

Eléments de base sur l'énergie au 21^e siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2020
Partie 6 - $e = mc^2$, il suffisait d'y penser**

Qu'est-ce qu'une énergie nucléaire ?

Une énergie nucléaire est tout simplement... une énergie associée à une modification de noyaux atomiques (nucleus = noyau).

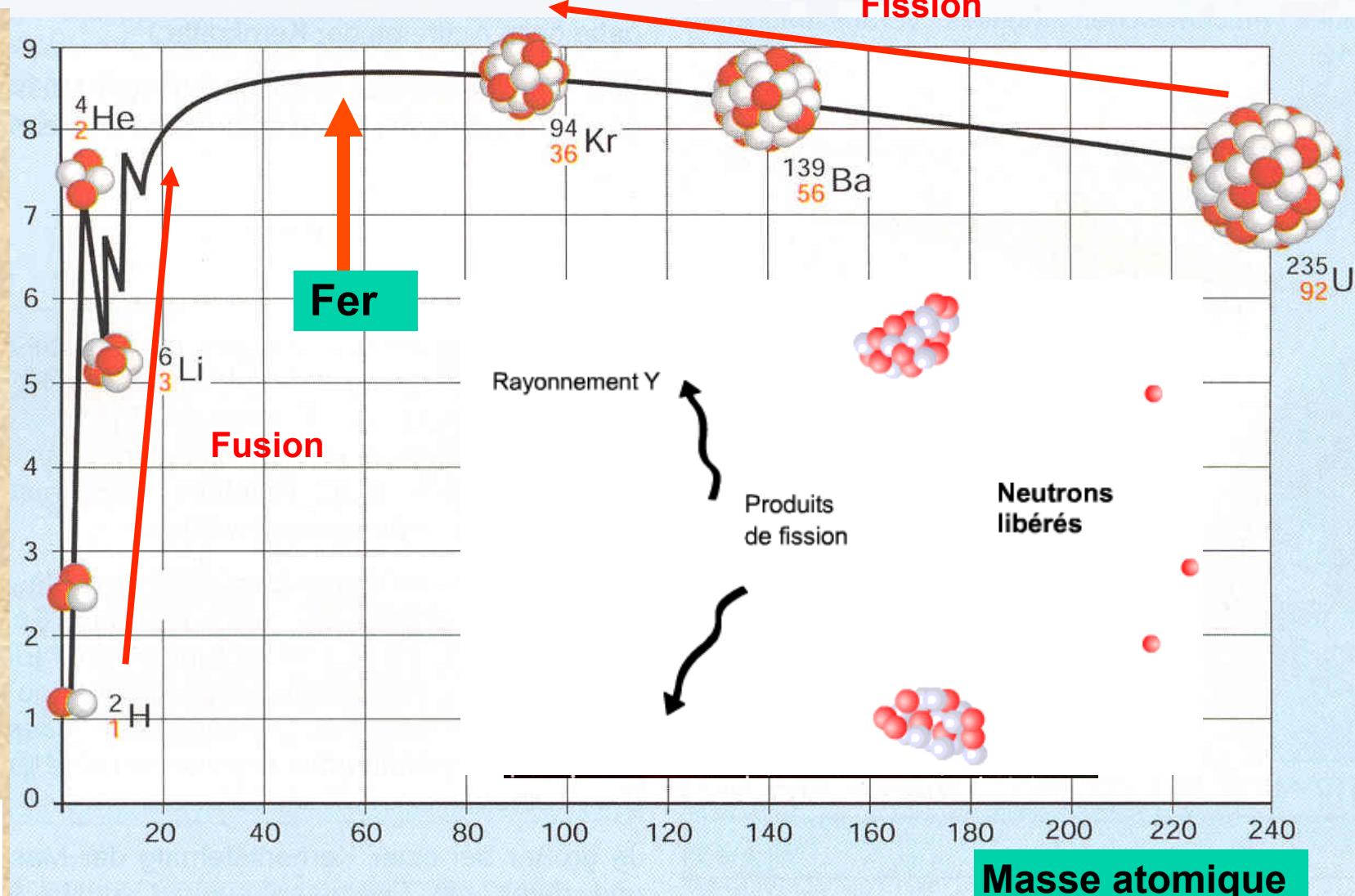
La première version est de casser en plusieurs morceaux un gros noyau (fission), avec libération d'énergie au passage

La deuxième version est de fusionner en un seul noyau 2 noyaux plus légers (fusion), avec aussi libération d'énergie au passage.

Dans les deux cas de figure, $e = mc^2$: la masse du/des noyaux à l'arrivée est plus faible que la masse du/des noyaux au départ, et la différence est de l'énergie cinétique pour les produits de fission et rayonnement gamma

Fusion et fission, deux manières de viser la stabilité

Energie de liaison
en MeV/nucléon



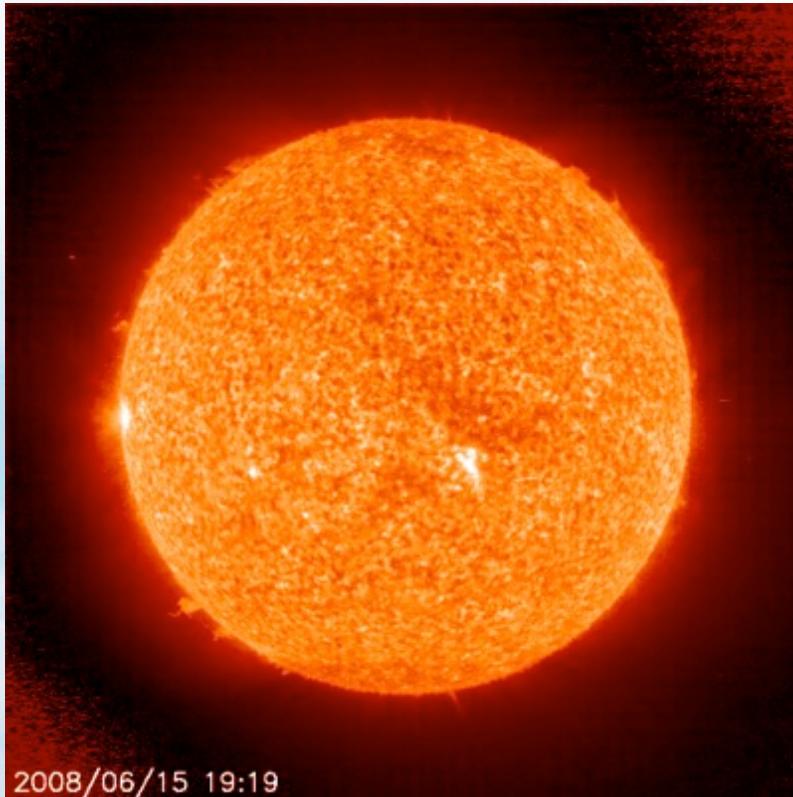
La réaction nucléaire met en jeu des énergies de quelques centaines de MeV par atome fissionné ou fusionné

La combustion du carbone, c'est environ 5 eV (plus d'un million de fois moins) par atome de C

Il y a donc à peu près autant d'énergie dans la fission d'un gramme d'U235 (ou de Pu239) que dans la combustion d'une tonne de pétrole

Sans énergie nucléaire, nous ne serions pas ici

Pas de soleil (fusion)



Le Soleil vu par SOHO le 15 juin 2008 (il va toujours bien merci)

Pas de planète Terre : les éléments constitutifs de la terre sont issus d'étoiles de la génération qui a précédé le Soleil

Le nucléaire est à la base de toute notre énergie...

Toutes les renouvelables - sauf la géothermie et les marées - sont des conséquences de l'énergie solaire - donc nucléaire - arrivée « récemment » :

Végétaux et dérivés (photosynthèse ex-solaire)

Hydroélectricité (cycle de l'eau = soleil)

Vent (machine climatique : soleil)

Soleil direct, vagues...

La géothermie provient... de la radioactivité naturelle des roches (nucléaire encore !)

Toutes les énergies fossiles sont des résidus d'énergie solaire (donc nucléaire) ancienne, un peu cuites par la géothermie... nucléaire

Le nucléaire est... nucléaire

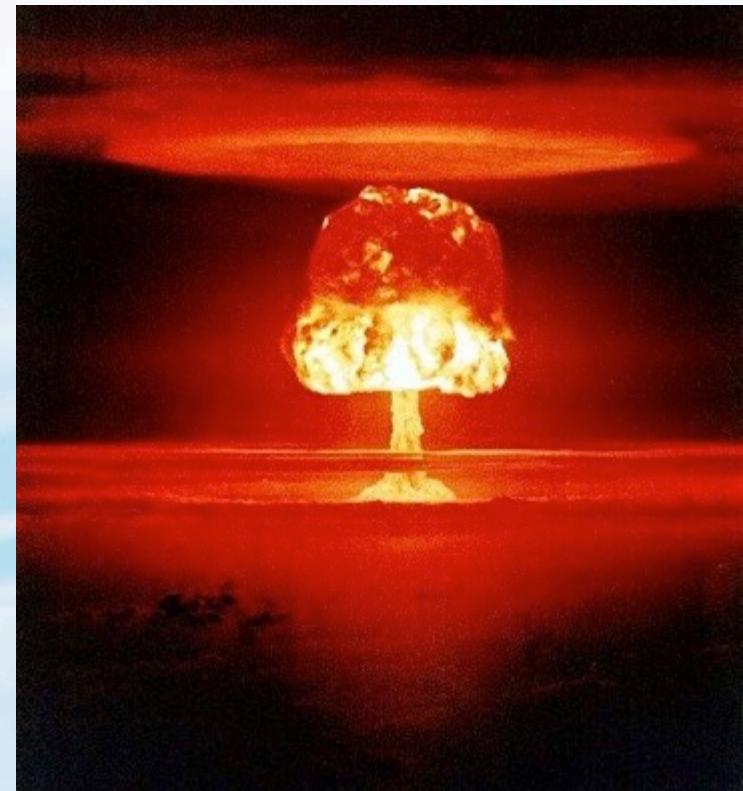
En fait tout ce qui compose la Terre (et la Lune, qui nous fournit les marées) a été « forgé » dans les étoiles de la génération précédent le Soleil, par la suite de réactions nucléaires

D'abord se taper dessus, ensuite penser à autre chose

Comme beaucoup d'autres technologies (hélas), les premiers usages de l'énergie nucléaire « humaine » ont été militaires :



Fission -> bombe A



Fusion -> bombe H

Le nucléaire civil, c'est un procédé **compliqué pour faire bouillir de l'eau**

En grande quantité

Sans combustion

Pas (très) cher

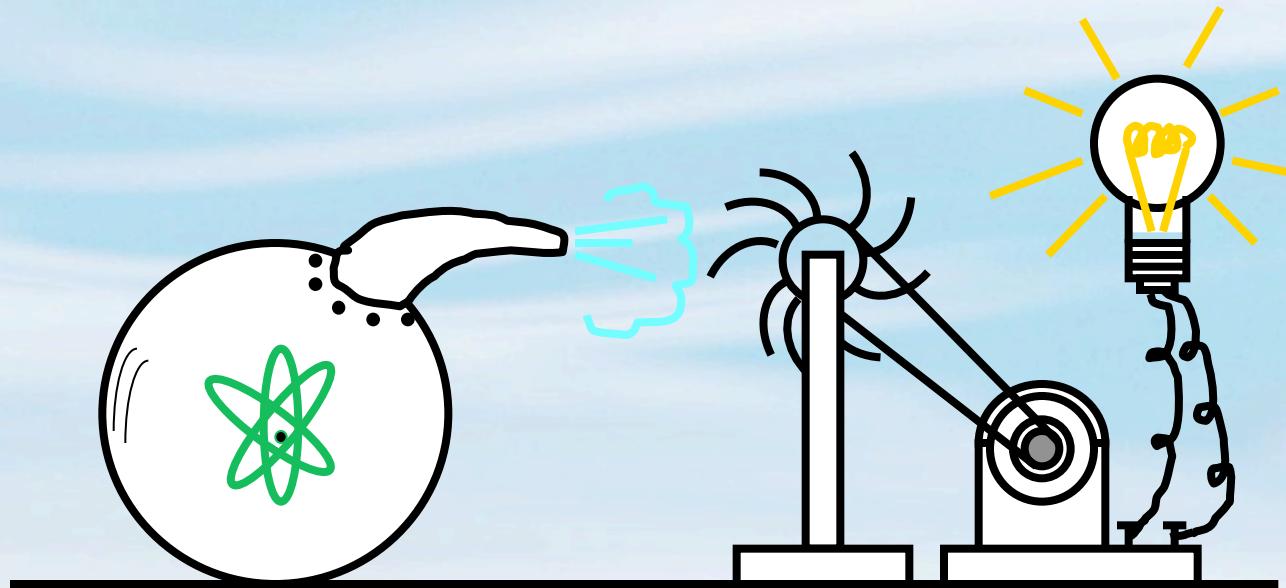
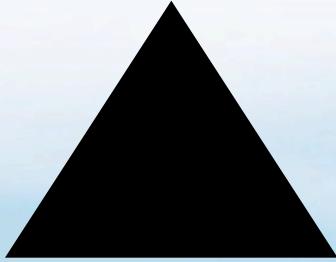
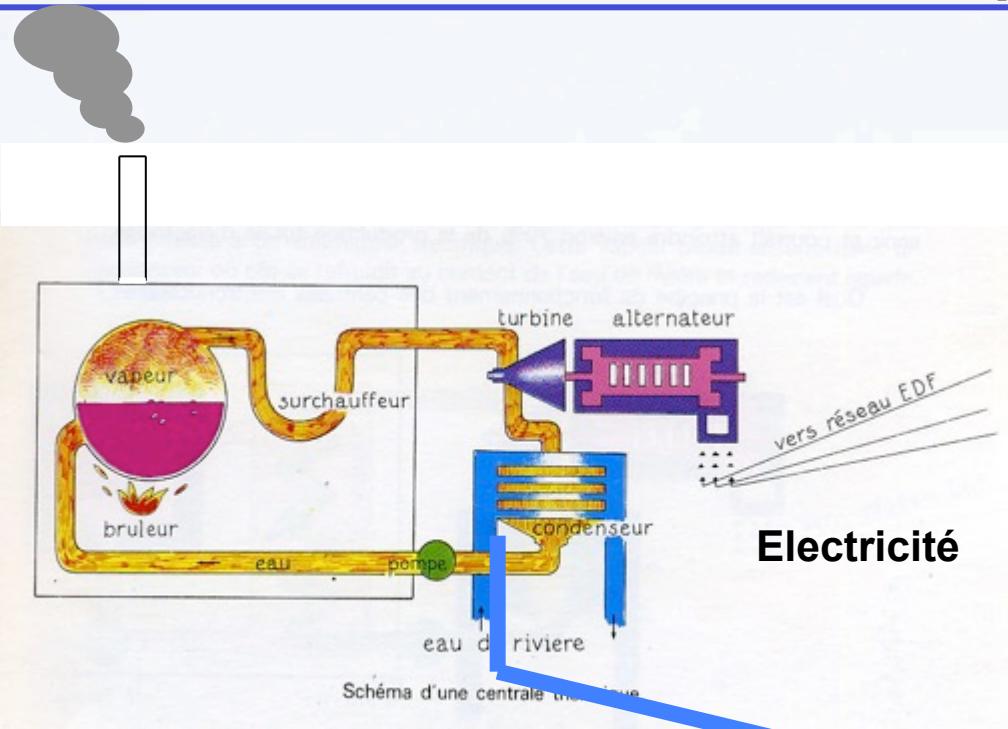


Illustration Bertrand Barré

Nucléaire ou charbon, c'est - presque - pareil



Charbon



Vapeur
d'eau



Uranium

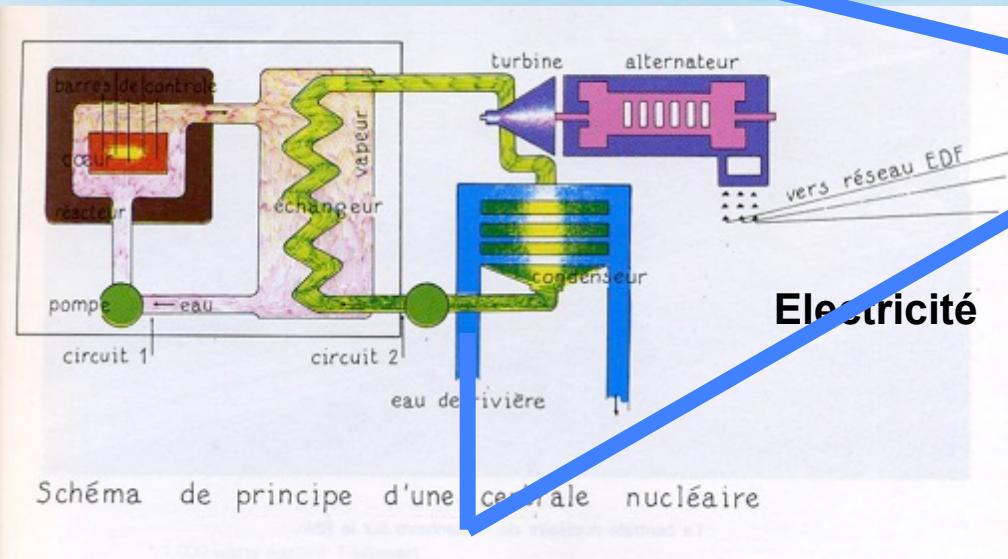


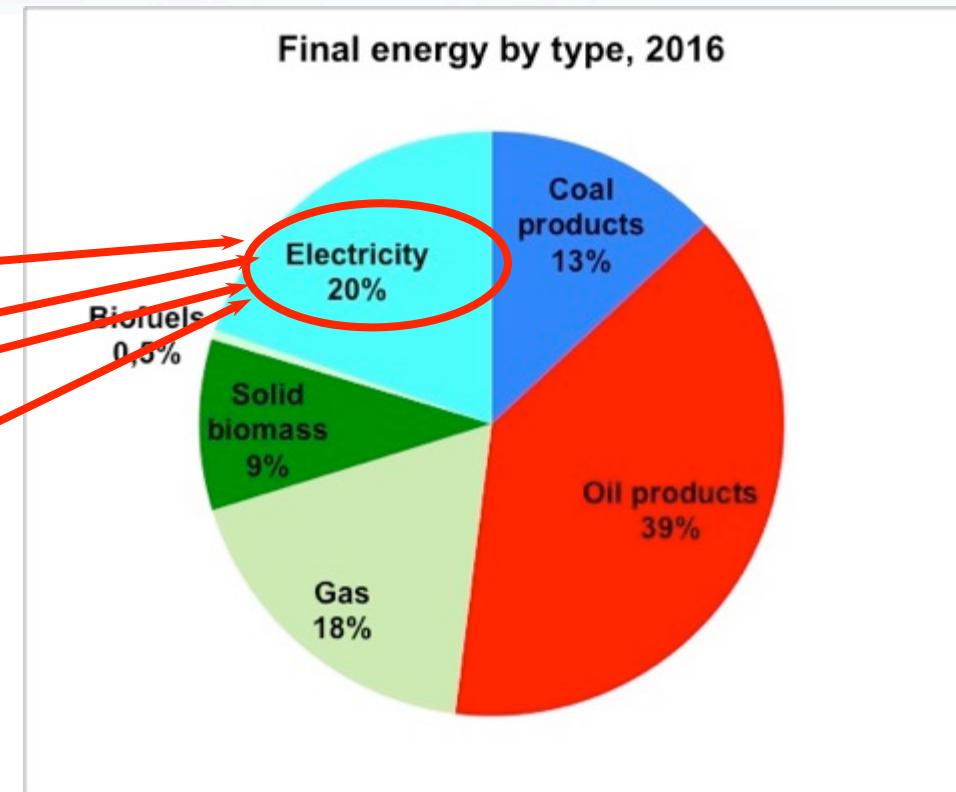
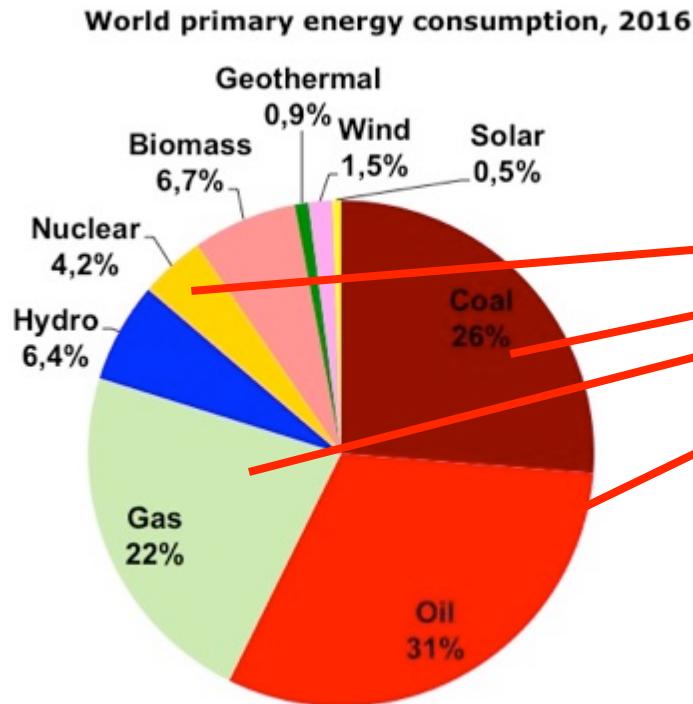
Illustration
Bertrand Barré

Le nucléaire, vraiment trop mauvais ?

