

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



Jean-Marc Jancovici - ENSMP 2010
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).

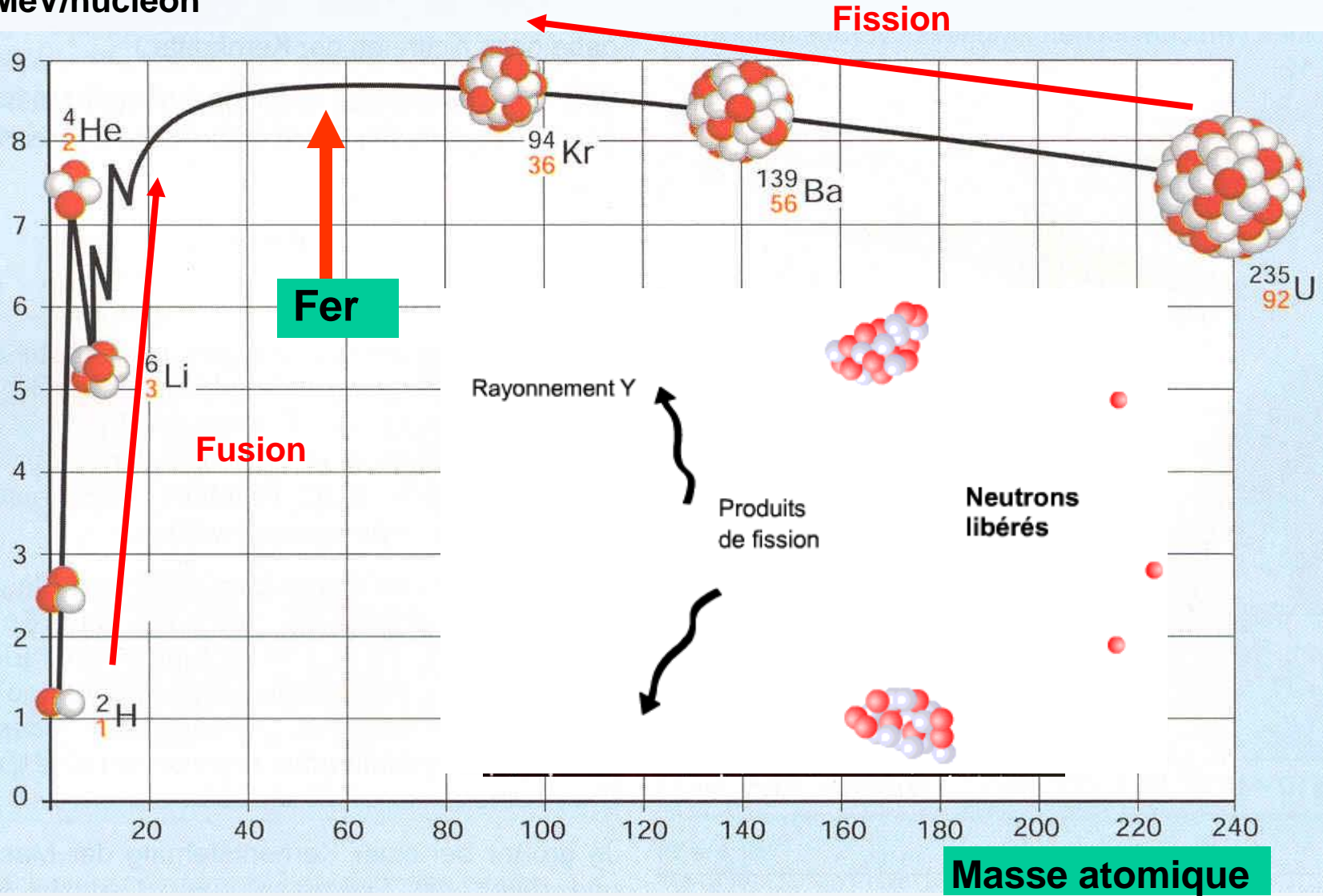
La première version est de casser en plusieurs morceaux un gros noyau (fission), avec libération d'énergie au passage

