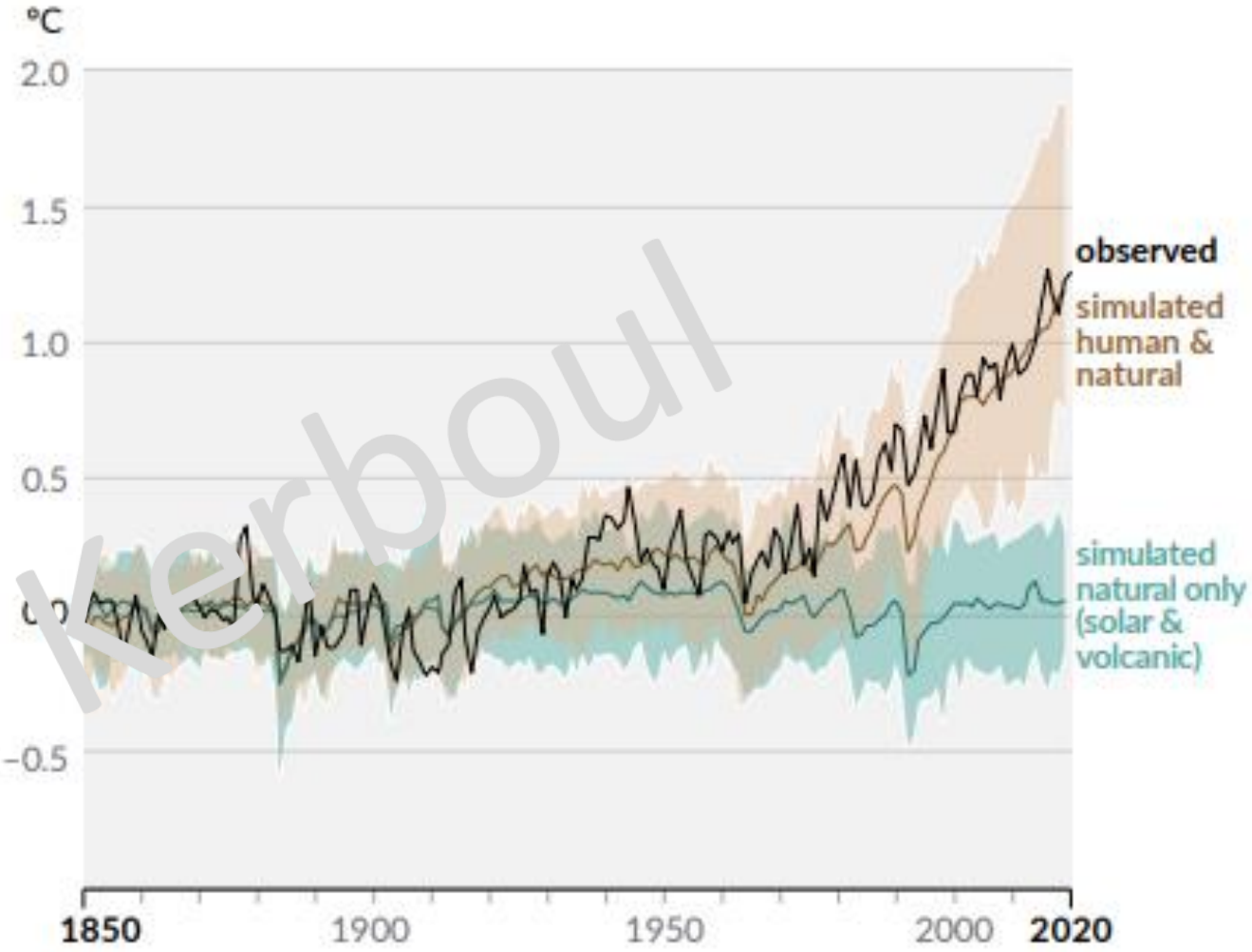
L’urgence du nucléaire durable

Claire Kerboul - www.nucleairedurable.fr

Source : National Geographic/ Lynsey Addario

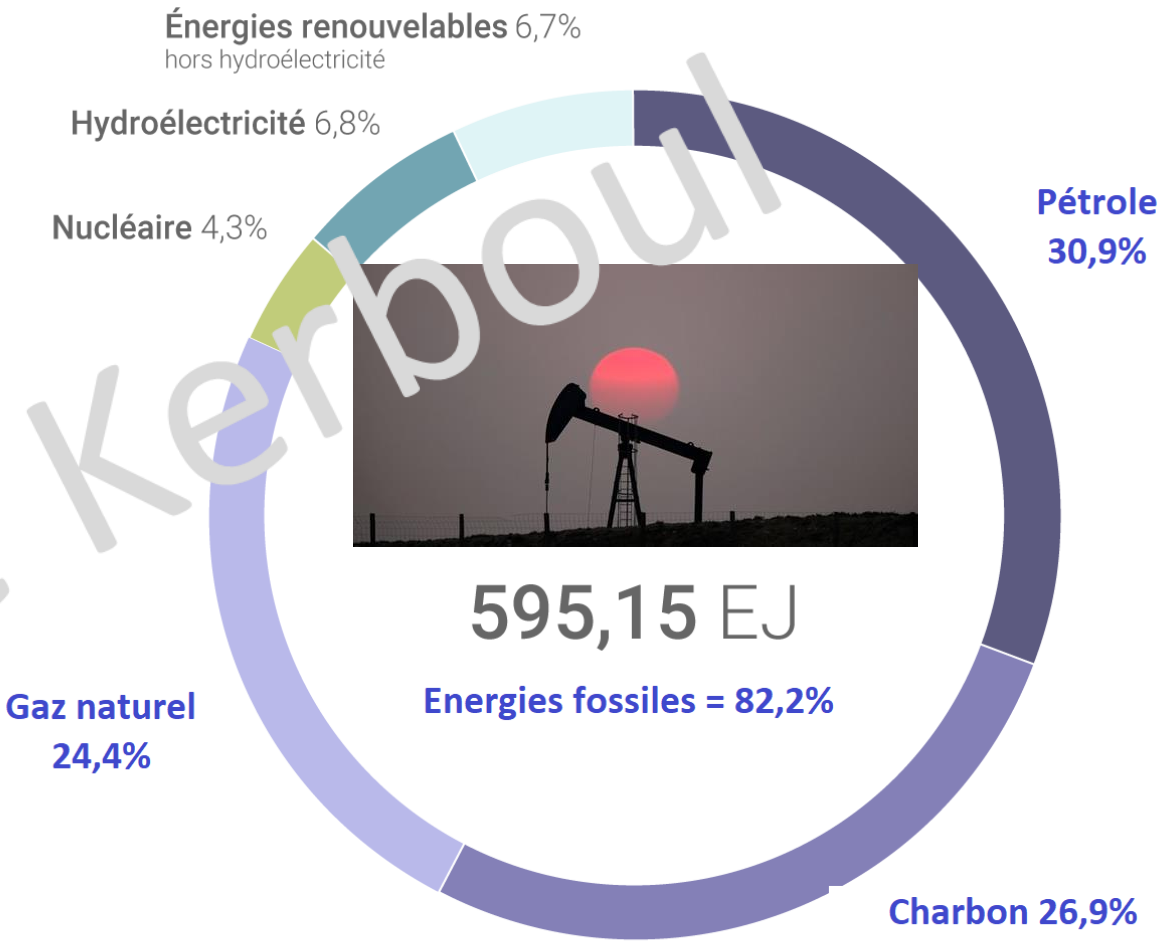


Source : Rapport Giec 2021

Claire Kerboul

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

Source : SIPA/ Martin Meissner



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

Une civilisation construite quasi exclusivement par les énergies fossiles

Claire Kerboul

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
				Year	kb/d	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

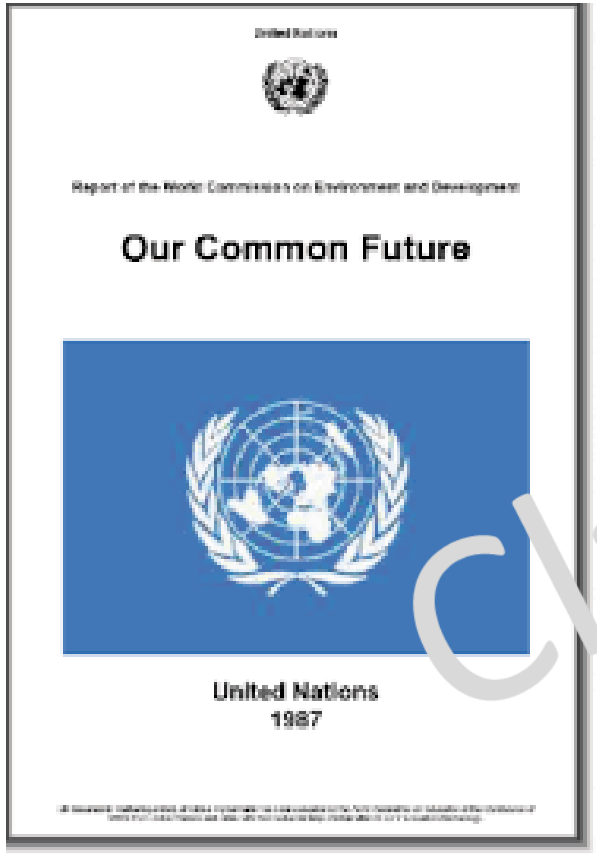
Claire Kerboul

Un monde durable ?

Claire Kerboul

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.

Claire Kerboul

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

Quelle énergie pour un monde durable ?