Dès qu'il s'agit de faire bouillir de l'eau (nucléaire, mais aussi charbon, gaz, et fioul lourd, soit 85% de l'électricité mondiale) :

Il faut une source chaude et une source froide

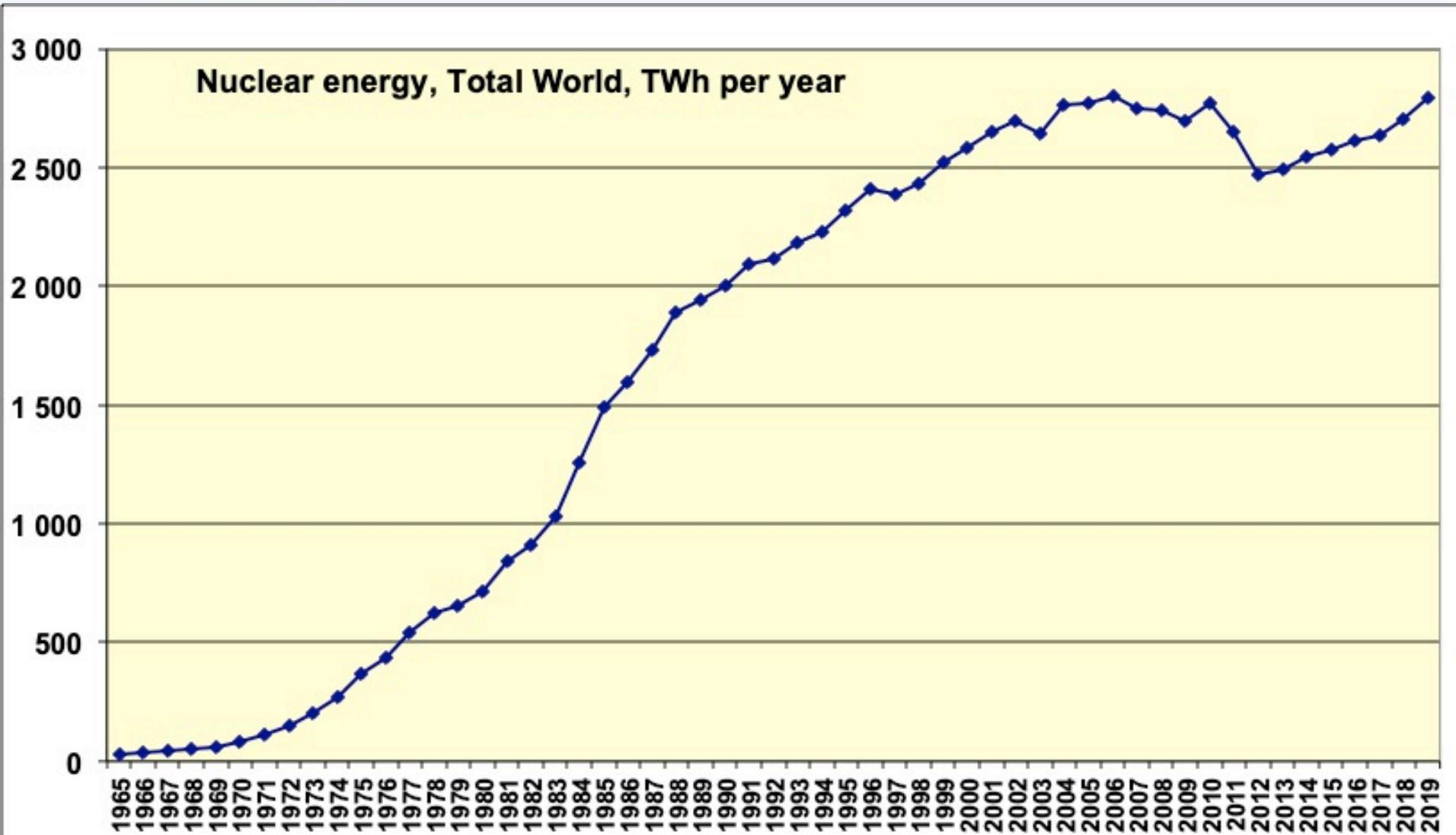
Carnot limite le rendement et on chauffe les petits oiseaux



14,2 Gtep primaire



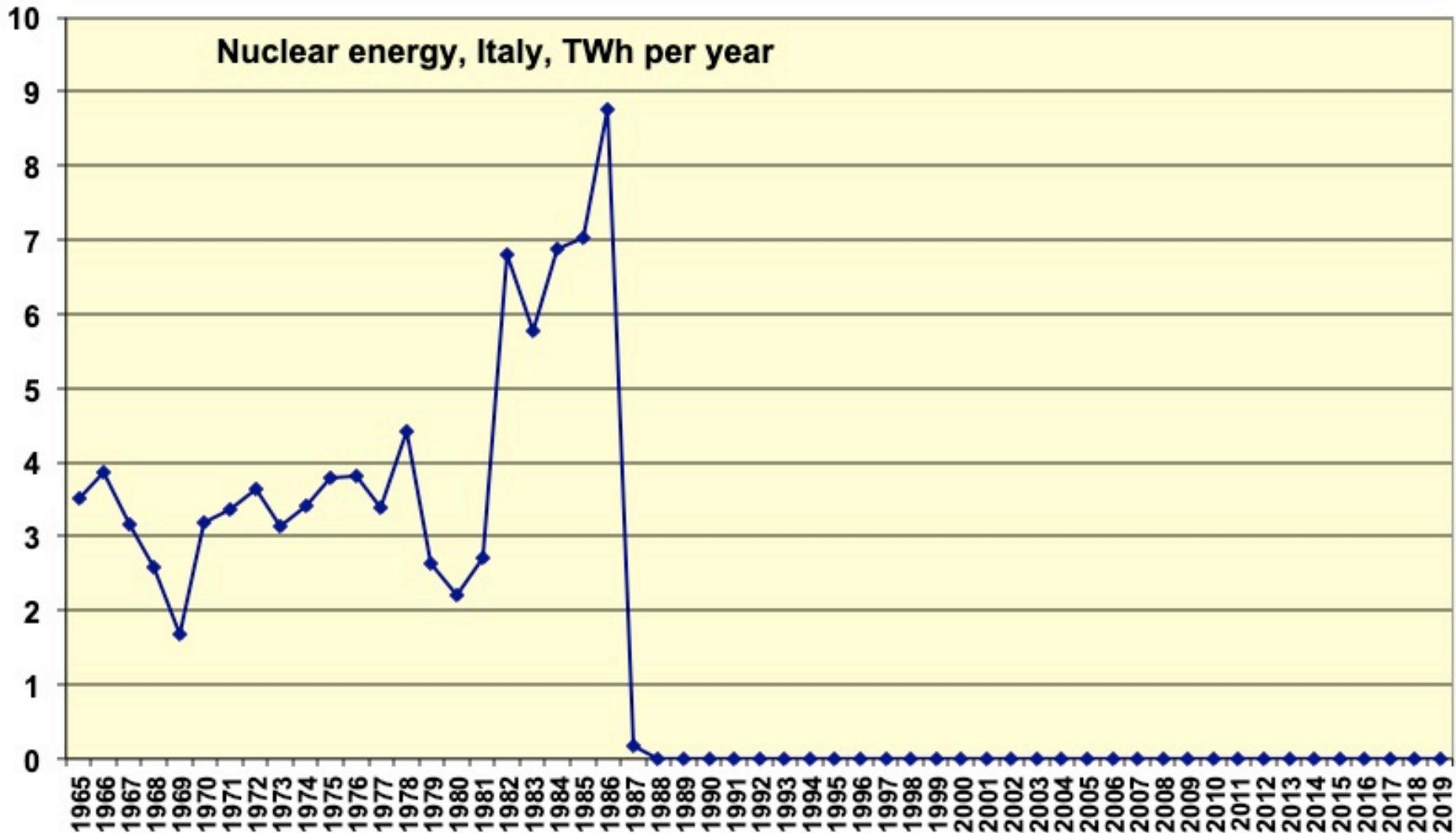
9,5 Gtep final



Électricité d'origine nucléaire dans le monde depuis 1965, en TWh.

Source : BP Statistical Review

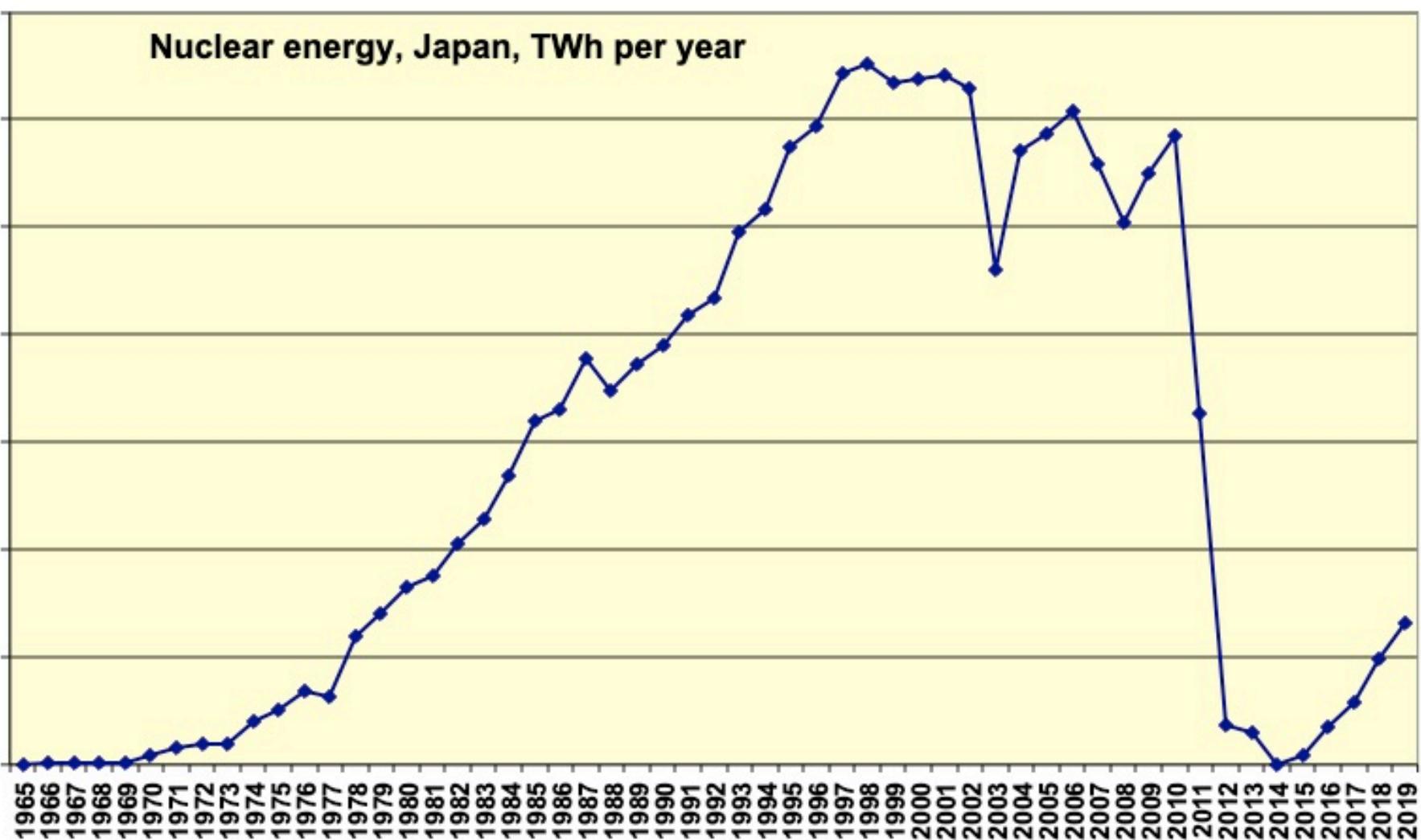
Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



Électricité d'origine nucléaire en Italie depuis 1965, en TWh.

Source BP Statistical Review

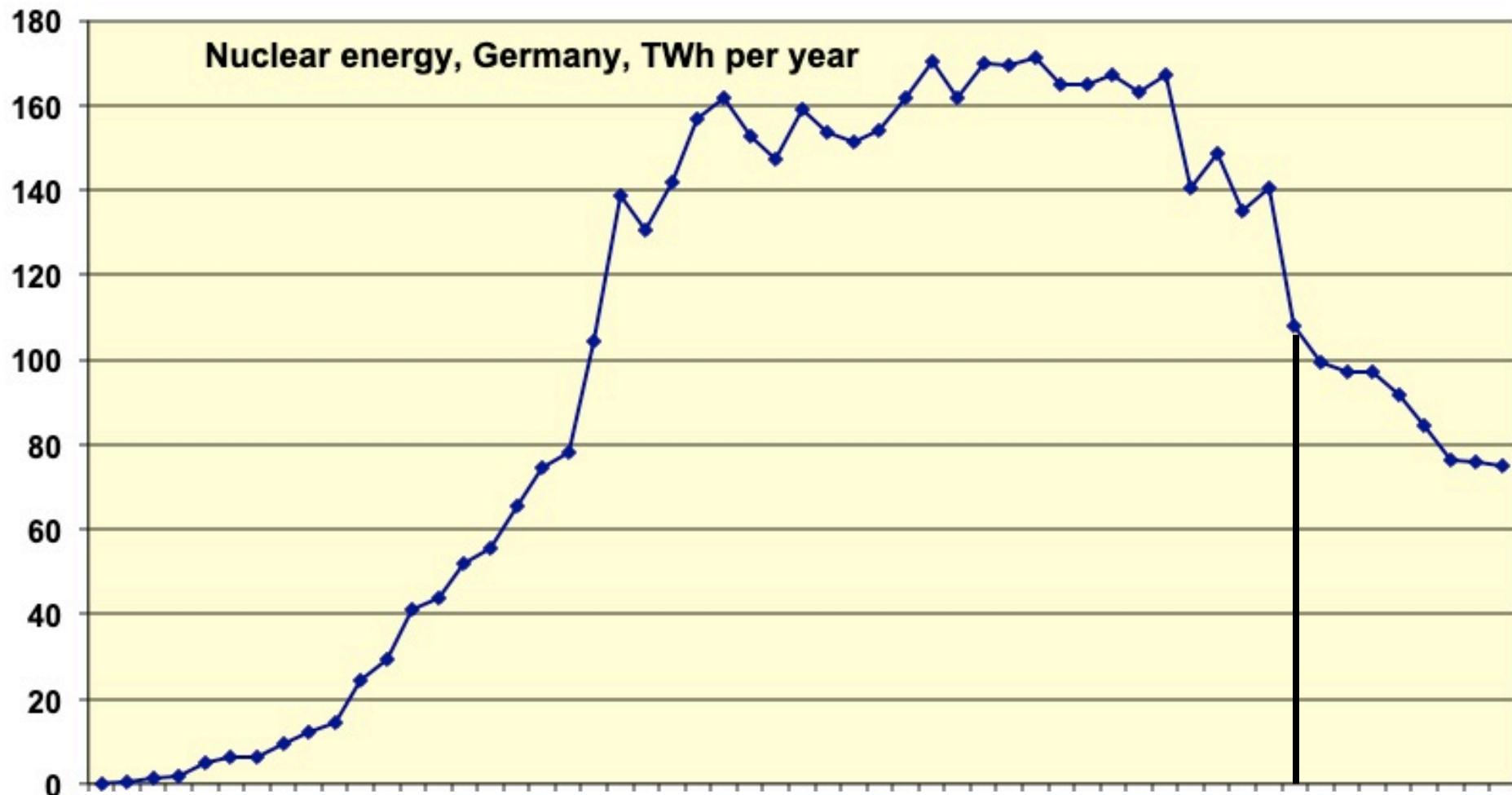
D'autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage



Électricité d'origine nucléaire au Japon depuis 1965, en TWh.