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



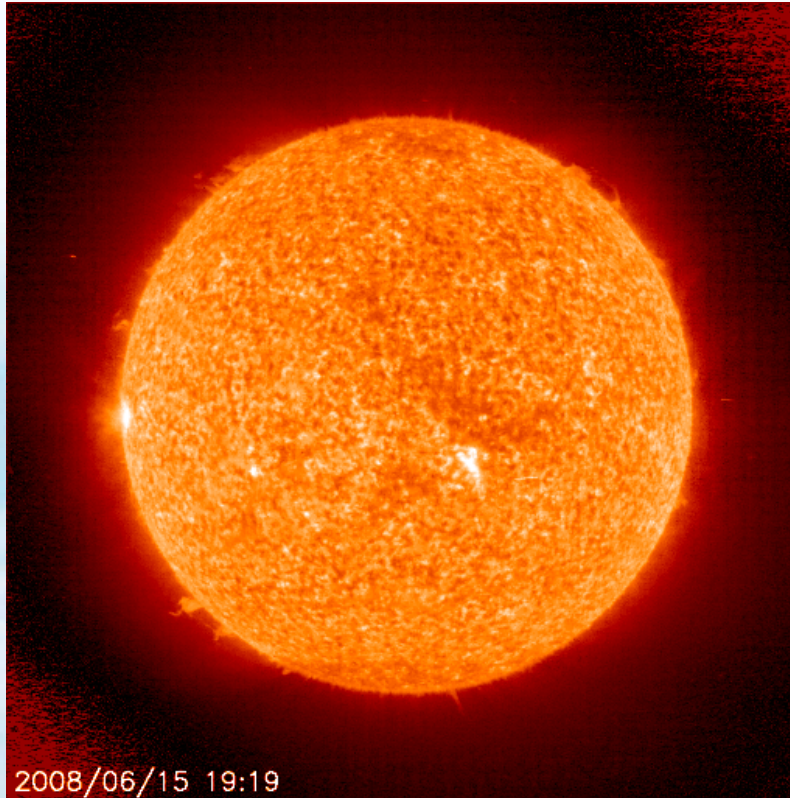
La réaction nucléaire met en jeu des énergies de quelques MeV par atome fissionné ou fusionné

La combustion du carbone, c'est environ 5 eV (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

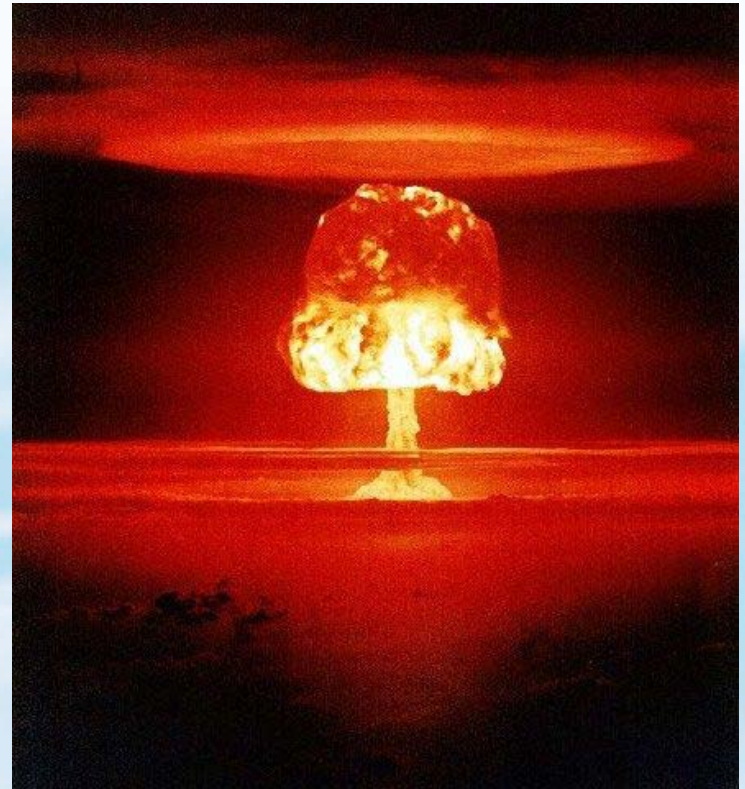
En fait tout ce qui compose la Terre (et la Lune, qui nous fournit les marées) a été « forgé » dans les étoiles de la génération précédant le Soleil, par la suite de réactions nucléaires