Claire Kerboul

Le renouvelable

Crédits : Andrey Sharpilo

Claire Kerboul

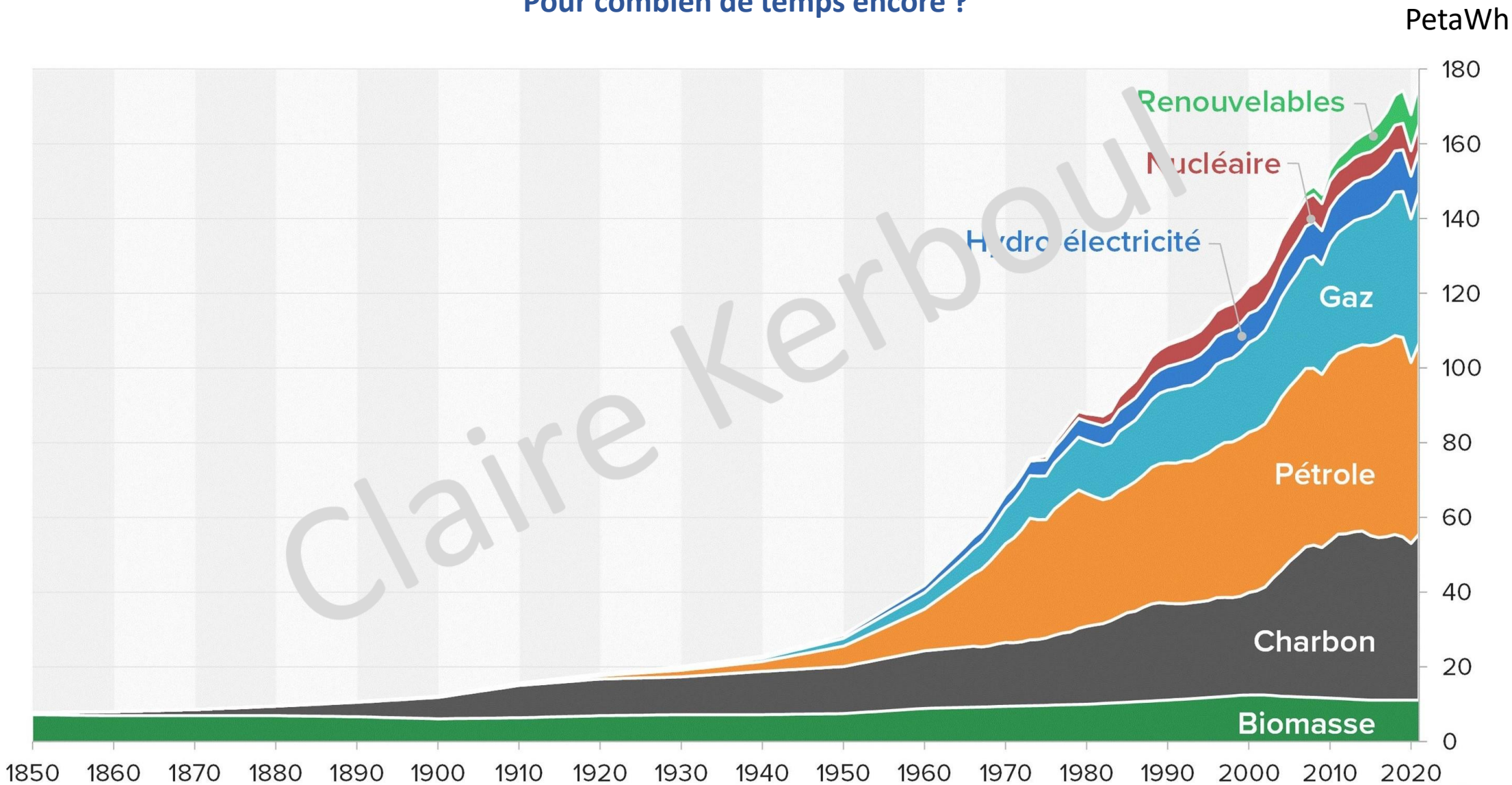
Puissance électrique fournie par type d'installation

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 $W_{crête}$	

Claire Kerboul

Consommation mondiale d'énergie primaire par source

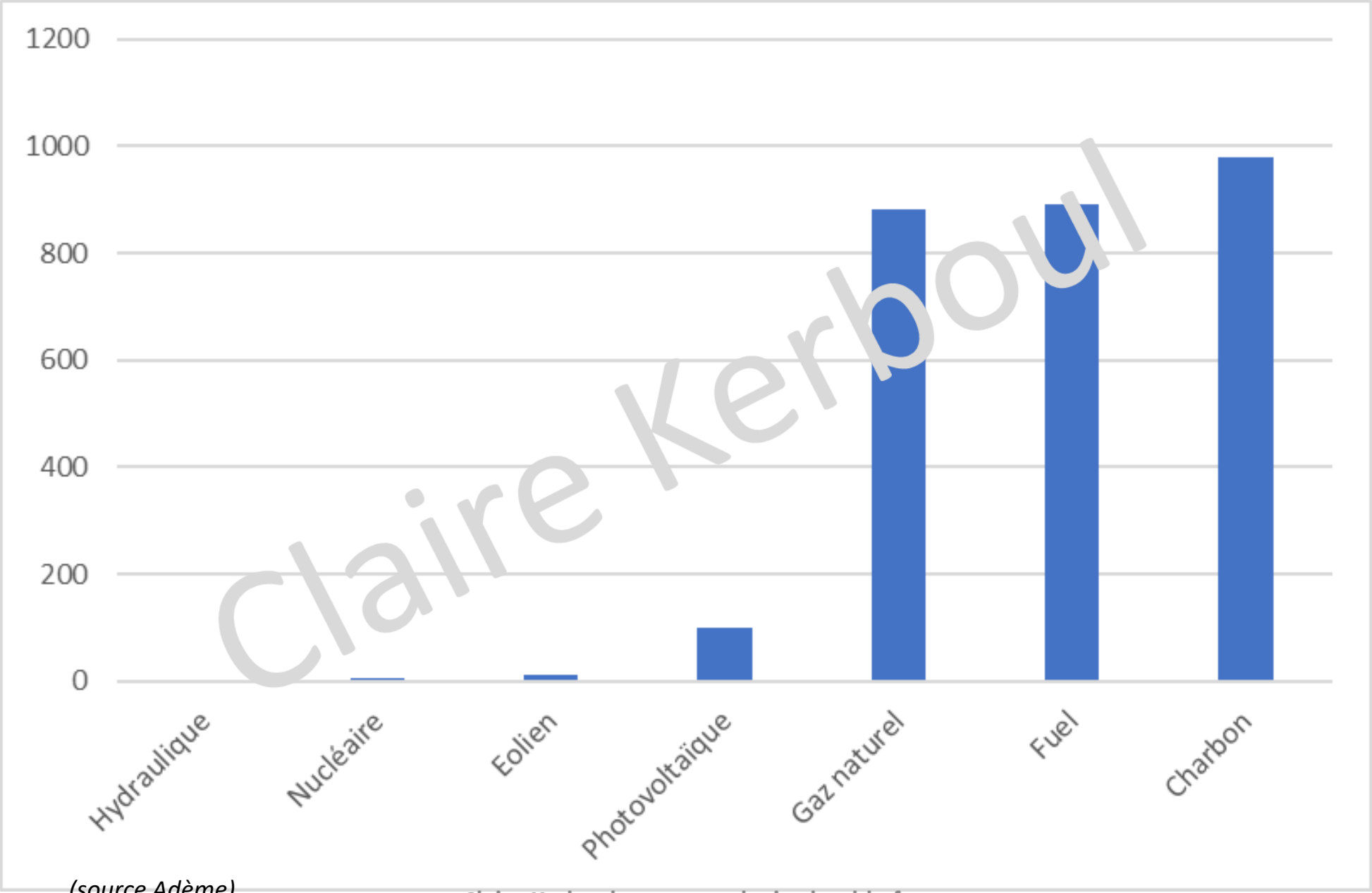
Pour combien de temps encore ?



