

# Eléments de base sur l'énergie au 21<sup>è</sup> siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2019  
Partie 6 -  $e = mc^2$ , il suffisait d'y penser**

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

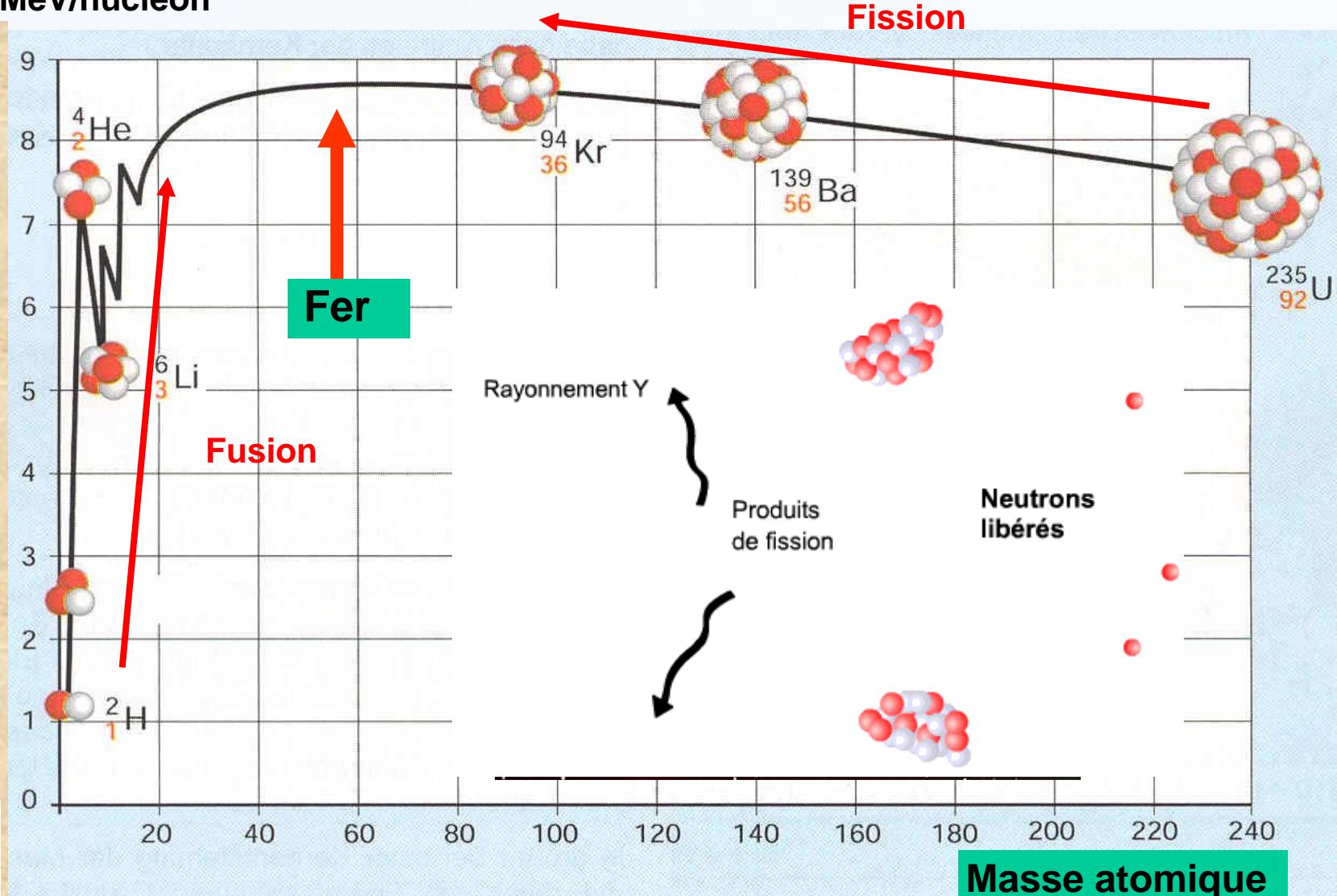
**La première version est de casser en plusieurs morceaux un gros noyau (fission), avec libération d'énergie au passage**

**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



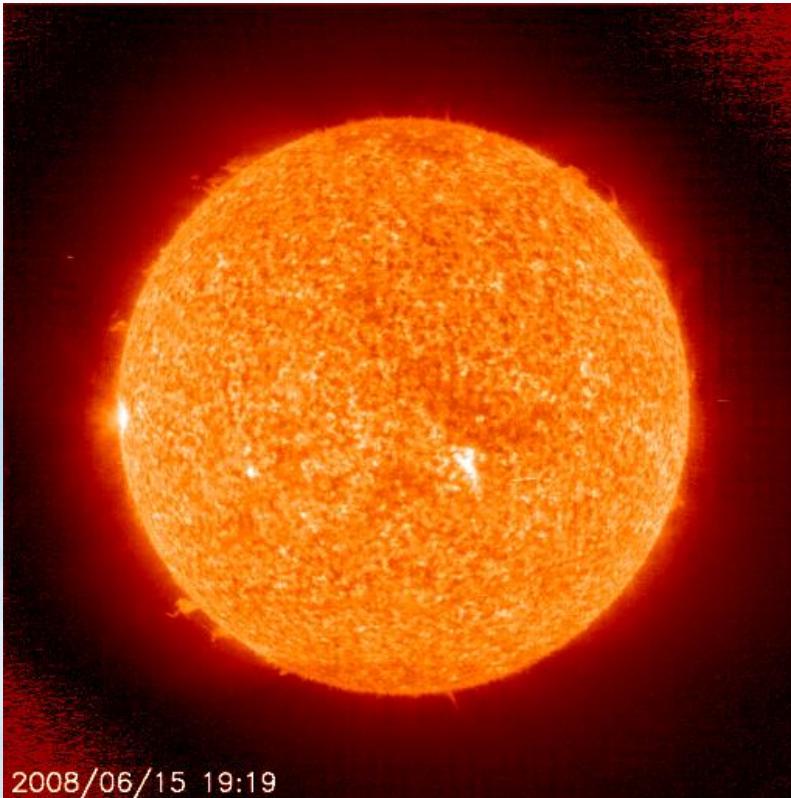
**La réaction nucléaire met en jeu des énergies de quelques centaines de MeV par atome fissionné ou fusionné**

**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**

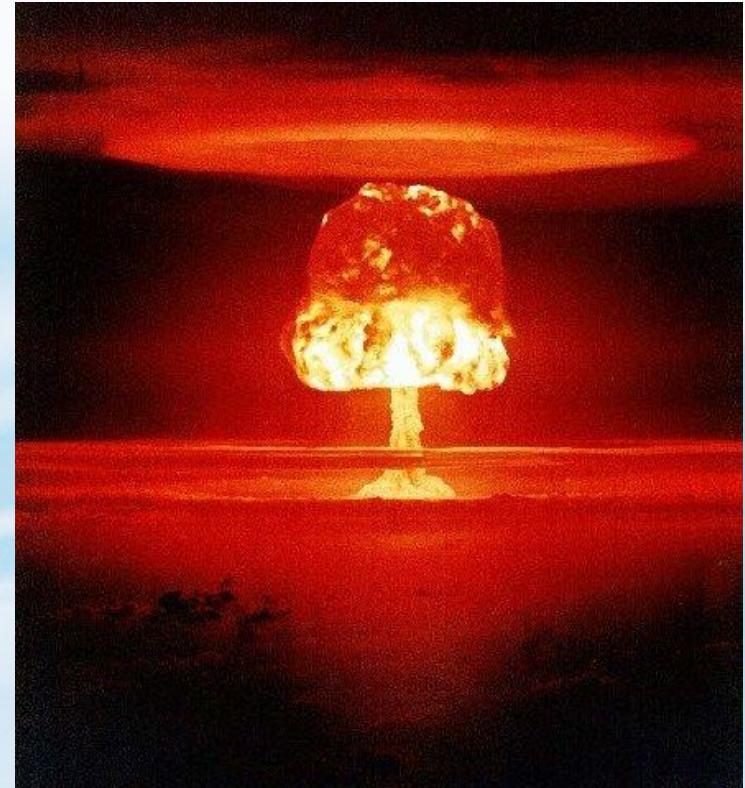
**En fait tout ce qui compose la Terre (et la Lune, qui nous fournit les marées) a été « forgé » dans les étoiles de la génération précédent le Soleil, par la suite de réactions nucléaires**

# 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**

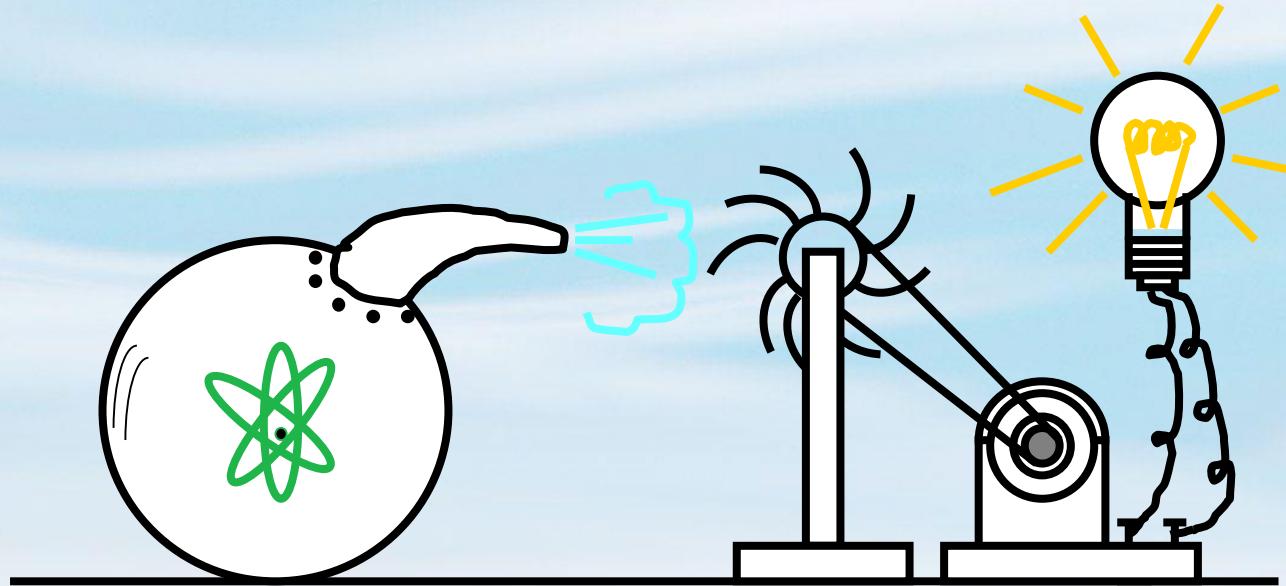
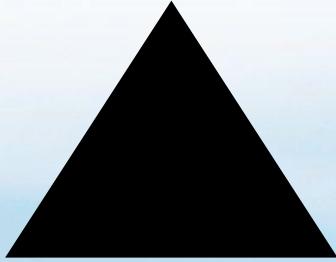
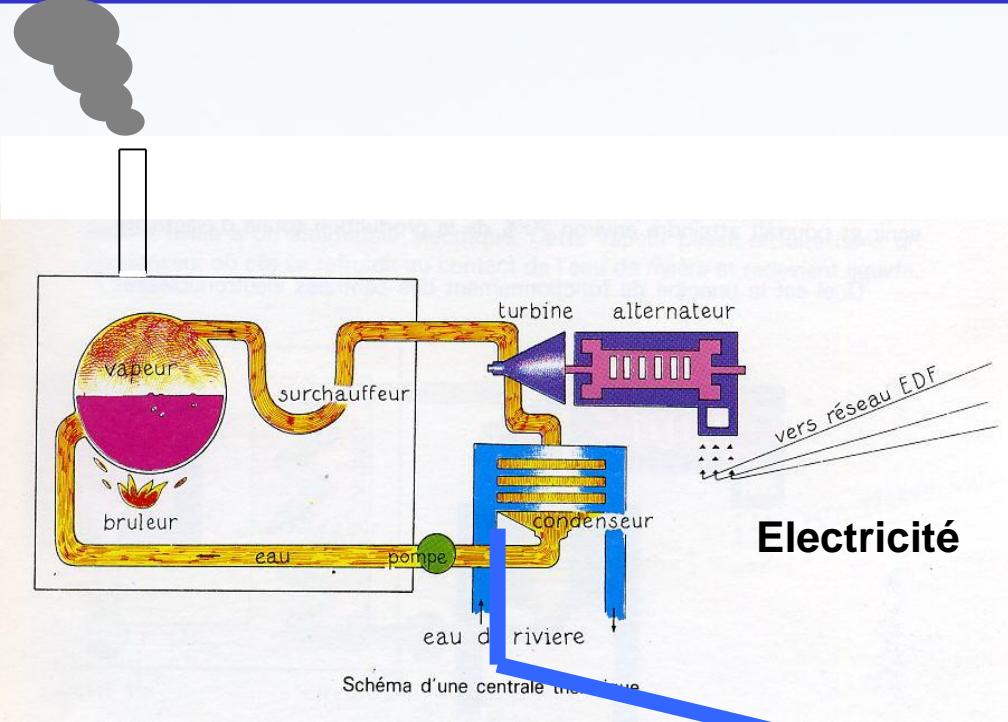


Illustration Bertrand Barré

# Nucléaire ou charbon, c'est - presque - pareil



Charbon



Uranium

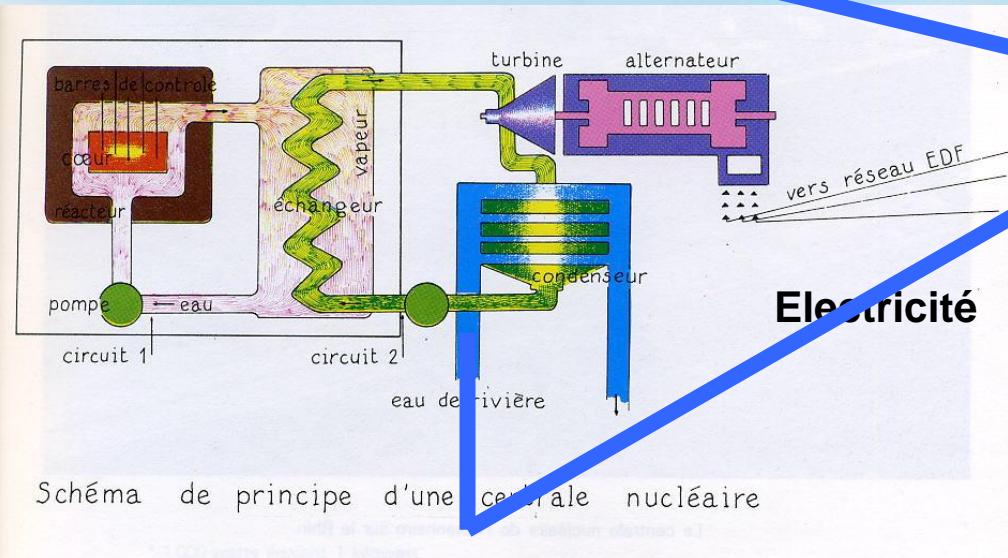


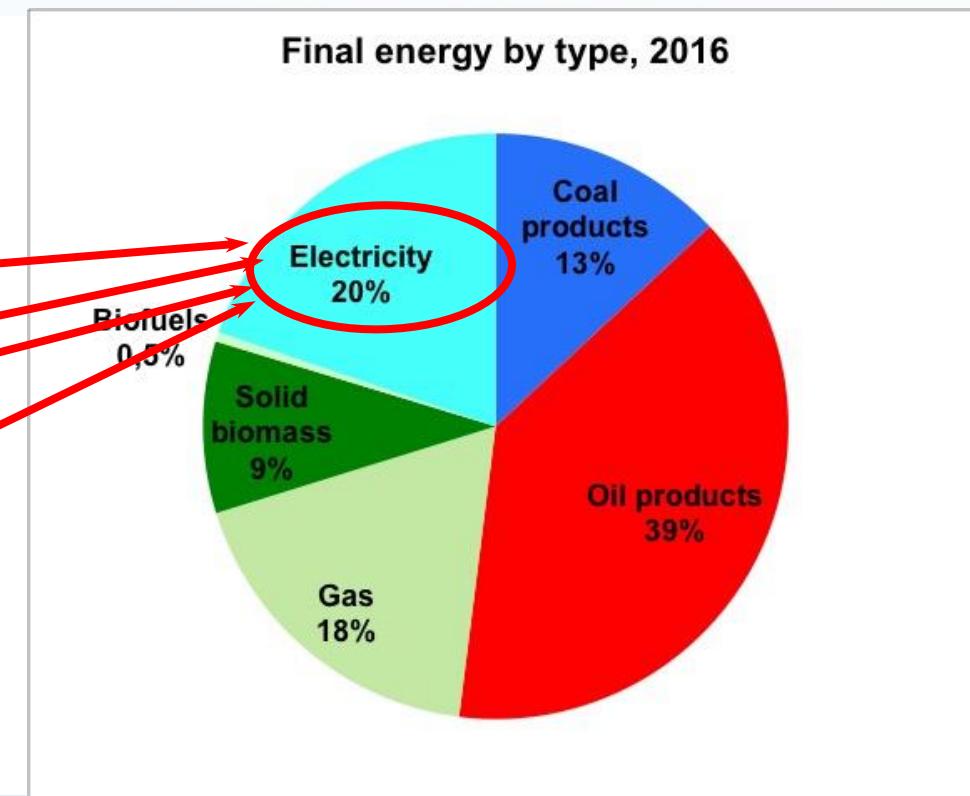
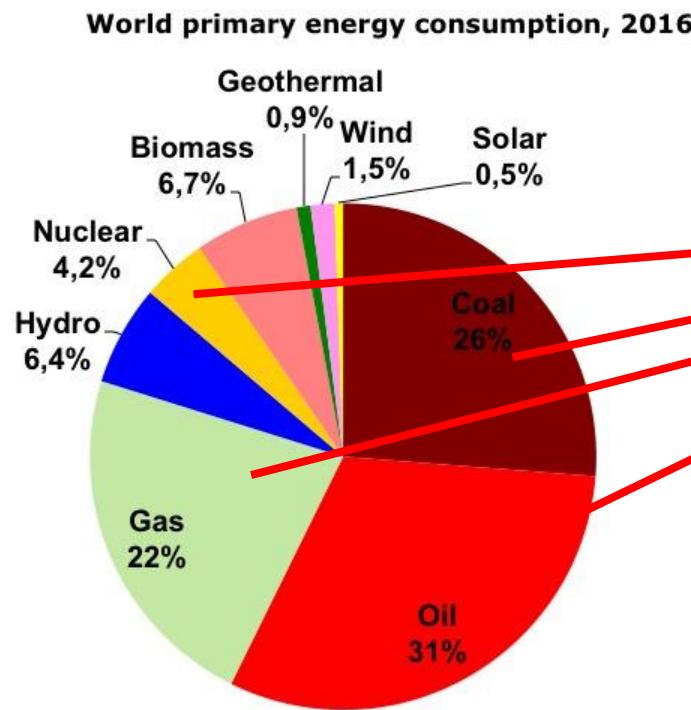
Illustration  
Bertrand Barré

