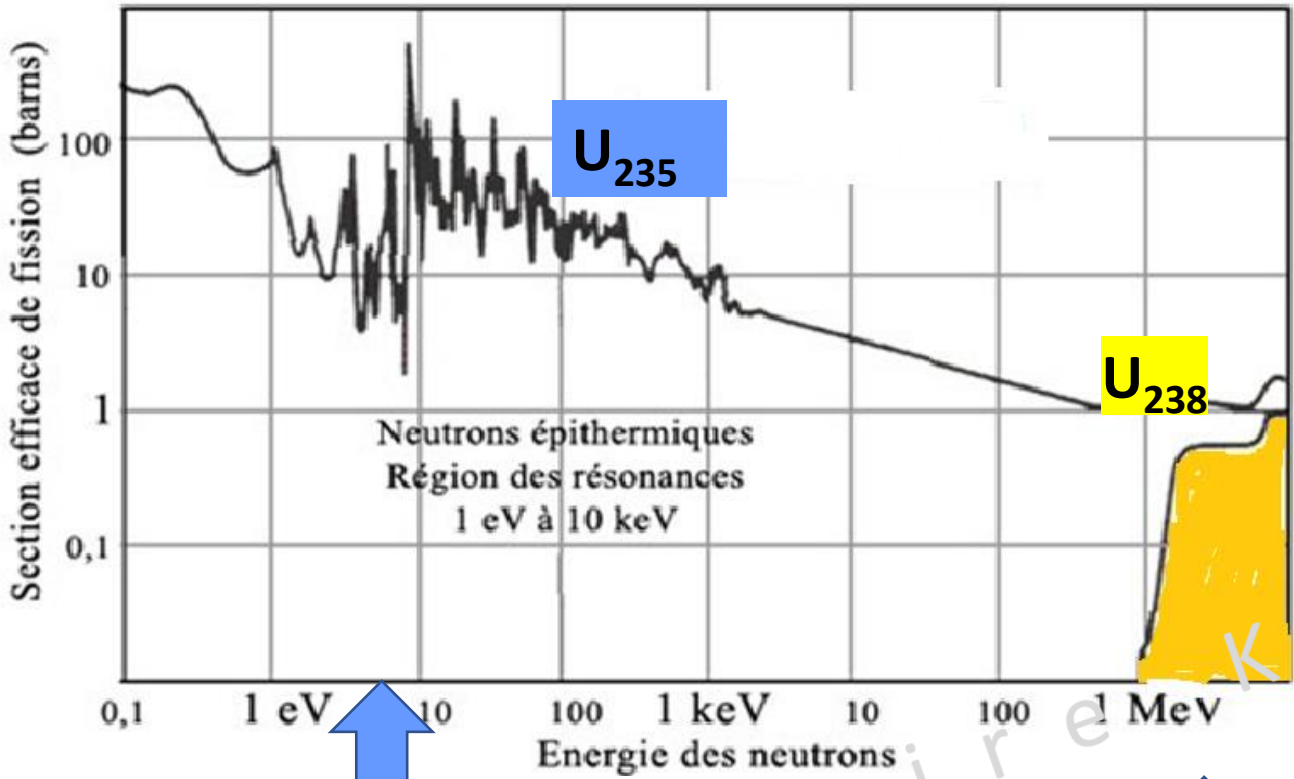
Le minerai d'uranium



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 Na₂U₂O₇, 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^{er} 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

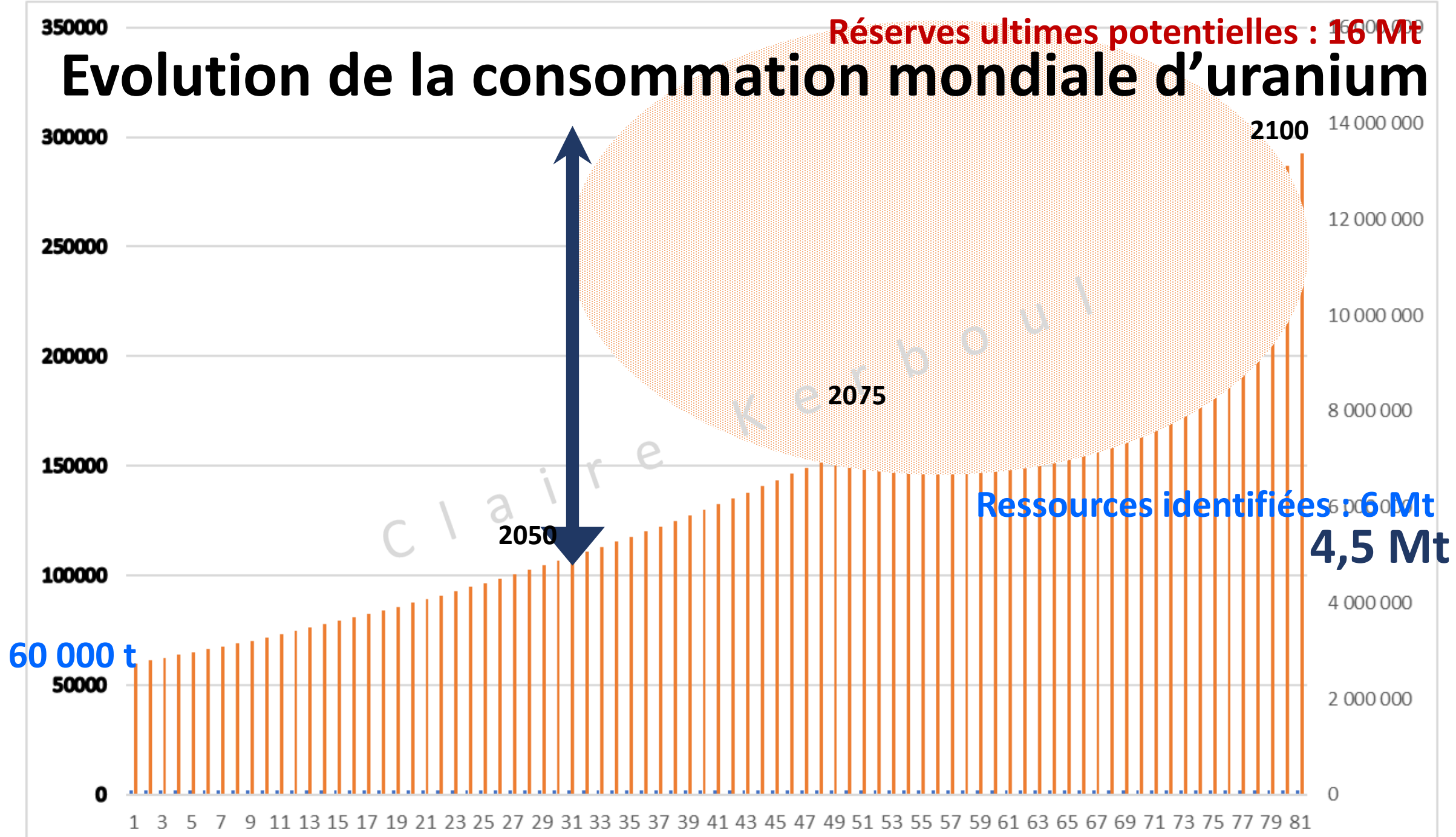
450 000 tonnes \Leftrightarrow 7000 années de production d'électricité