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

Claire Kerboul

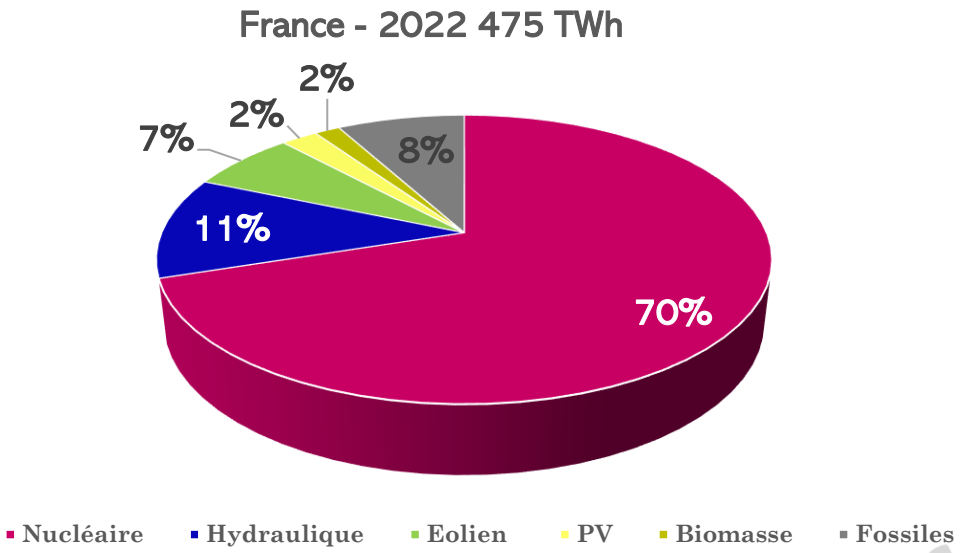
Emission de CO2 en grammes par kWh

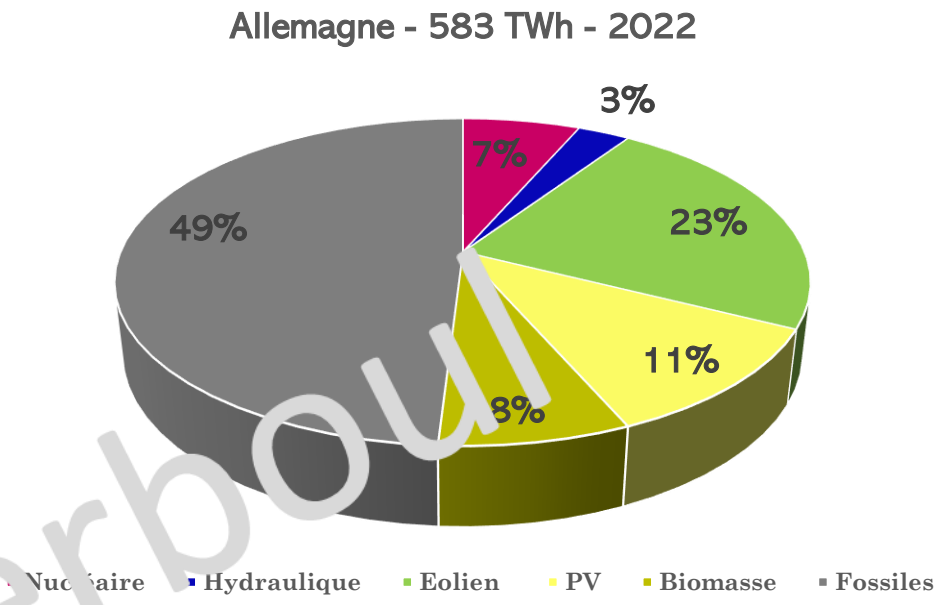


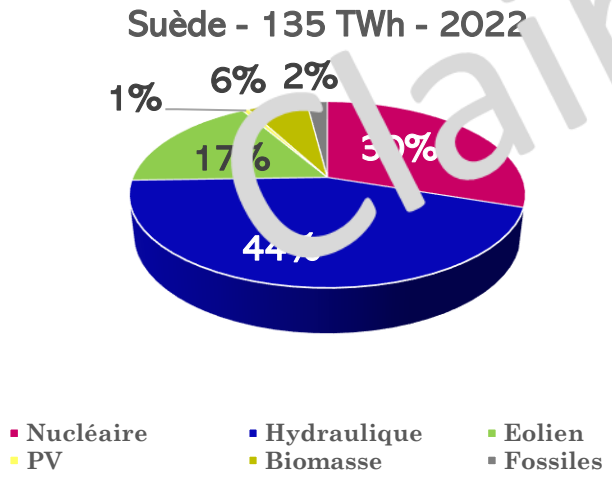
(source Adème)

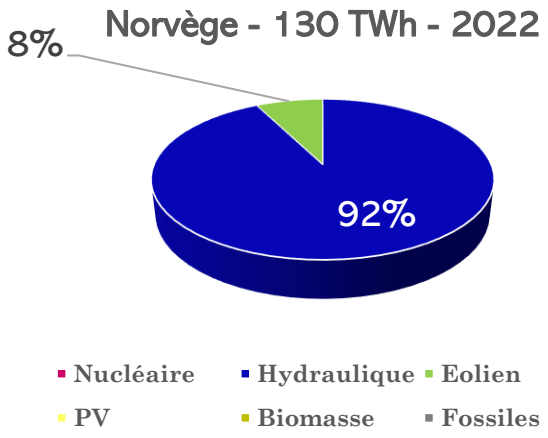
Les énergies renouvelables sont-elles durables ?

Claire Kerboul



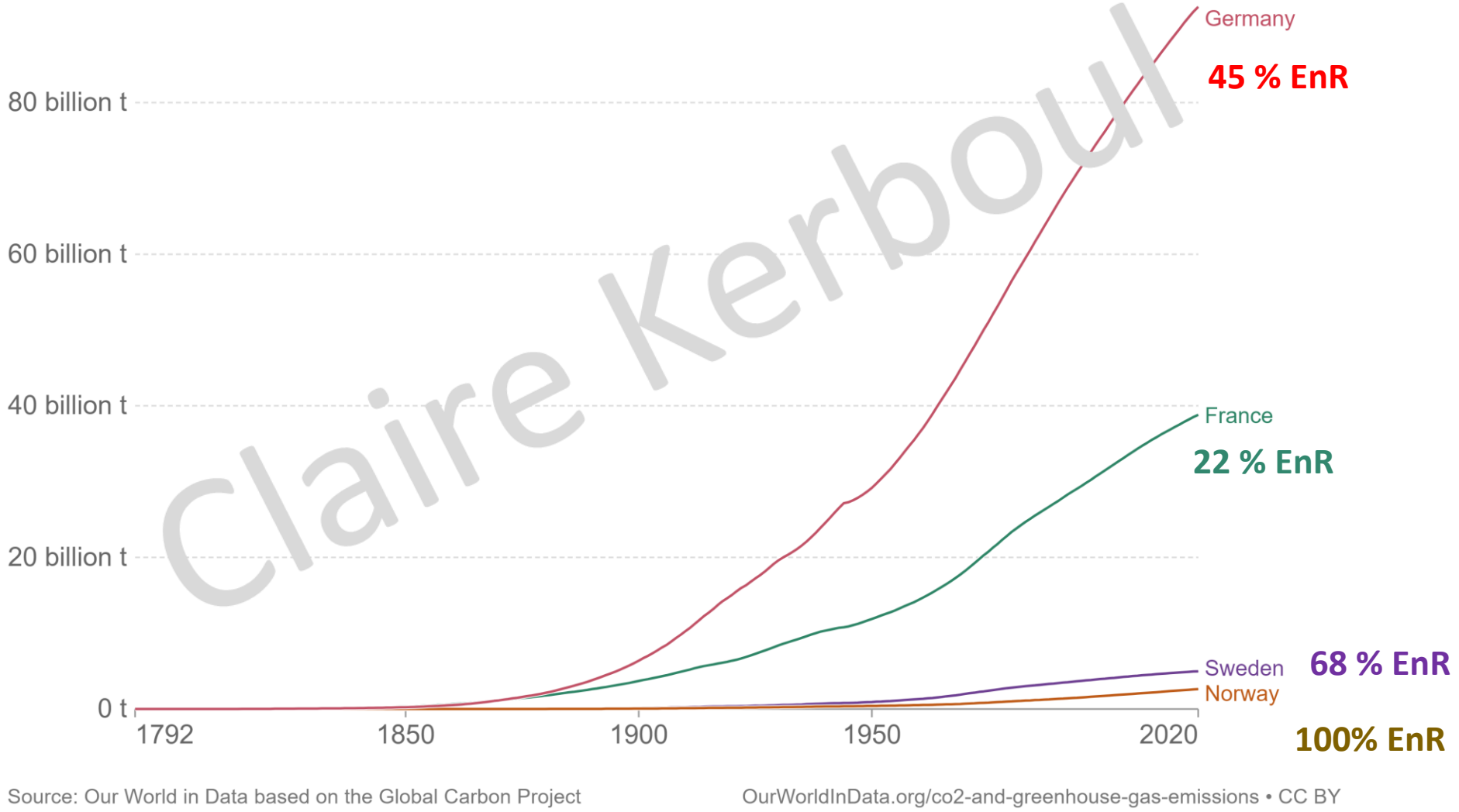






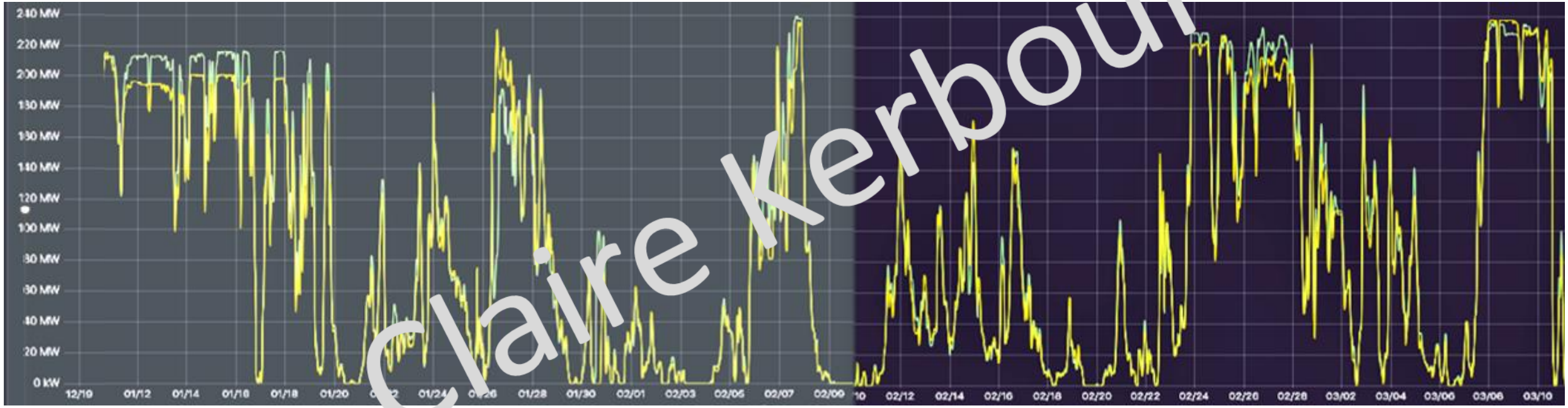
Claire Kerboul

Emissions de CO_2 cumulées (G_{tonnes})