# 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

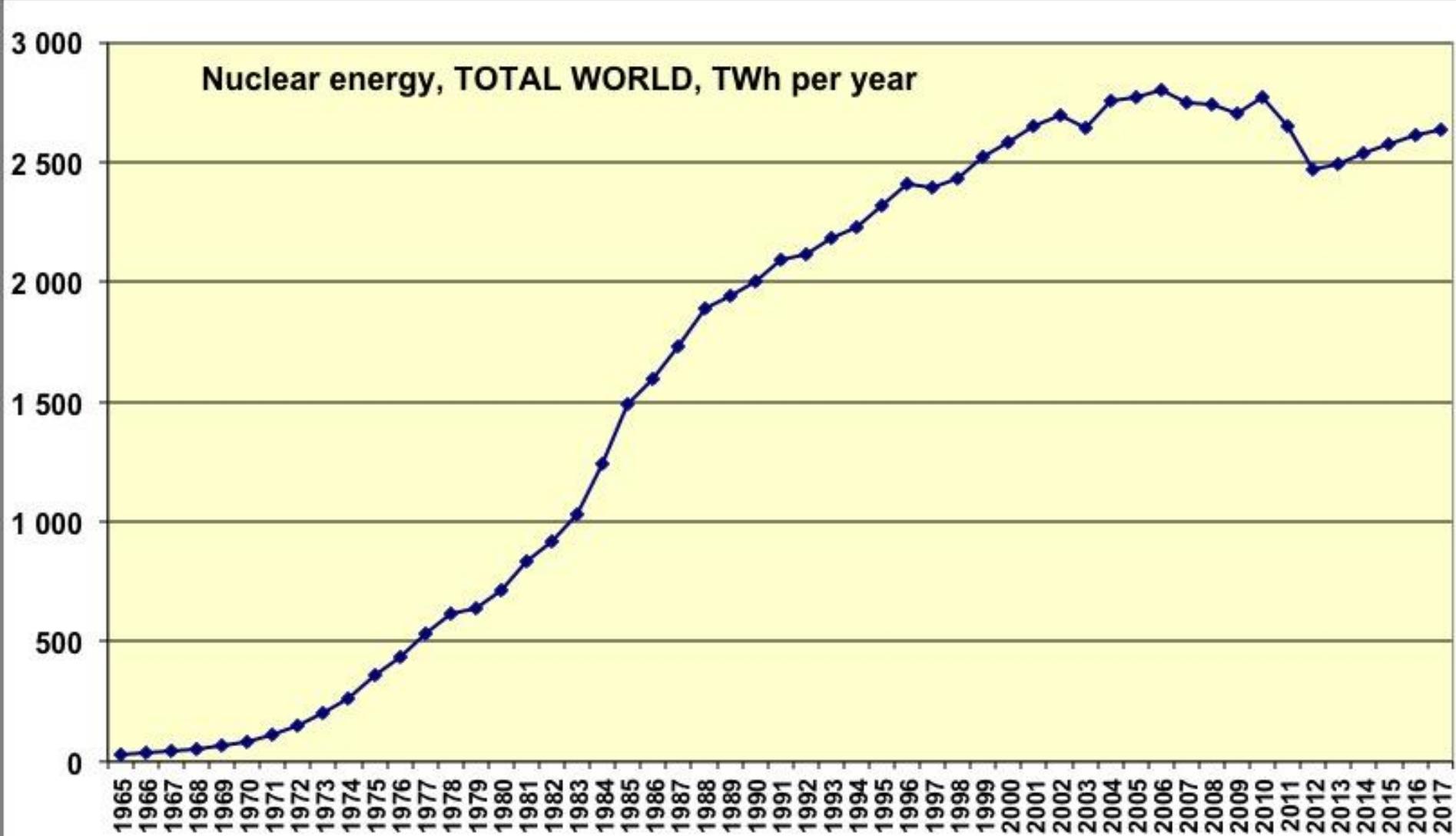
Carnot limite le rendement et on chauffe les petits oiseaux



14,2 Gtep primaire



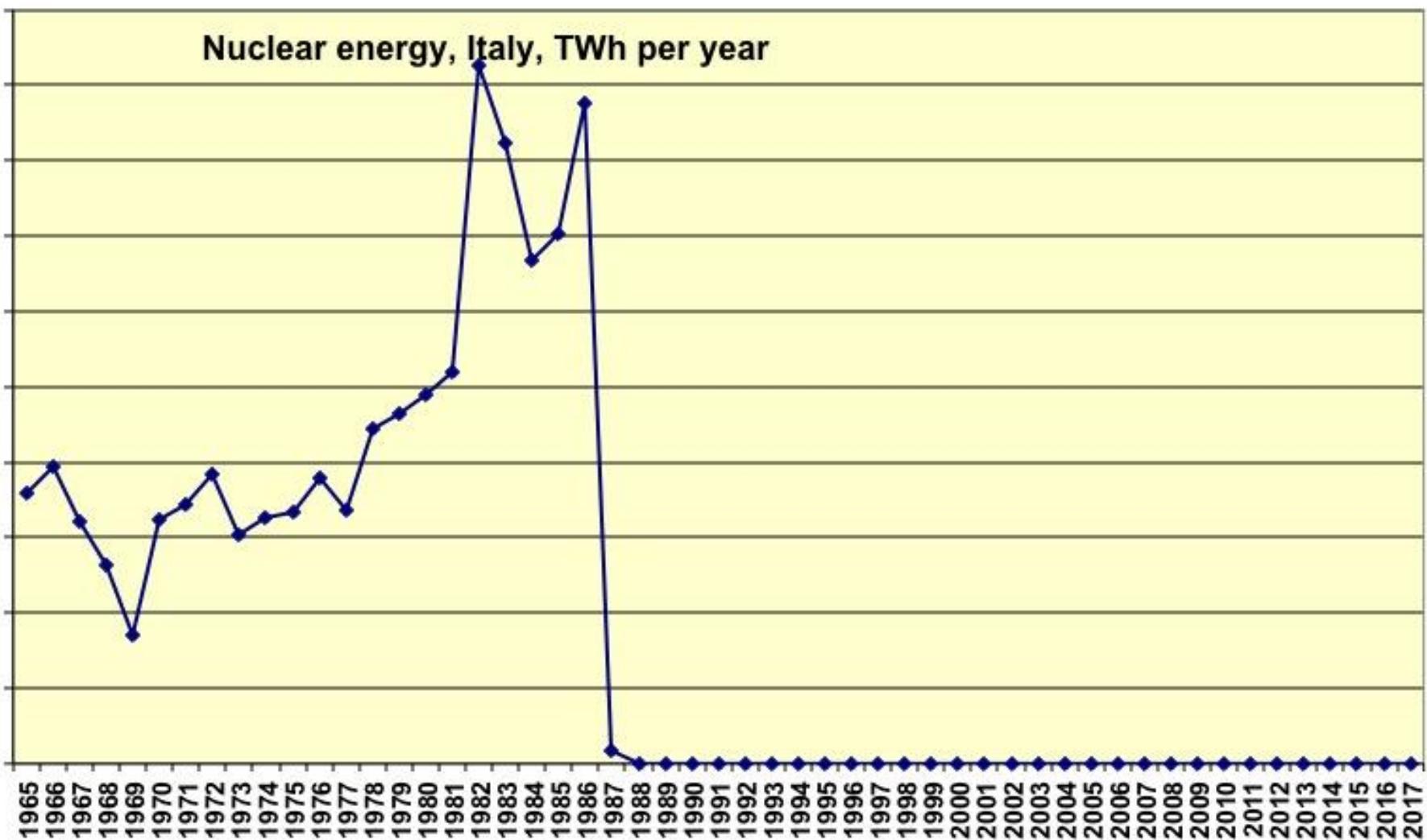
9,5 Gtep final



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

Source : BP Statistical review, 2018

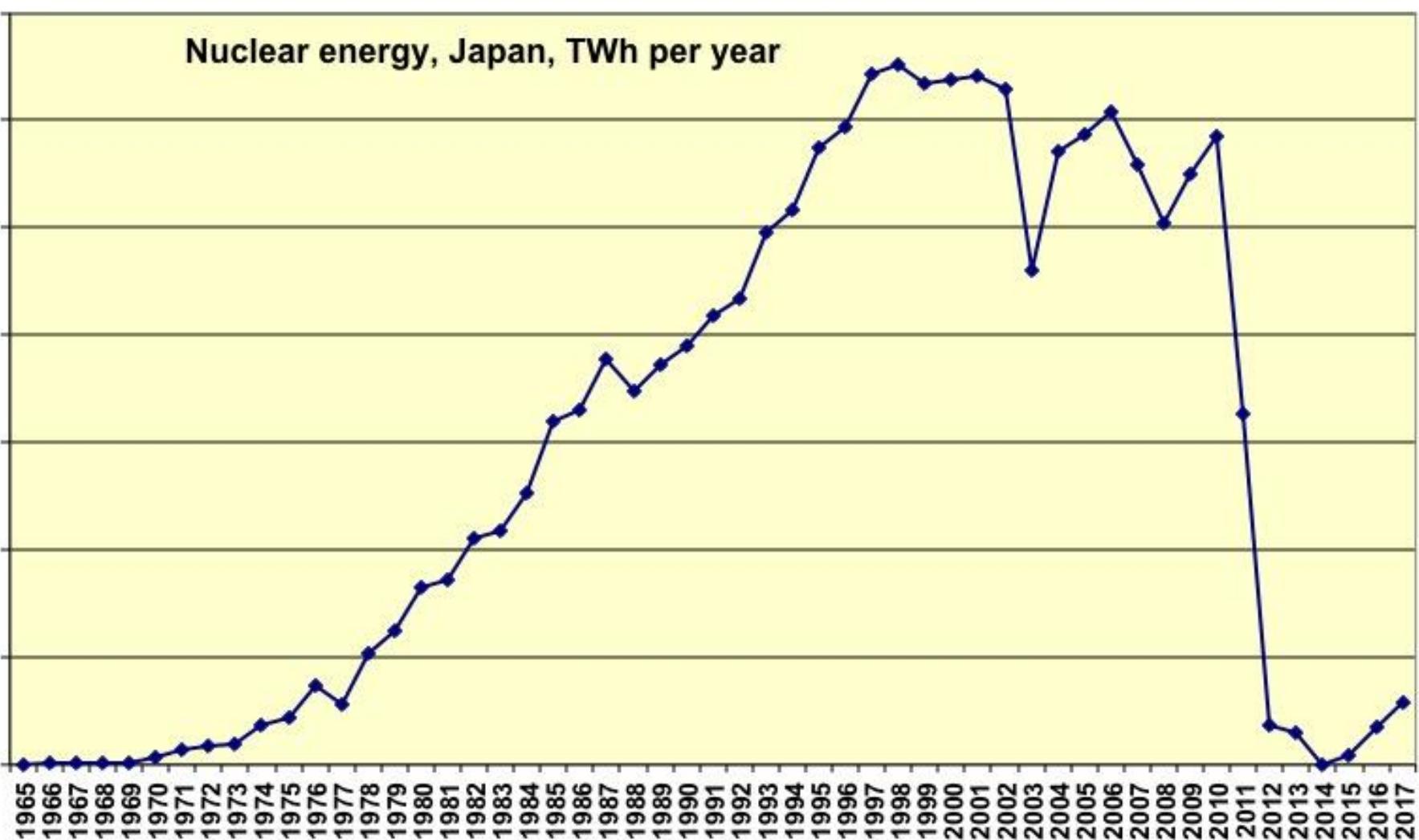
# Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



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

Source BP Statistical review, 2018

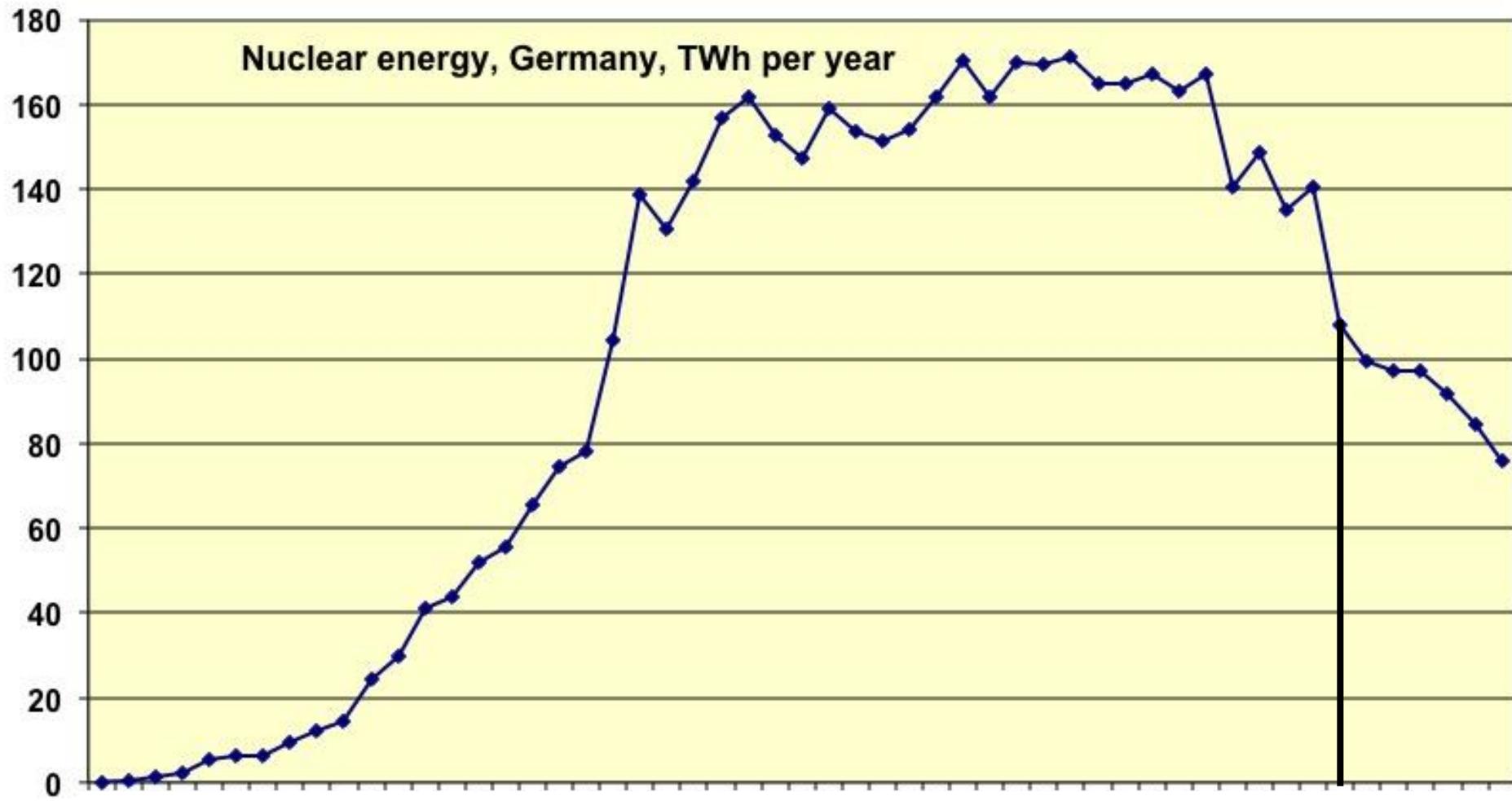
# D'autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage



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

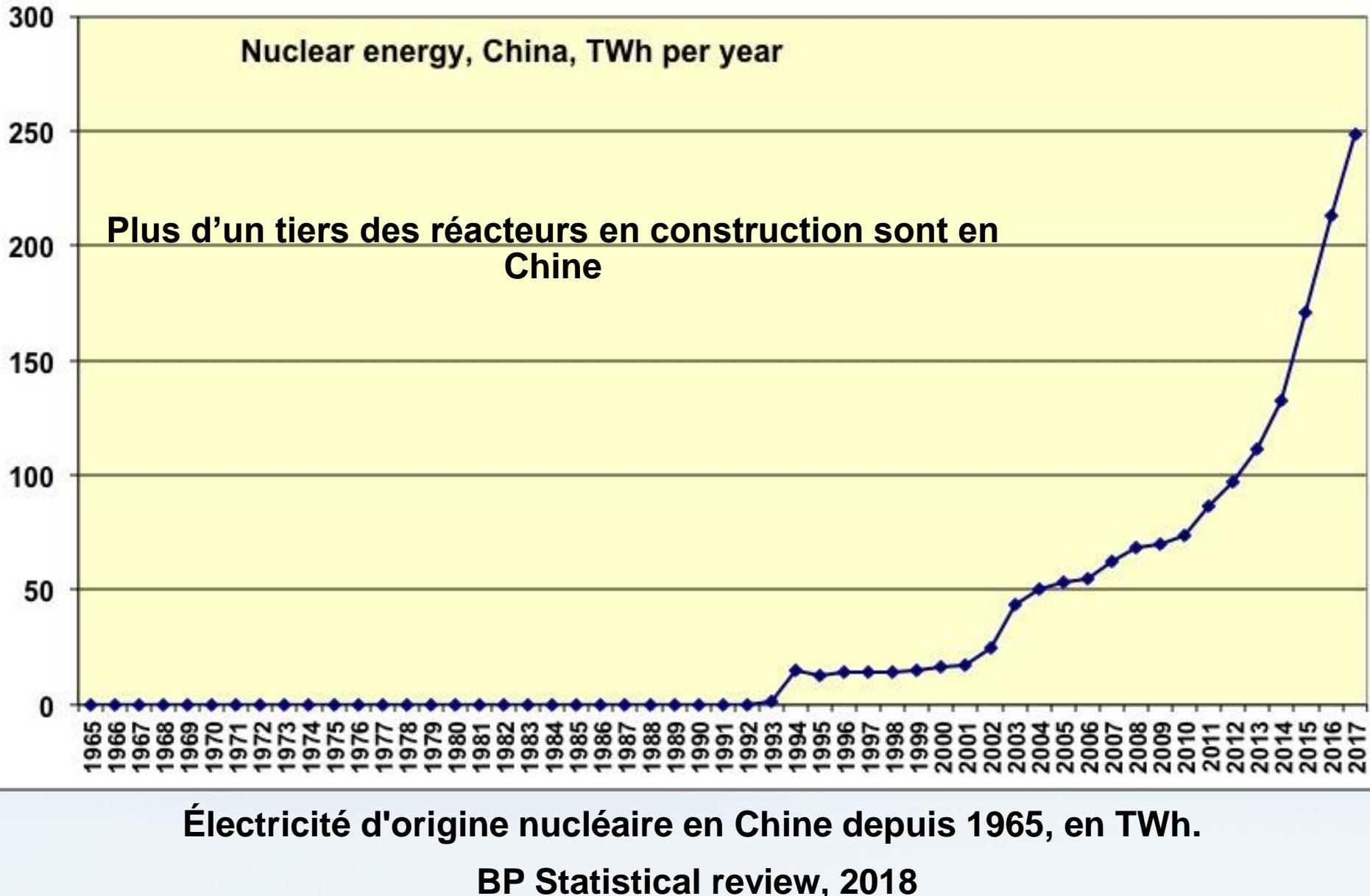
Source BP Statistical review, 2018

# D'autres ont peu de plages mais quelques électeurs

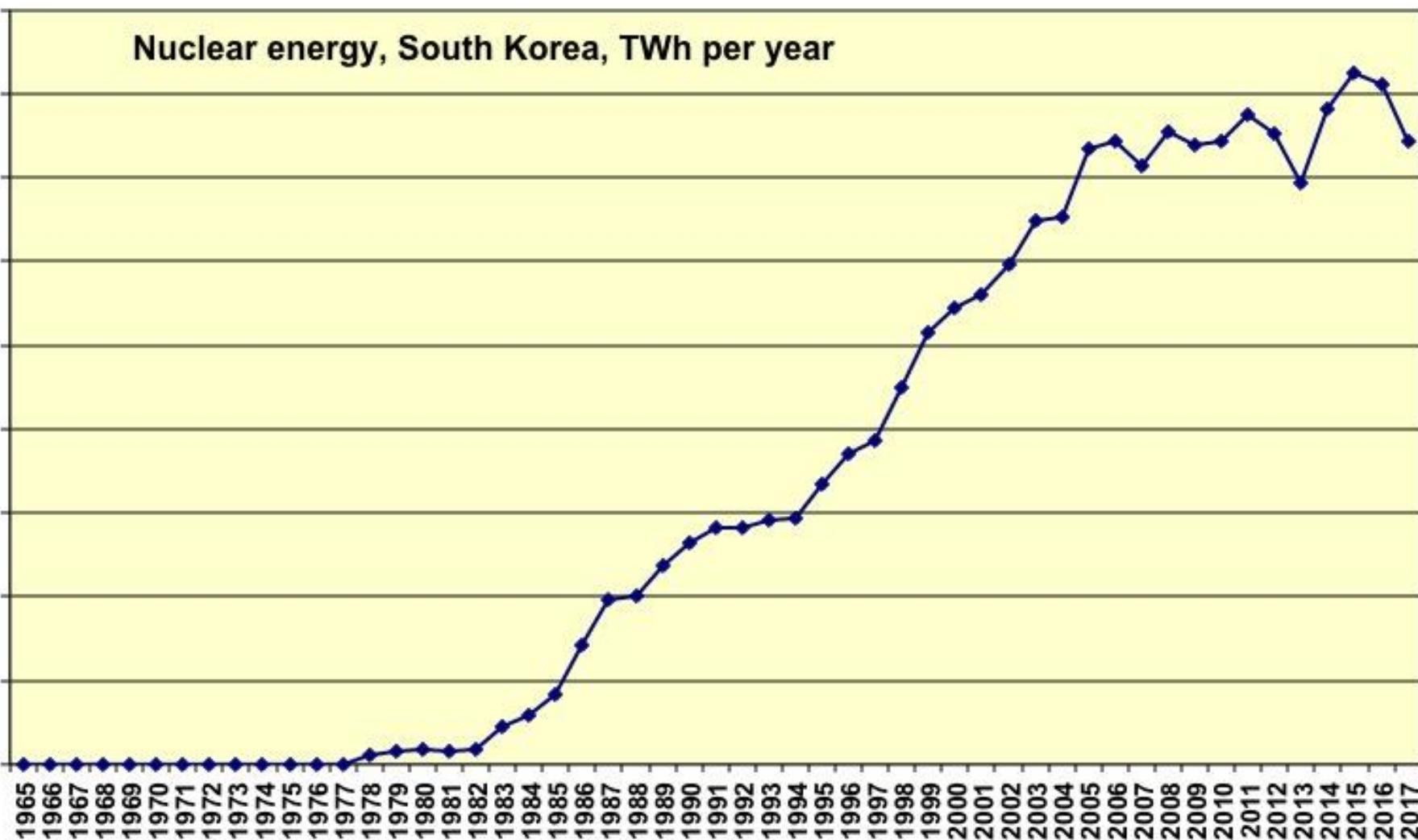


Électricité d'origine nucléaire en Allemagne depuis 1965, en TWh.