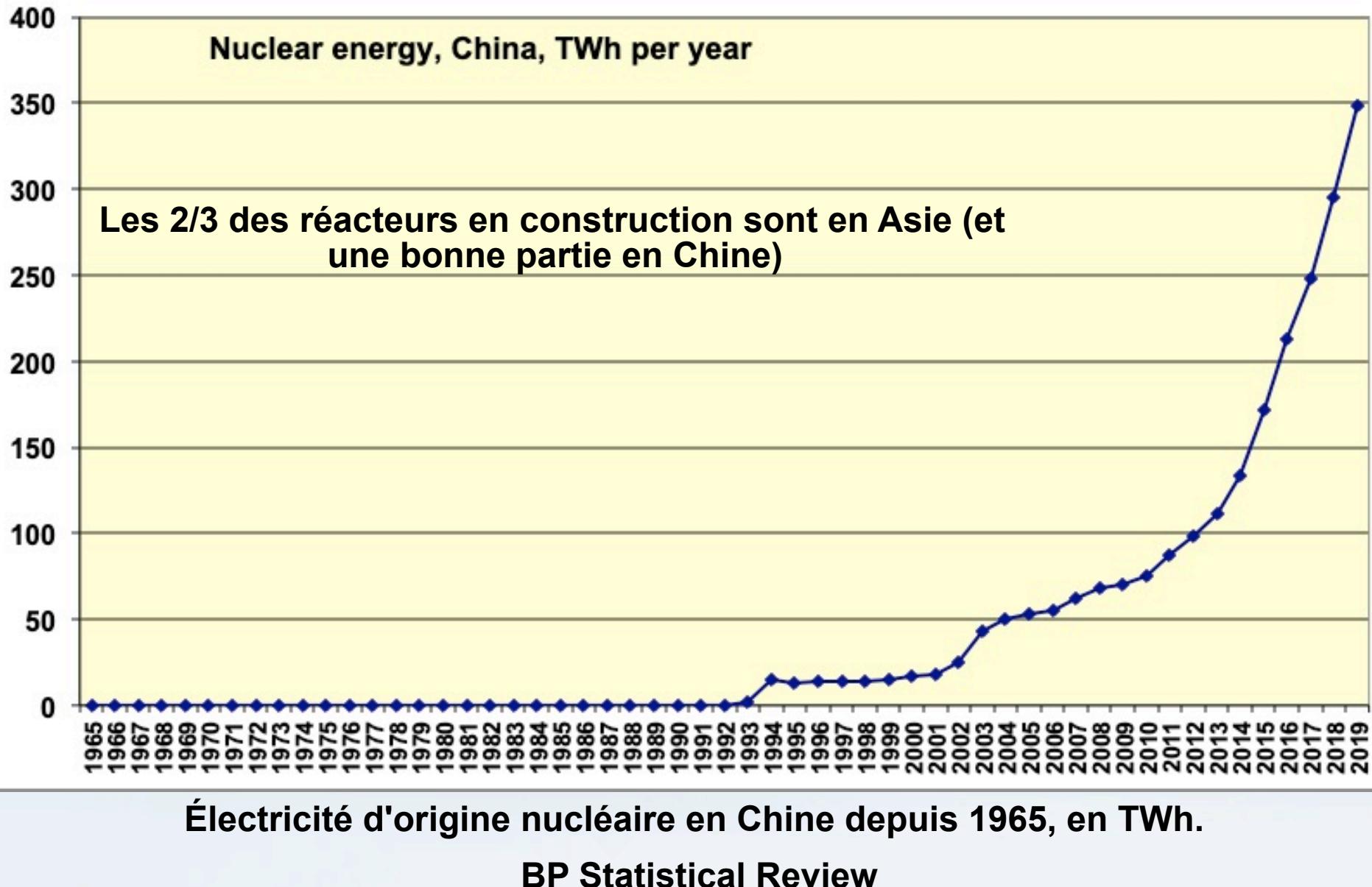
Source BP Statistical Review

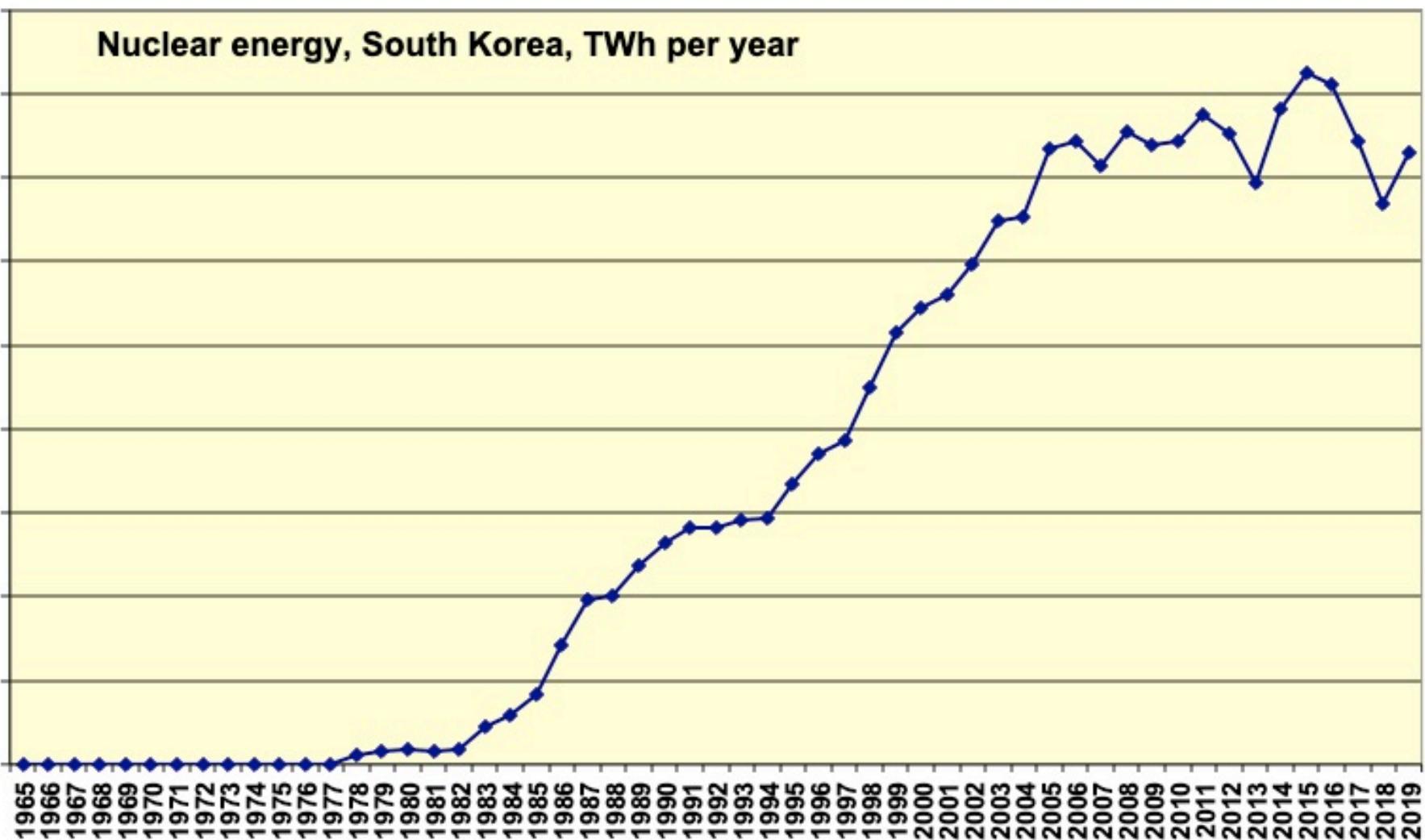
D'autres ont peu de plages mais quelques électeurs



Électricité d'origine nucléaire en Allemagne depuis 1965, en TWh.

Source BP Statistical Review

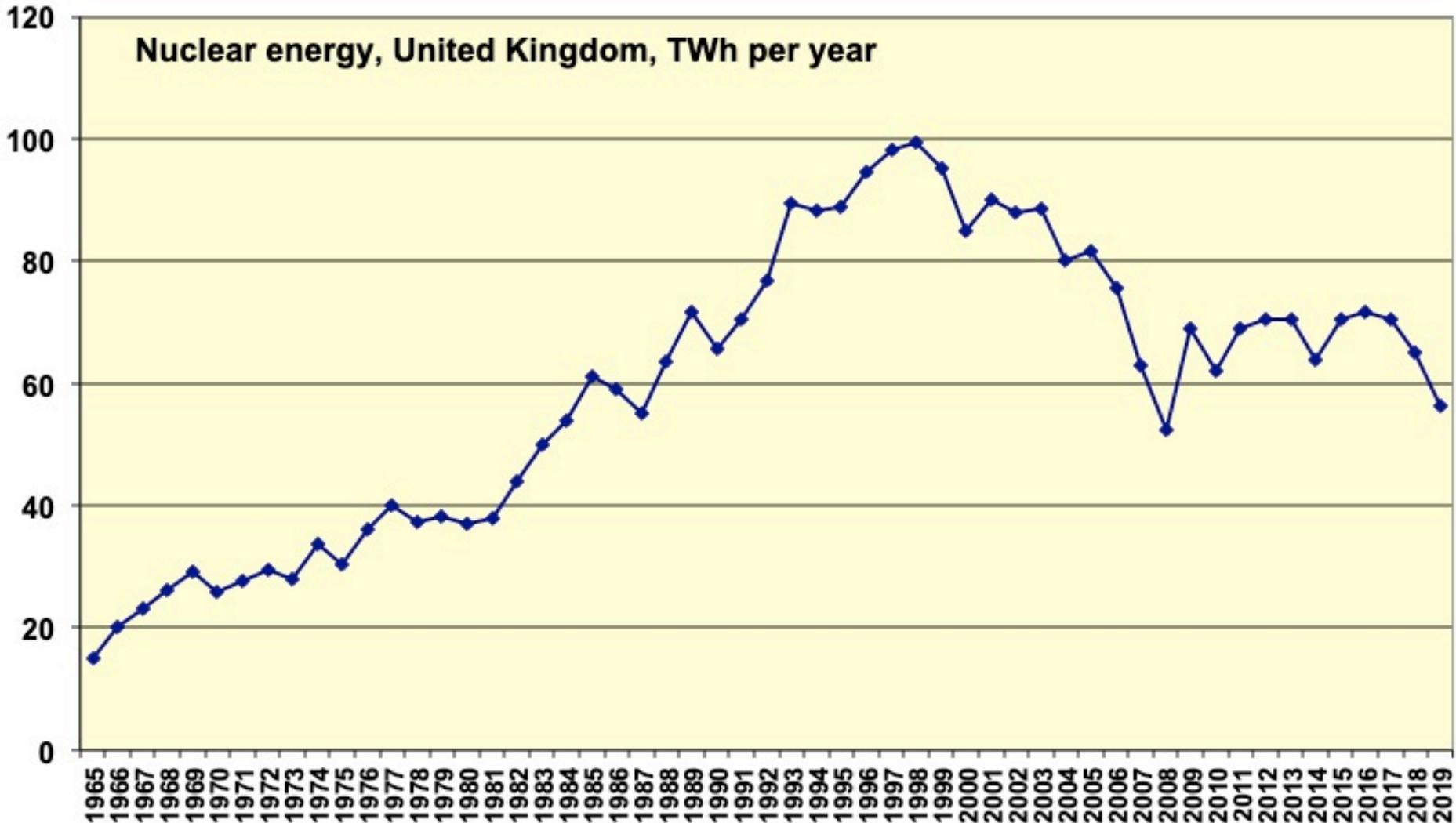




Électricité d'origine nucléaire en Corée du Sud depuis 1965, en TWh.

BP Statistical Review

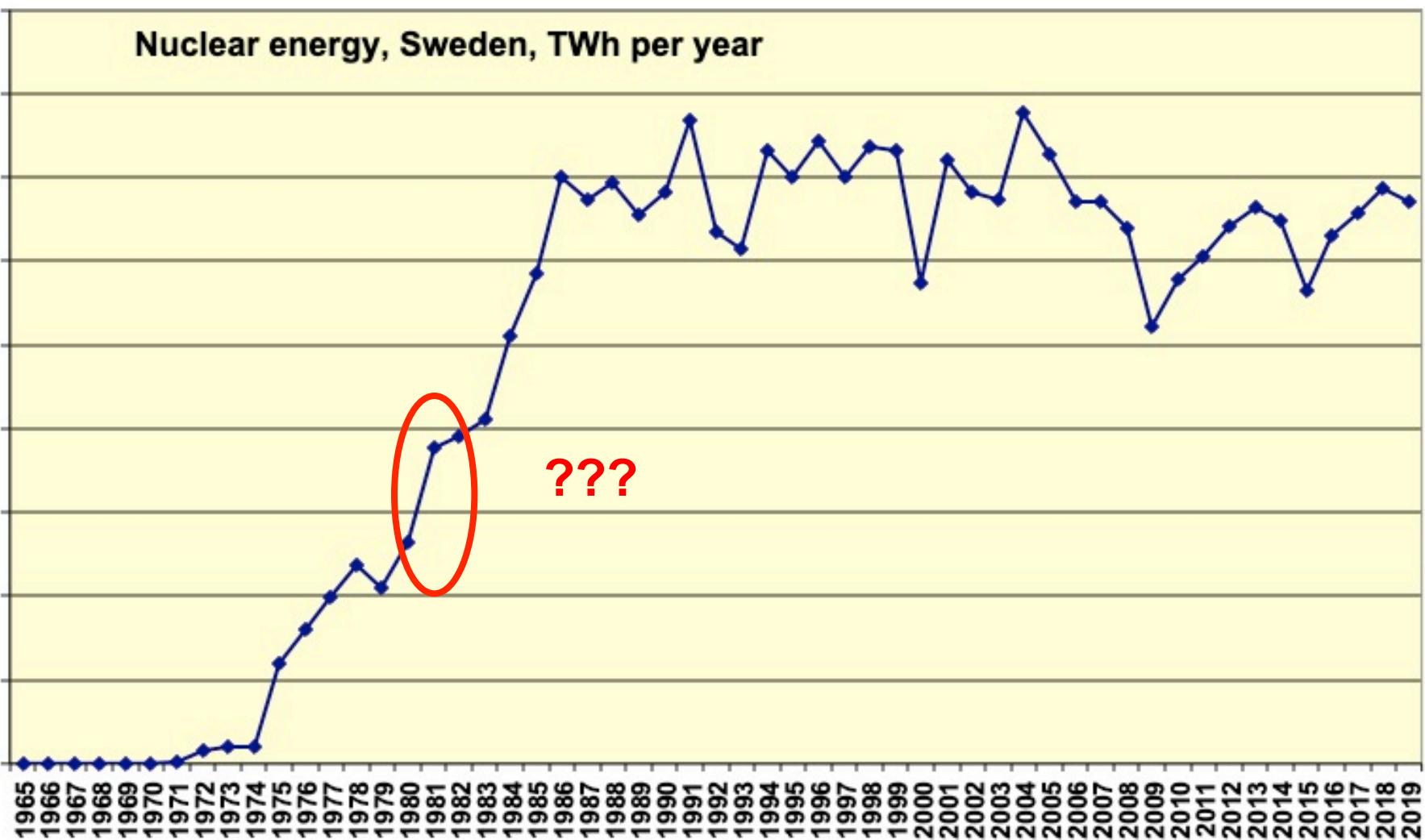
D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point



Électricité d'origine nucléaire en Grande Bretagne depuis 1965, en TWh.

BP Statistical Review

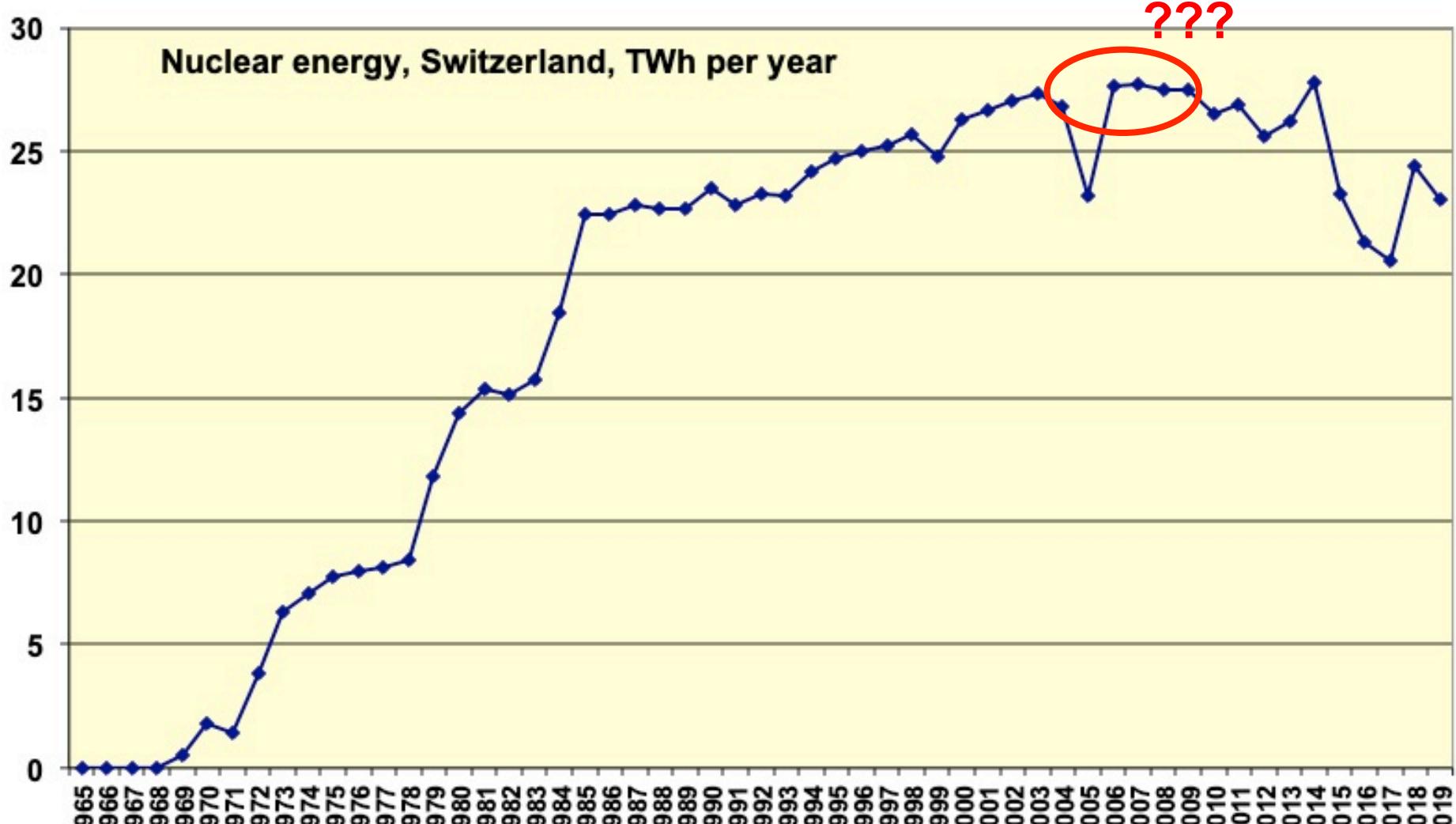
D'autres ont dit qu'ils feraient sans, sauf que...



Électricité d'origine nucléaire en Suède depuis 1965, en TWh.

BP Statistical Review

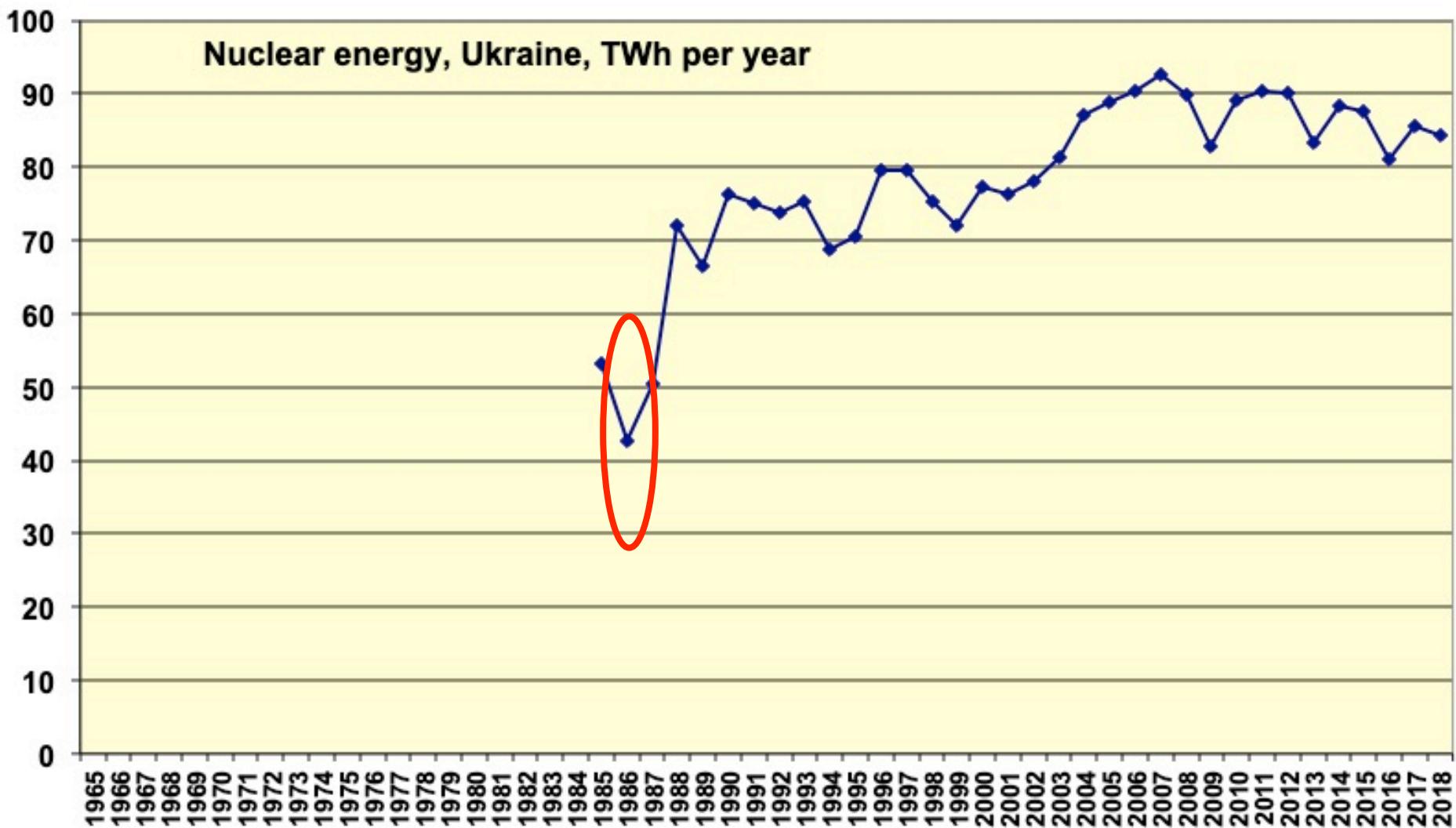
D'autres ont dit qu'ils aimaitent, et puis non, et oui, et non...