Claire Kerboul

Eoliennes en mer du banc de Guérande –Saint-Nazaire

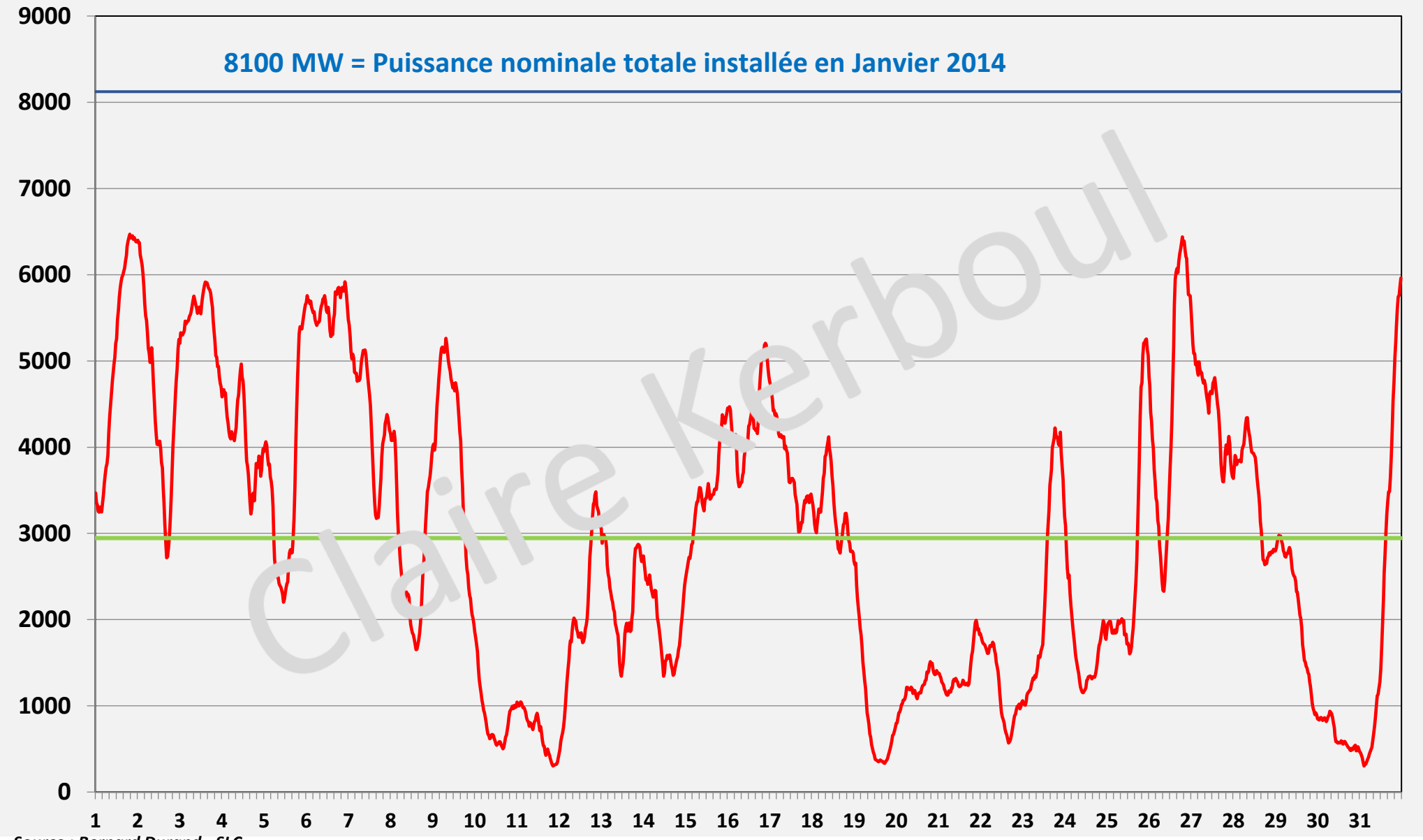


Claire Kerboul

Source Bernard Durand - SLC

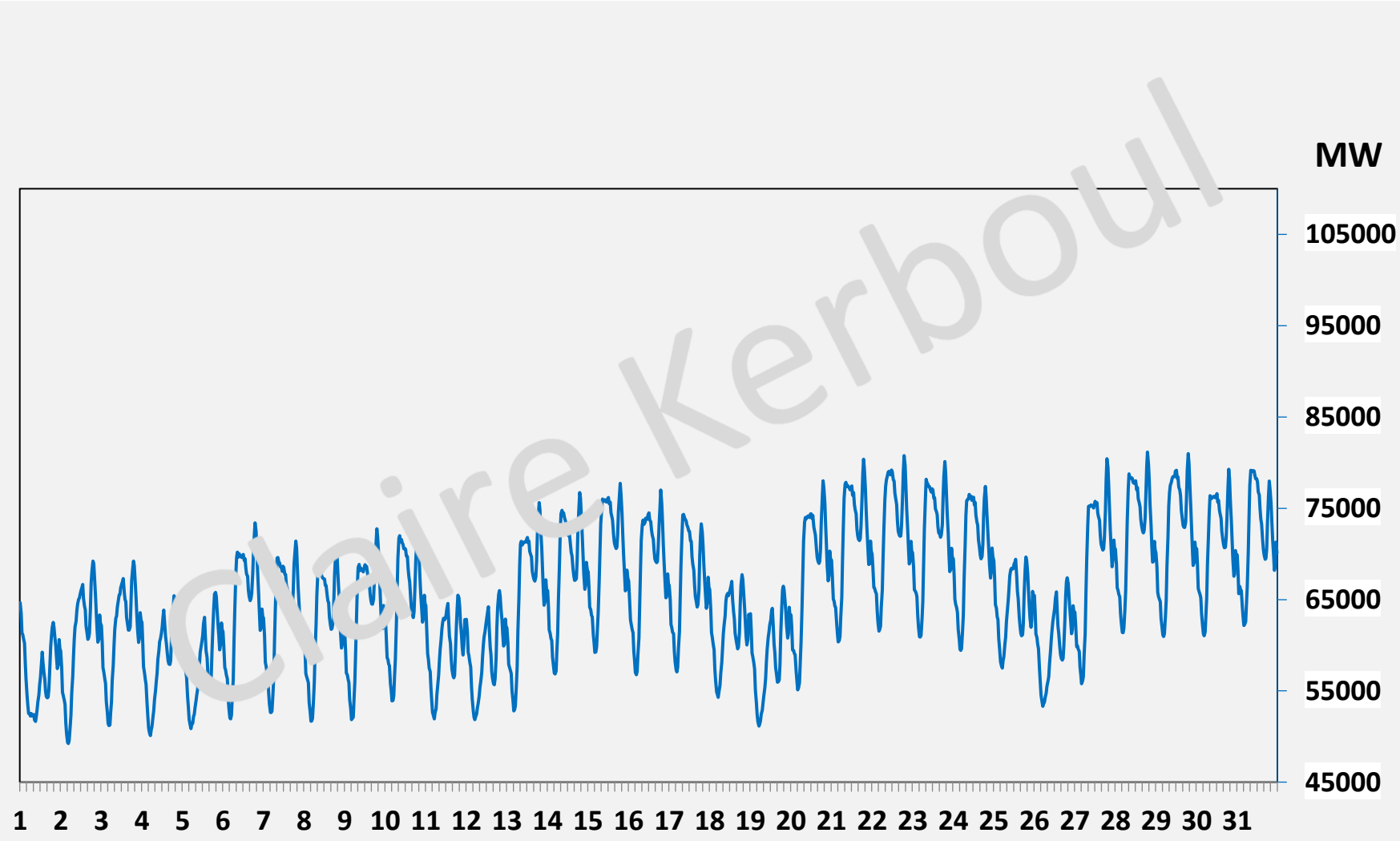
Janvier-février 2023

Puissance éolienne mesurée en France en janvier 2014

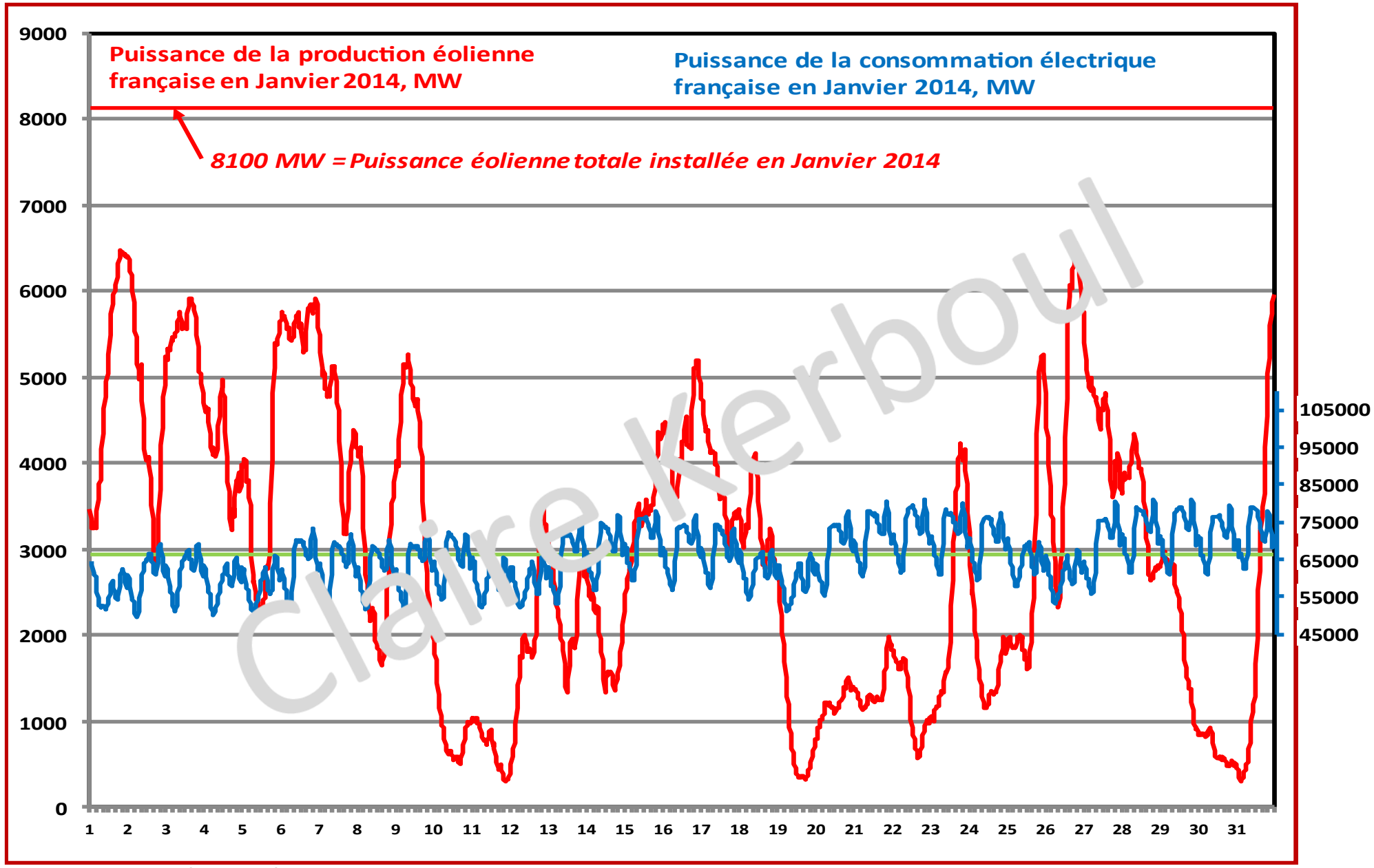


Source : Bernard Durand - SLC

Consommation totale de puissance électrique en France en 2014



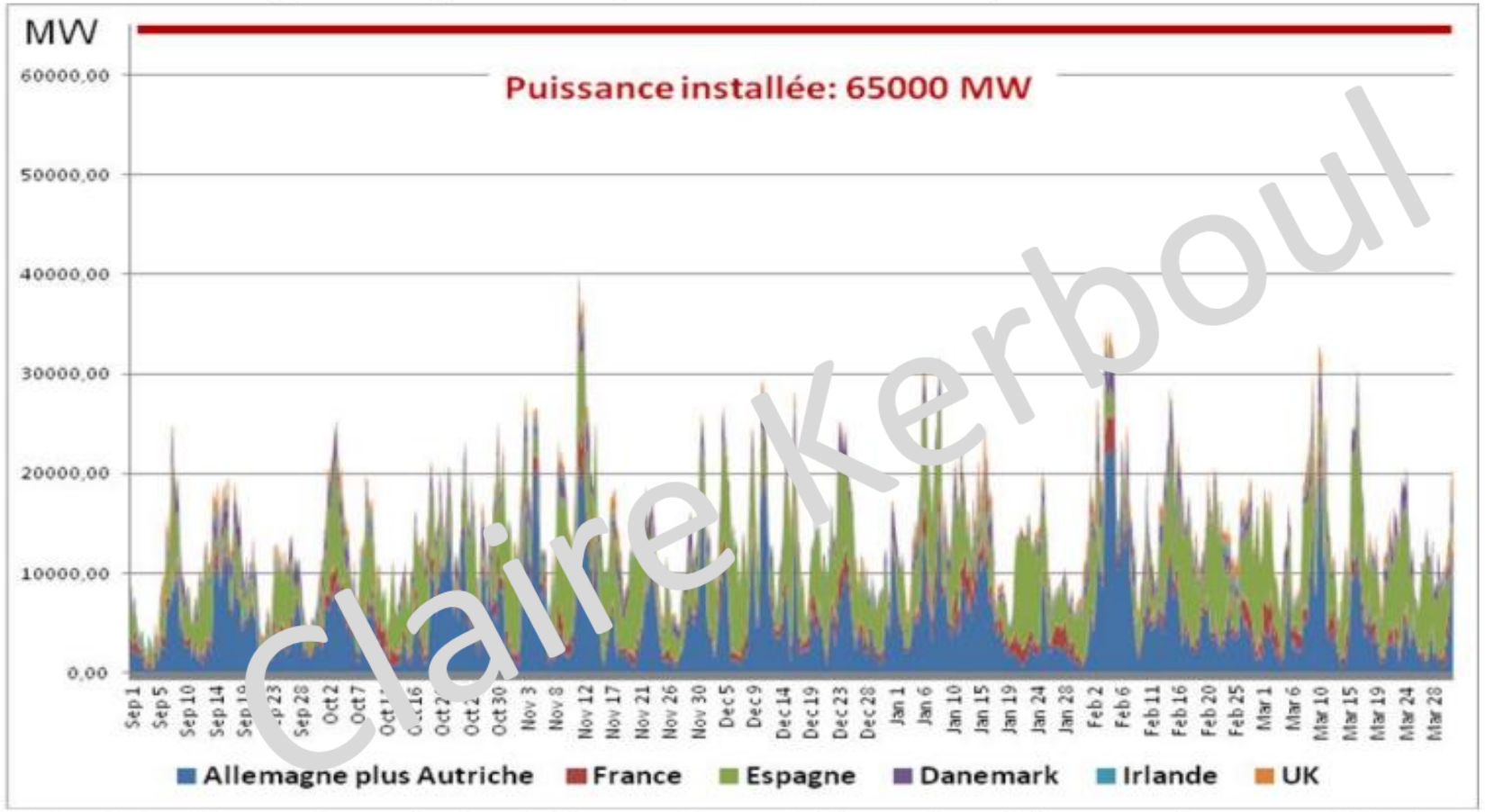