Source BP Statistical review, 2018



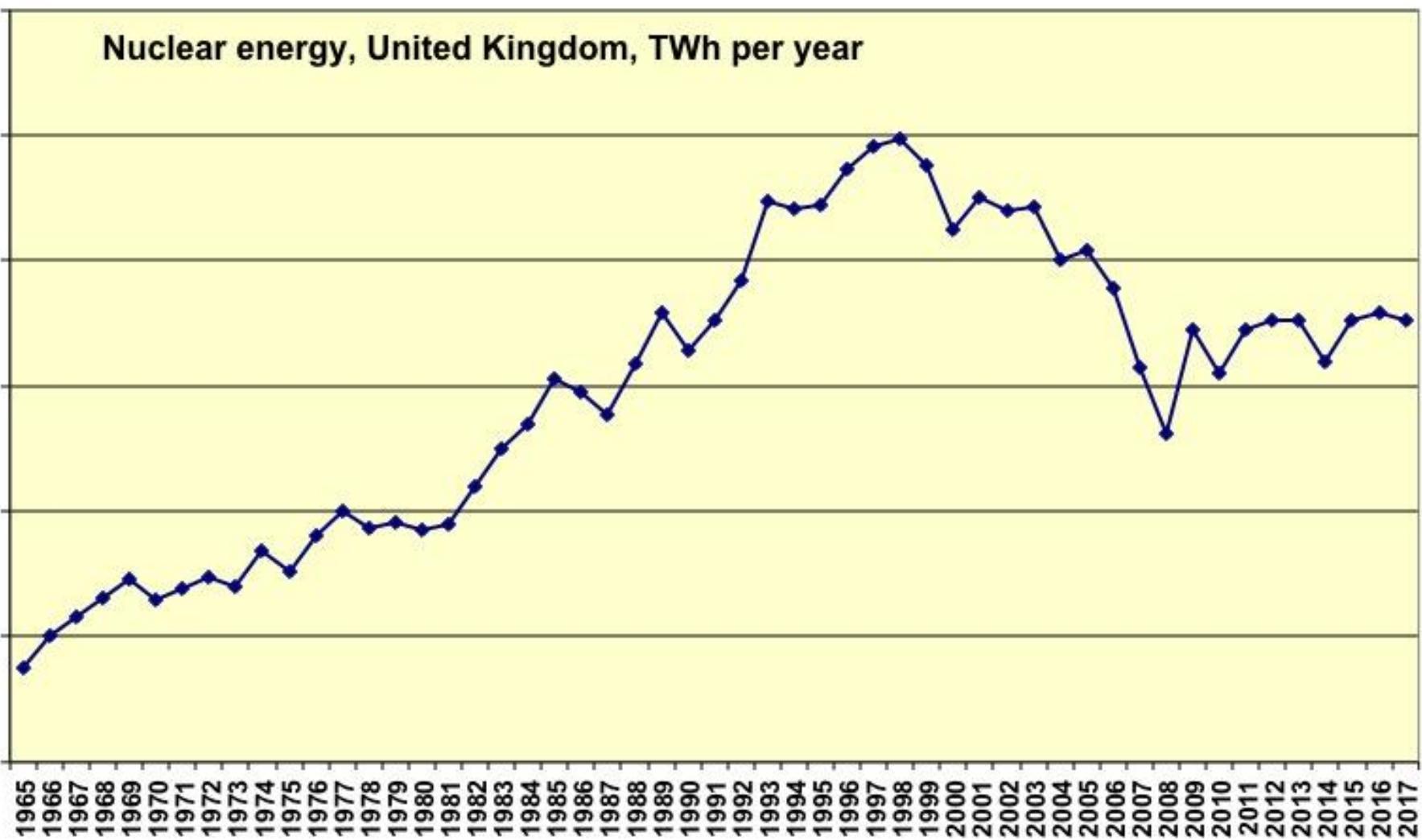
# D'autres mettent le paquet (bis)



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

BP Statistical review, 2018

# D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point



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

BP Statistical review, 2018

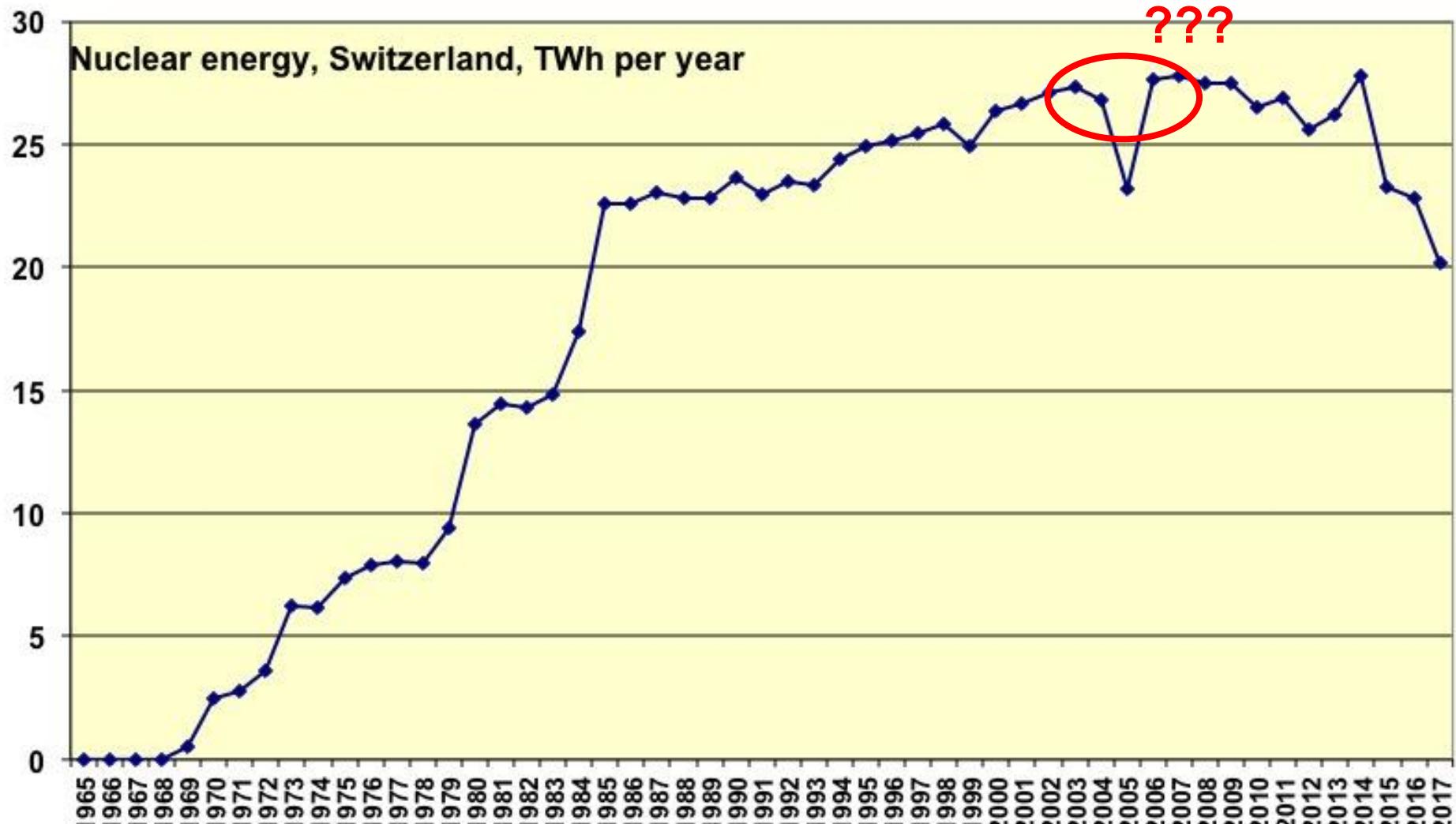
# D'autres ont dit qu'ils feraient sans, sauf que...



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

BP Statistical review, 2018

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



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

BP Statistical review, 2018

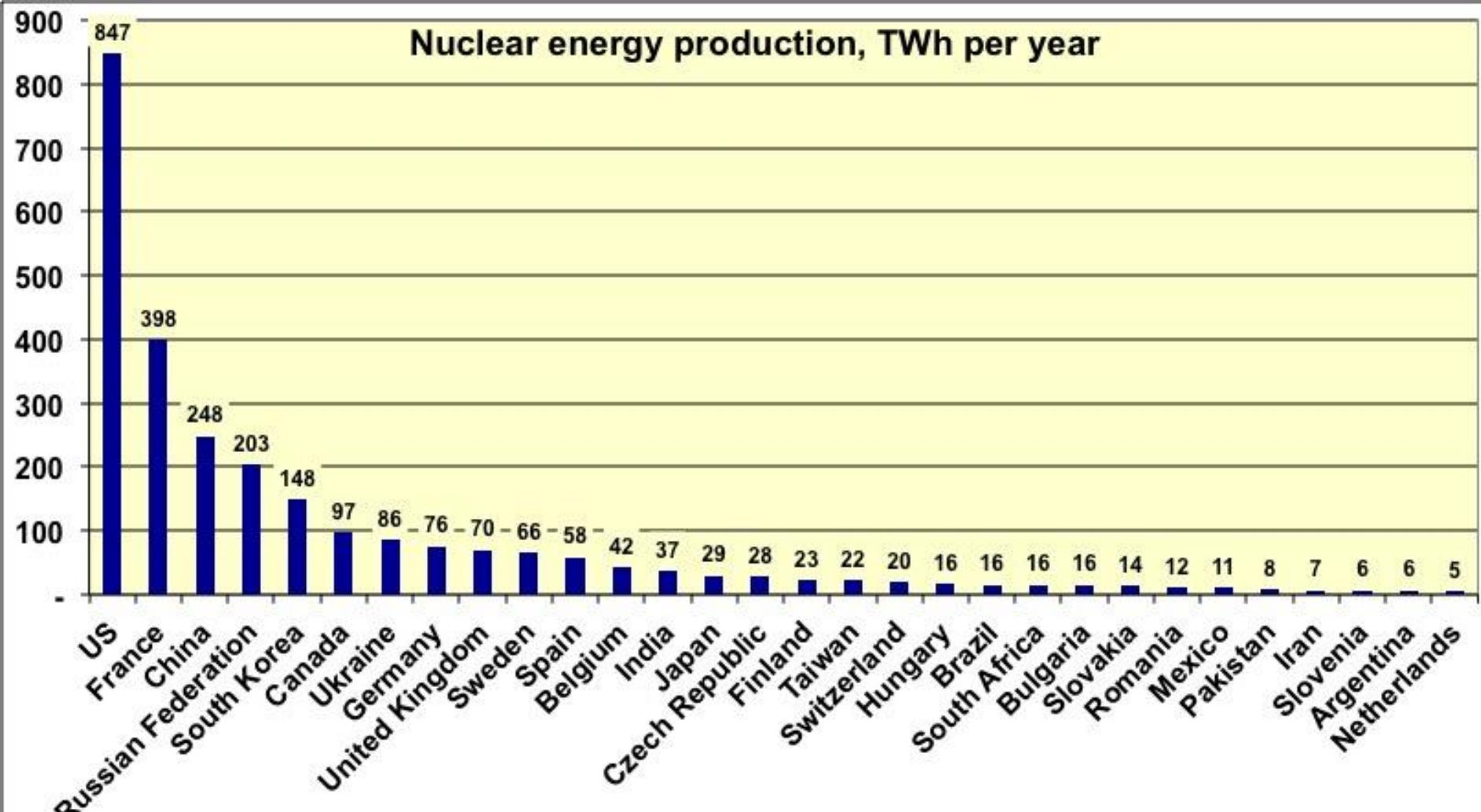
# D'autres « explosent », puis « redémarrent »



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

BP Statistical review, 2018

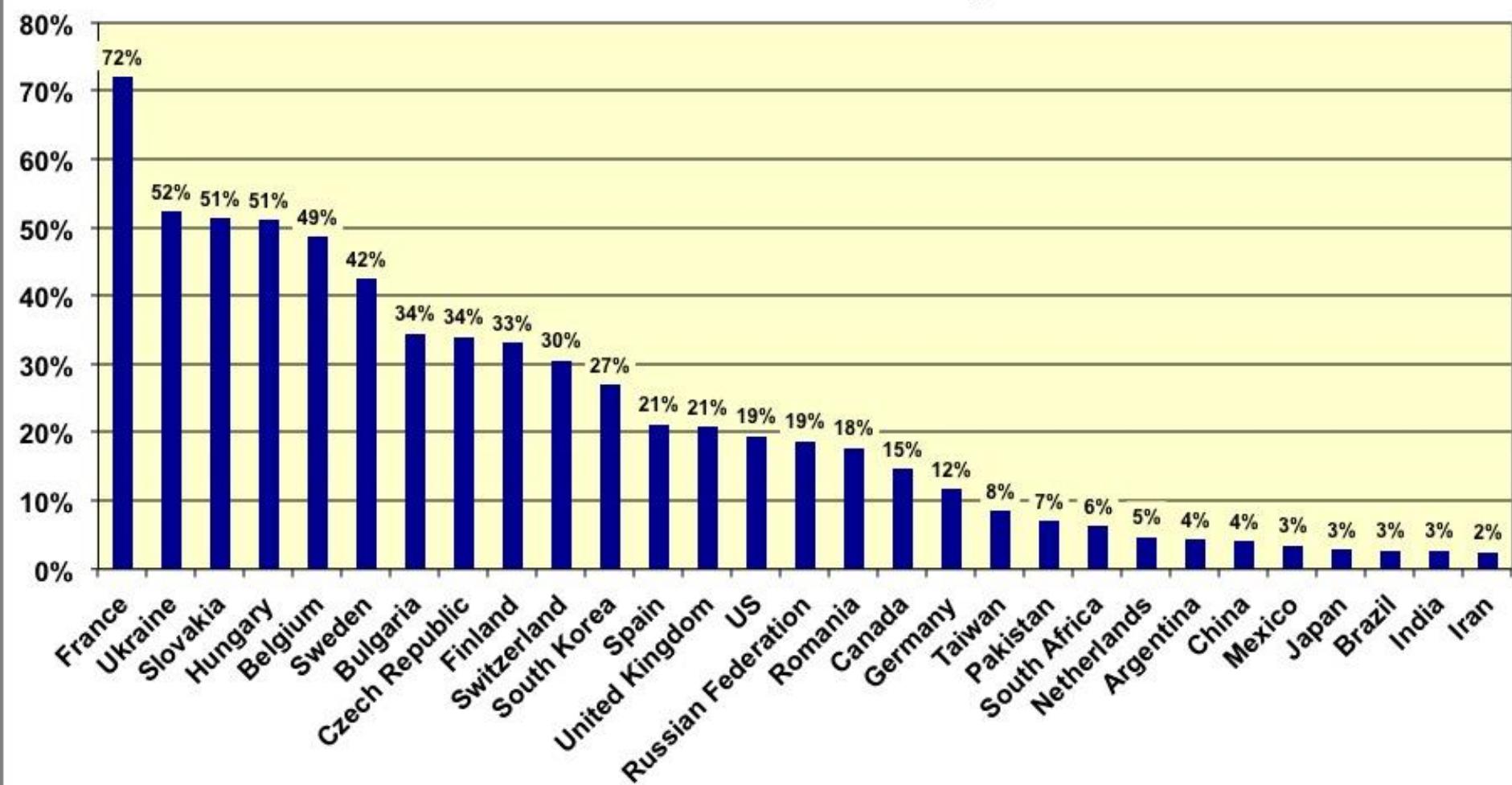
# Atome, qui en fait finalement ?



Production nucléaire en TWh en 2017. Source BP Statistical review, 2018

# Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?

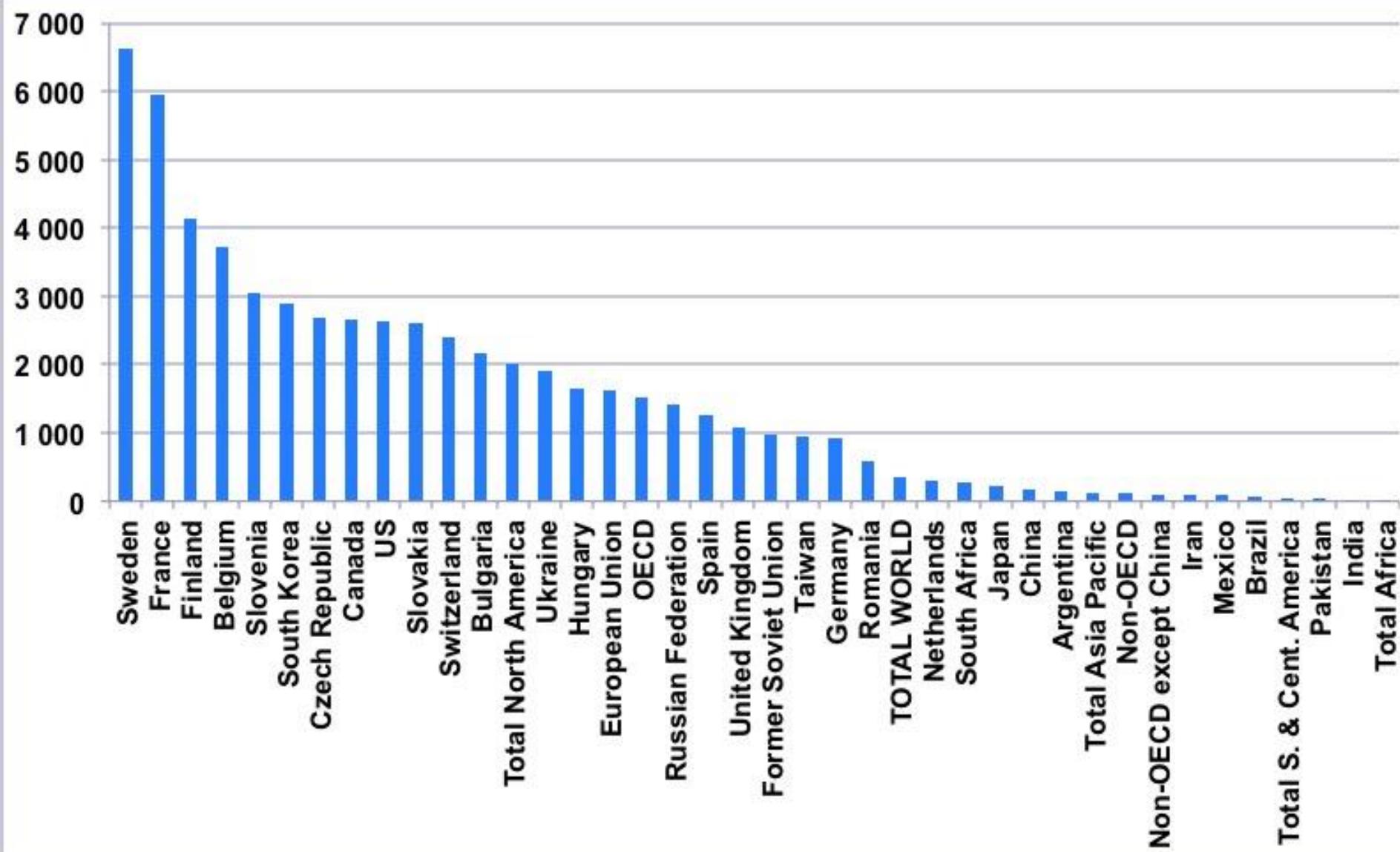
share of nuclear in electricity



% de nucléaire dans la production électrique en 2017

BP Statistical review, 2018

# Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?