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

Si on reste pacifique, c'est quoi l'idée de départ ?

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

En grande quantité

Sans combustion

Pas (très) cher

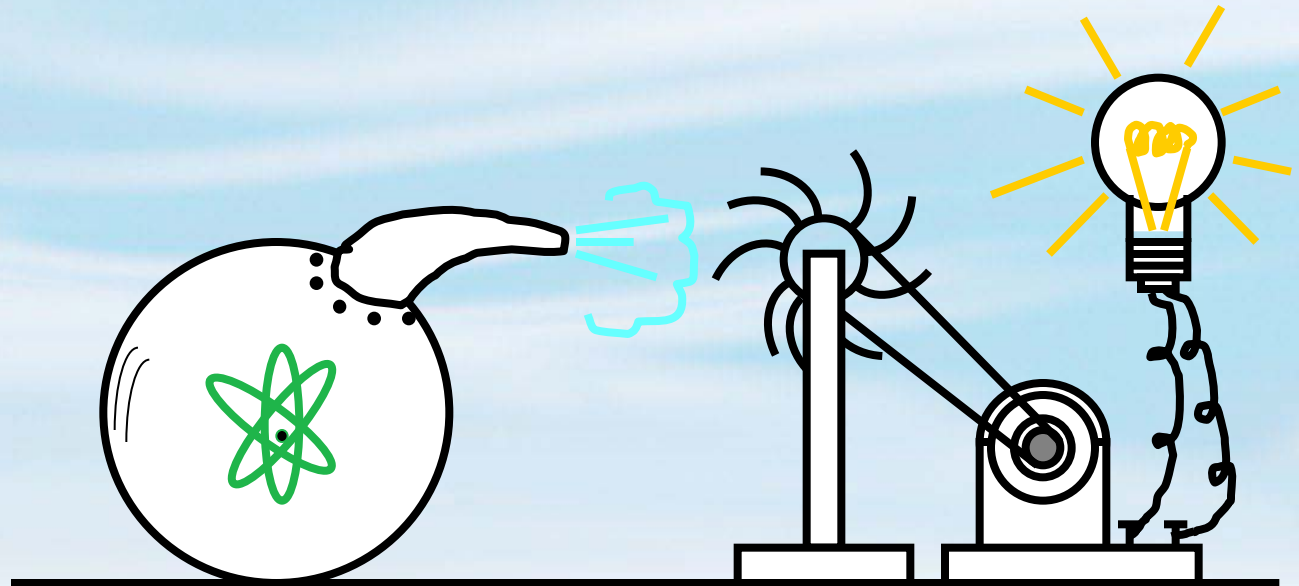
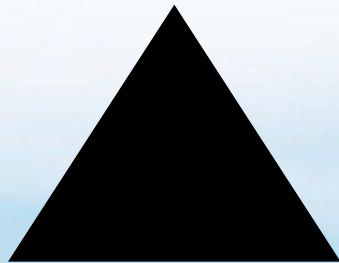