Source : Bernard Durand - SLC



Source : Bernard Durand - SLC

Exemple du « foisonnement » de la production éolienne en Europe

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

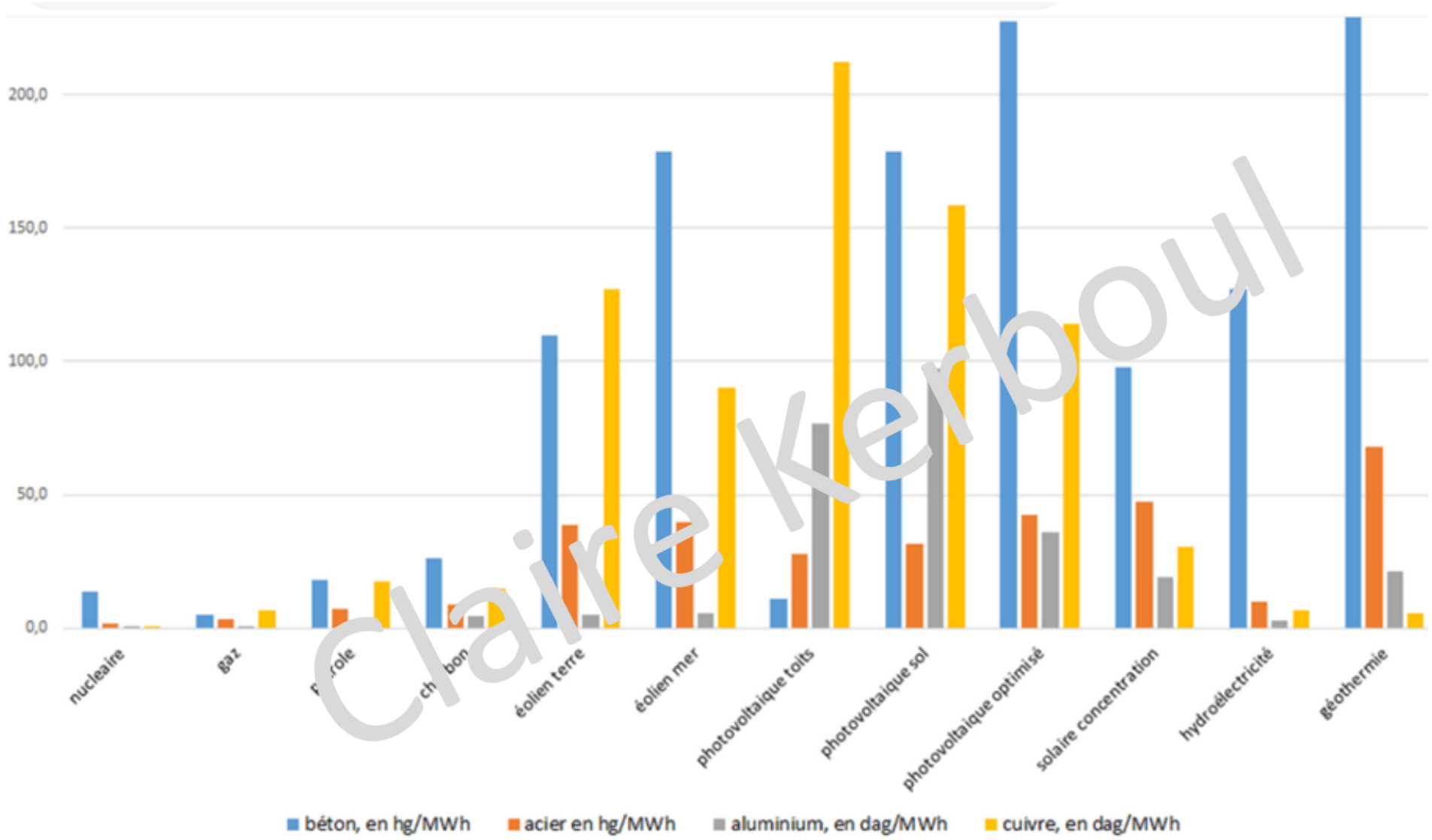


Claire Kerboul

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 :

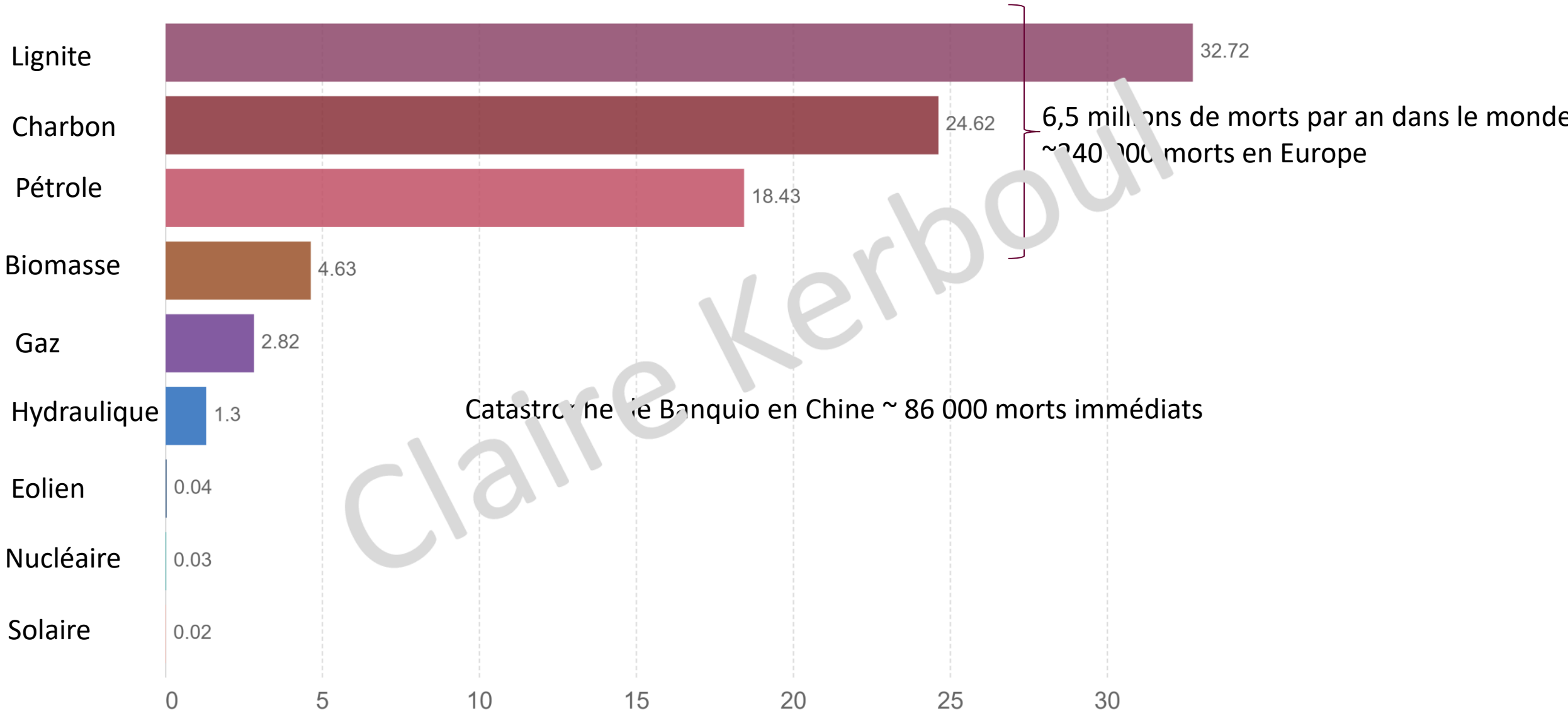


Claire Kerboul

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)