Électricité d'origine nucléaire en Suisse depuis 1965, en TWh.

BP Statistical Review

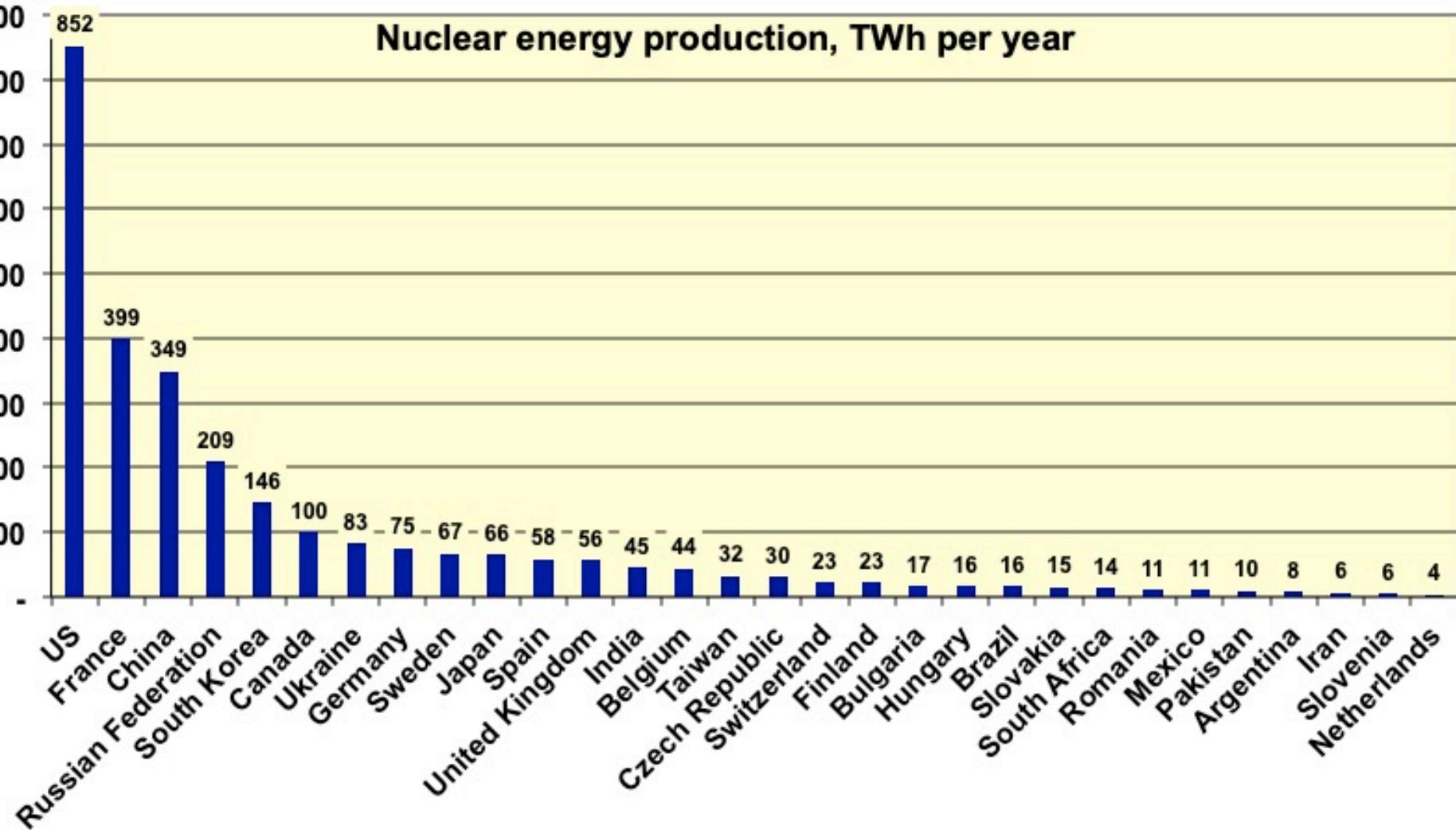
D'autres « explosent », puis « redémarrent »



Électricité d'origine nucléaire en Ukraine depuis 1985, en TWh.

Source : BP Statistical Review

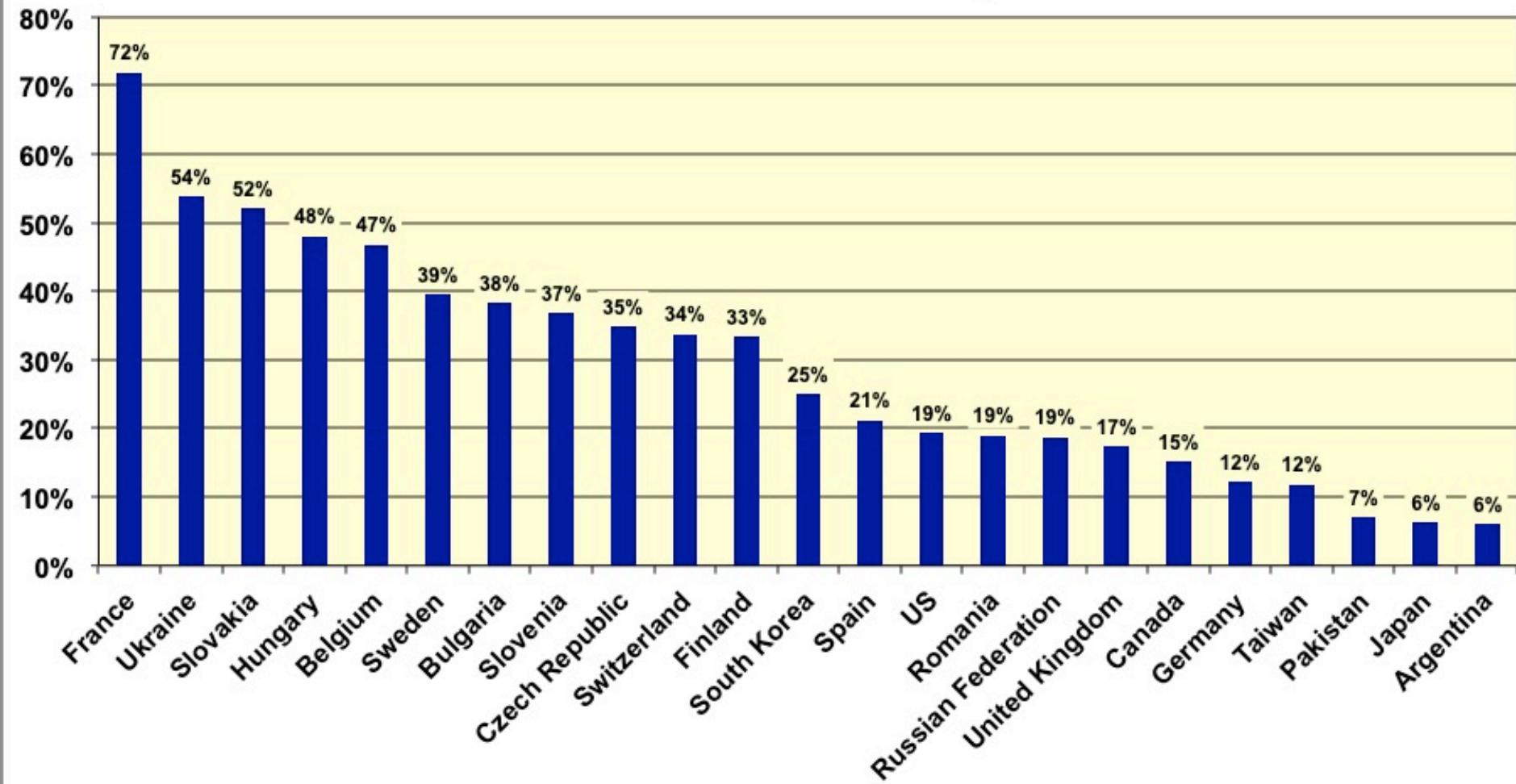
Atome, qui en fait finalement ?



Production nucléaire en TWh en 2019. Source BP Statistical Review

Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?

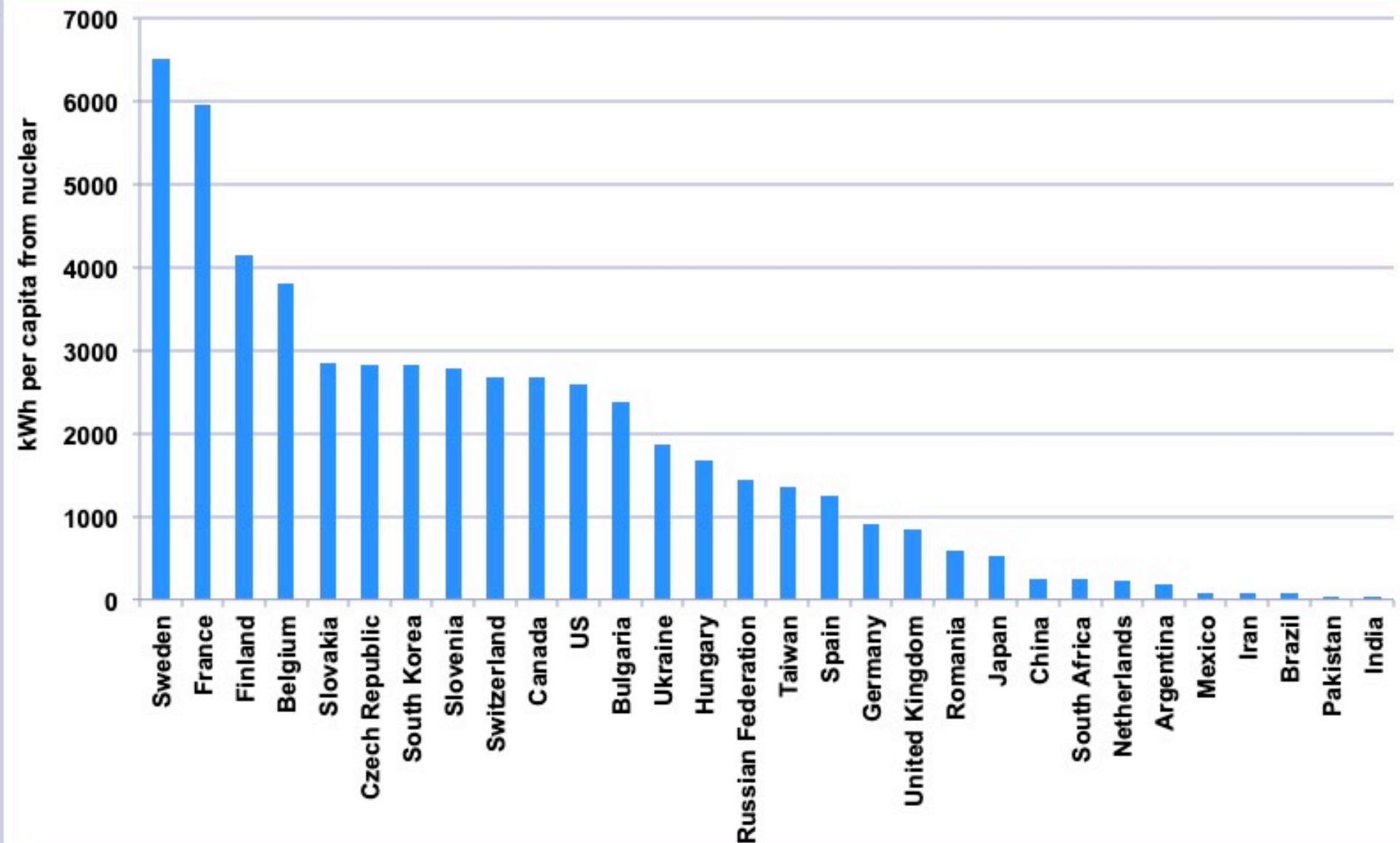
share of nuclear in electricity



% de nucléaire dans la production électrique en 2019

Source BP Statistical Review

Atome, qui en fait beaucoup par personne ?

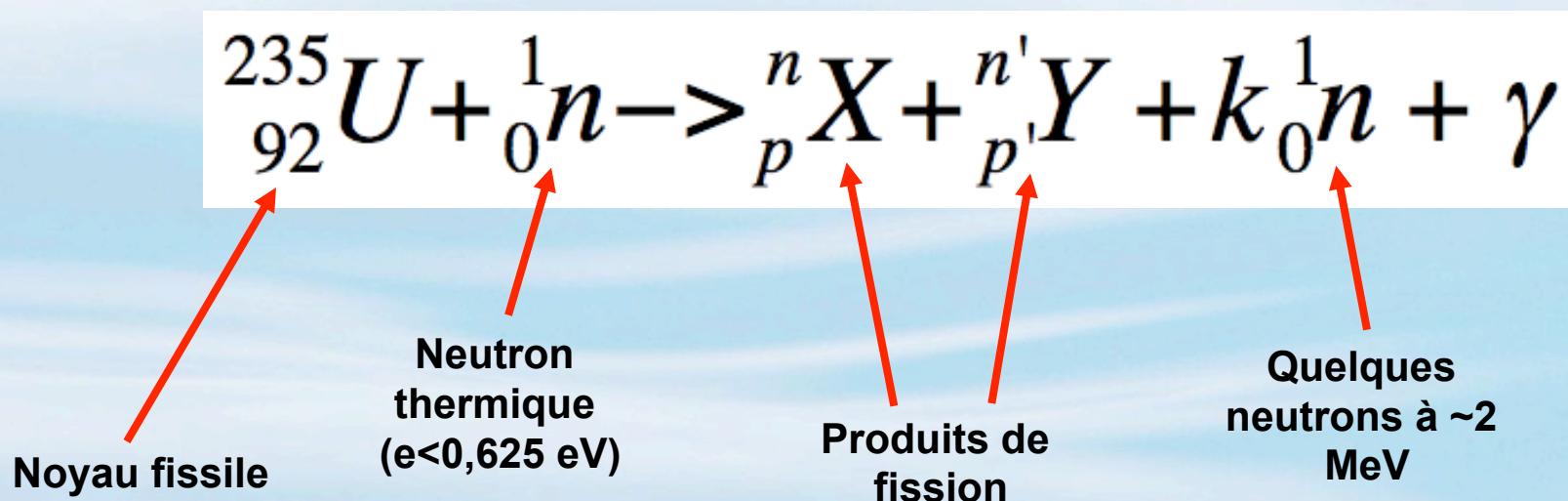


kWh nucléaires par personne en 2019. Données primaires BP Statistical Review

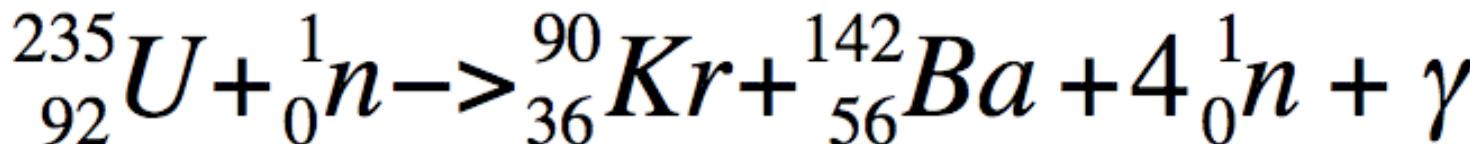
La fission consiste à exploiter l'énergie libérée par le fractionnement en plusieurs petits noyaux d'un gros noyau avec $Z > 89$

Cette fission peut intervenir spontanément (cas rare)

Elle peut intervenir après absorption d'un neutron (cas standard).
Exemple de l'uranium 235 :



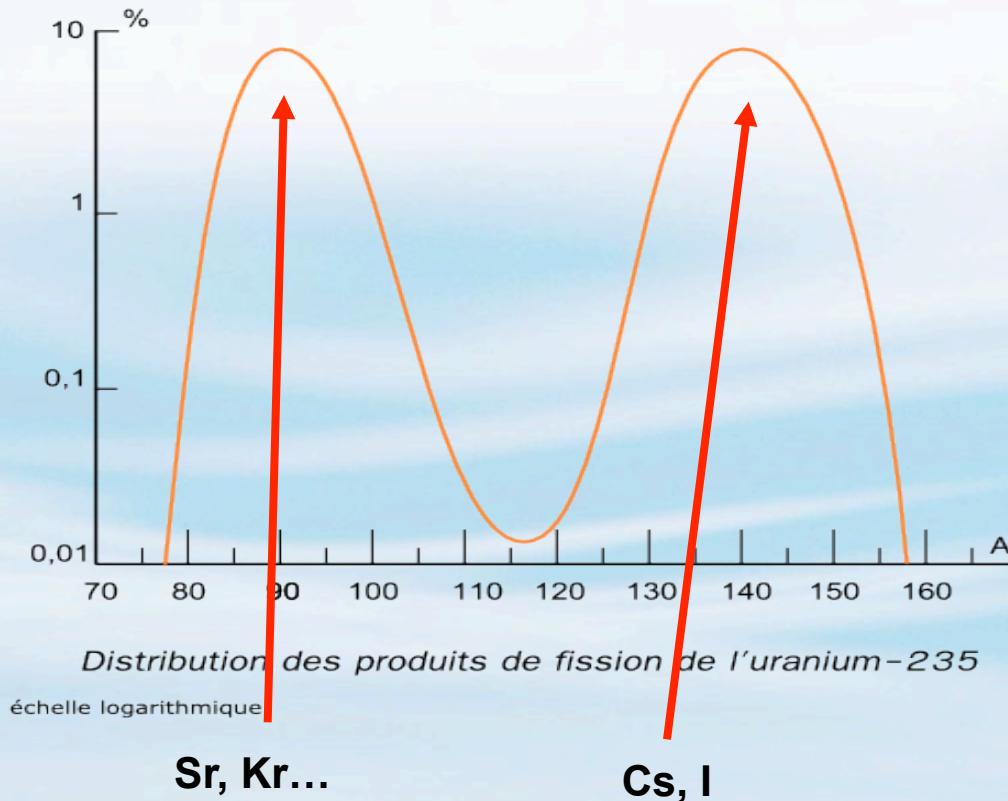
Exemple « pour de vrai » :



La fission, c'est le grand bazar...