Illustration Bertrand Barré

Nucléaire ou charbon, c'est - presque - pareil



Charbon



Uranium

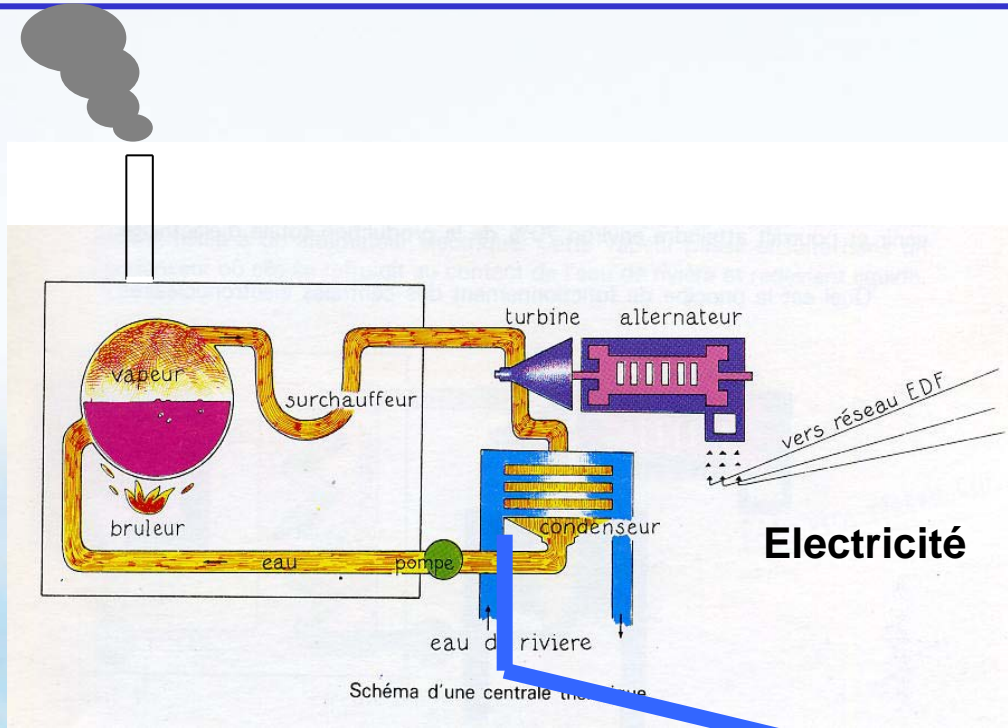


Schéma d'une centrale thermique

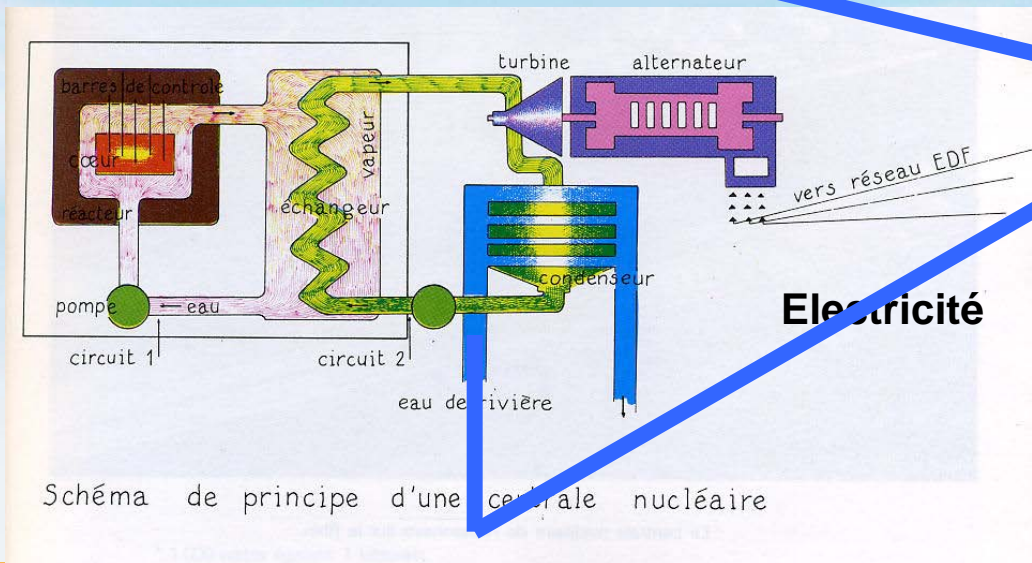
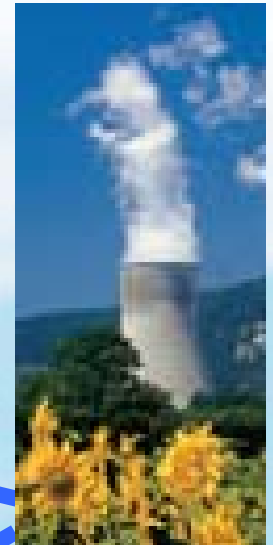