Claire Kerboul

Analyse des critères de durabilité (/MWh produit)

Installation	Puissance	CO_2eq	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	–	–	+	+	–

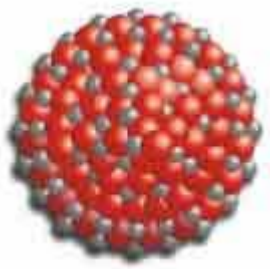
Claire Kerboul

Le nucléaire est-il durable ?

Claire Kerboul

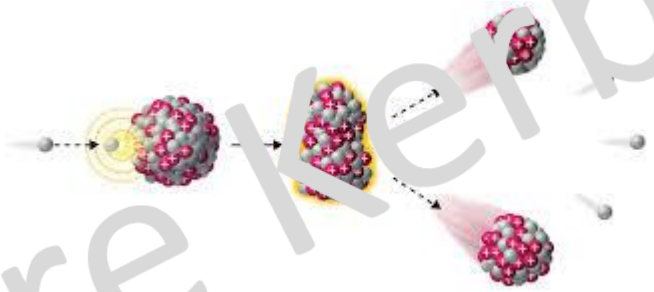
Le seul noyau fissile disponible sur Terre : l'uranium 235

$^{92}_{123}U_{235}$



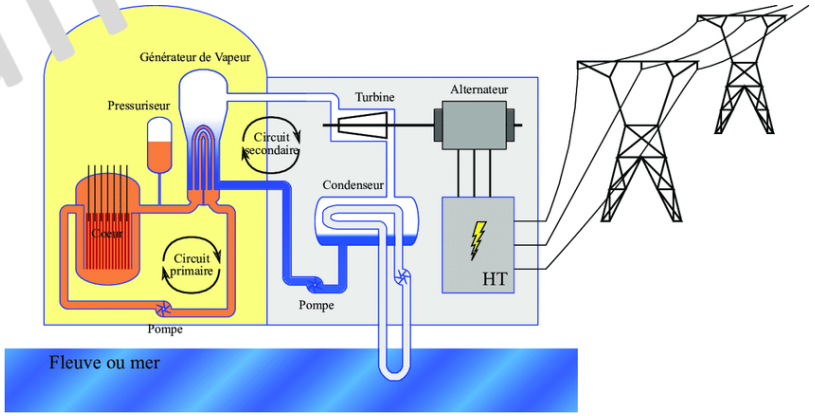
Seul noyau Fissile sur Terre

l'uranium 235 est fissile.



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

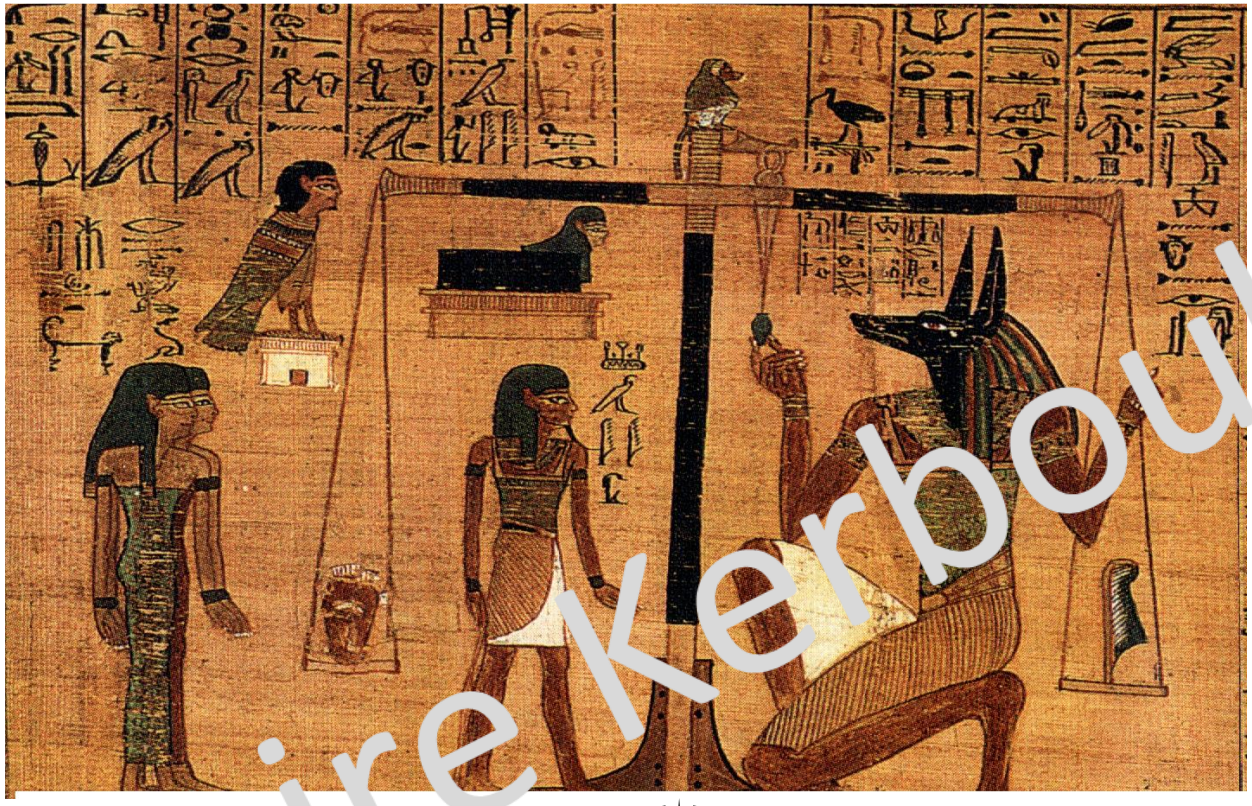
La fission est d'autant plus facile que le neutron est lent → réacteur à eau pressurisée (REP).