Après une fission, on obtient :

Deux noyaux plus petits, porteurs d'énergie cinétique : les produits de fission

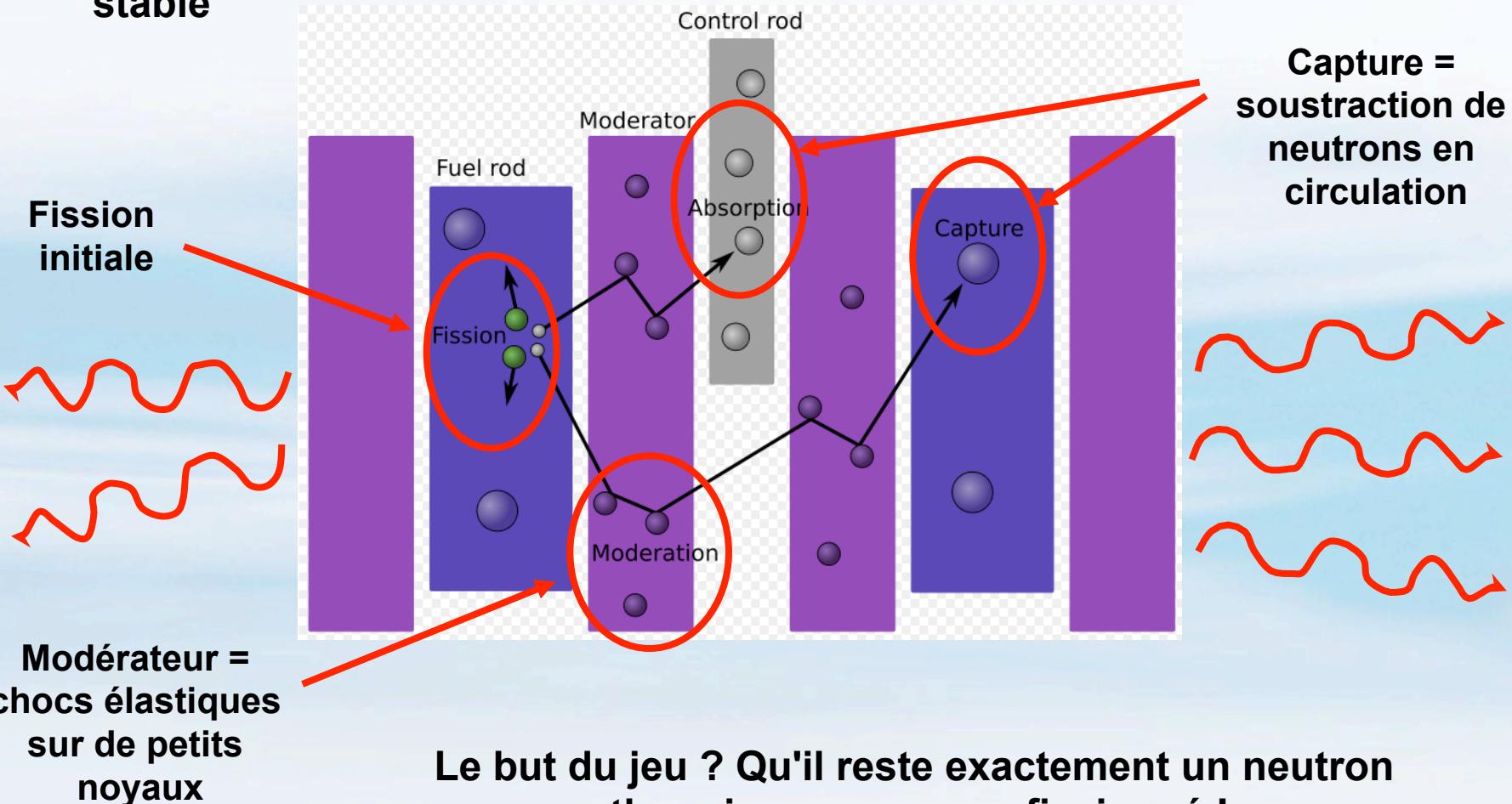


Leur demi-vie est généralement comprise entre quelques heures et quelques dizaines d'années, et leurs descendants sont souvent radioactifs eux-mêmes

Après une fission, c'est le grand bazar... (bis)

Après une fission, on obtient (2) :

Des neutrons, bien trop énergétiques pour être absorbés par les noyaux fissiles, et en trop grand nombre pour que la réaction soit stable



Après une fission, c'est le grand bazar... (ter)

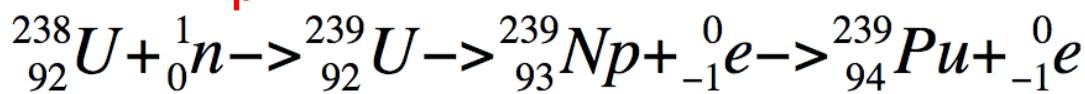
Après une fission, on obtient encore :

Du rayonnement gamma

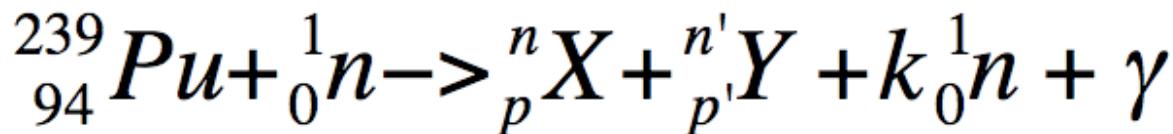
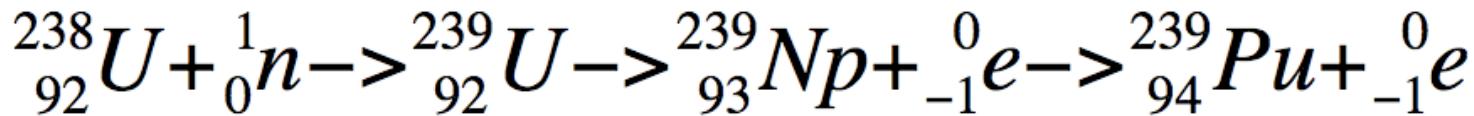
Des actinides, dont le plutonium, dont les isotopes impairs sont fissiles

1 H															2 He		
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

$n+\beta$



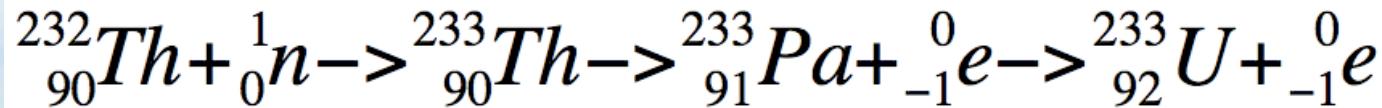
Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



Il faut donc 2 neutrons au lieu d'un pour passer du noyau fertile à la fission

Dans le cas du Pu, le neutron de fission est « rapide » ($e > 0,9$ MeV)

Il existe deux isotopes fertiles présents dans la nature : U238 (99,3% de U total) et Th232 (100% de Th)



La réaction fournit les neutrons permettant de « régénérer » du combustible à partir de l'isotope initial : on parle donc de « **surgénérateur »**



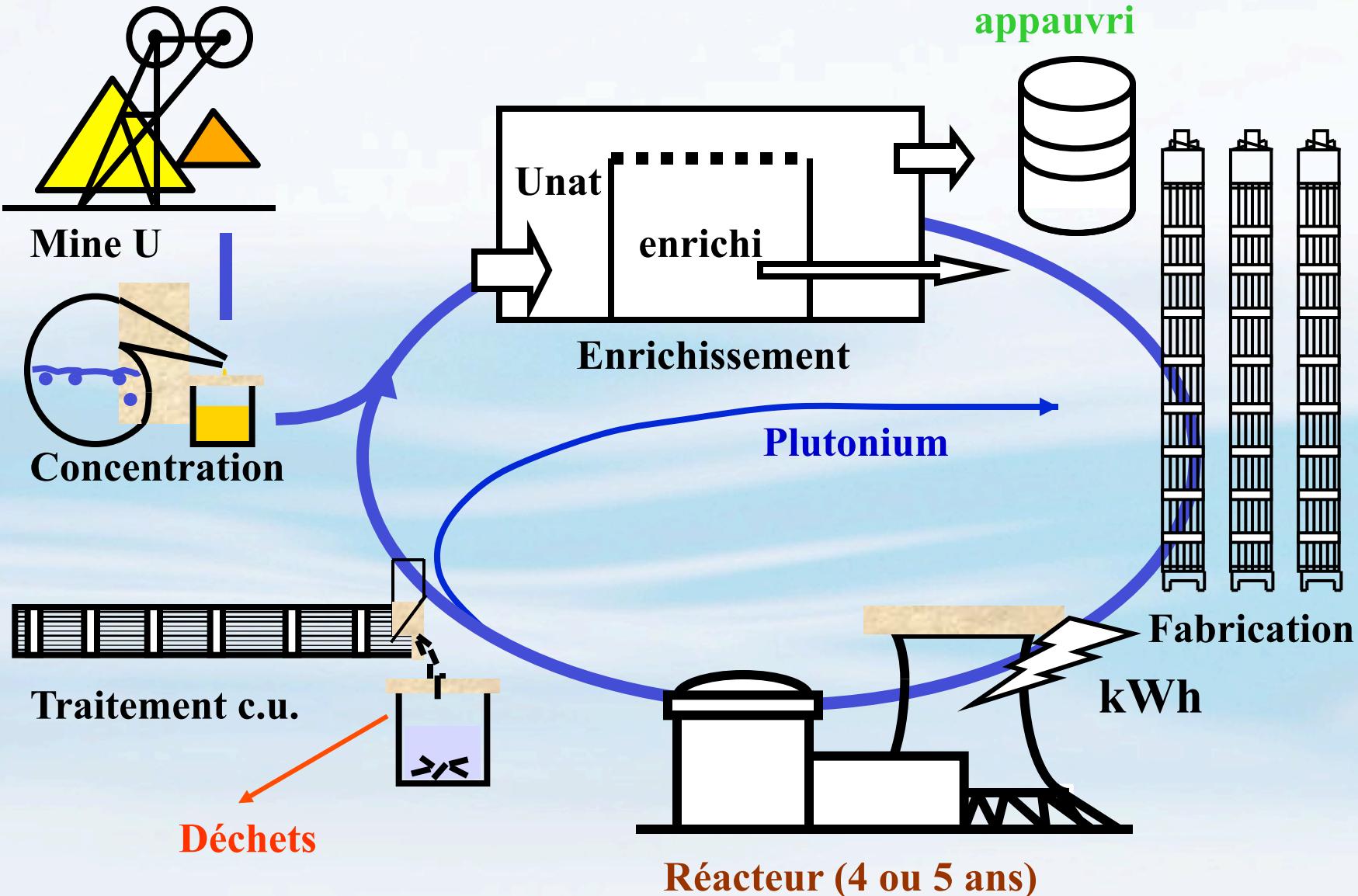
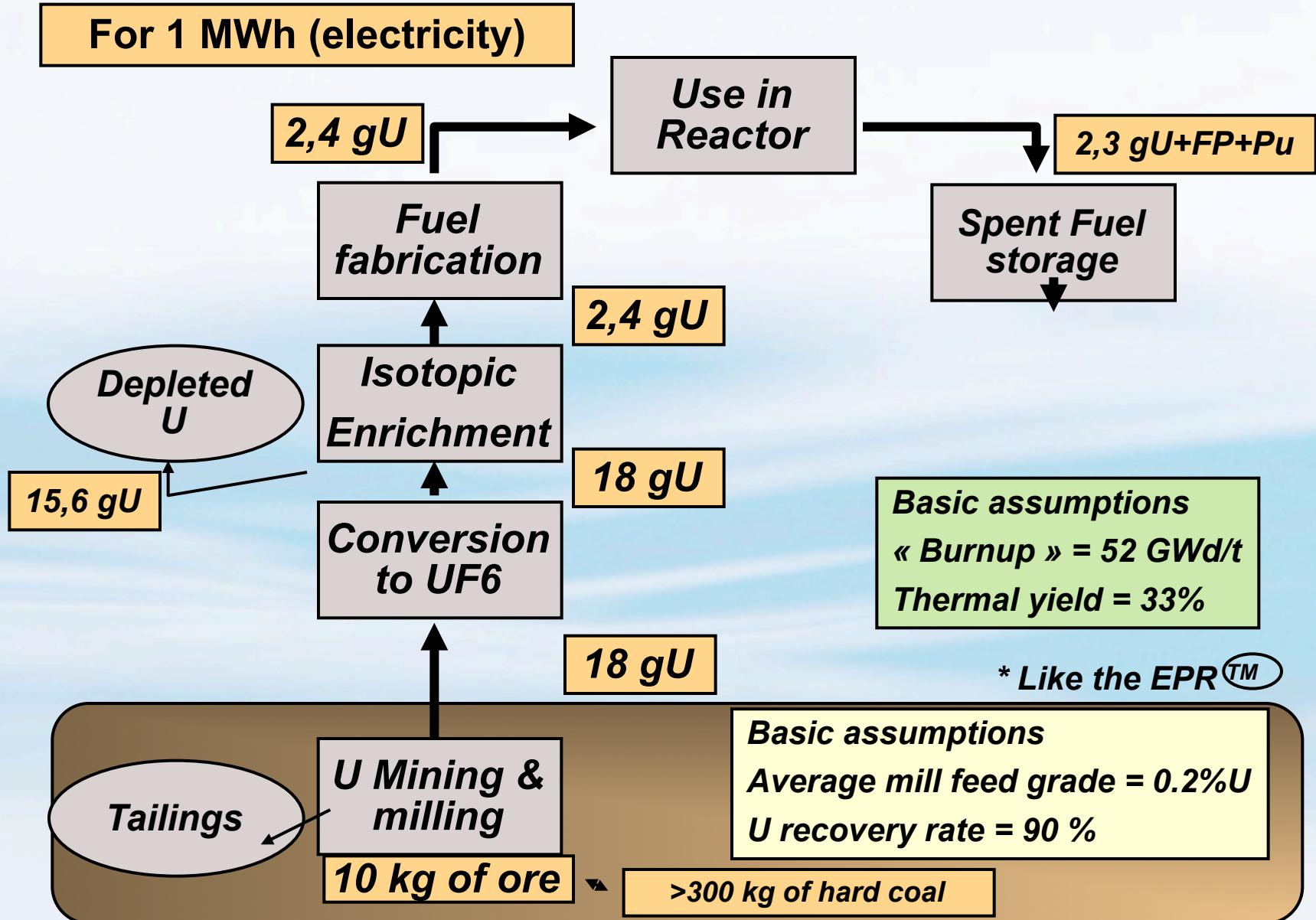
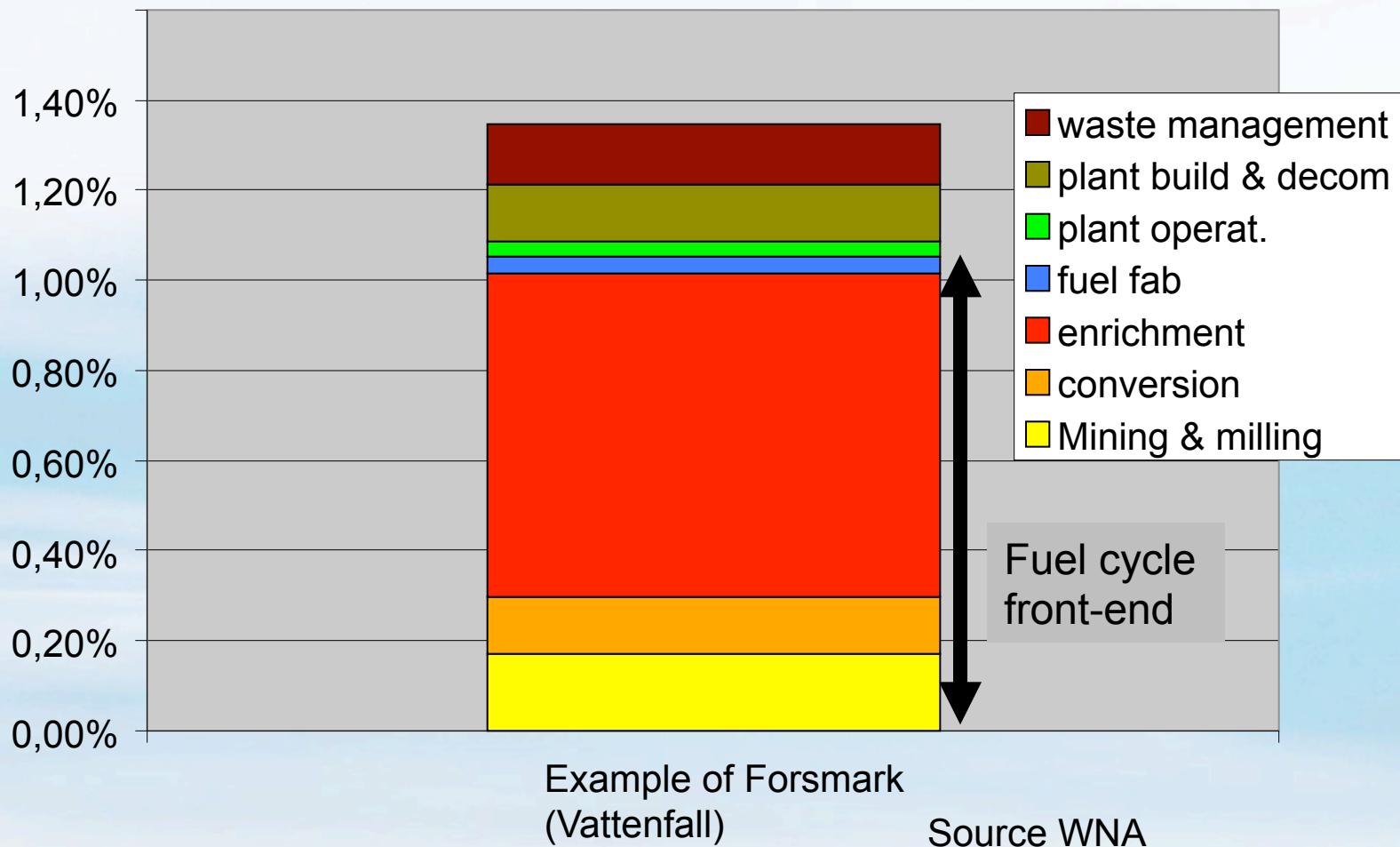


Illustration Bertrand Barré

Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids

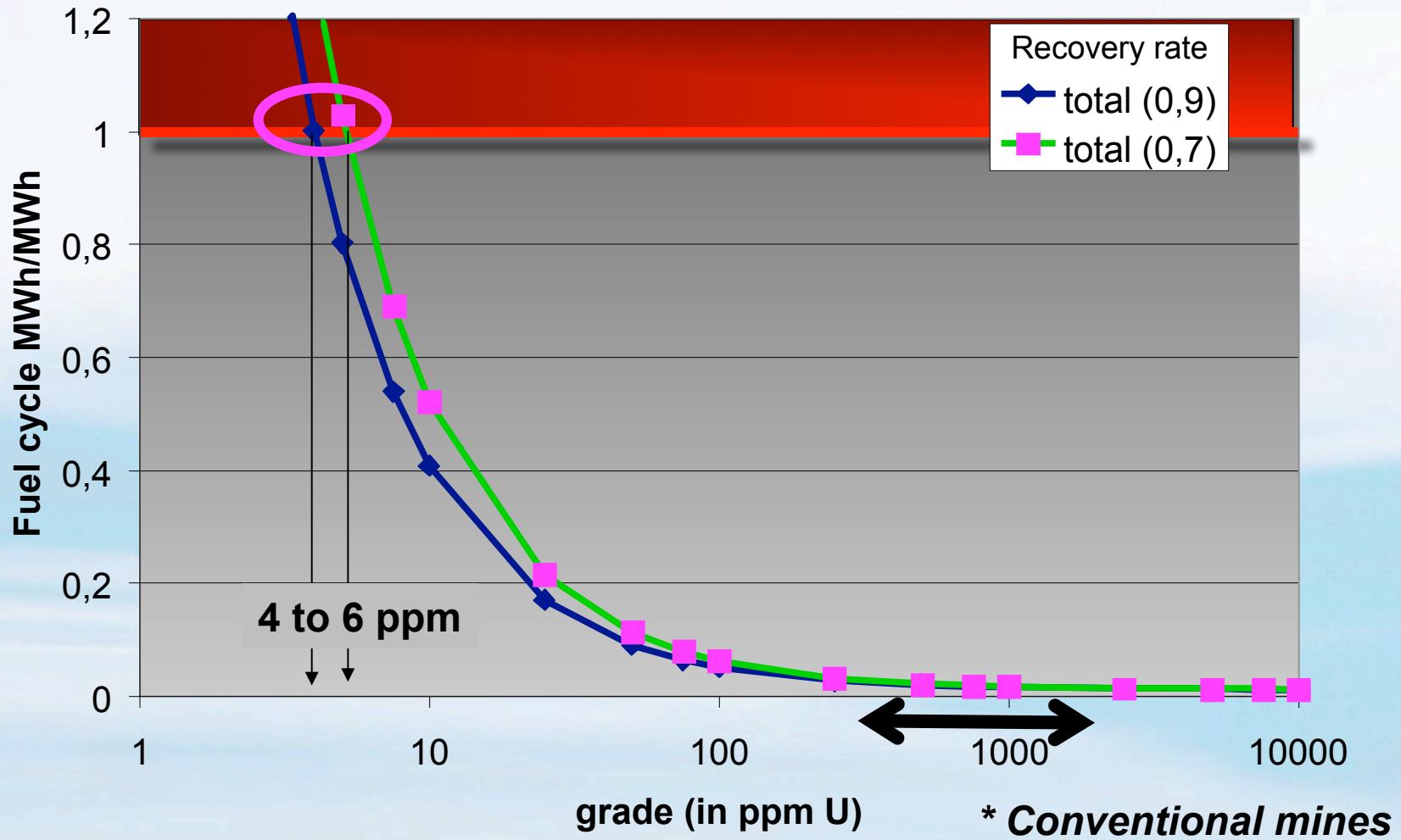


Combien de kWh pour combien de kWh ?