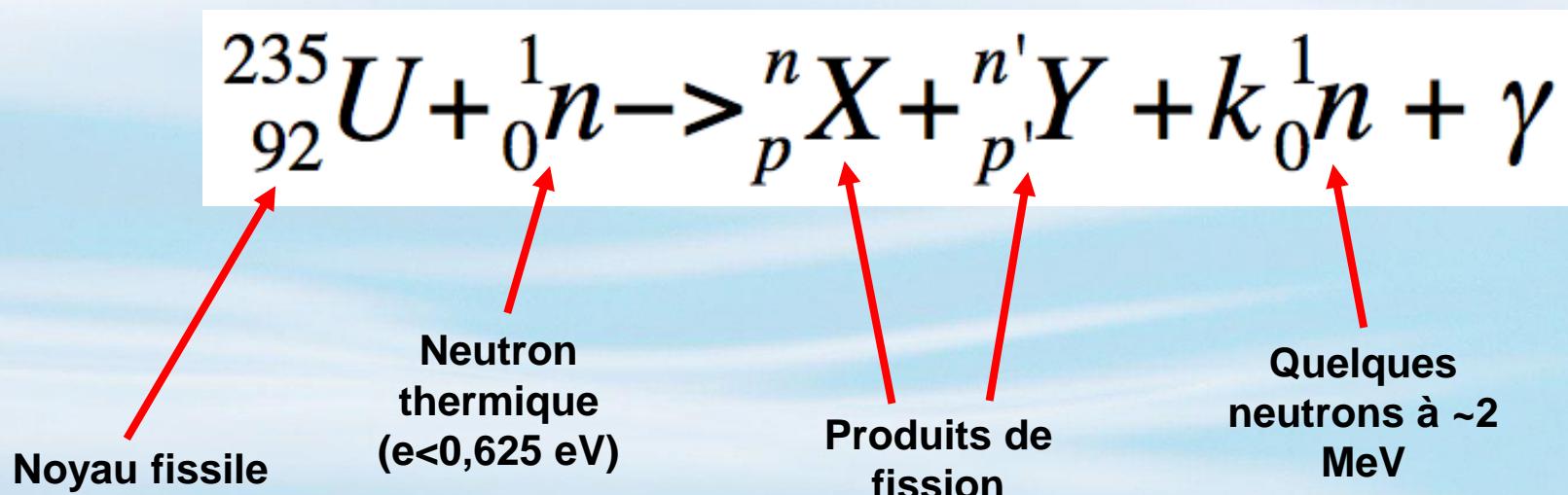


kWh nucléaires par personne en 2017. BP Statistical review, 2018

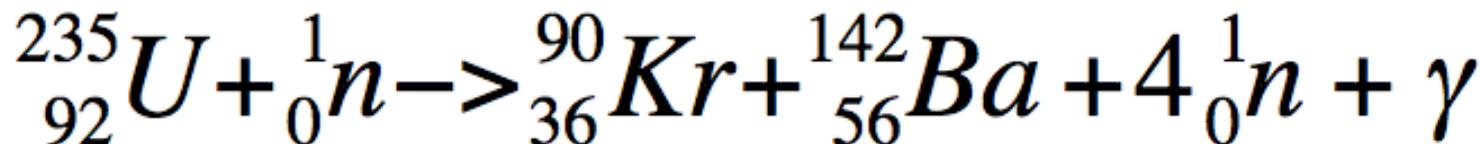
La fission consiste à exploiter l'énergie libérée par le fractionnement en plusieurs petits noyaux d'un gros noyau avec  $Z > 89$

Cette fission peut intervenir spontanément (cas rare)

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



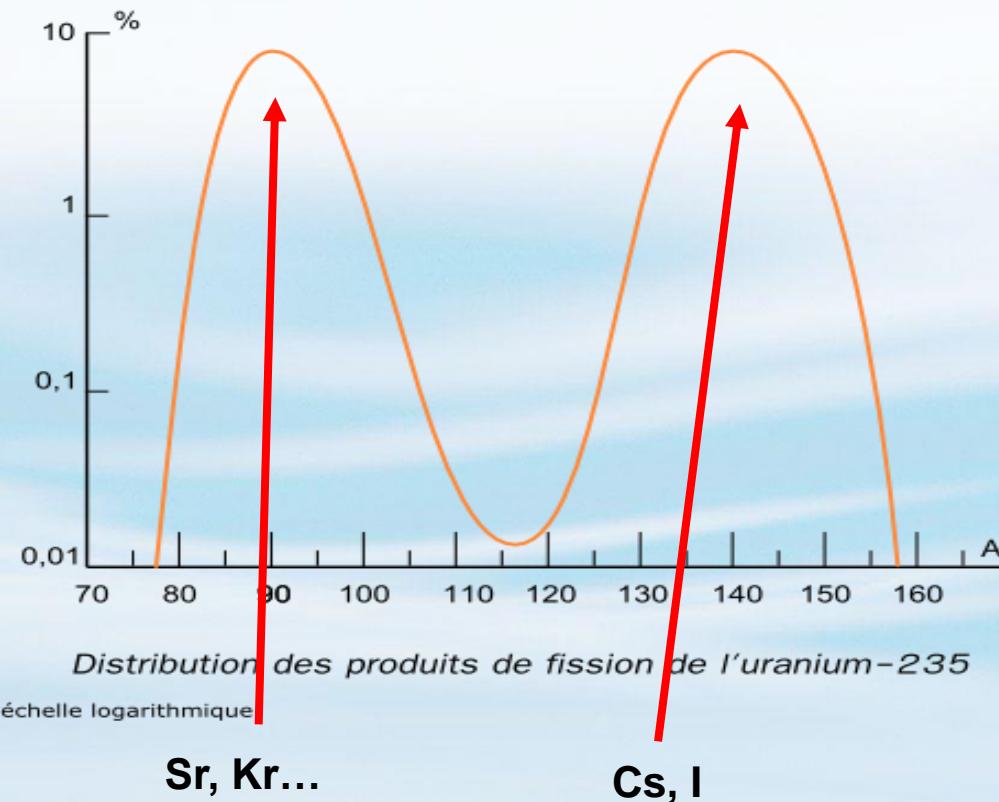
Exemple « pour de vrai » :



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

## Après une fission, on obtient :

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

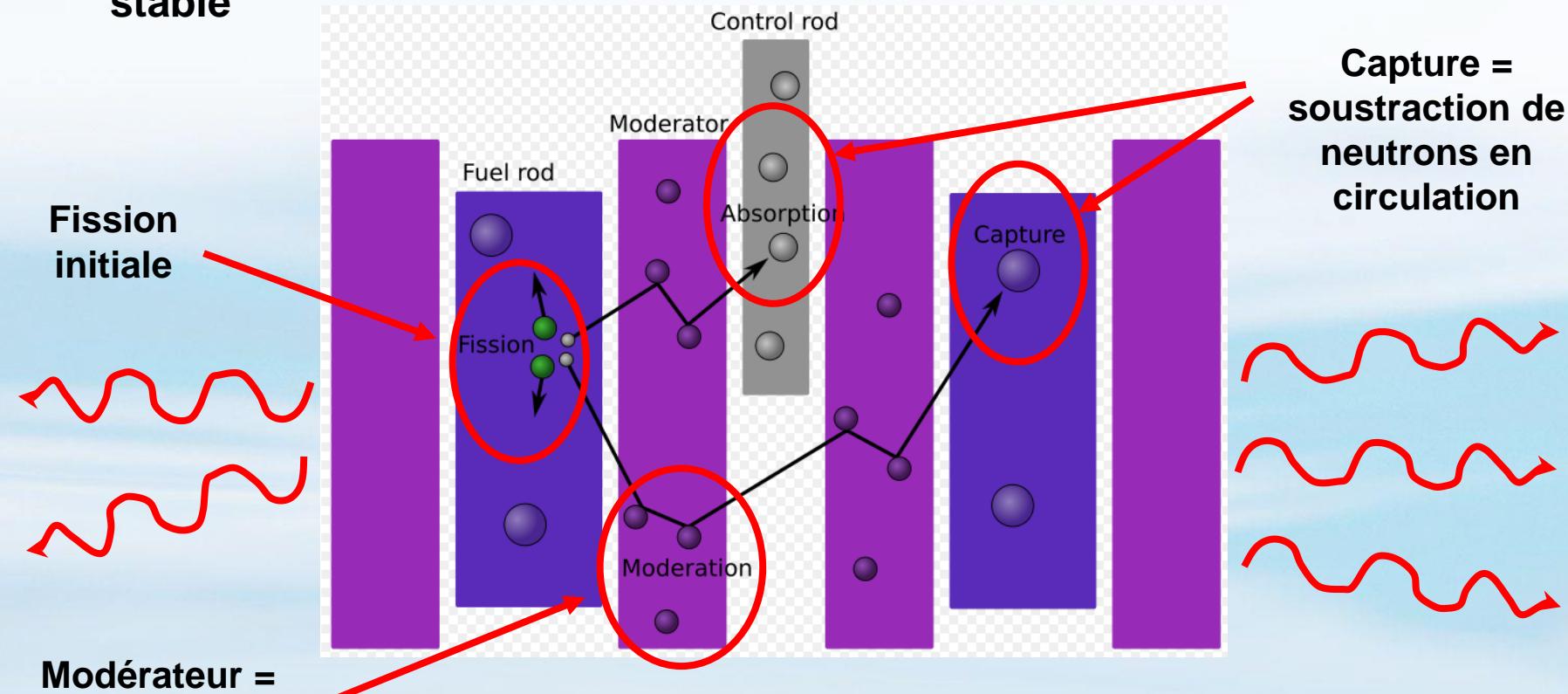


**Leur demi-vie est généralement comprise entre quelques heures et quelques dizaines d'années, et leurs descendants sont souvent radioactifs eux-mêmes**

# 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



Modérateur =  
chocs élastiques  
sur de petits  
noyaux

Le but du jeu ? Qu'il reste exactement un neutron  
thermique par noyau fissionné !

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

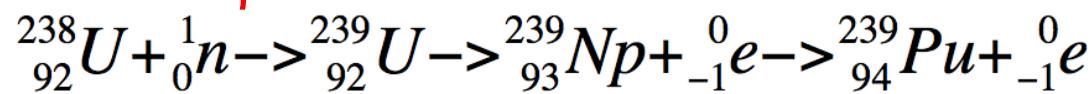
Après une fission, on obtient encore :

Du rayonnement gamma

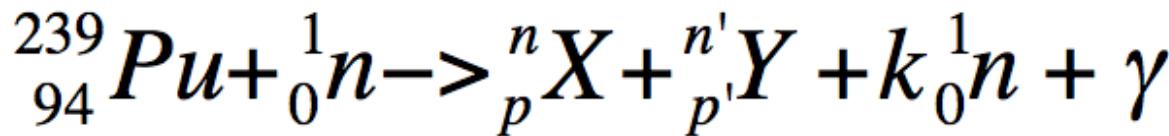
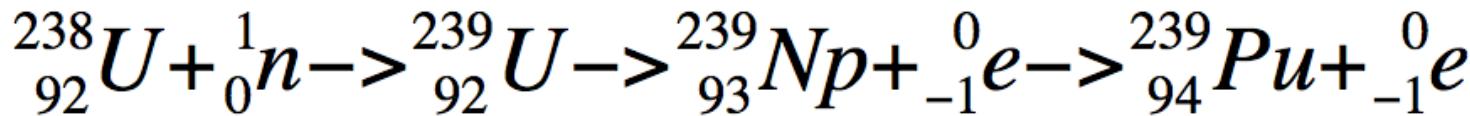
Des actinides, dont le plutonium, dont les isotopes impairs sont fissiles

1	H																							2	He
2	Li	Be																						10	Ne
3	Na	Mg																						18	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31	32	33	34	35	36						Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	49	50	51	52	53	54						Xe	
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	78	Pt	Au	80	81	82	83	84	85	86					Rn	
7	Fr	Ra	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118						Uuo	
* Lanthanides																									
** Actinides																									

$n+\beta$



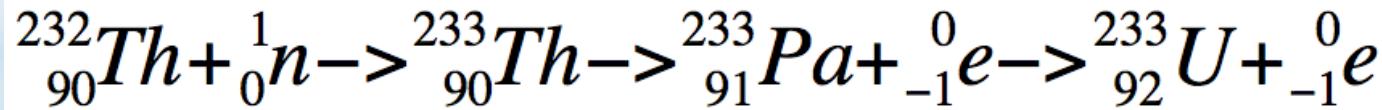
# Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



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** »

# La bouilloire se perfectionne, bien sûr...



1942 : la pile de Fermi, 0,5 watts de puissance !

Premières réalisations



1950

1970

1990

2010

2030

2050

2070

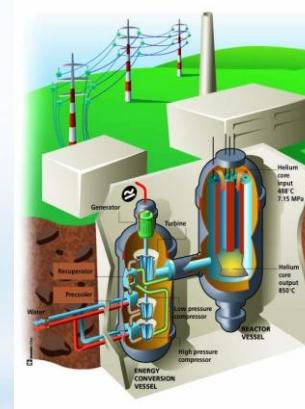
2090

Réacteurs actuels



Réacteurs avancés

Systèmes du futur



Generation I

UNGG  
CHOOZ

Generation II

REP 900  
REP 1300

N4

Generation III

EPR

Generation IV

?

Source CEA



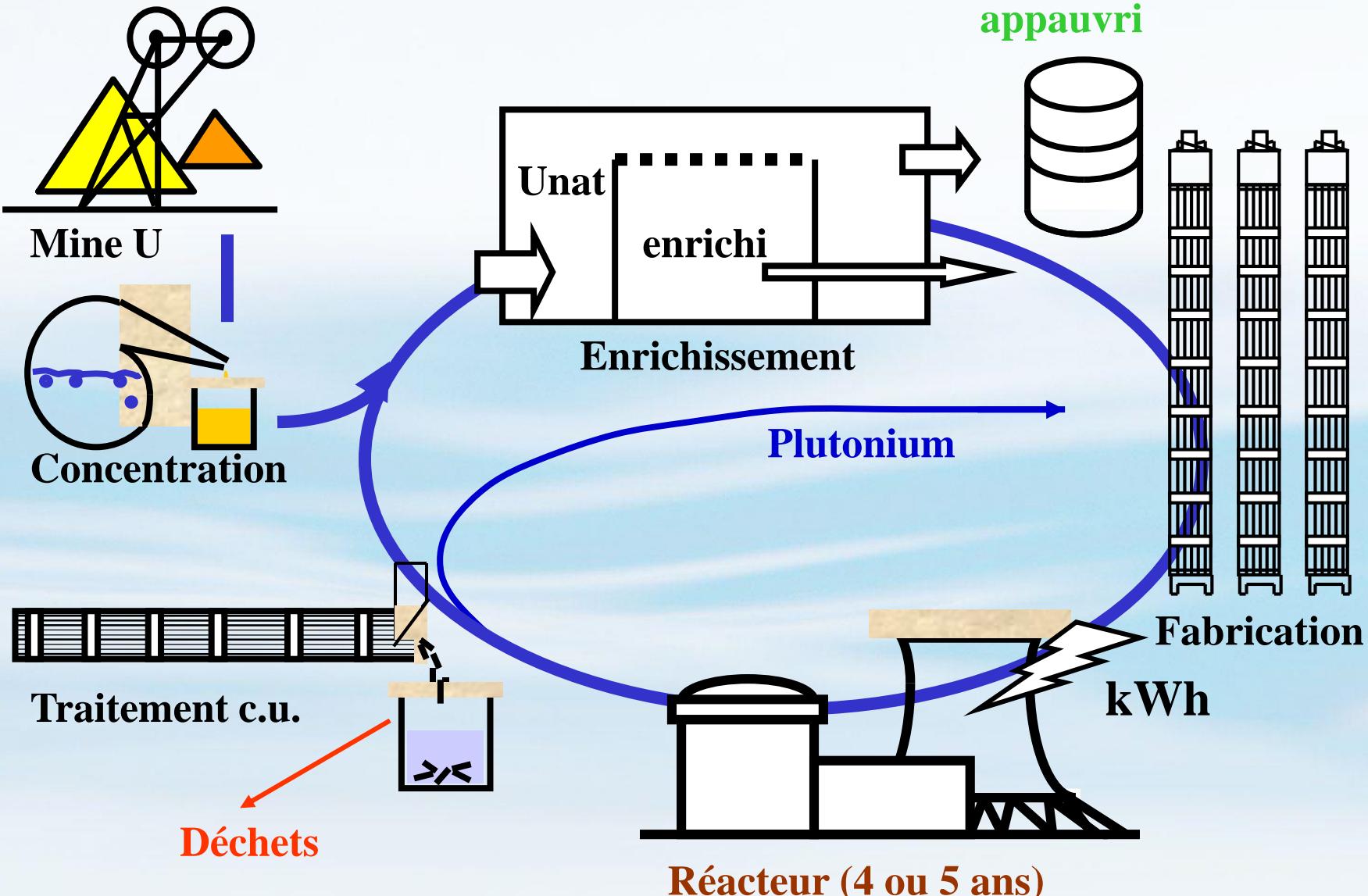
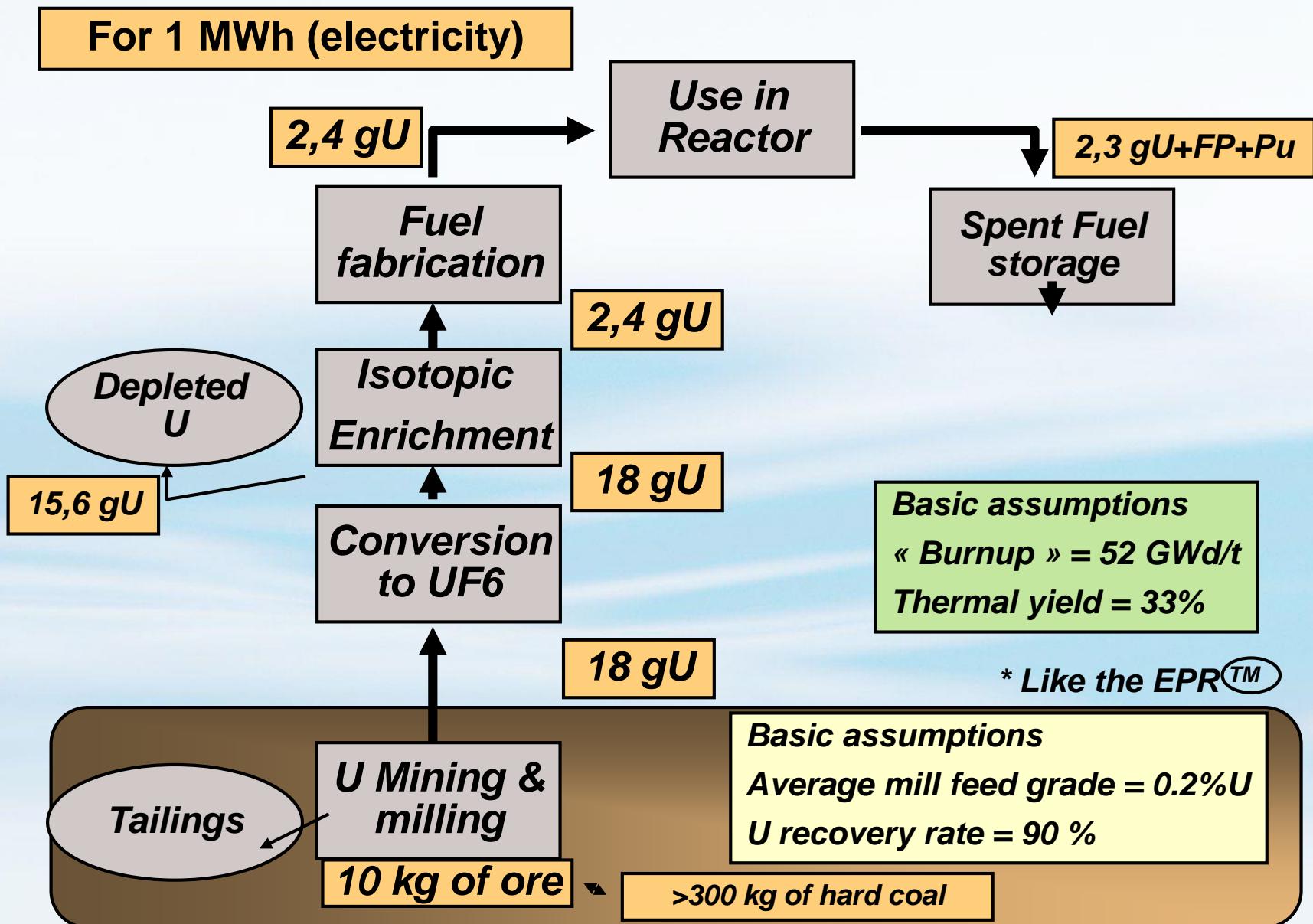
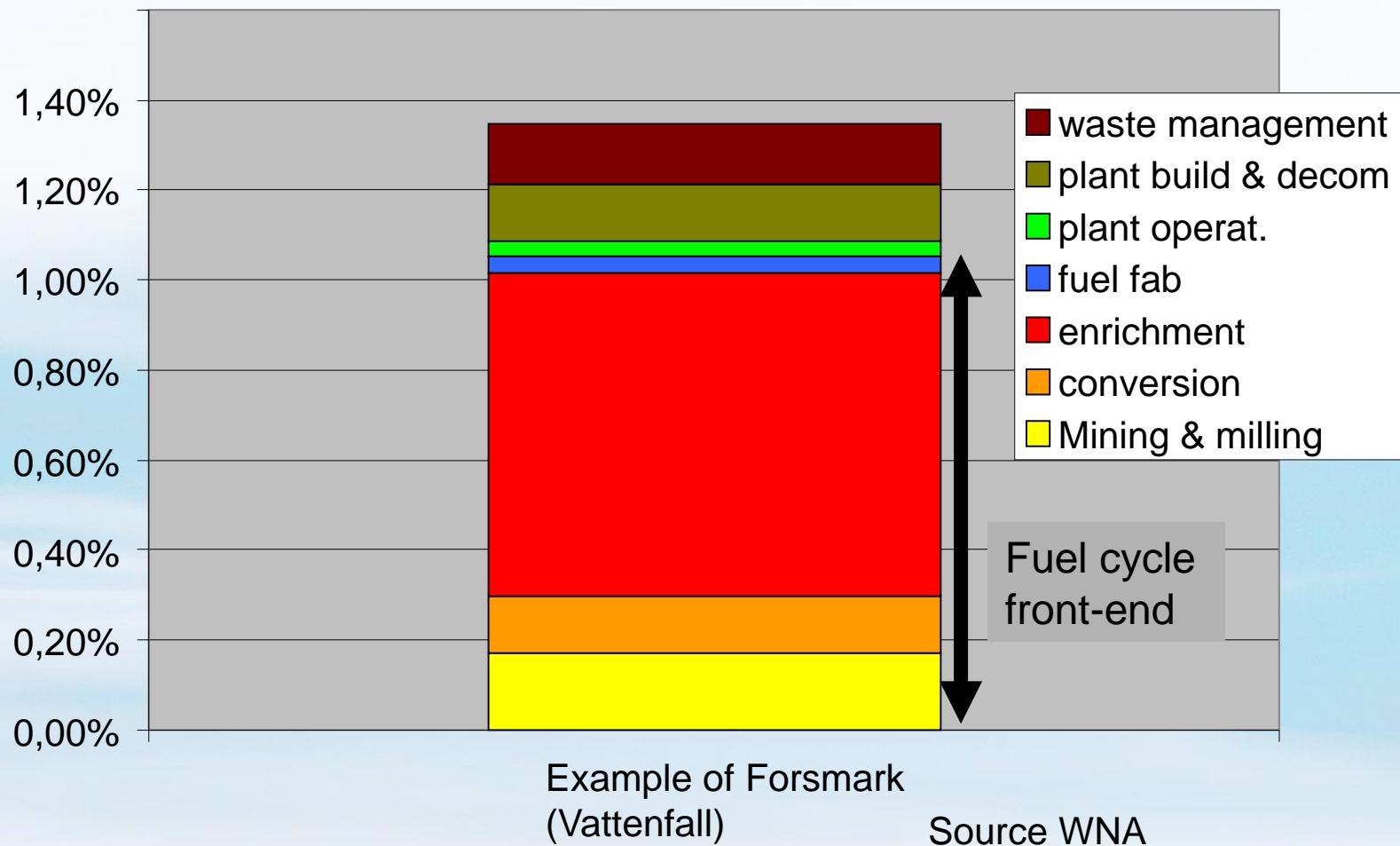