Source : Clavier Remi in Research Gate

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

Claire Kerboul



Claire Kerboul

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

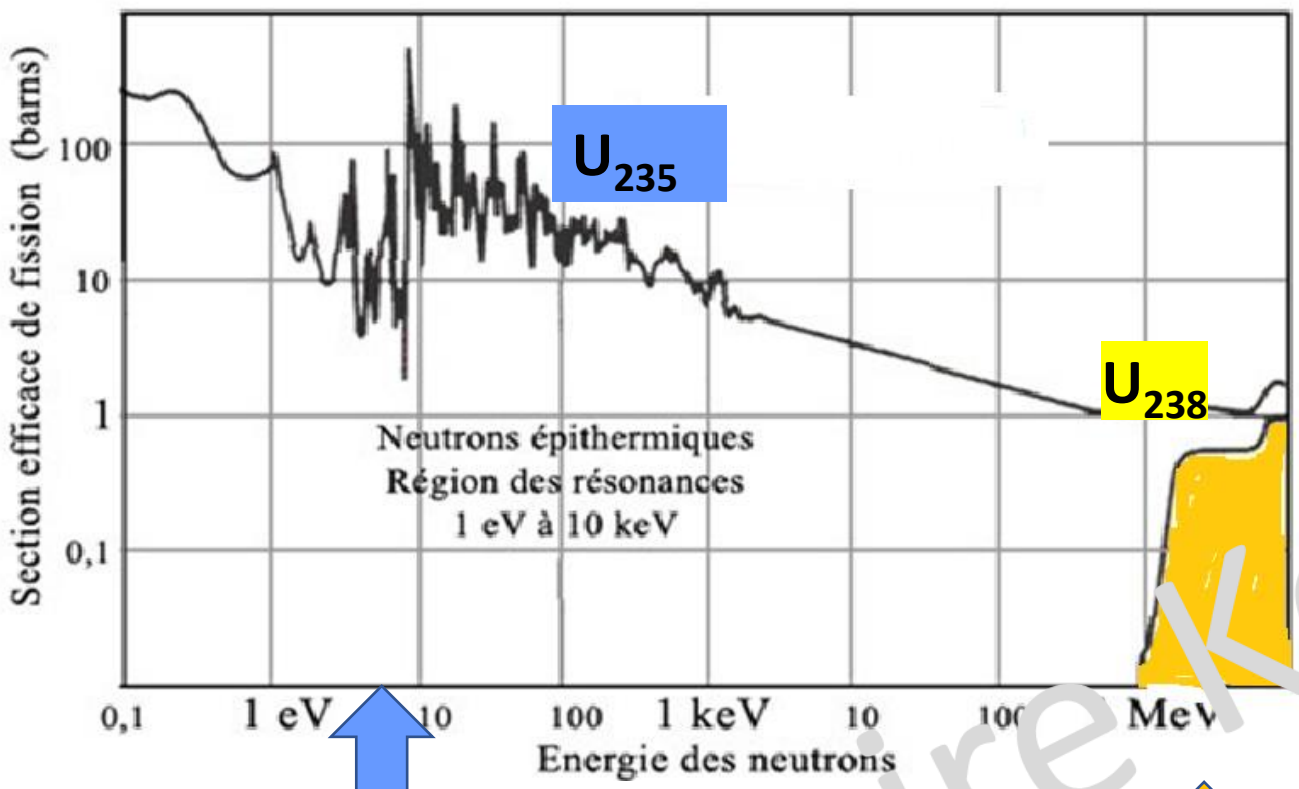
Le minerai d’uranium

99,3% uranium 238

≤ 0,7% uranium 235 fissile

traces d’uranium 234

Claire Kerboul



Réacteurs à « neutrons lents »
REP, EPR

1% de la ressource

Réacteurs à « neutrons rapides »
Phénix, Superphénix, Astrid

100% de la ressource

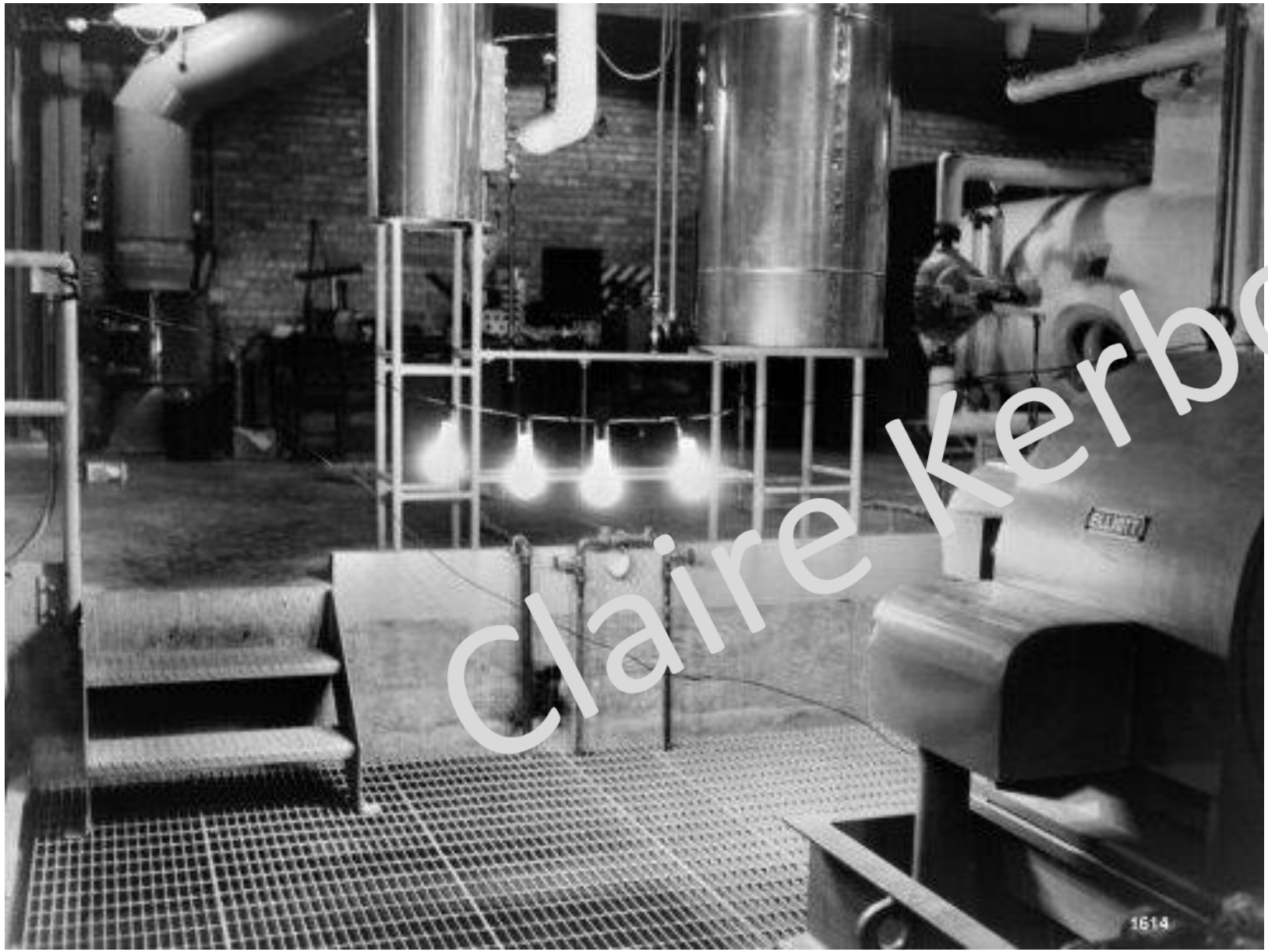
Source : © Orano / Larrayadieu Eric

concentré d'uranium sous forme de diuranate de sodium $Na_2U_2O_7$, calciné et naturel.

Claire Kerboul

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

Enrico Fermi - 1945

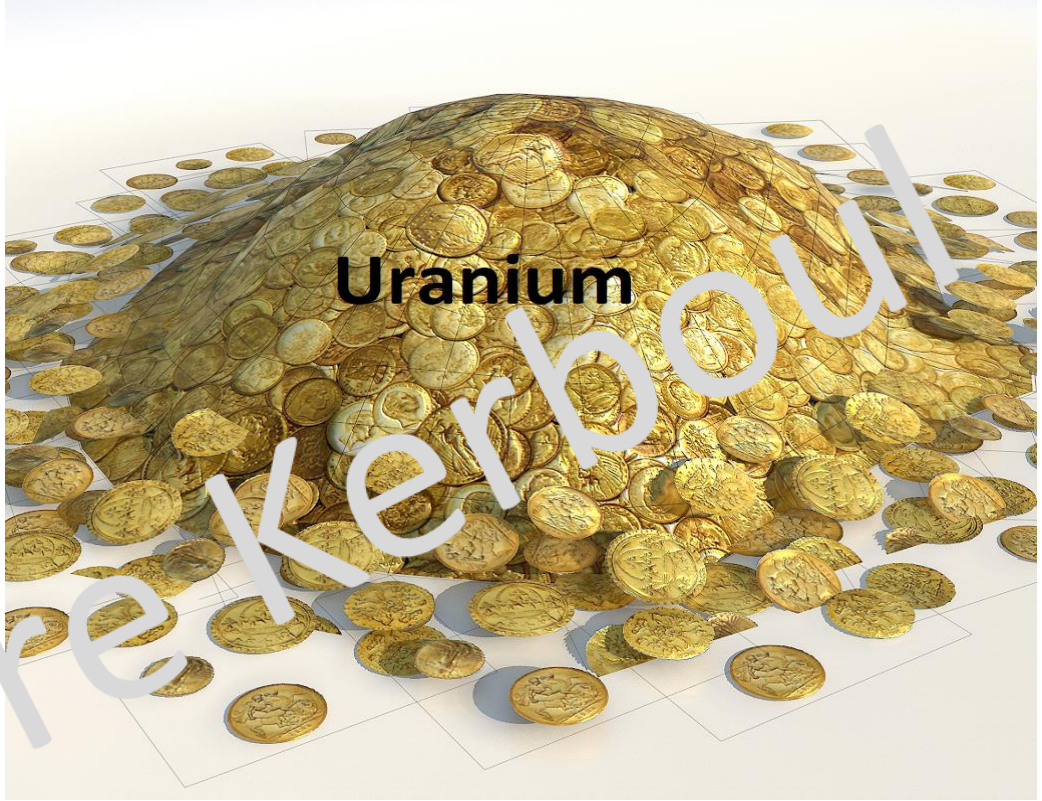


Source : http://www.ne.anl.gov/About/hn/news961220.shtml Argonne National Laboratory, Domaine public