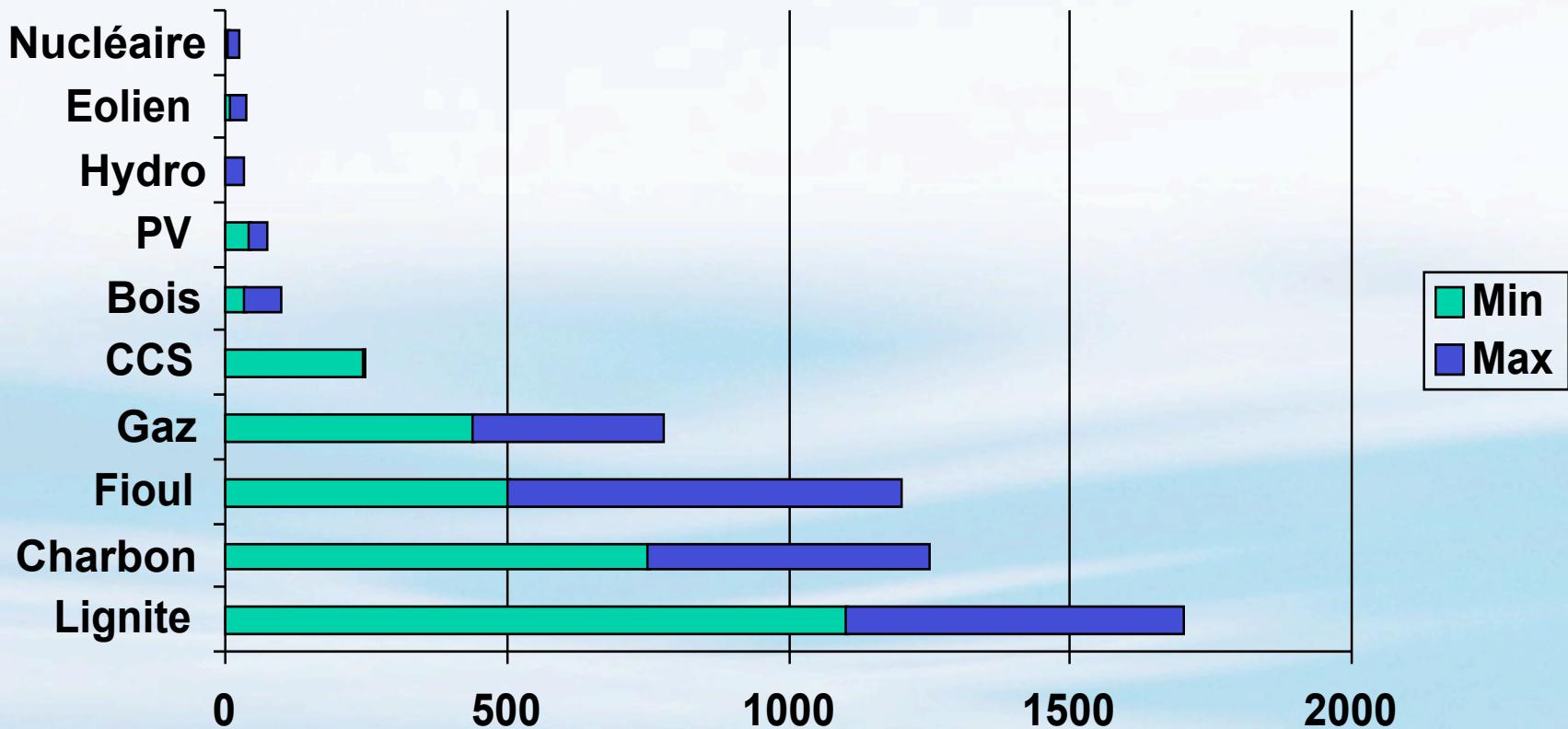
% de l'énergie finale du réacteur consommée par chaque étape de préparation du combustible. Source Areva

kWh or not kWh : il faut compter...



Consommation d'énergie du cycle du combustible en fonction de la teneur du mineraï en U. Source Areva.

CO₂ or not CO₂ : il faut compter...



Fourchette des évaluations des émissions de CO₂ par kWh électrique selon les modes de production.

Mais le public ne compte pas toujours !

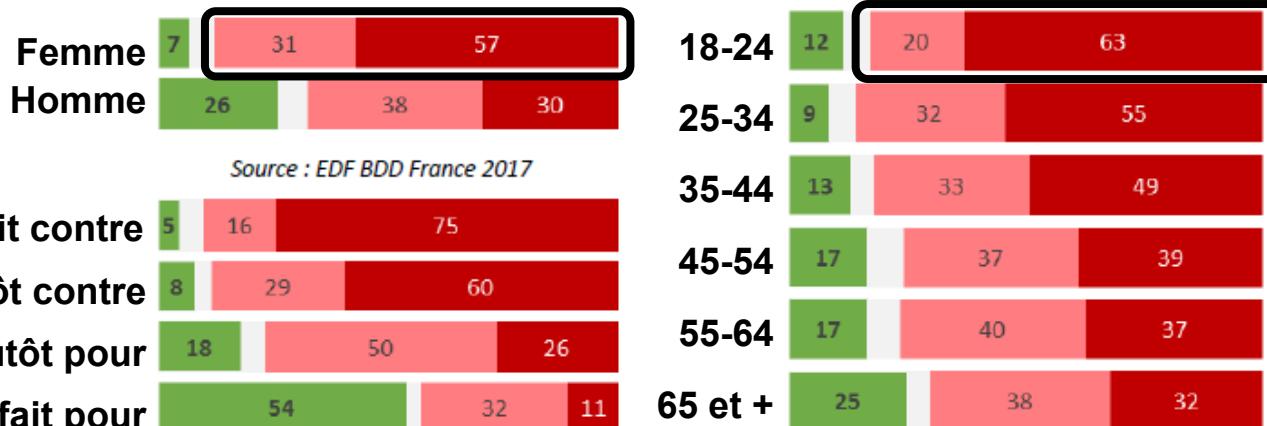
Pour chacun des éléments suivants, indiquez si, selon vous, il contribue à l'effet de serre (au réchauffement de l'atmosphère) : - les centrales nucléaires ?



!!!

Figure 12 : distribution des réponses selon l'année d'interrogation

Lecture : en 2017, 44% des personnes de 18 ans ou plus vivant en France estiment que les centrales nucléaires contribuent beaucoup à l'effet de serre.



!!!

Tout à fait contre

Plutôt contre

Plutôt pour

Tout à fait pour

Figures 13a, 13b et 13c : distribution des réponses selon le sexe, la réponse à la question de la Fig. 8 (item 'énergie nucléaire'), et la tranche d'âge

Lecture : en 2017, 75% des personnes de 18 ans ou plus vivant en France et se prononçant tout à fait contre l'utilisation de l'énergie nucléaire en France estiment que les centrales nucléaires contribuent beaucoup à l'effet de serre.

Le nucléaire, parfois sujet préféré des journalistes

Vrais ou faux problèmes, le nucléaire a nourri et continue à nourrir de nombreux débats parfois houleux :

Déchets

Accidents

Maladies

Coût

« opacité »

Pas assez d'uranium...

On joue au petit jeu des réserves ?

		CATEGORY of Uranium resources (million tons = Mt)			
		Conventional		Unconventional	
		Identified (deposits)	Undiscovered		
Cost of recovery \$/lbU308		Reasonably Assured Resources	Inferred Resources ①	Prognosticated Resources ②	Speculative Resources ③
\$/lbU308	< 15	1.95	0.80		
	15 - 30	0.70	0.36	1.7	4.6
	30 - 50	0.65	0.29	0.82	
	> 50	-	-	?	2.9
Subtotal		3.30	1.45	2.52	7.5
General total		4.75		10.0	
General total of conventional resources: 14,750 000 t World demand in 2006: less than 70,000 t Resources: > 200 times 2006 demand					

Équivalent du 1P

≈ Équivalent du 2P

Total haut de fourchette : > 30 à 40 Mt

Source AREVA

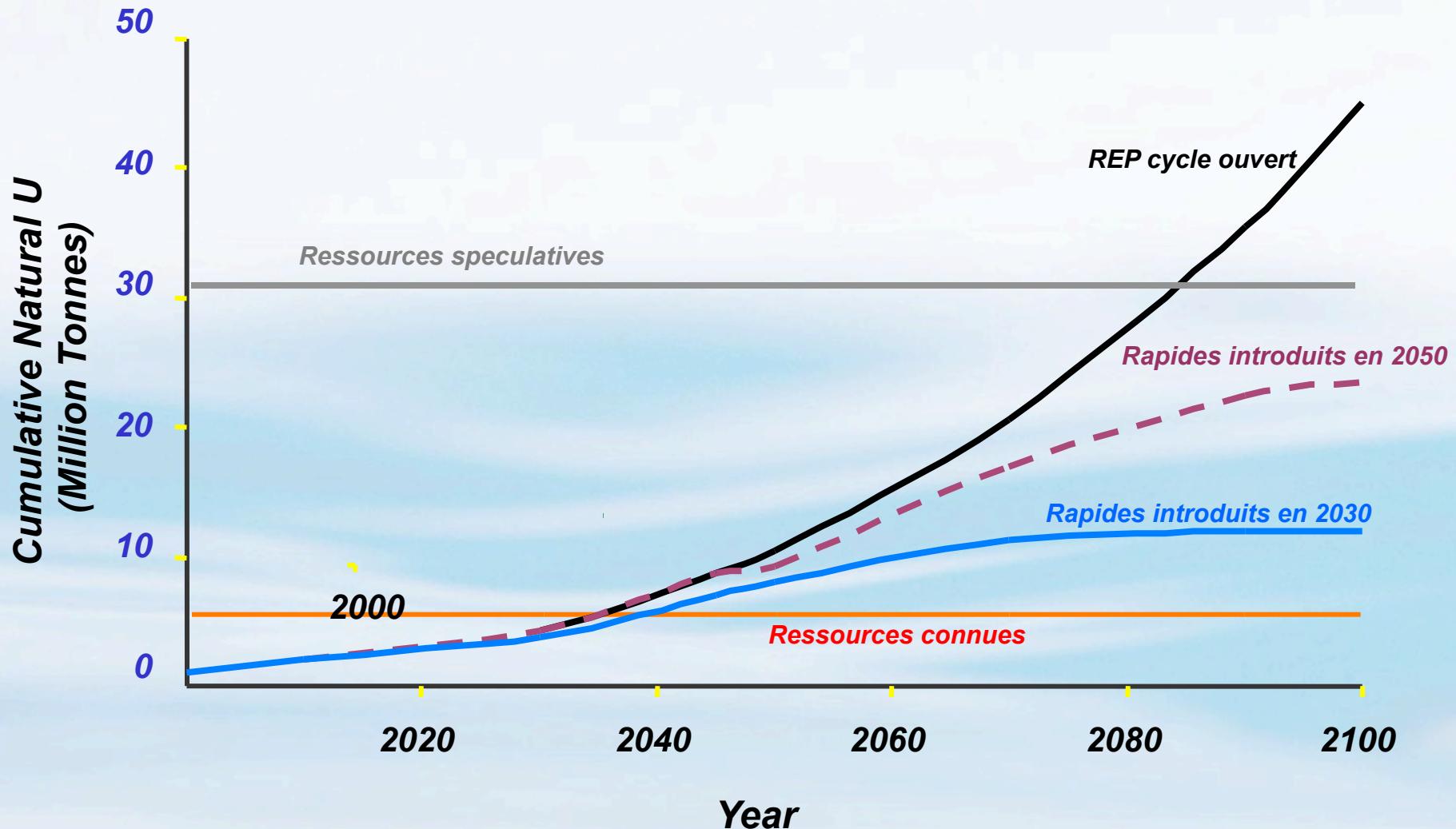
- ① Based on direct geological evidence
- ② Based on indirect geological evidence
- ③ Extrapolated values

Unconventional

15 to 25

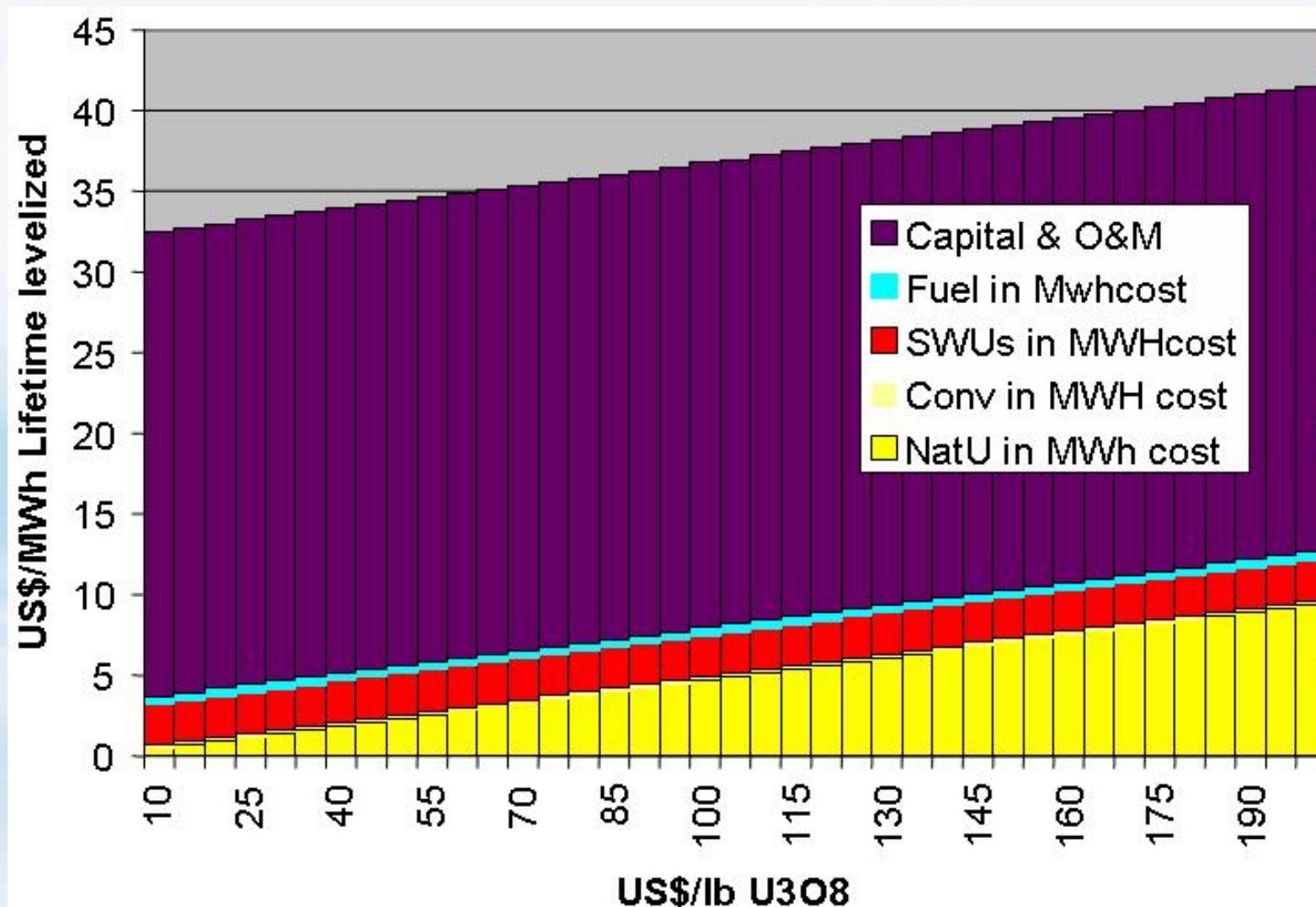
Phosphates, eau de mer...

On joue au petit jeu des exponentielles ?