Illustration Bertrand Barré

# Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids

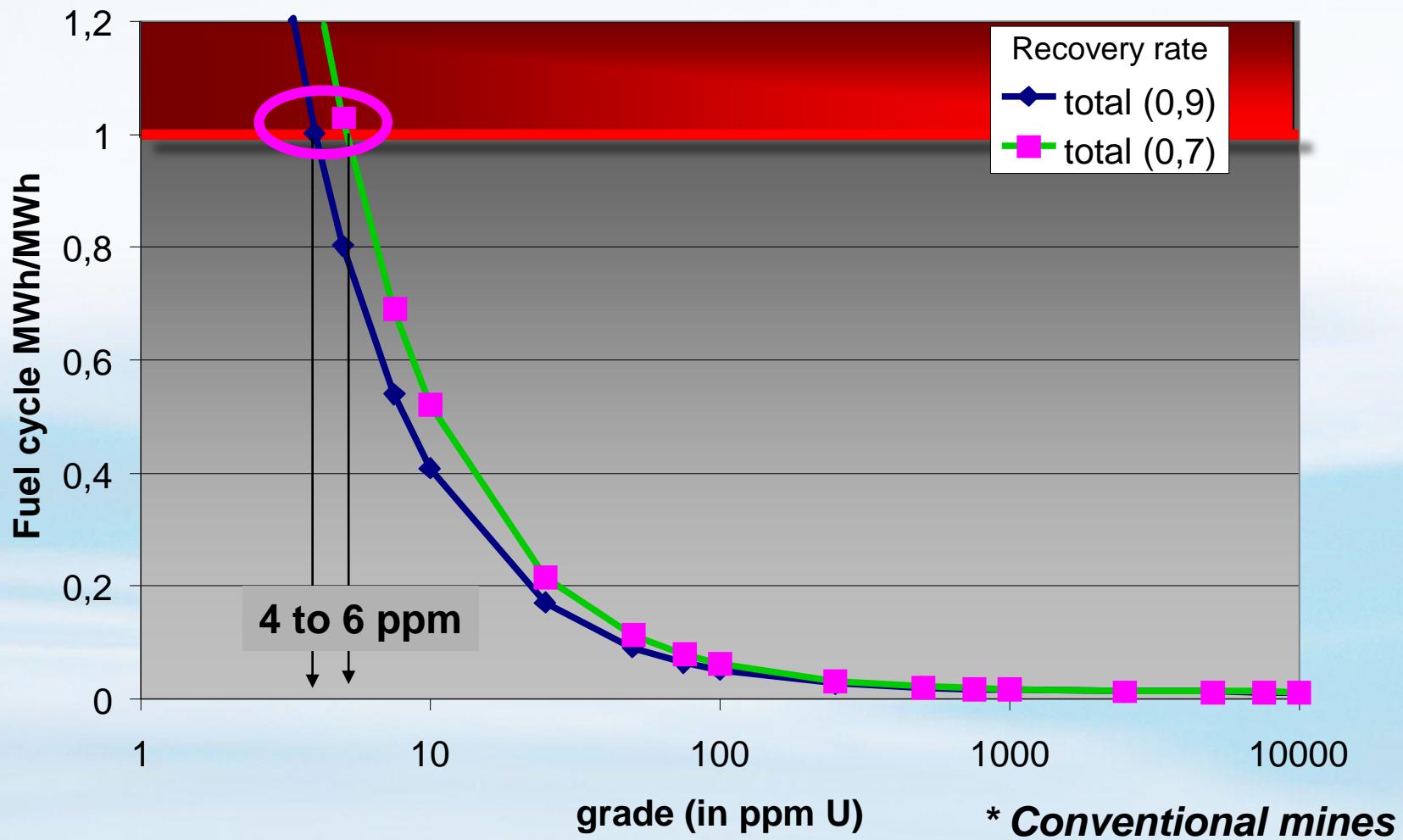


# Combien de kWh pour combien de kWh ?



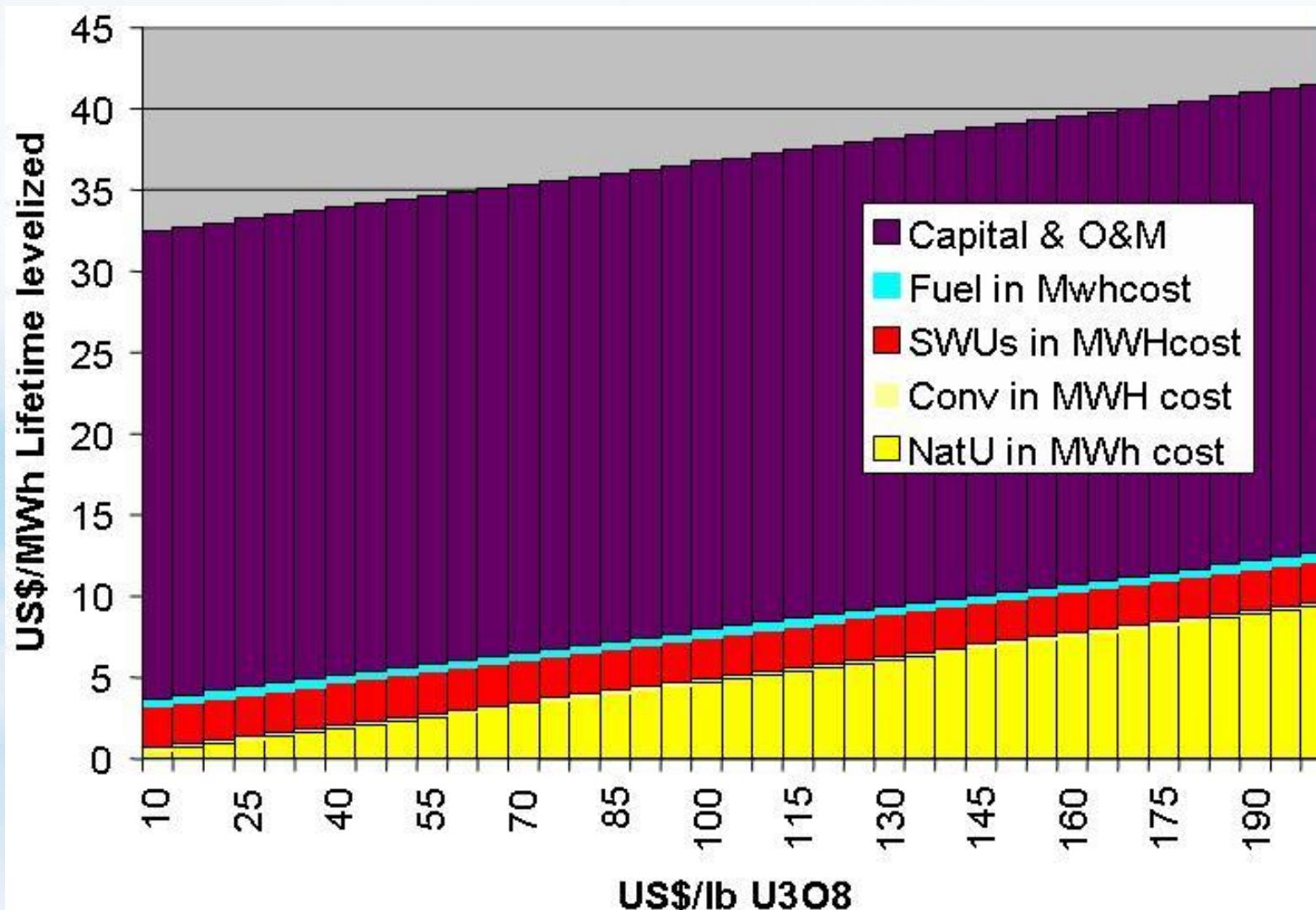
**% de l'énergie finale du réacteur consommée par chaque étape de préparation du combustible. Source Areva**

# kWh or not kWh : il faut compter...



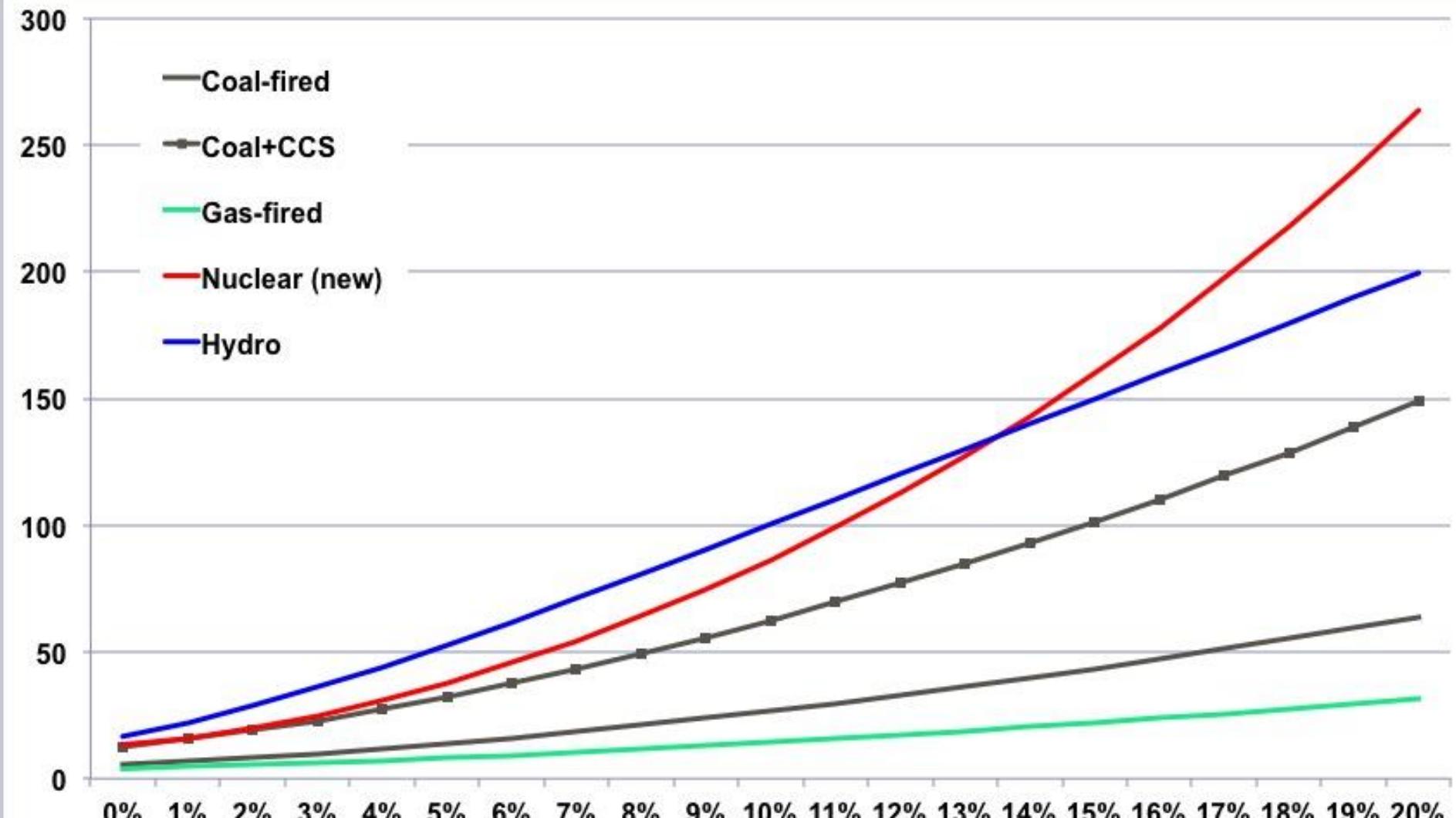
Consommation d'énergie du cycle du combustible en fonction de la teneur du minerai en U. Source Areva.

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

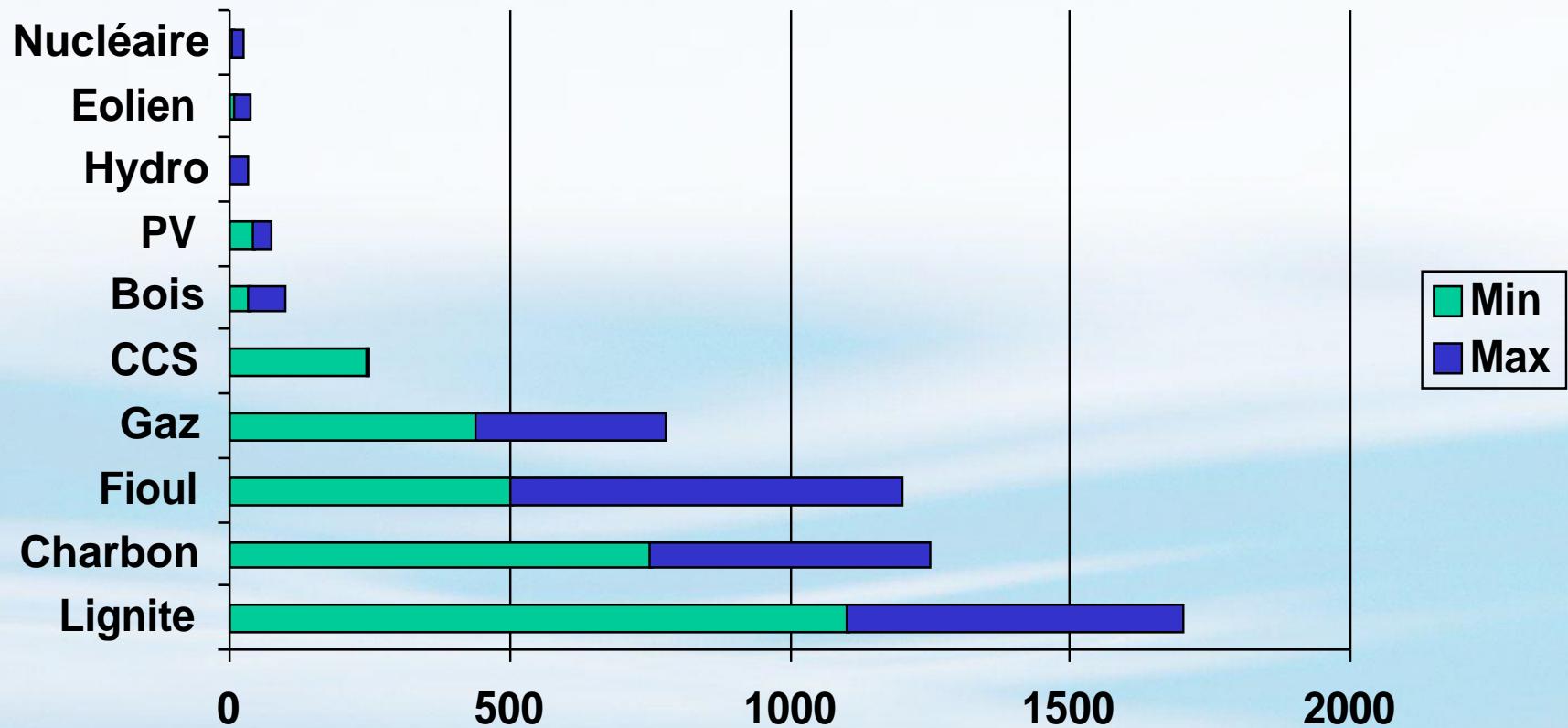


Sensibilité du kWh nucléaire au prix de l'Uranium (\$ par livre de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)  
Source AREVA

# Bien plus important : le cout de l'argent



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



Fourchette des évaluations des émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique selon les modes de production.

# ... mais le public n'en tient pas toujours compte !

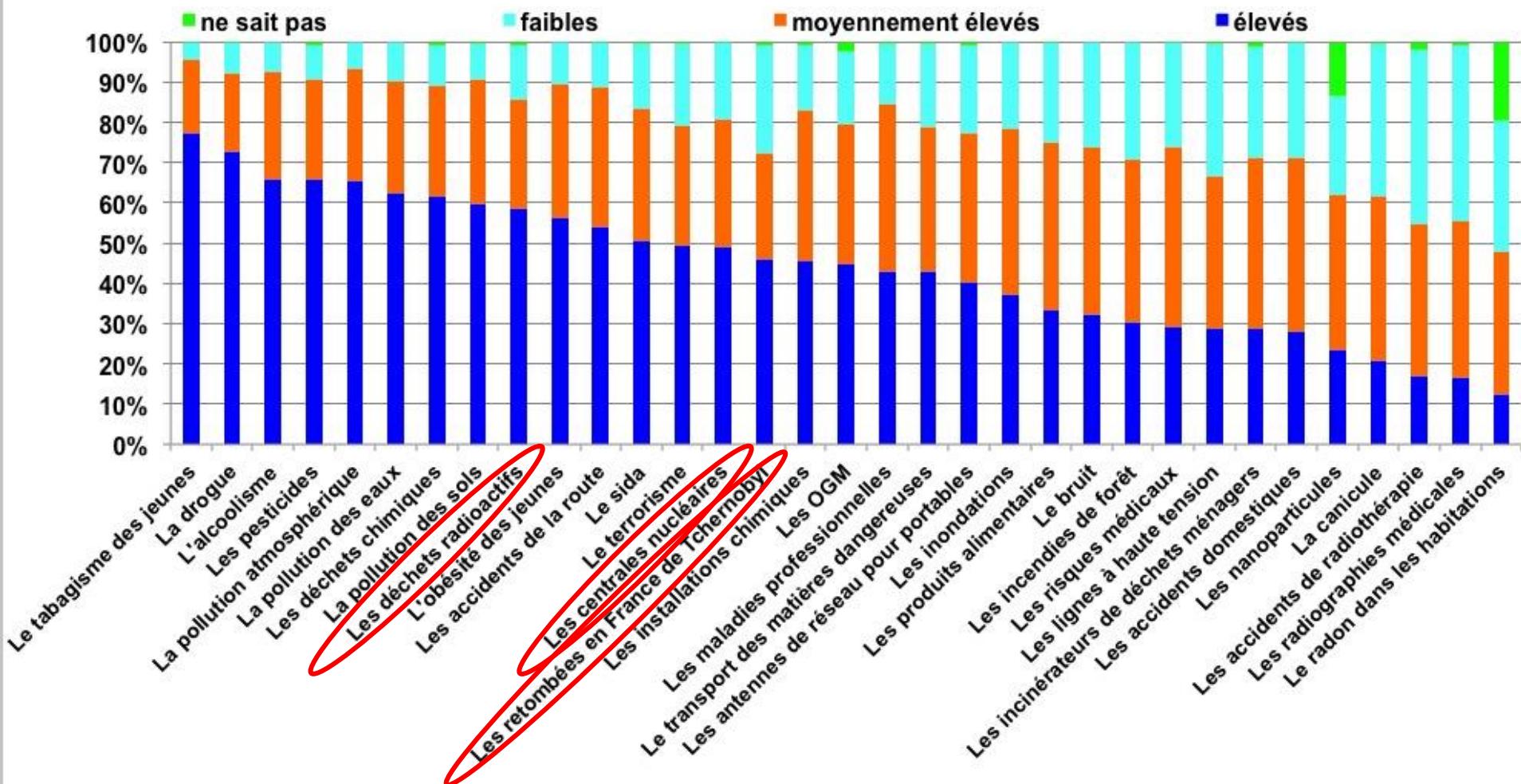
**Pour chacune des activités suivantes dites-moi si d'après ce que vous savez elle contribue beaucoup, assez, peu ou pas du tout à l'effet de serre (Réponse « beaucoup » + « assez » )**

!!!