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

Claire Kerboul

450 000 tonnes ⇔ 7000 années de production d'électricité



U_{235}

U_{238}

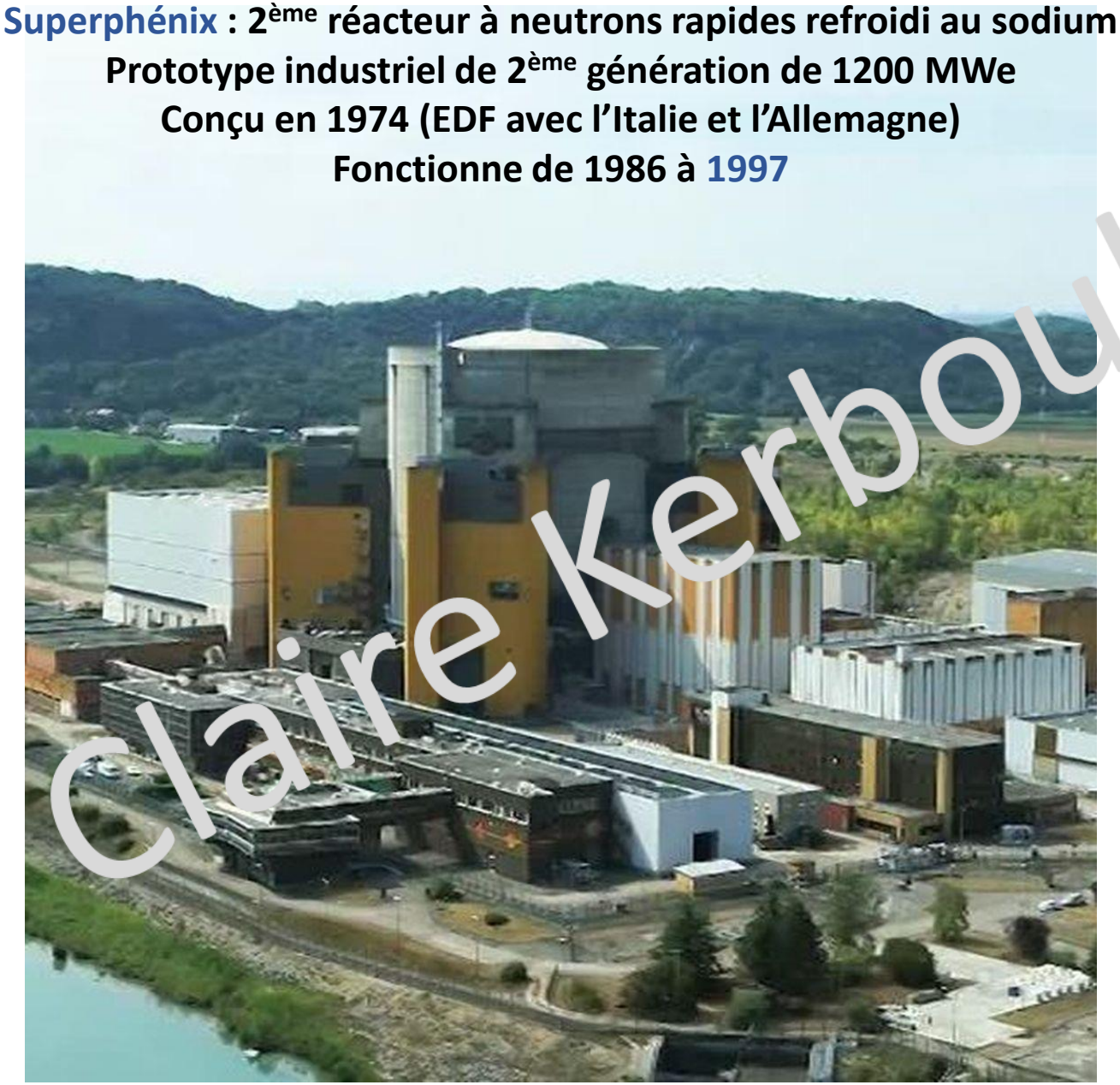
Claire Kerboul

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

Phénix : 1ème 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 : 2ème réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium
Prototype industriel de 2ème 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

Salle de commande de Superphénix

Claire Kerboul

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

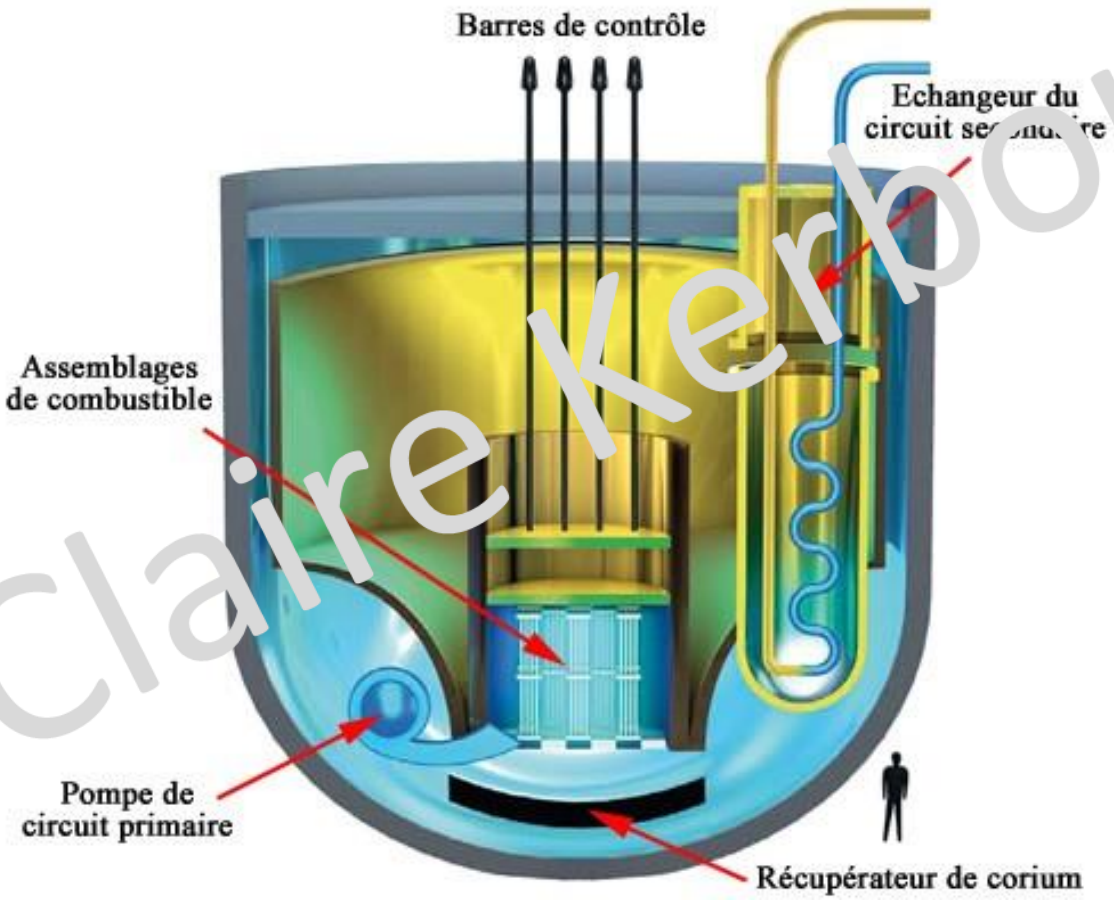
RAPPORT

(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)

Claire Kerboul

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.

Claire Kerboul

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 siecle.

….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

Claire Kerboul

Les fausses bonnes idées

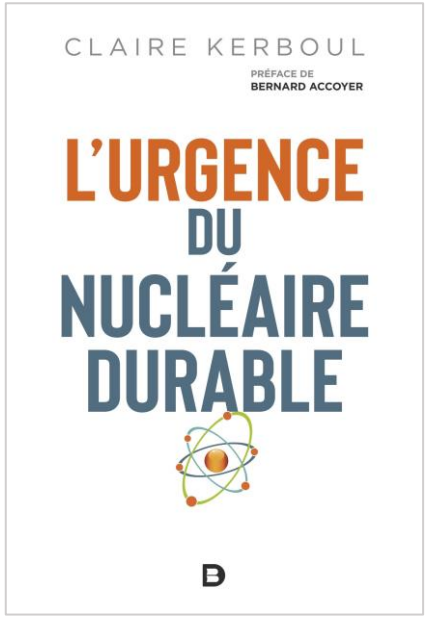
Le thorium

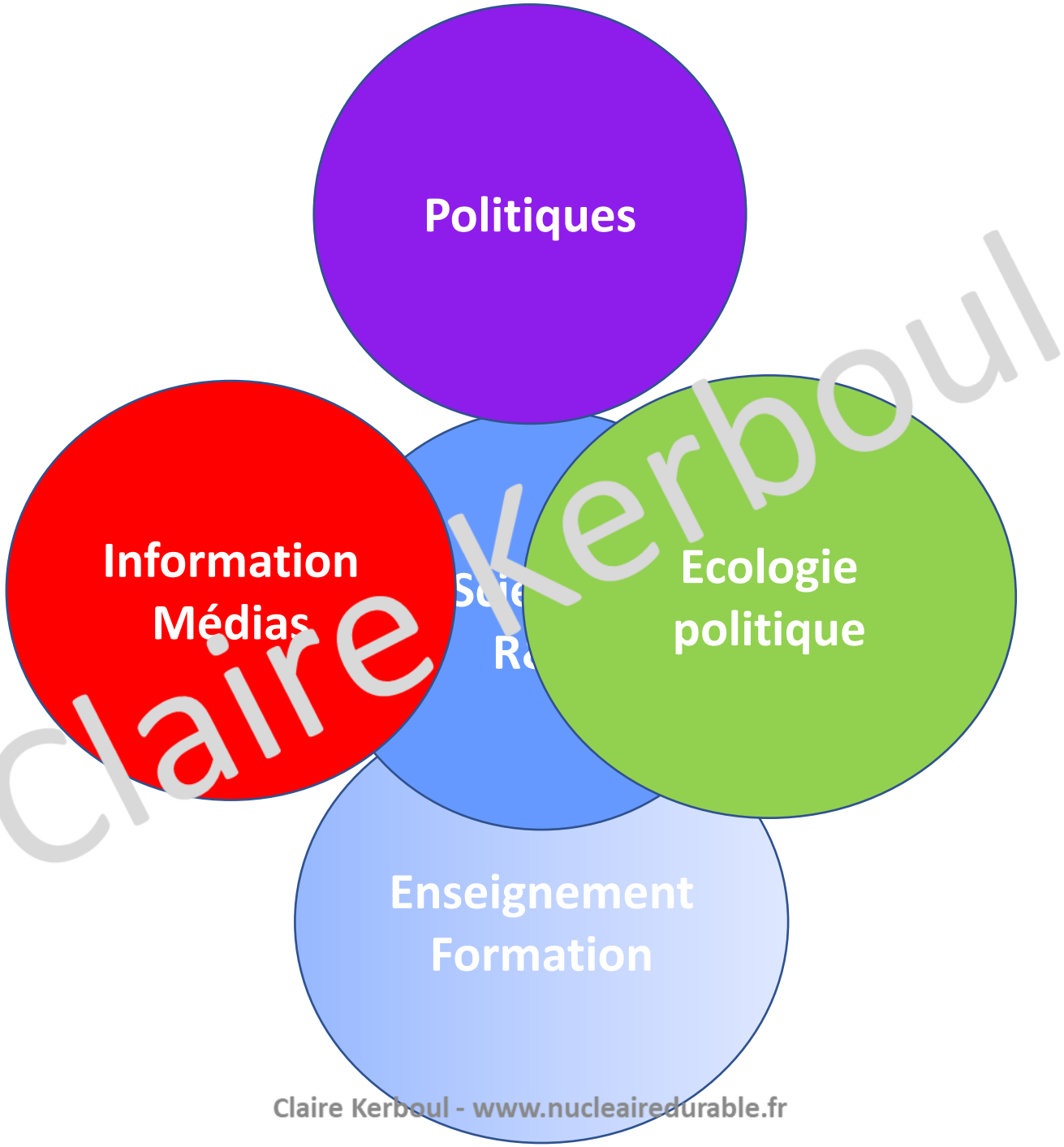
L'uranium de l'eau de mer

Les réacteurs à sels fondus

La fusion

Claire Kerboul





Claire Kerboul

Claire Kerboul