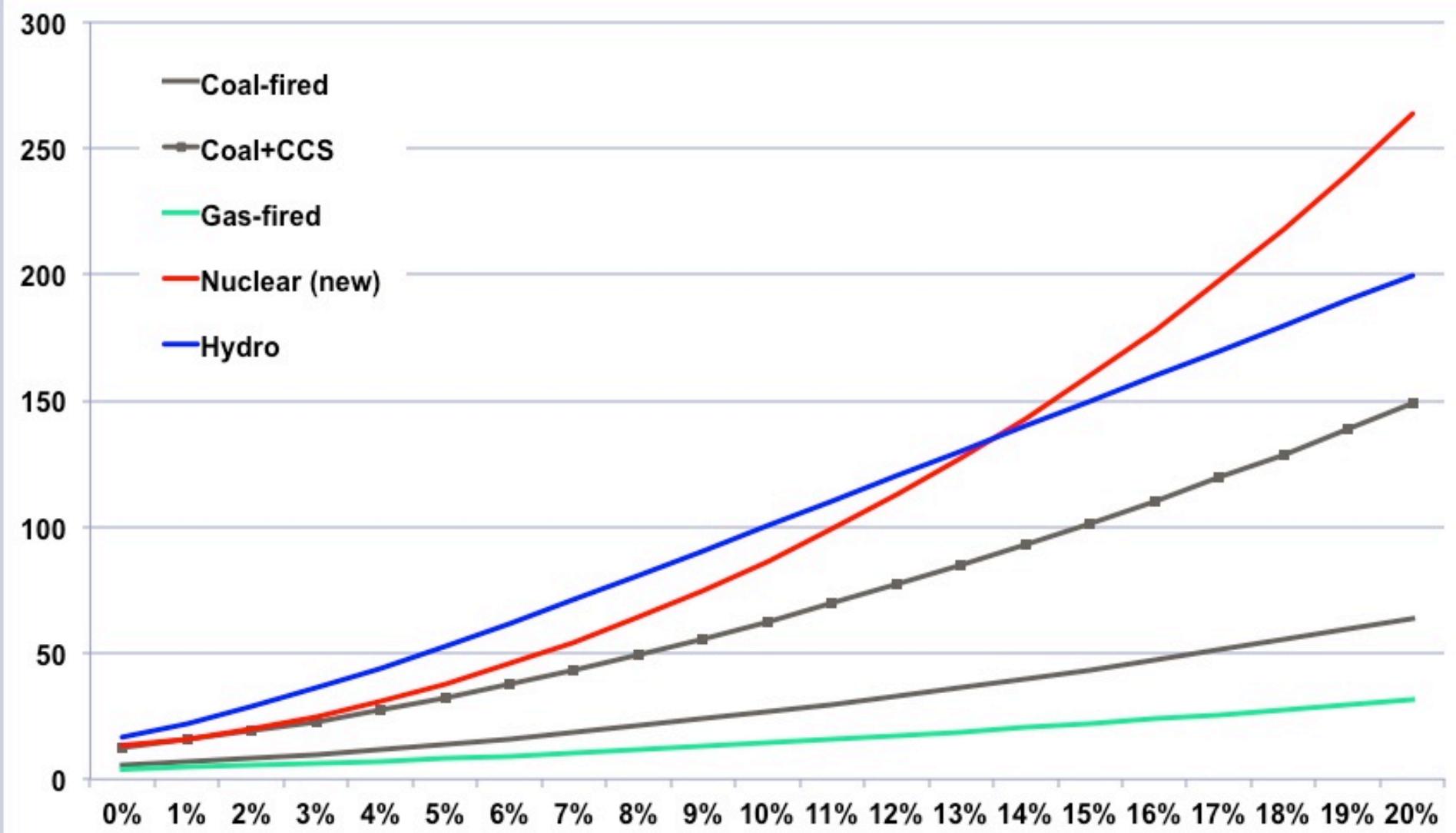
« Durabilité » des réserves d'U si le nucléaire se développe.
Source CEA

Le kWh nucléaire est sensible au prix de l'U, mais pas trop



Sensibilité du kWh nucléaire des centrales en opération au prix de l'Uranium (\$ par livre de U₃O₈). Source AREVA

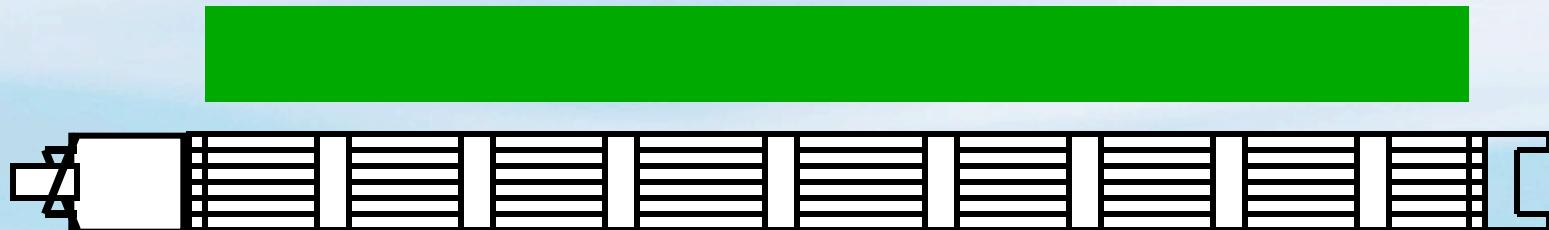
Bien plus important : le cout de l'argent



Part de l'investissement initial dans le cout du kWh en fonction du cout du capital. Calculs de l'auteur

Combustible neuf

Uranium (4% ^{235}U) : 500 kg



Uranium (0,9% ^{235}U) : 435 kg

Pu : 5kg

PF* : 20 kg

recyclables

Combustible usé

**(et quelques Actinides mineurs)*

Illustration Bertrand Barré

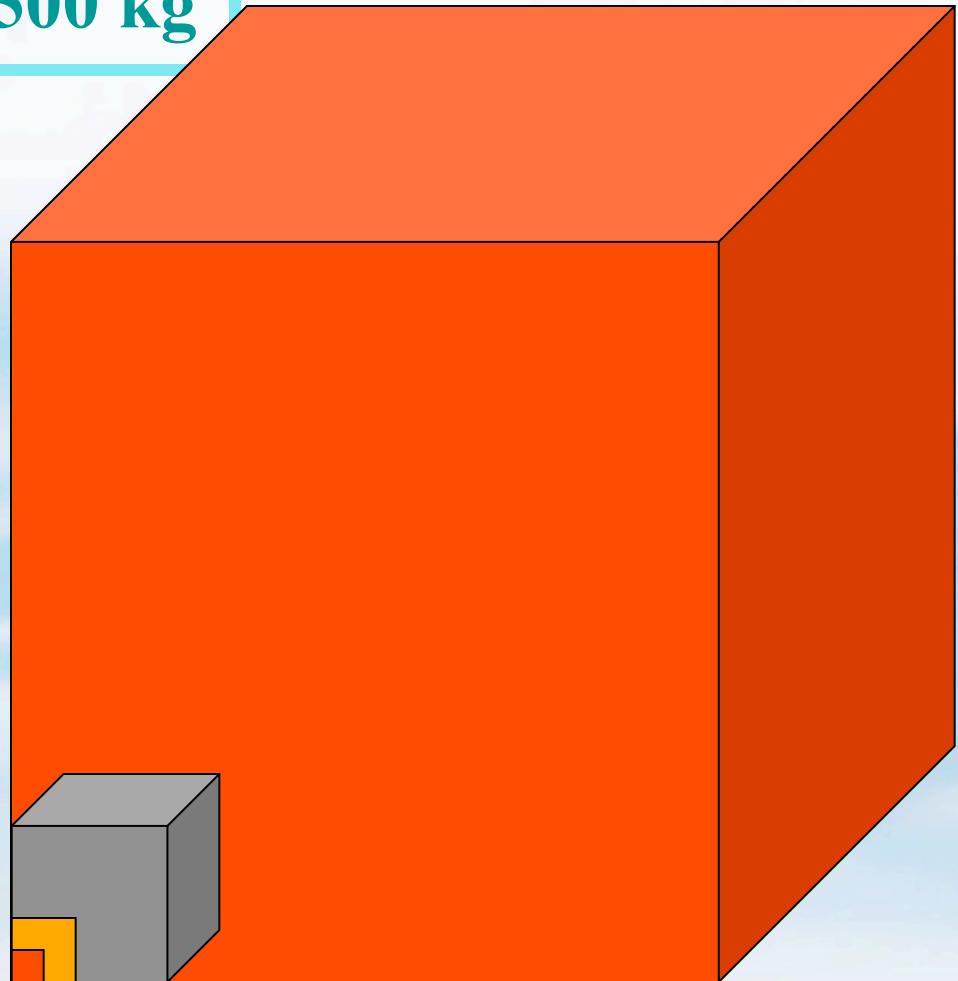
Déchets industriels : 2 500 kg

dont déchets toxiques :
~100 kg

Déchets nucléaires
moins de 1 kg

dont vie longue : 100g

dont HA : 10g

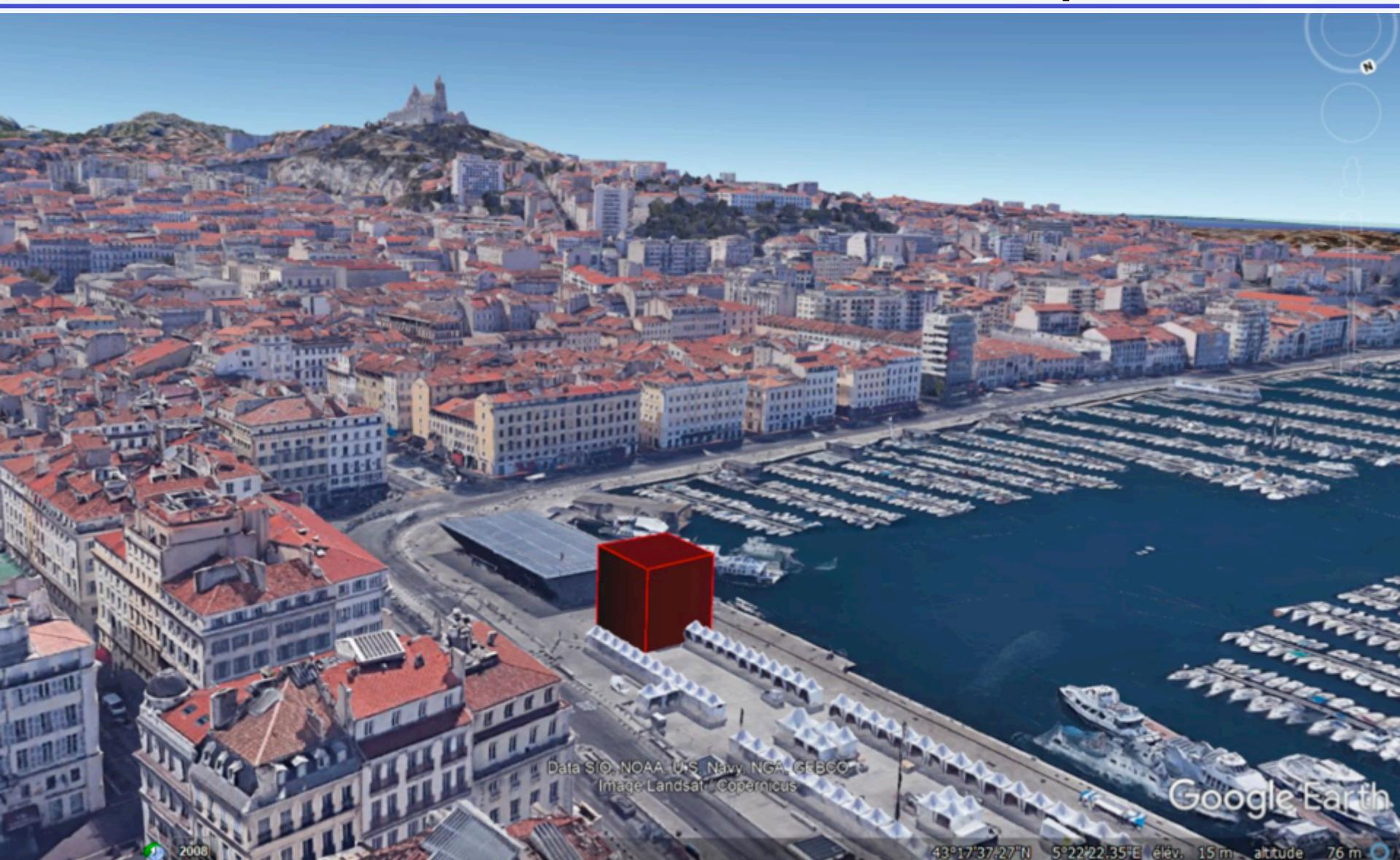


Production de déchets par Français(e) et par an



Stockage faible activité à Soulaines





Vue d'artiste du volume occupé par la totalité des déchets HALV existants en France

Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment

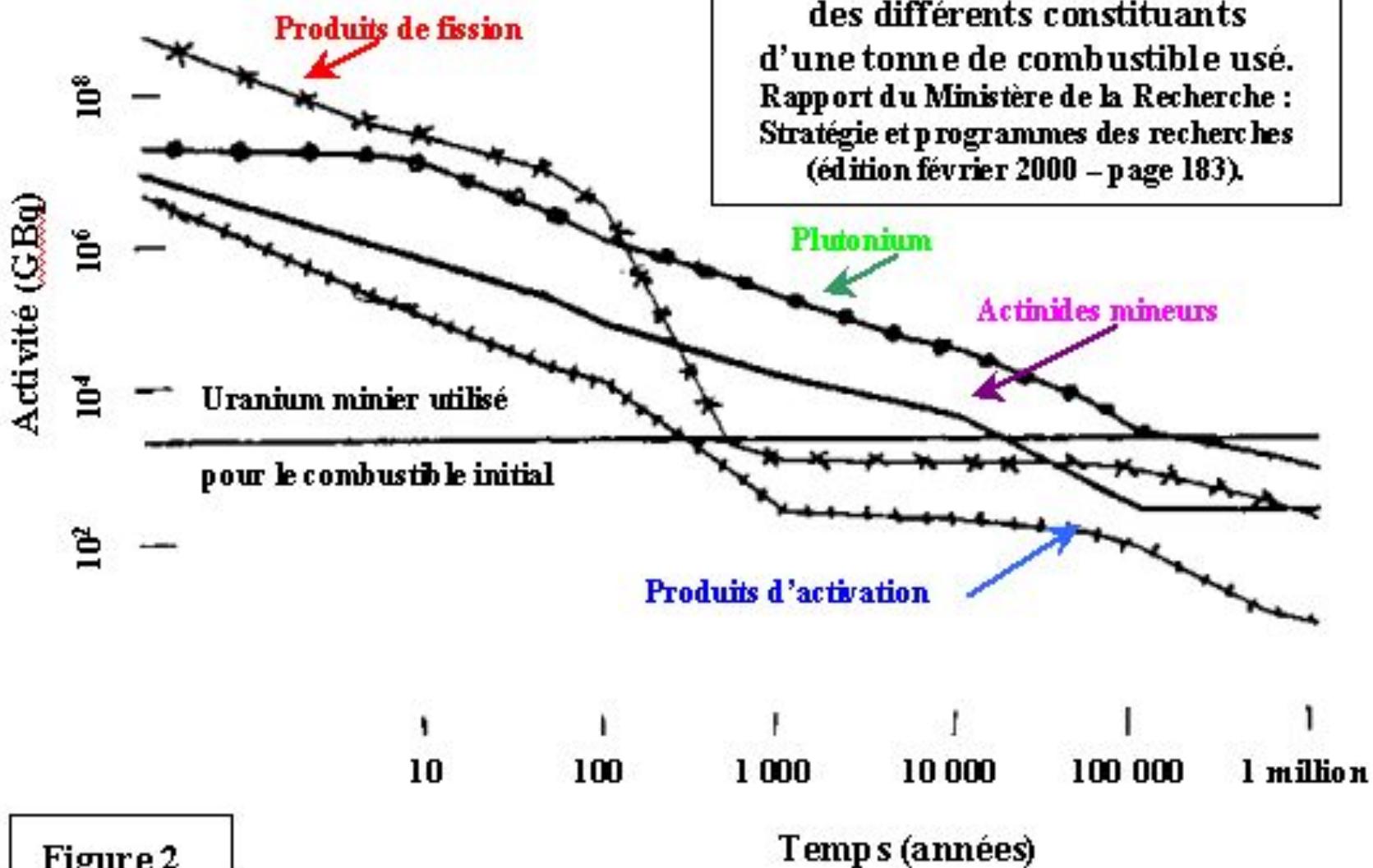
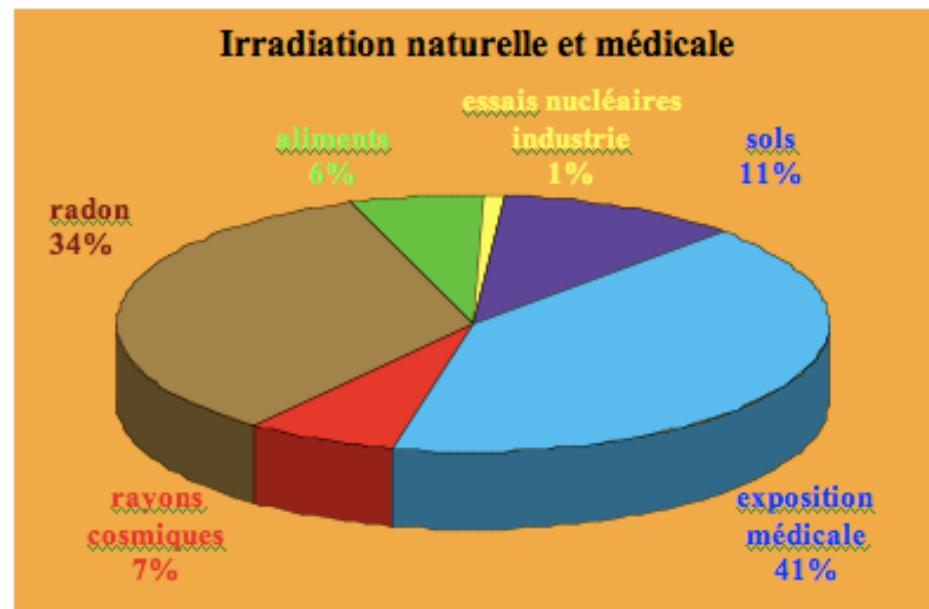


Figure 2

Nous sommes tous irradiés, c'est juste une question de dose



Variations de l'irradiation naturelle

rayons cosmiques :

- niveau de la mer 0,25 mSv/an
- Mexico (2240 m) 0,80 mSv/an
- La Paz (3900 m) 2,00 mSv/an

exposition externe aux rayonnements terrestres :

- moyenne 0,9 mSv/an
- Espírito Santo (Brésil) 35 mSv/an
- Maximum (Iran) 250 mSv/an
- Bouches du Rhône 0,2 mSv/an
- Limousin 1,2 mSv/an

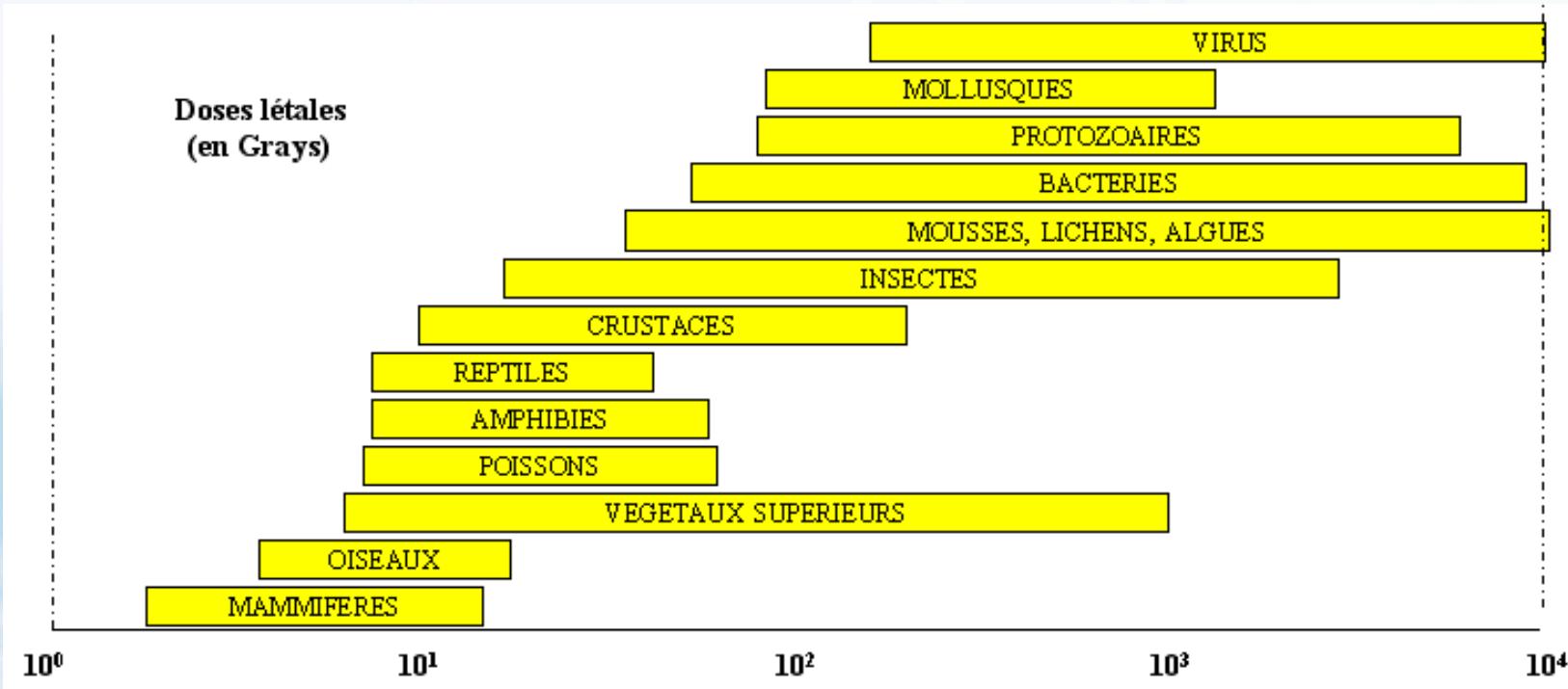
exposition interne liée aux eaux de boisson

- eau d'Evian 0,03 mSv/an
- eau de St Alban 1,25 mSv/an

En dessous de 200 mSv par an, pas d'effet documenté sur la santé

Décomposition du rayonnement reçu par Français et par an en mSv
Source André Aurengo, 2003

L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



Doses mortelles pour diverses catégories d'être vivants.
Source UNSCEAR

NB : 1 Gray = 1 joule par kg d'énergie transmise par le rayonnement

J'aime les Nations Unies... ou pas !