	Les activités industrielles	Les transports	La destruction des forêts	Les bombes aérosols	Le chauffage des bâtiments	Le traitement des déchets	Les centrales de production d'électricité <b>au gaz au charbon ou au fuel</b>	Les centrales nucléaires	L'agriculture et l'élevage	L'activité volcanique
2014	88	85	88	75	75	74	91*	53	66	36
2013	90	88	89	73	72	70	64	61	59	36
2010	90	88	90	70	70	69	64	61	59	42
2007	93	92	89	75	71	69	59	56	50	31
2004	90	88	87	73	58	70	62	63	41	28
2001	89	87	84	67	46	67	52	61	39	33
2000	85	83	79	64	39	57	60	59	33	30

- La formulation de cet item a changé en 2014 : l'Ademe a ajouté « au gaz, au charbon ou au fuel », ce qui a provoqué une augmentation artificielle de cet item

Baromètre Ademe / CSA



Perception du risque par la population pour divers facteurs. Source Baromètre IRSN, 2014

## Causes de mortalité en France (rangées dans l'ordre de la perception des risques):

Tabagie  $\approx$  70.000 morts par an

Drogue  $\approx$  1.000 morts par an (y compris accidents de la route)

Alcoolisme  $\approx$  30.000 morts par an

Pollution atmosphérique  $\approx$  10.000 morts par an

**Les déchets nucléaires : 0 mort par an**

Obésité  $\approx$  50.000 morts par an

Accidents de la route  $\approx$  3.000 morts par an

SIDA  $\approx$  300 morts par an

Terrorisme  $\approx$  quelques dizaines de morts par an

**Les centrales nucléaires : 0 mort par an**

**Les retombées en France de Tchernobyl : 0 mort par an**

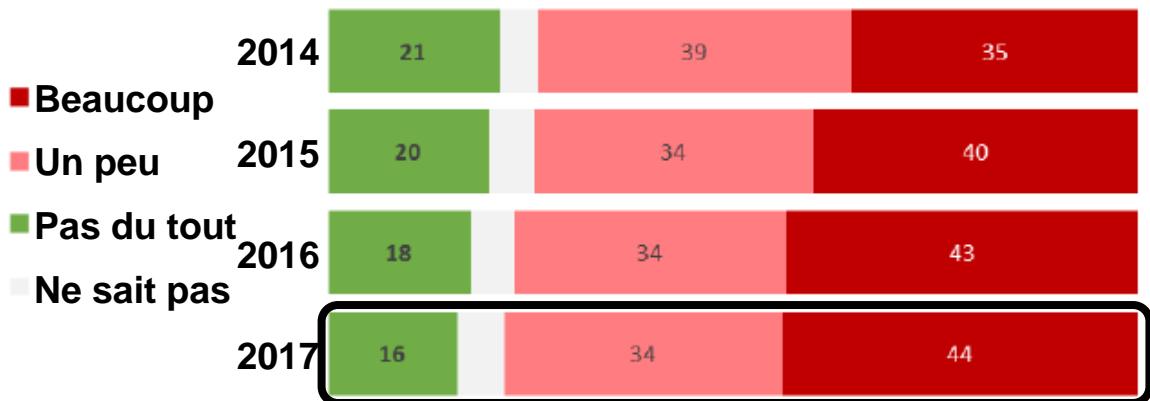
Maladies professionnelles et accidents du travail  $\approx$  500 morts par an

Accidents domestiques  $\approx$  10.000 morts par an

Le radon  $\approx$  2.000 morts par an

# En démocratie, ce que pense l'électeur, non les faits

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

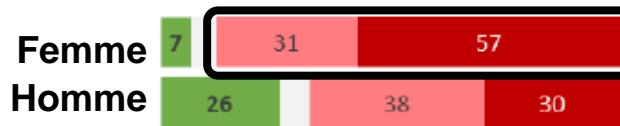


Source : EDF BDD France 2014-2017

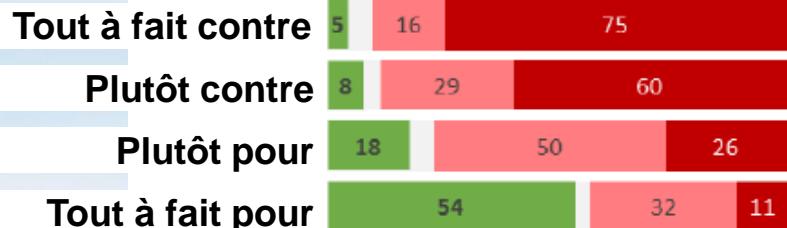
!!!

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.



!!!



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.

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			
		Identified (deposits)	Undiscovered		
Cost of recovery \$/lbU308		Reasonably Assured Resources	Inferred Resources ①	Prognosticated Resources ②	Speculative Resources ③
<15		1.95	0.80		
15 - 30	40 to 80	0.70	0.36	1.7	4.6
30 - 50	80 to 130	0.65	0.29	0.82	
> 50	> 130	-	-	?	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 <b>Resources: &gt; 200 times 2006 demand</b>					

Équivalent du 1P

≈ Équivalent du 2P

Total haut de fourchette : > 30 à 40 Mt

Source AREVA

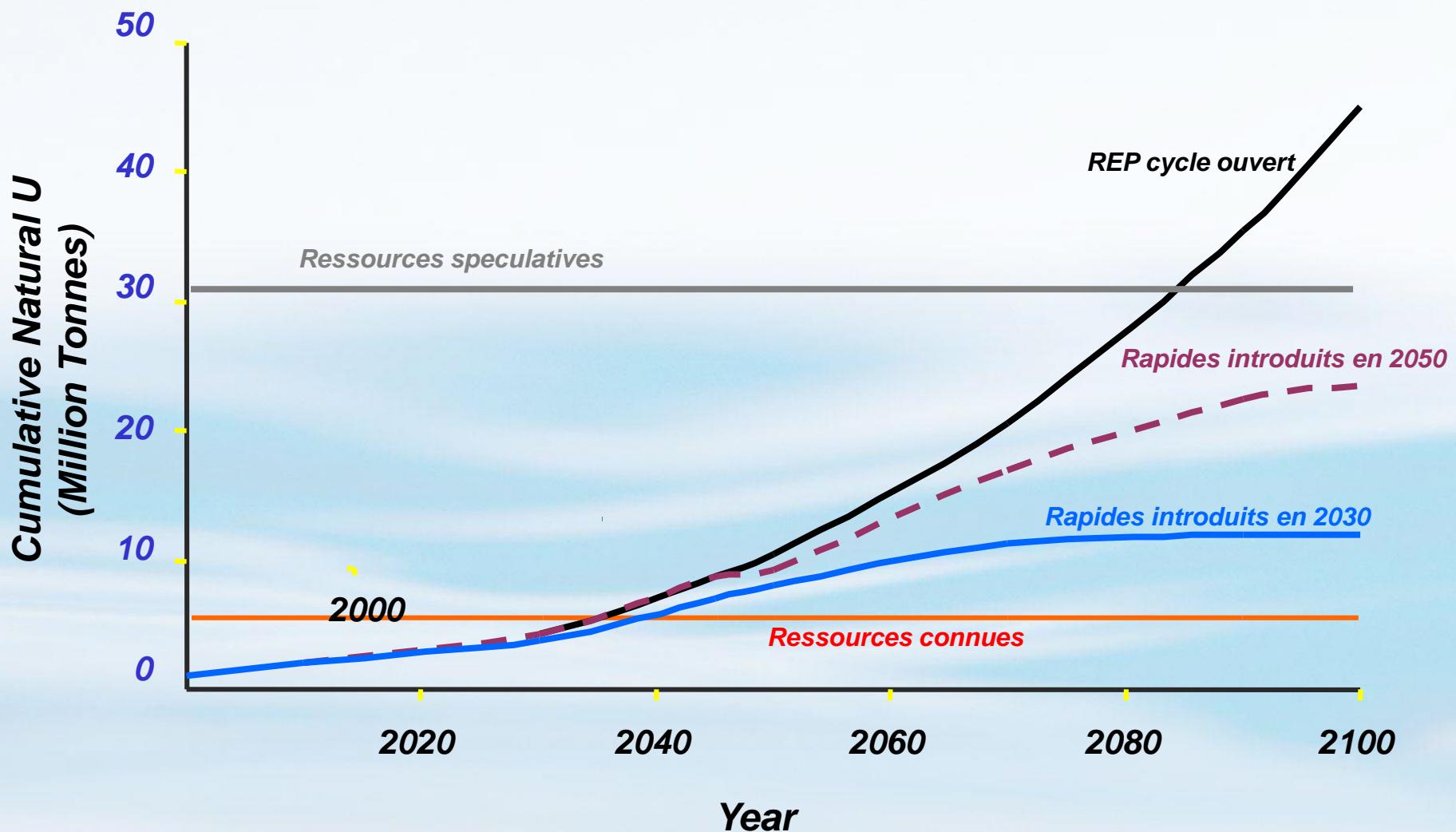
- ① Based on direct geological evidence
- ② Based on indirect geological evidence
- ③ Extrapolated values

## Unconventional

15 to 25

Phosphates, eau de mer...

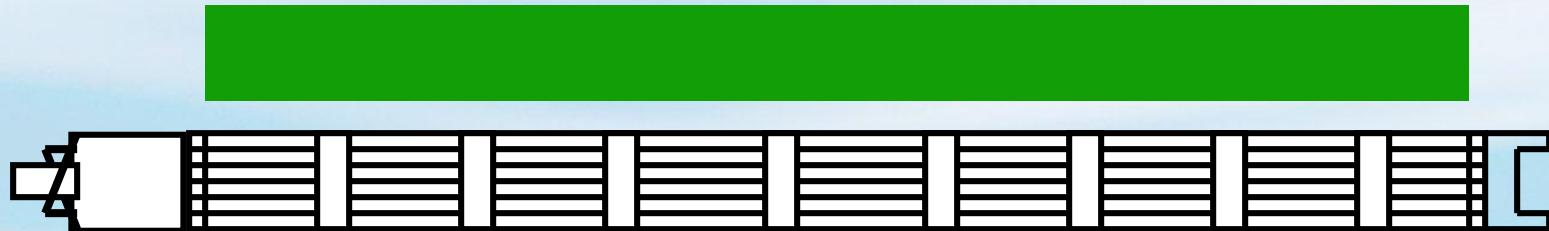
# On joue au petit jeu des exponentielles ?



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

## Combustible neuf

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



Uranium (0,9%  $^{235}\text{U}$ ) : 475 kg      Pu : 5kg      PF\* : 20 kg

← →  
*recyclables*

## Combustible usé

*\*(et quelques Actinides mineurs)*

Illustration Bertrand Barré

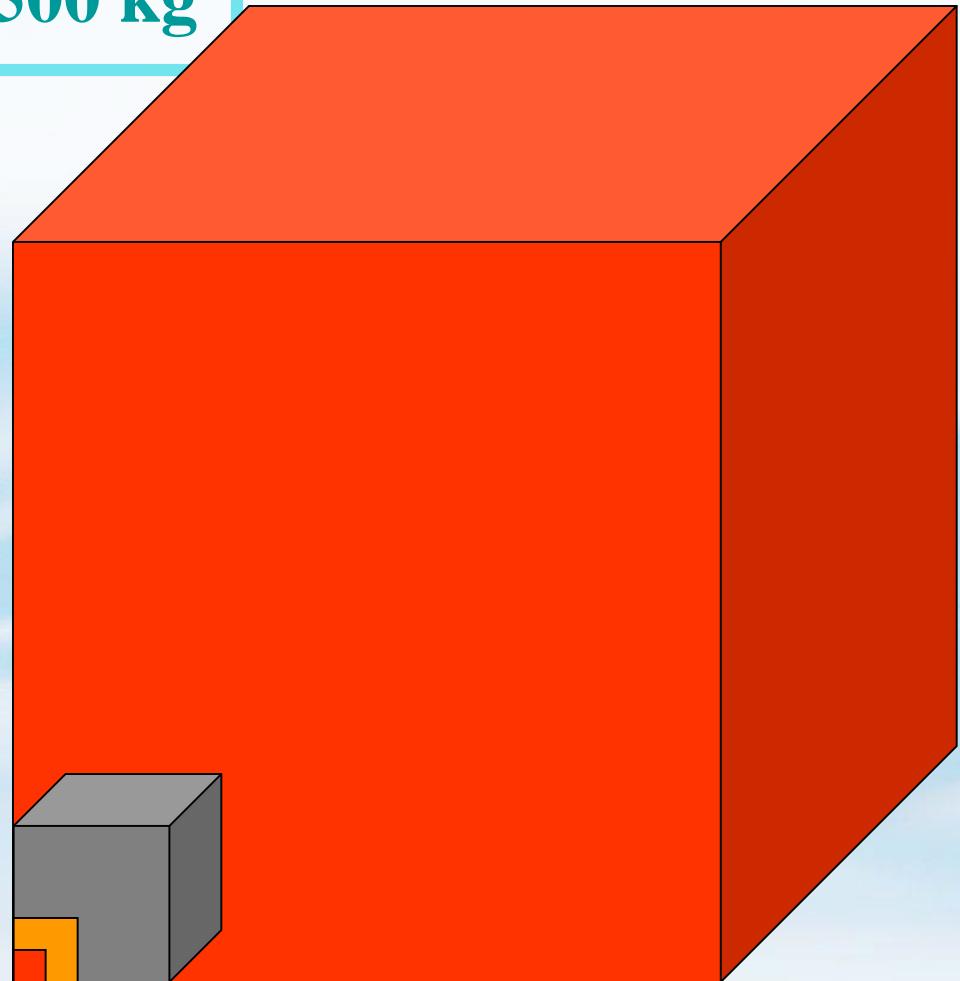
**Déchets industriels : 2 500 kg**

**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**

# Les déchets, quelques ordres de grandeur

Catégorie de déchets	Production totale (part française)
<b>TFA</b> (hors résidus miniers)	1 à 2 000 000 m <sup>3</sup>
<b>FMA – vie courte</b>	1 300 000 m <sup>3</sup> (stockés)
<b>FMA – vie courte</b> - Déchets tritiés	3 500 m <sup>3</sup>
<b>FA – vie longue</b> - Graphites	14 000 m <sup>3</sup>
<b>FA – vie longue</b> - Radifères	> 100 000 m <sup>3</sup>
<b>MA – vie longue</b>	60 000 m <sup>3</sup>
<b>HA</b> - Produits de fission vitrifiés	5 000 m <sup>3</sup>

**Volumes de déchets pour 40 ans d'exploitation du parc actuel.**  
**Source ANDRA**



Stockage faible activité à Soulaines



**Et une poubelle naturelle !**



Gisement d'uranium d'OKLO au Gabon.

# Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment

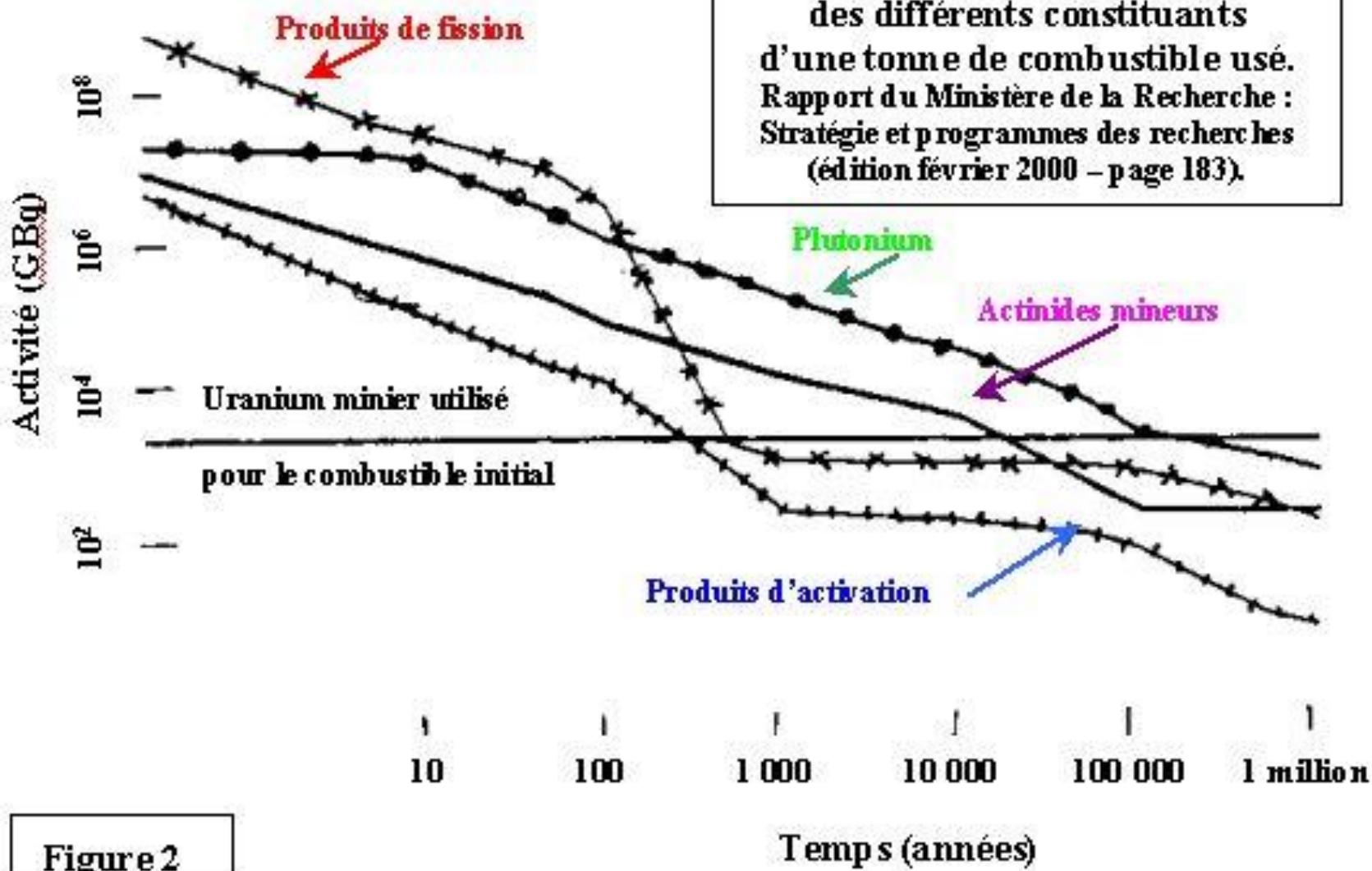
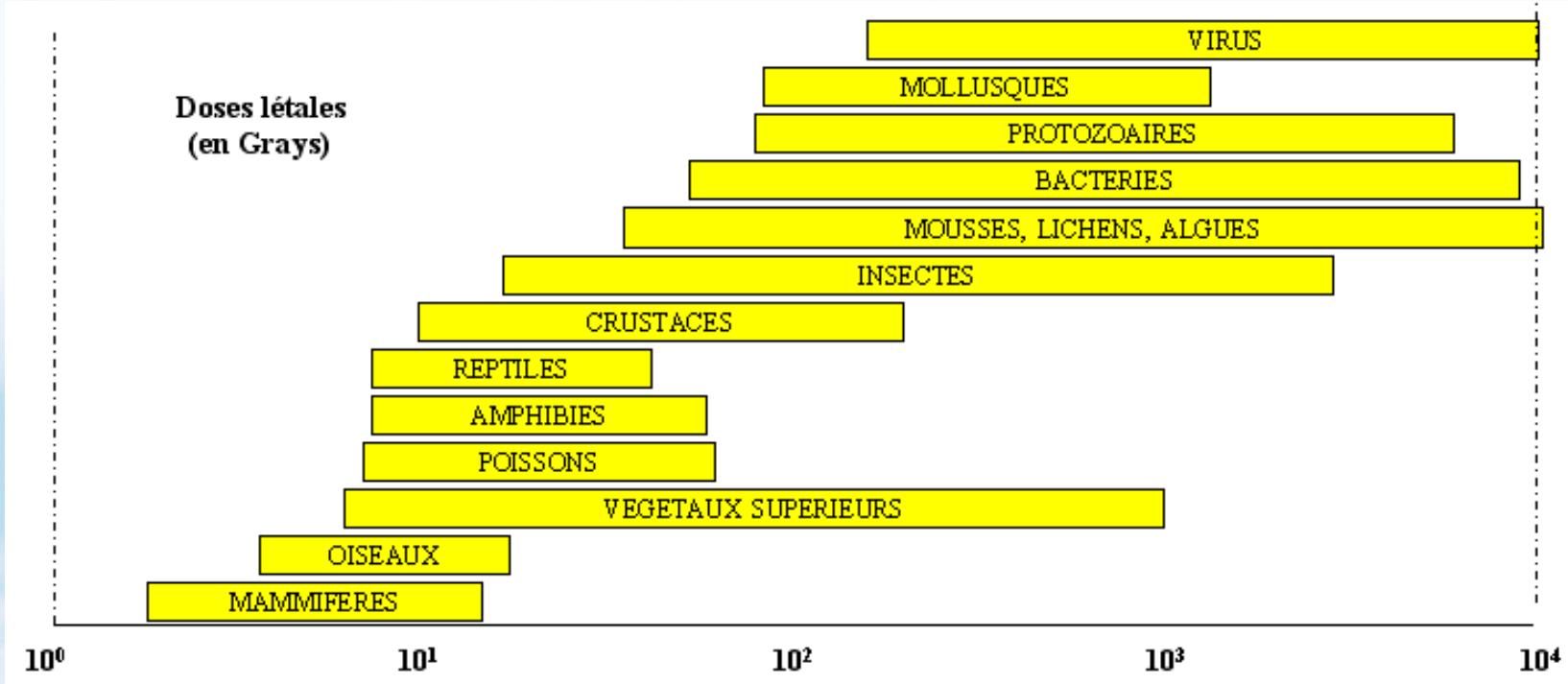