U_{235}

U_{238}

Evolution de la consommation mondiale d'uranium



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



**Phénix : 1^{ère} 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^{ème} réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
Prototype industriel de 2^{ème} 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.

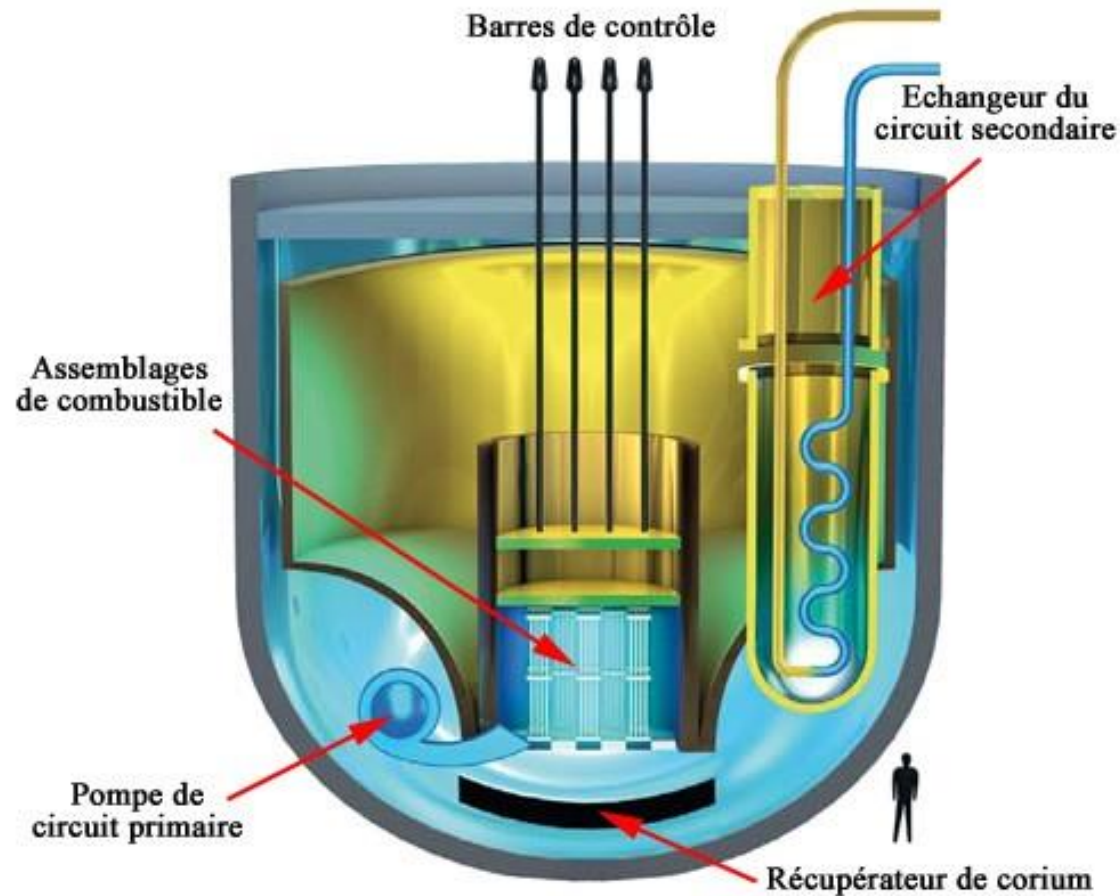
TOME I

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