United Nations
Environment
Programme



World
Meteorological
Organization

Weather • Climate • Water



United Nations
Environment
Programme



World Health
Organization



United Nations Scientific Committee
on the Effects of Atomic Radiation

1988

1955

Les antinucléaires, en phase avec les Nations Unies ?

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION UNSCEAR 2013 Report

Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

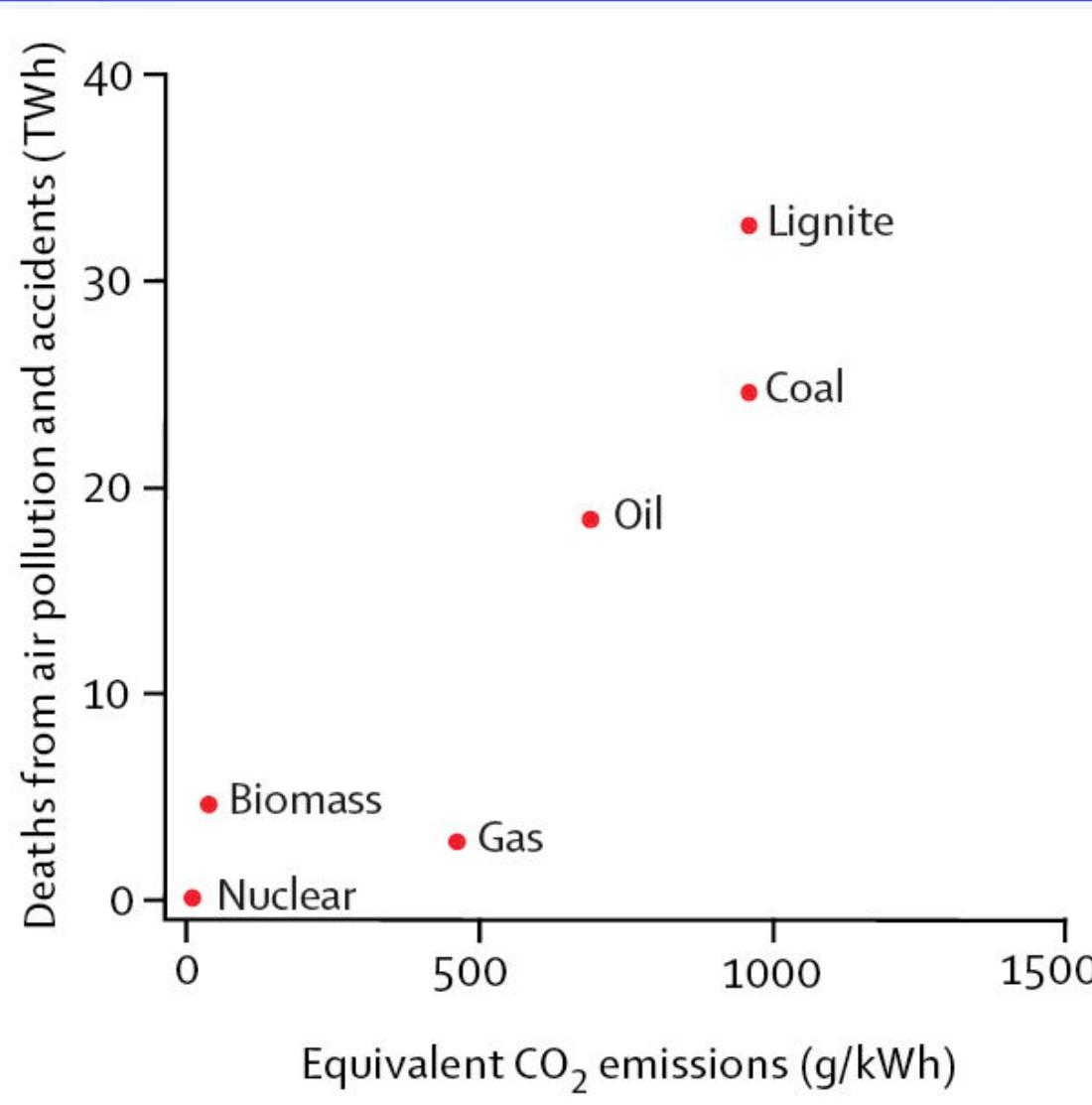
SCIENTIFIC ANNEX A:

Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident
after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami

321 pages (personne ne les lit)

Page 10 : The doses to the general public, both those incurred during the first year and estimated for their lifetimes, are generally low or very low. **No discernible increased incidence of radiation-related health effects are expected among exposed members of the public or their descendants.**

Les médecins sont-ils tous tombés sur la tête ?



Morts par TWh électrique (et émissions de CO₂ par kWh électrique) pour les divers modes de production électrique en Europe. Surprise !

Source : Electricity generation and health, Anil Markandya & Paul Wilkinson, The Lancet, 2007

L'avis qu'on en a ne colle pas toujours aux faits

Question n°7

« Parmi les événements catastrophiques suivants,
quel est celui qui vous a le plus marqué ? »

Évolution 2011-2019 (en %)

Fukushima (0 mort)

Tchernobyl (100 - 1000 morts)

Tsunami (\approx 20.000 morts)

Divers

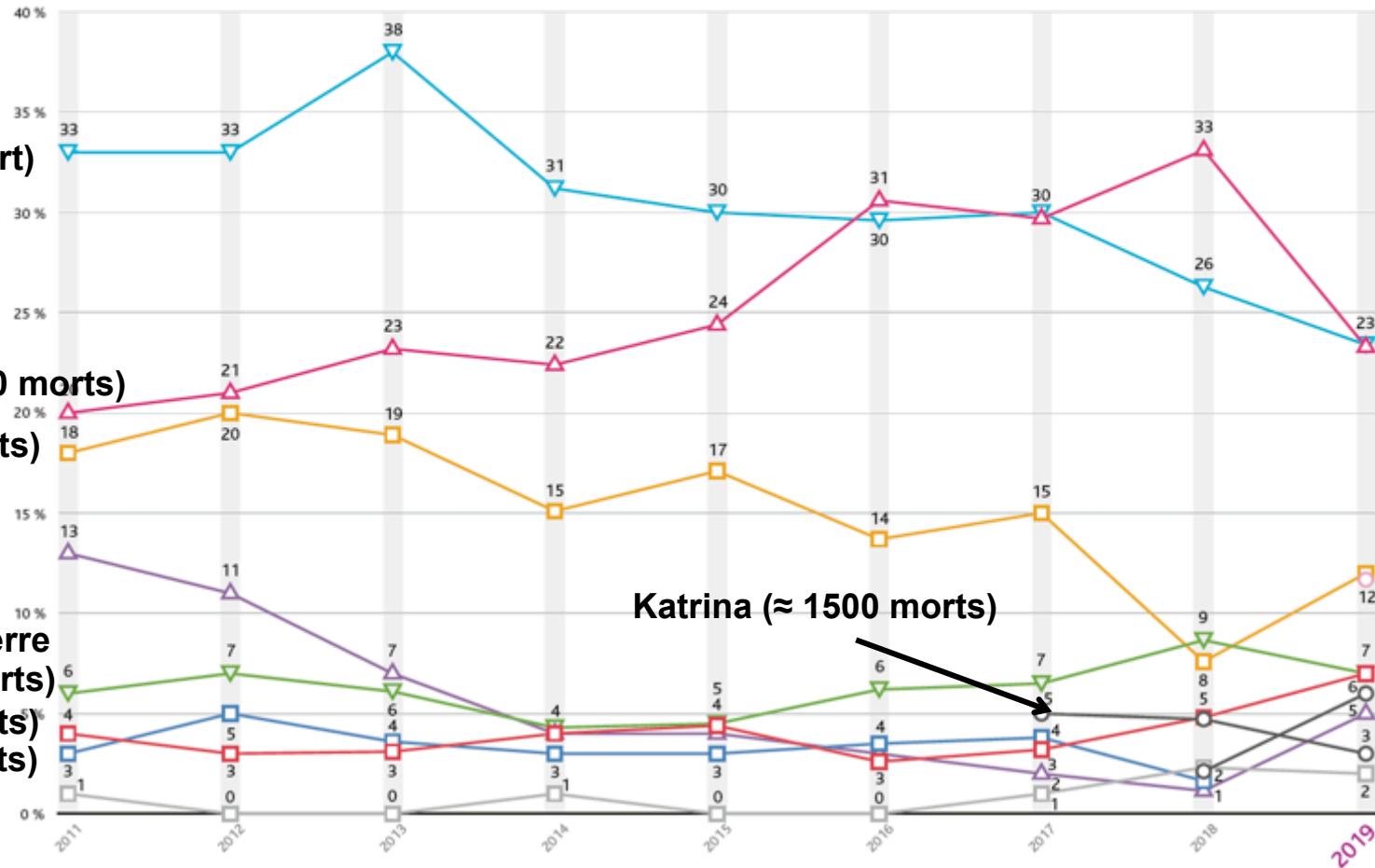
Tremblement de terre

Haiti (\approx 100.000 morts)

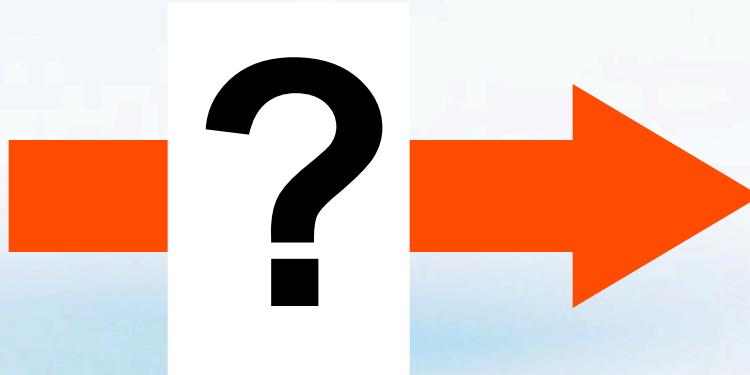
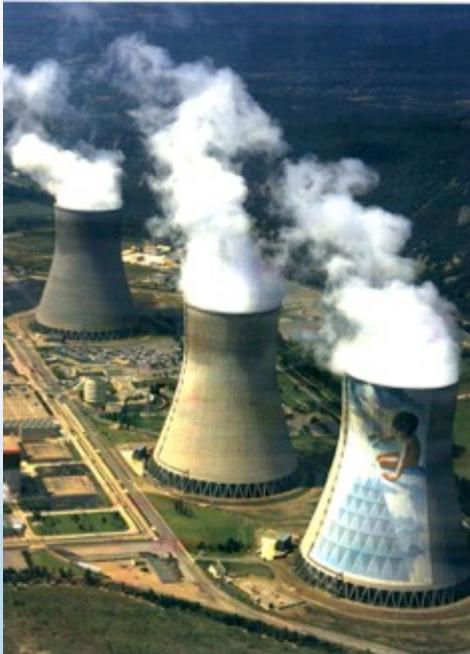
Xynthia (59 morts)

Bhopal ($>$ 2000 morts)

Katrina (\approx 1500 morts)



Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ?



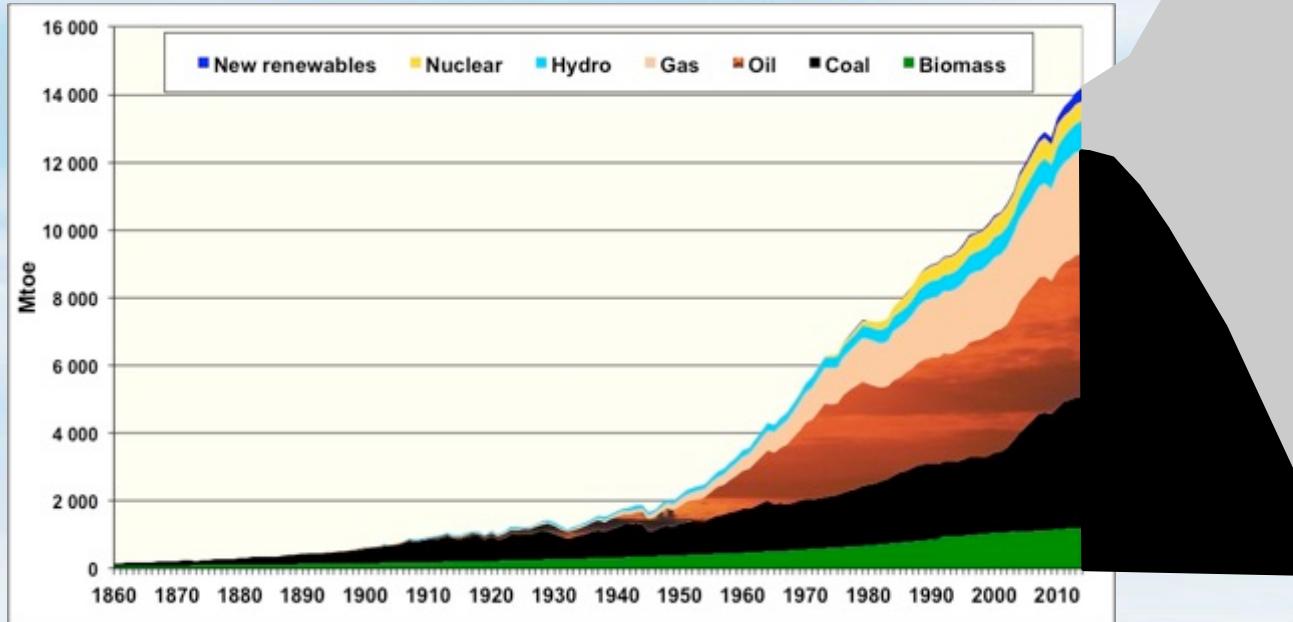
Il y a indiscutablement des bases scientifiques communes

Les filières d'accès aux matières fissiles peuvent être les mêmes, mais pas toujours (ex Pu 239 pas compatible avec l'exploitation commerciale d'un REP, mais oui pour CANDU)

Tout pays décidé à le faire peut « proliférer », avec ou sans nucléaire civil, et historiquement cela a plutôt été sans (y compris Israël, Afrique du Sud, Irak...)

Développer l'électricité nucléaire fait entrer dans un système international d'engagements, de contrôles, qui rend plus détectables les activités clandestines (Corée du Nord, Iran)

Rappel : le but du jeu, c'est d'essayer ça



+7% par an
(incl. nucléaire)

-3,1% par an

Quelques éléments de réflexion :

L'accident de Tchernobyl, selon l'OMS, fera au plus quelques milliers de décès prématurés **en 40 ans** (le tabac, l'alcool, la voiture ou la « malbouffe » : environ un million chacun par an),

Les déchets nucléaires sont produits en quantités minimes par rapport à bien d'autres activités

Les réserves d'uranium accessibles si on y met le prix sont importantes (et en U238 ne constituent plus une limite)

Mais... 7% de croissance sur 35 ans, c'est $\approx 3000 \text{ GW nucléaires en 2050}$ (≈ 300 aujourd'hui), 6.000 si 50% de pertes après production de l'électricité pour « autre chose » (stockage, conversion en H₂, etc), **10.000 à 15.000** si peu de contribution des renouvelables.

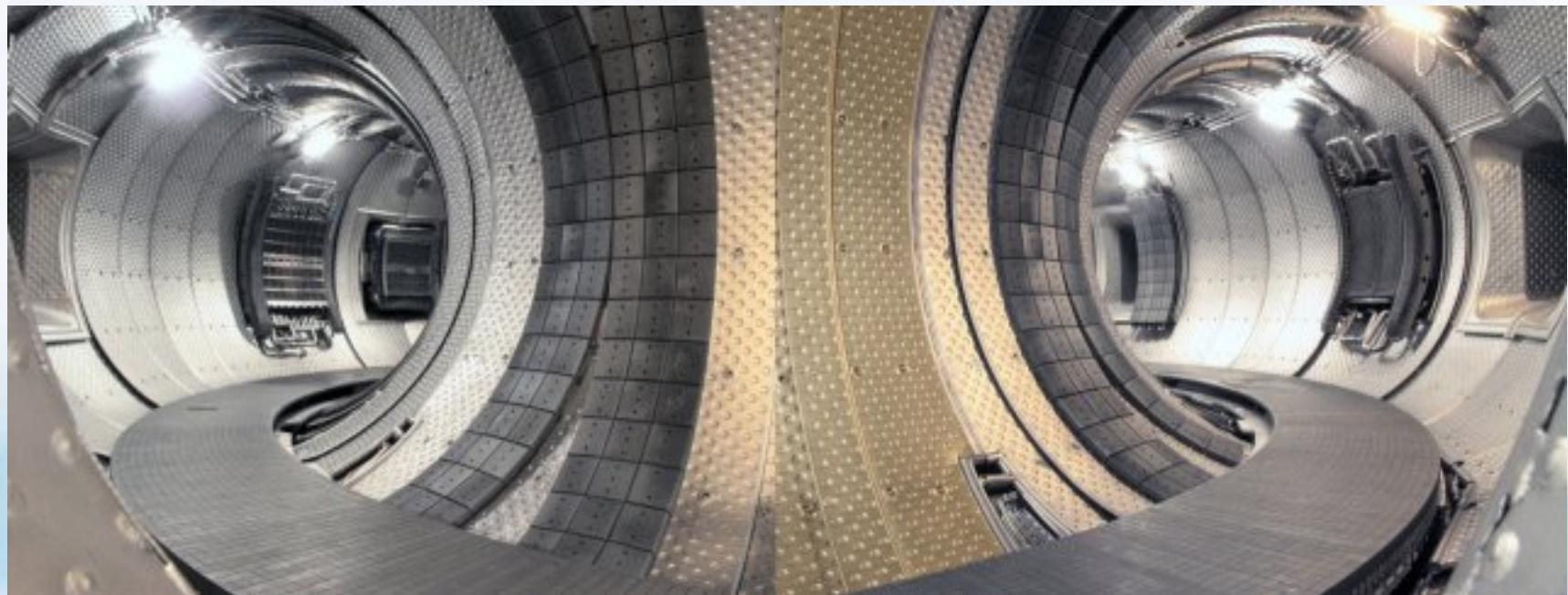
Y aura-t-il les capitaux ? (5.000 GW $\approx 20.000 \text{ G\$}$, $\approx 30\%$ du PIB mondial 2014)

Y aura-t-il les compétences ?

Y aura-t-il la volonté en démocratie, avec 20 ans de préavis ?

Y aura-t-il les emplacements ? Etc etc

La contribution du nucléaire à « la » solution : encore et toujours une question d'ordre de grandeur !



Avantages :

Charge de combustible très faible (quelques kg), donc pas d'accident de criticité possible

Toute « panne » entraîne immédiatement la fin du confinement du plasma et l'arrêt de la réaction

Source quasi inépuisable de Deutérium sur Terre

Pas de déchets en direct (alpha n'est pas radioactif, les neutrons non plus)

Mais...

ITER sera juste un objet de recherche, objectif = NRJ injectée < NRJ de fusion

Construction ITER (10 ans) + expérimentation (10 ans) + construction prototype (10 ans) + expérimentation prototype (10 ans) + construction tête de série (10 ans) = rien avant 50 ans

Le tritium vient de l'activation du lithium, guère plus abondant que l'uranium ; c'est la fusion D-D qui ouvre la voie à l'infini (or ITER c'est D-T)

Il n'y a pas de déchets de la fusion, mais l'activation par les neutrons de la couverture du réacteur produira probablement quelques cochonneries quand même

L'énergie infinie résout-elle plus de problèmes qu'elle n'en crée ?