Figure 2

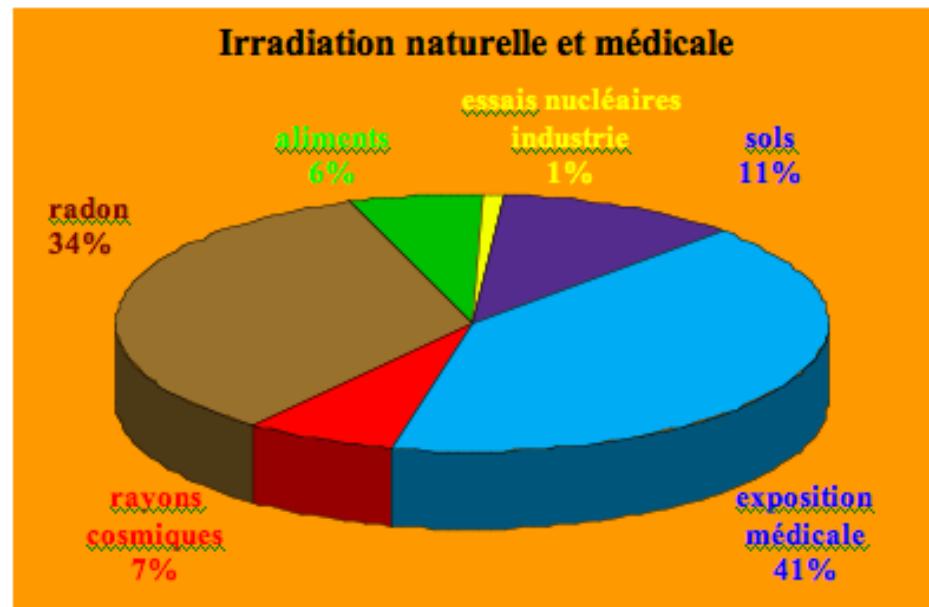
# L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



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

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

# 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
- Espirito 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

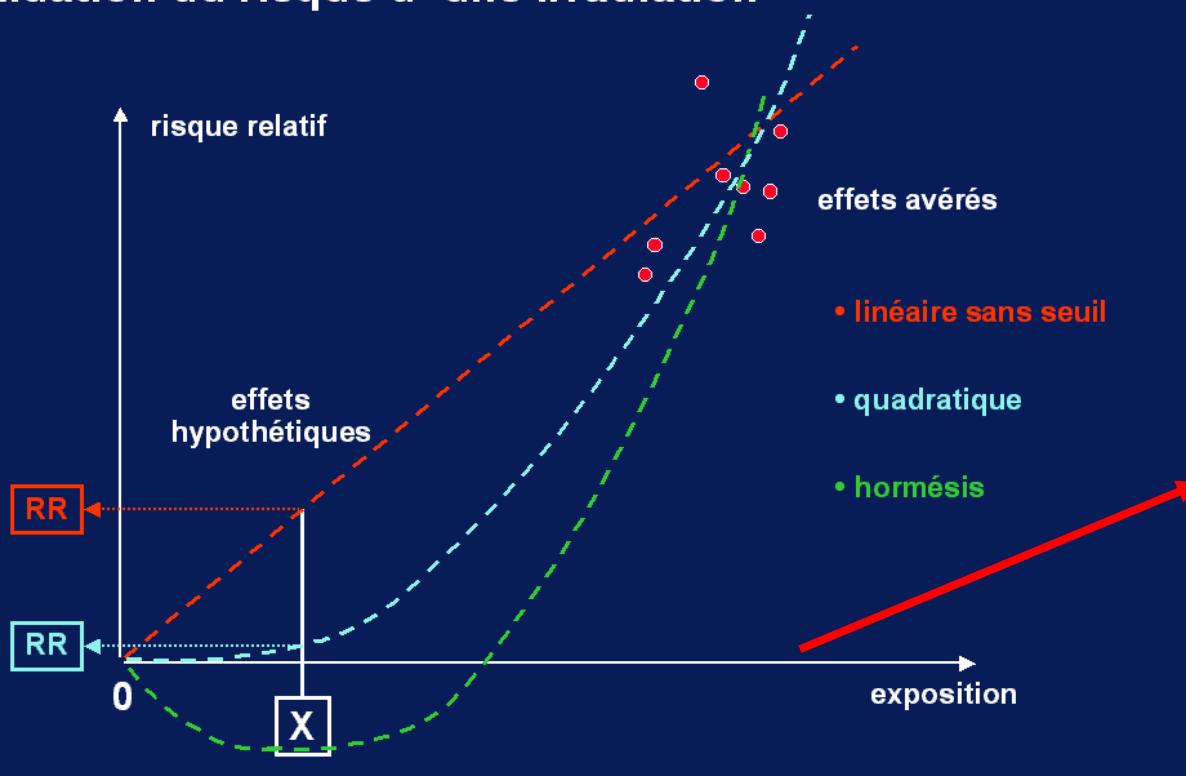
Décomposition du rayonnement reçu par Français et par an en mSv  
Source André Aurengo, 2003



**Effet conjugué d'une déficience en vitamine D et d'un empoisonnement chronique au fluor - venant du charbon - sur un enfant chinois.**  
**Source : Health Impacts of Coal, Robert B. Finkelman, US Geological Survey, 2003**

# La relation linéaire dose-effet sans seuil, commode mais faux

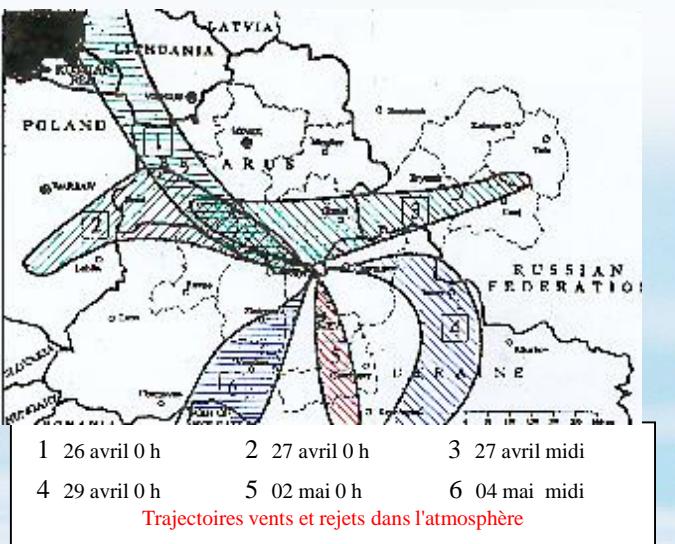
## évaluation du risque d 'une irradiation



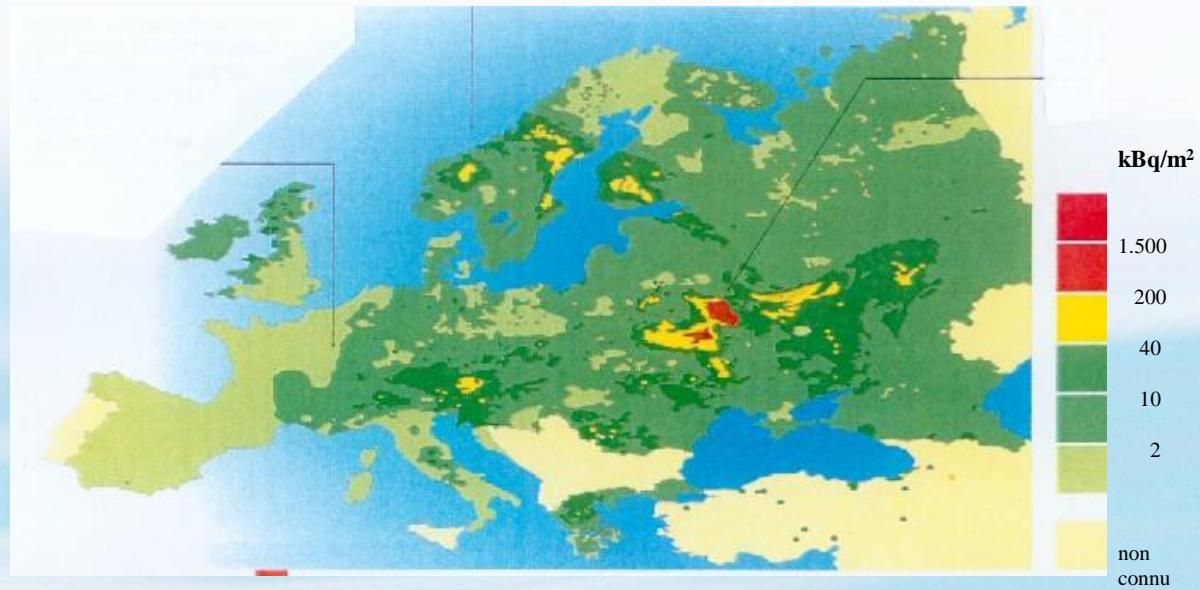
**Effets sanitaires :**  
**Déterministes**  $> 700 \text{ mSv}$  ; effet croît avec dose  
**Stochastiques adultes**  $> 200 \text{ mSv}$  ; proba croît avec dose, pas effet  
**Stochastiques enfants**  $> 100 \text{ mSv}$   
**Stochastiques foetus**  $> 20 \text{ mSv}$

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

# Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent

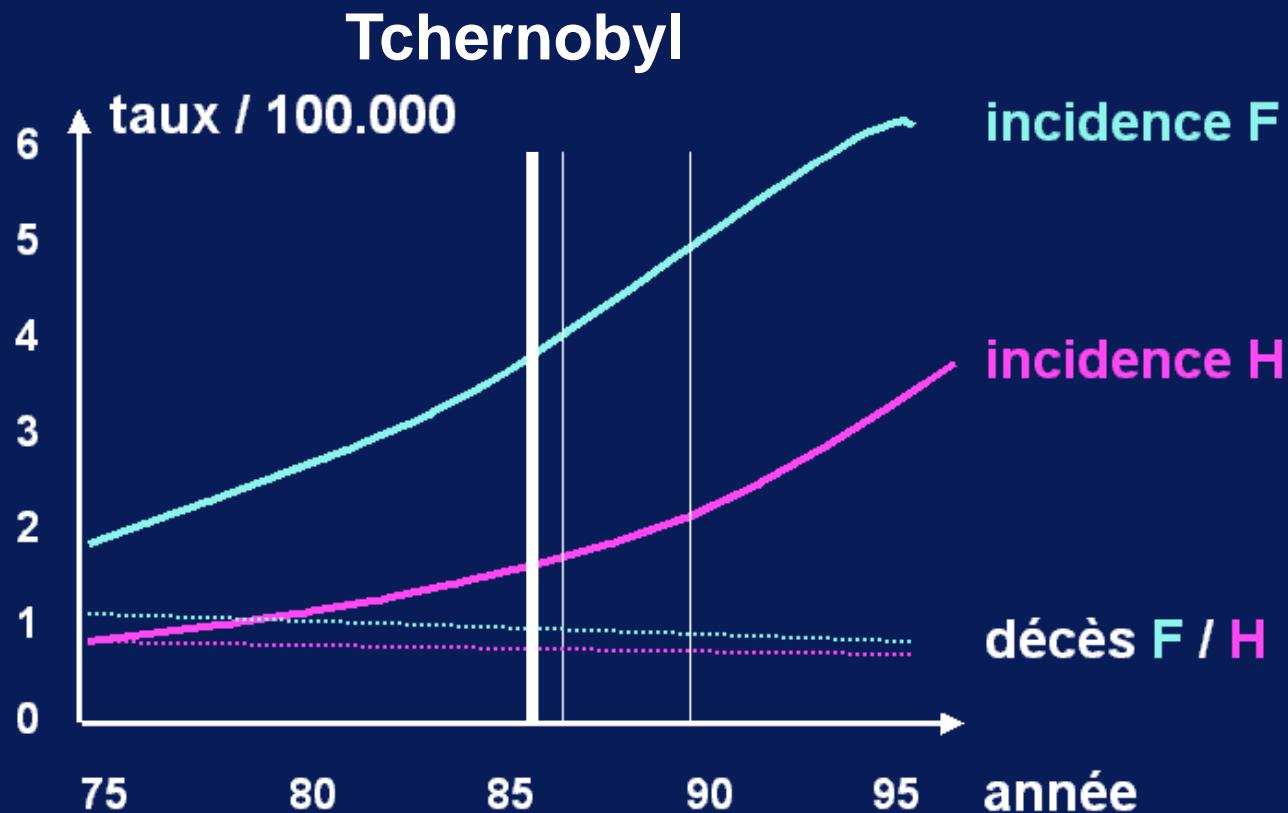


**Trajectoires (évaluées) des panaches de Tchernobyl**



**Estimation des activités en Cs-137 déposé sur certains pays d'Europe après l'accident de Tchernobyl**

## cancers thyroïdiens en France 1975 - 1995

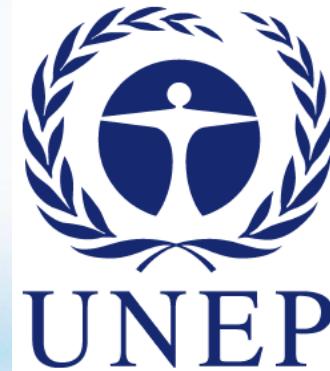


Source André Aurengo

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



United Nations  
Environment  
Programme



United Nations  
Environment  
Programme



World Health  
Organization



United Nations Scientific Committee  
on the Effects of Atomic Radiation

1988

1955

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

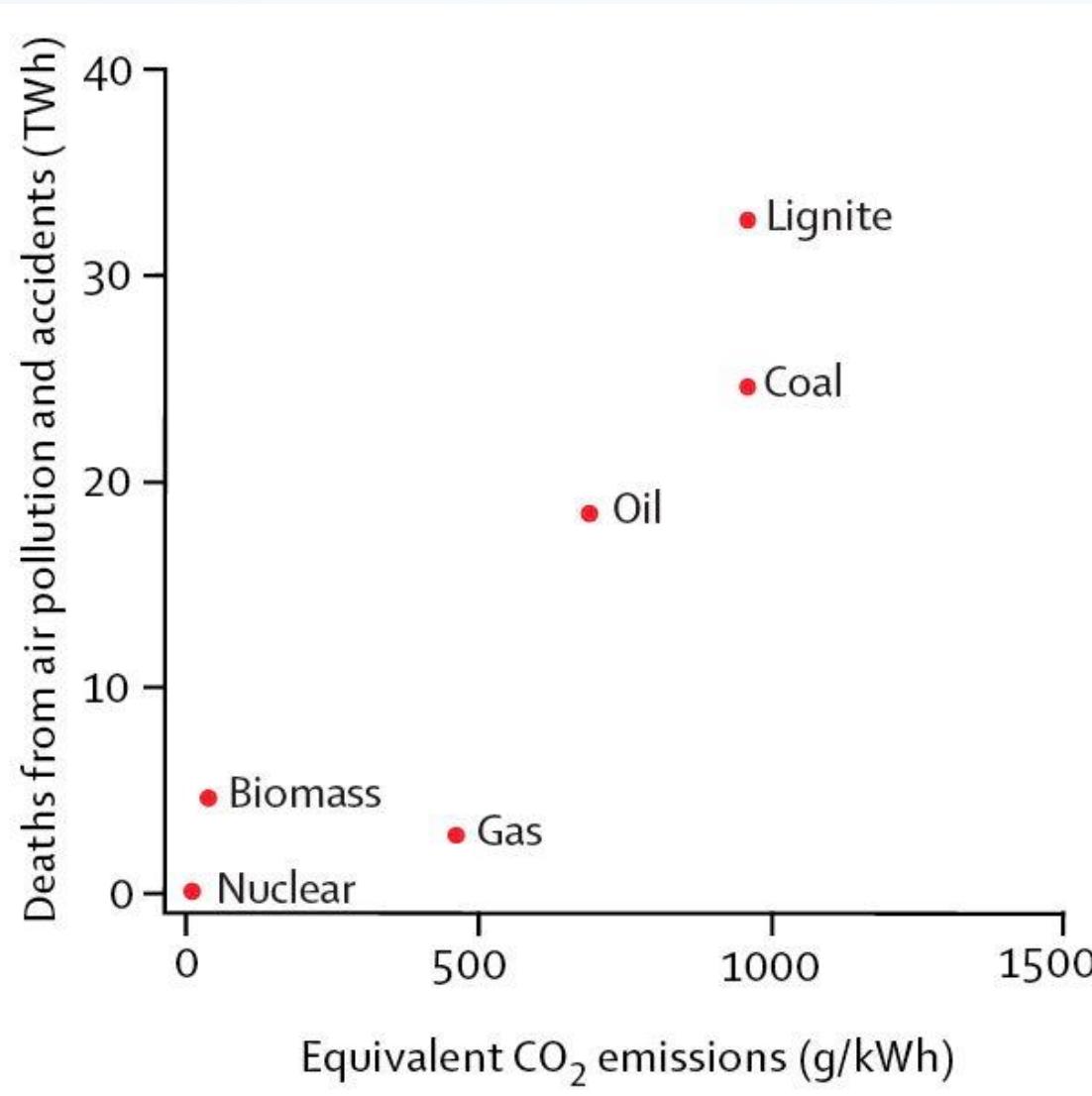
SCIENTIFIC ANNEX A:

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.**

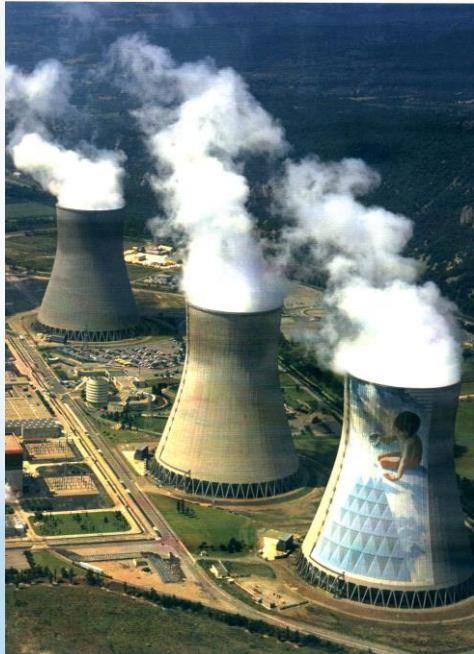
# Les médecins sont-ils tous tombés sur la tête ?



**Morts par TWh électrique (et émissions de CO<sub>2</sub> 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

# Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ?

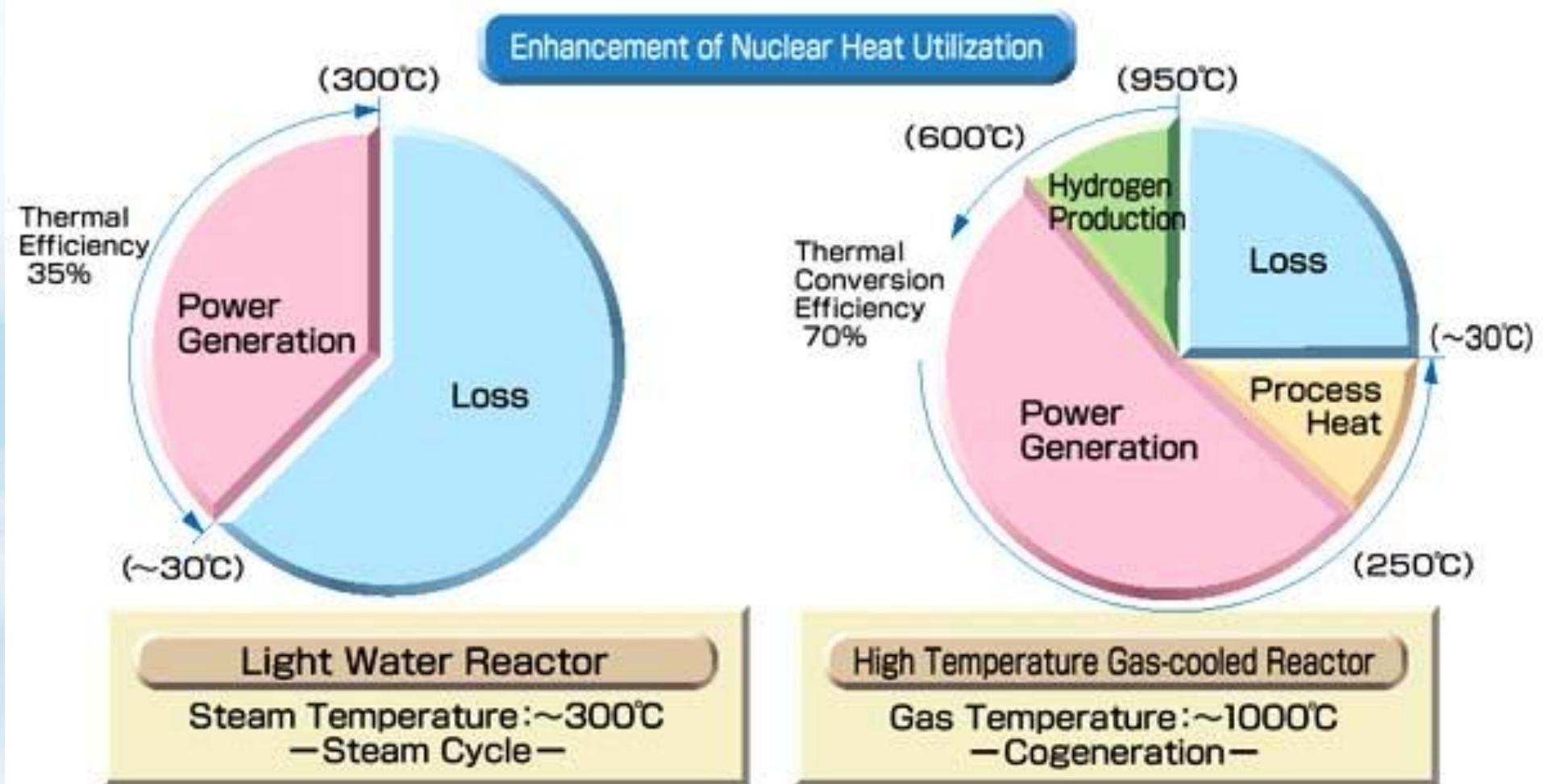


Il y a indiscutablement des bases scientifiques communes

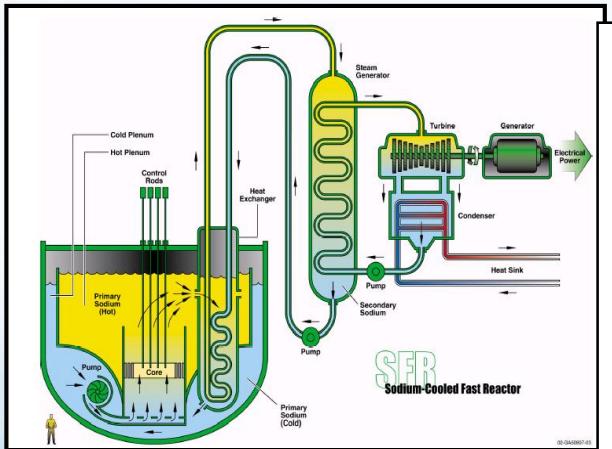
Les filières d'accès aux matières fissiles peuvent être les mêmes, mais pas toujours (ex Pu 239 pas compatible avec l'exploitation commerciale d'un REP, mais oui pour CANDU)

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...)

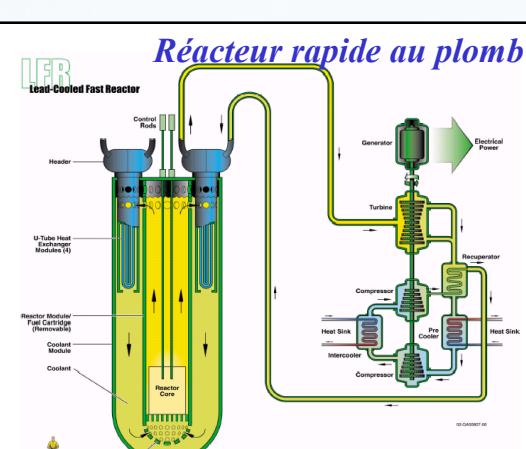
Développer l'électricité nucléaire fait entrer dans un système international d'engagements, de contrôles, qui rend plus détectables les activités clandestines (Corée du Nord, Iran)



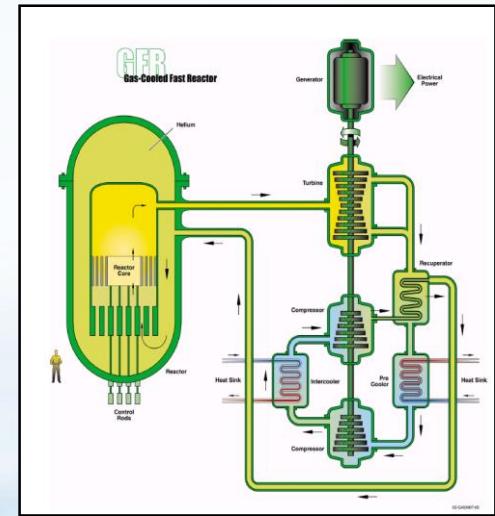
# Les projets dans les cartons



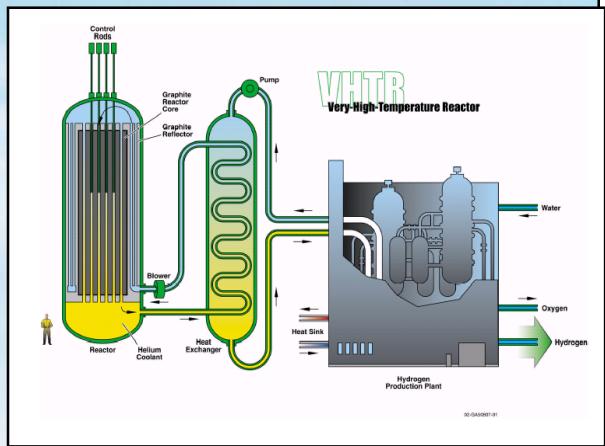
Réacteur rapide Sodium



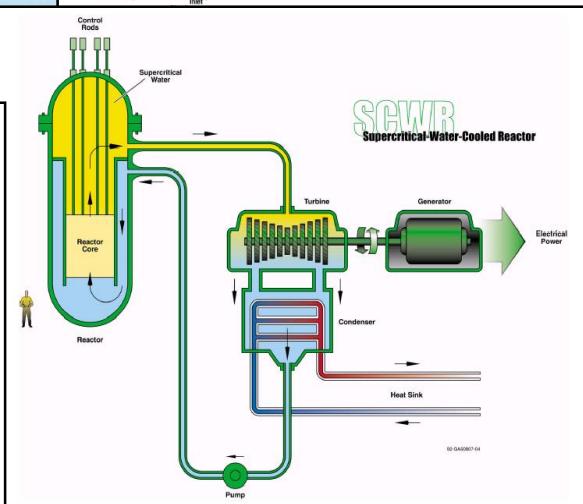
Réacteur rapide au plomb



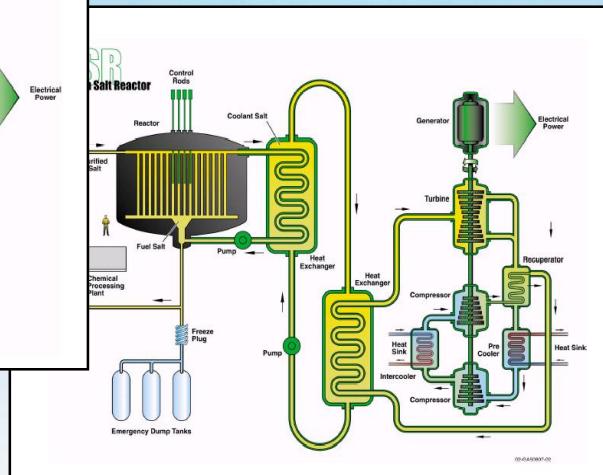
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température

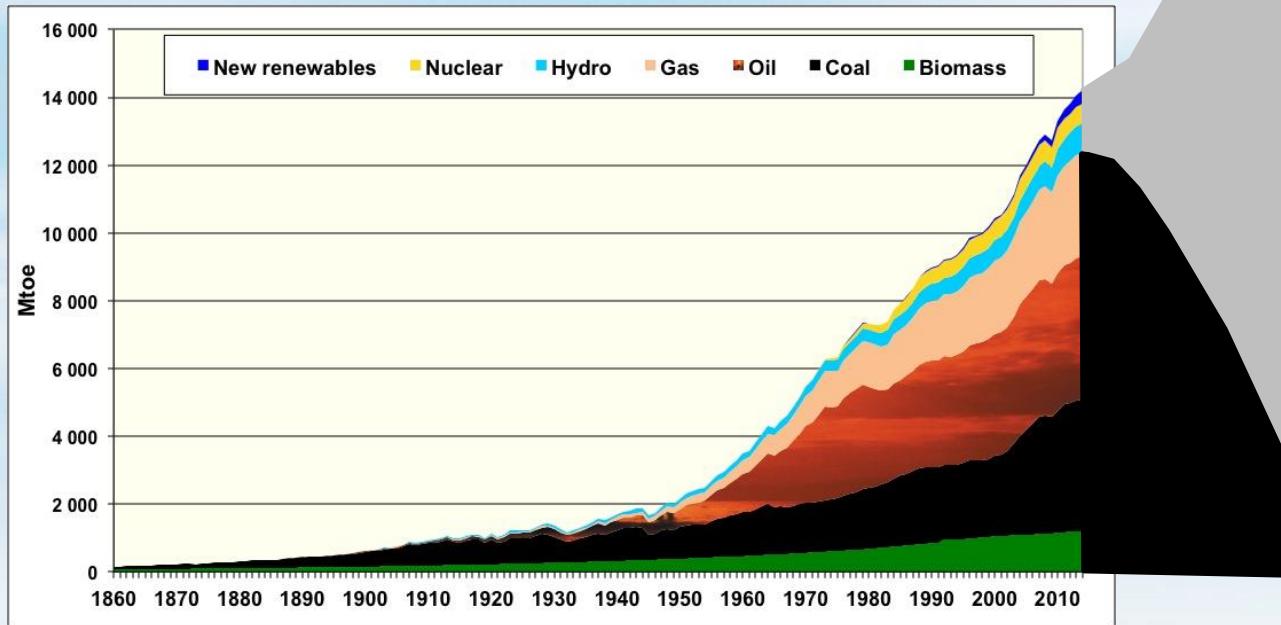


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

# 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  $\approx 3000$  GW nucléaires en 2050 ( $\approx 300$  aujourd'hui), 6.000 si 50% de pertes après production de l'électricité pour « autre chose » (stockage, conversion en H<sub>2</sub>, etc), **10.000 à 15.000** si peu de contribution des renouvelables.

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

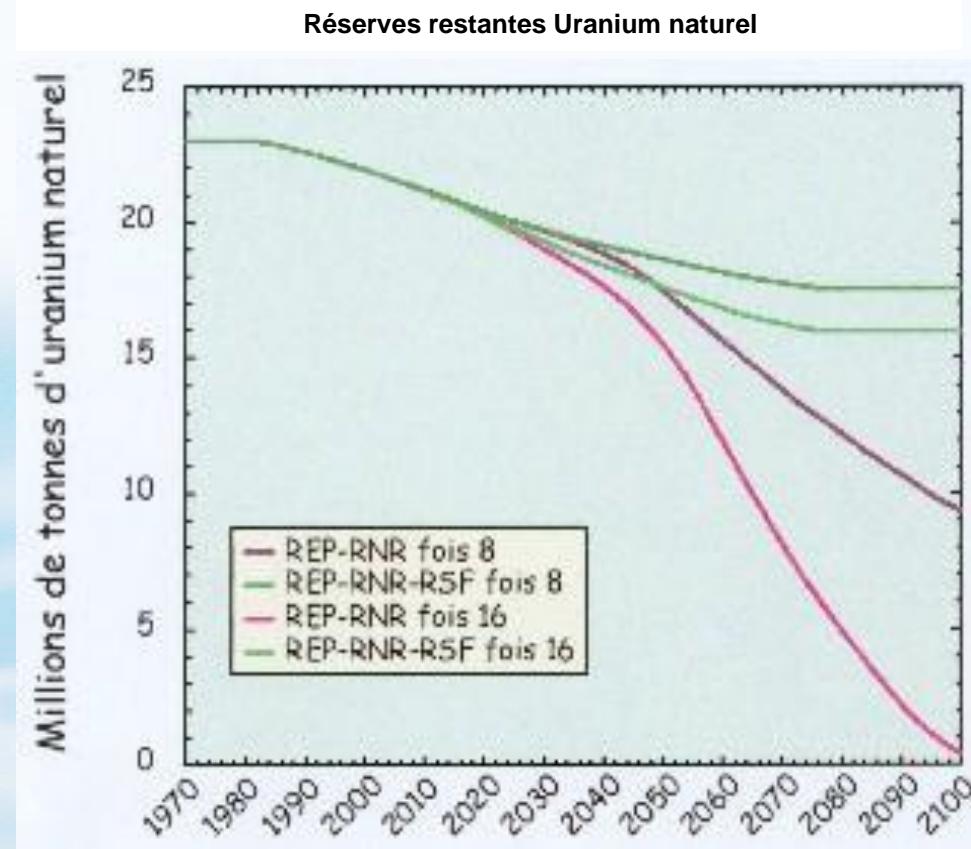
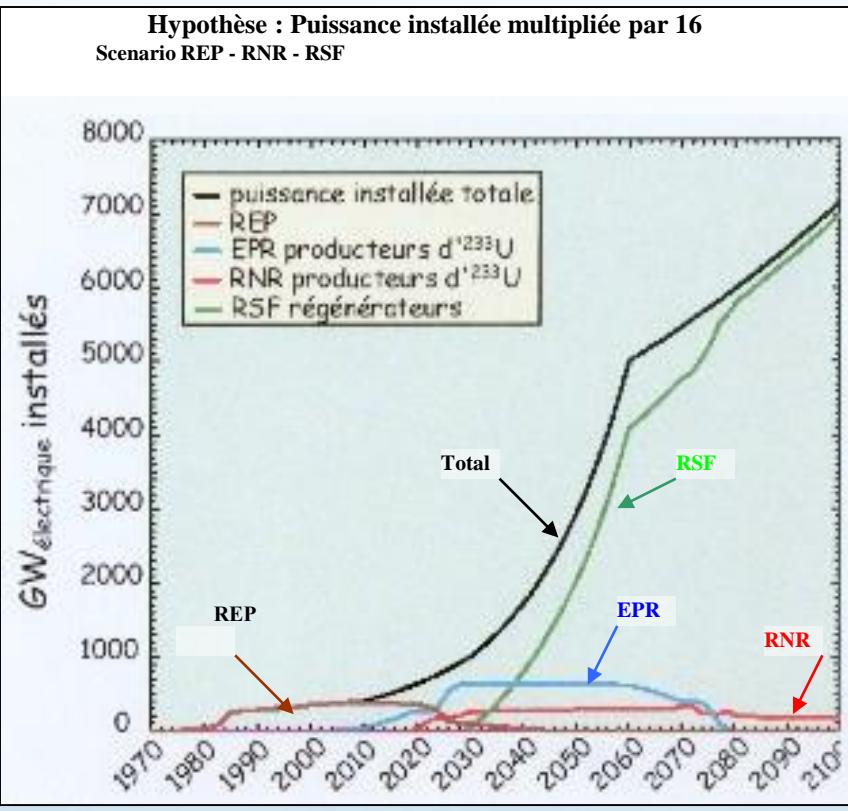
Y aura-t-il les compétences ?

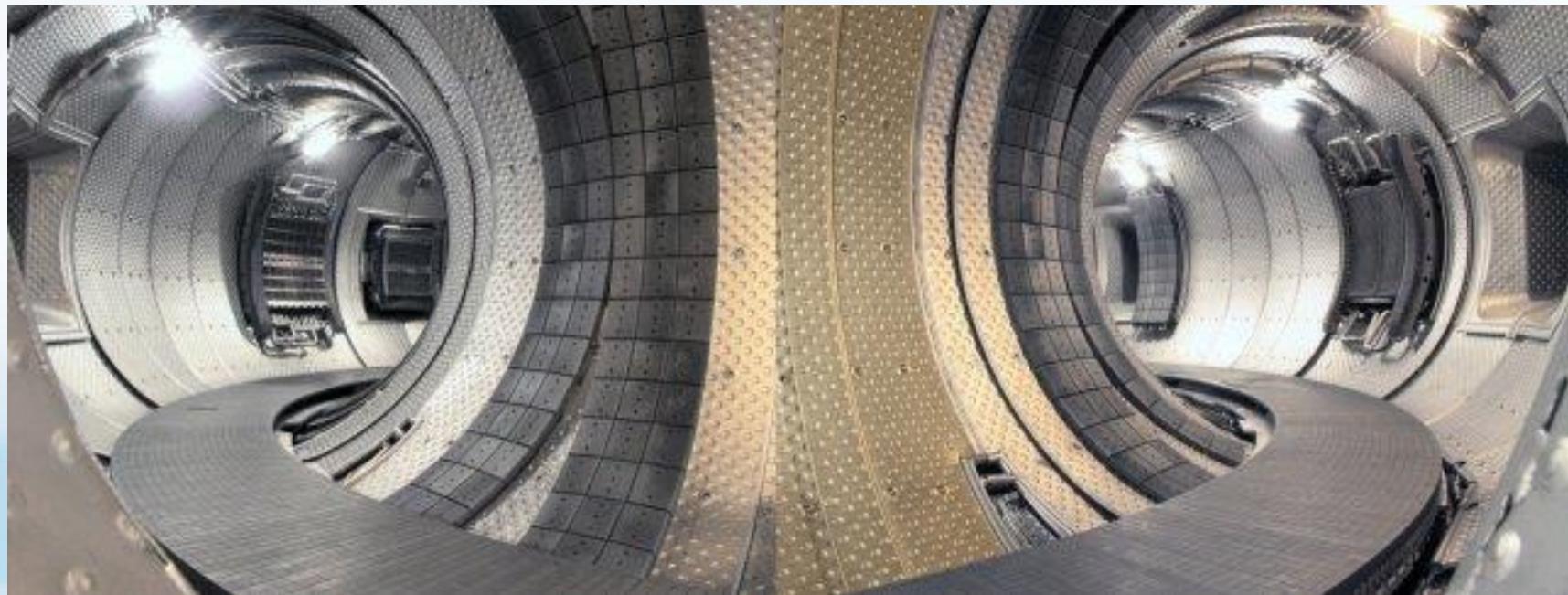
Y aura-t-il la volonté en démocratie, avec 20 ans de préavis ?

Y aura-t-il les emplacements ? Etc etc

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

# Et quid de l'uranium ?





## 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 ?**