Schéma de principe d'une centrale nucléaire

**Vapeur
d'eau**



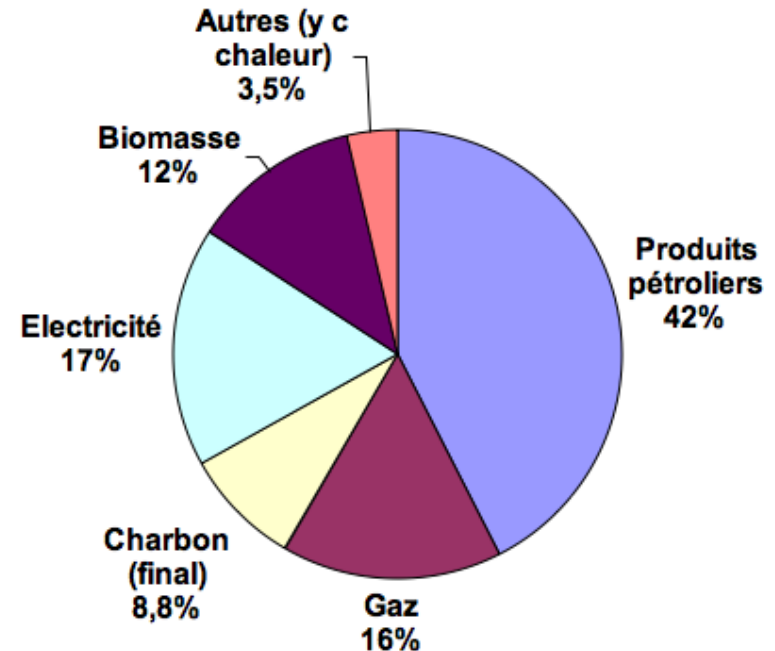
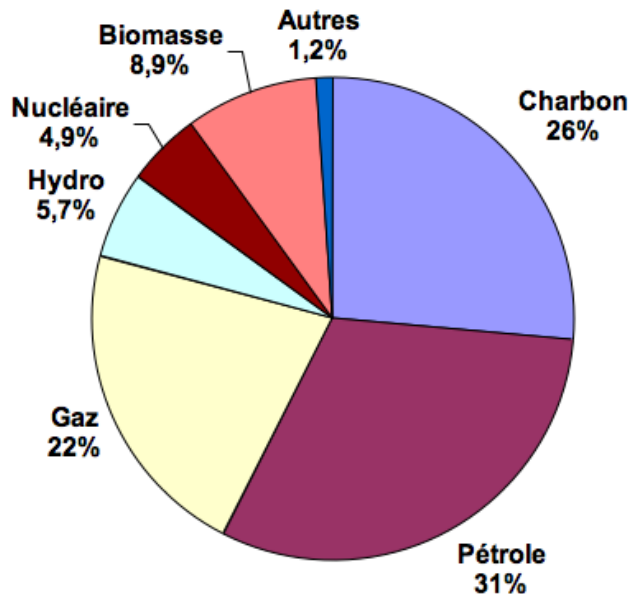
**Illustration
Bertrand Barré**

Le nucléaire, vraiment trop mauvais ?

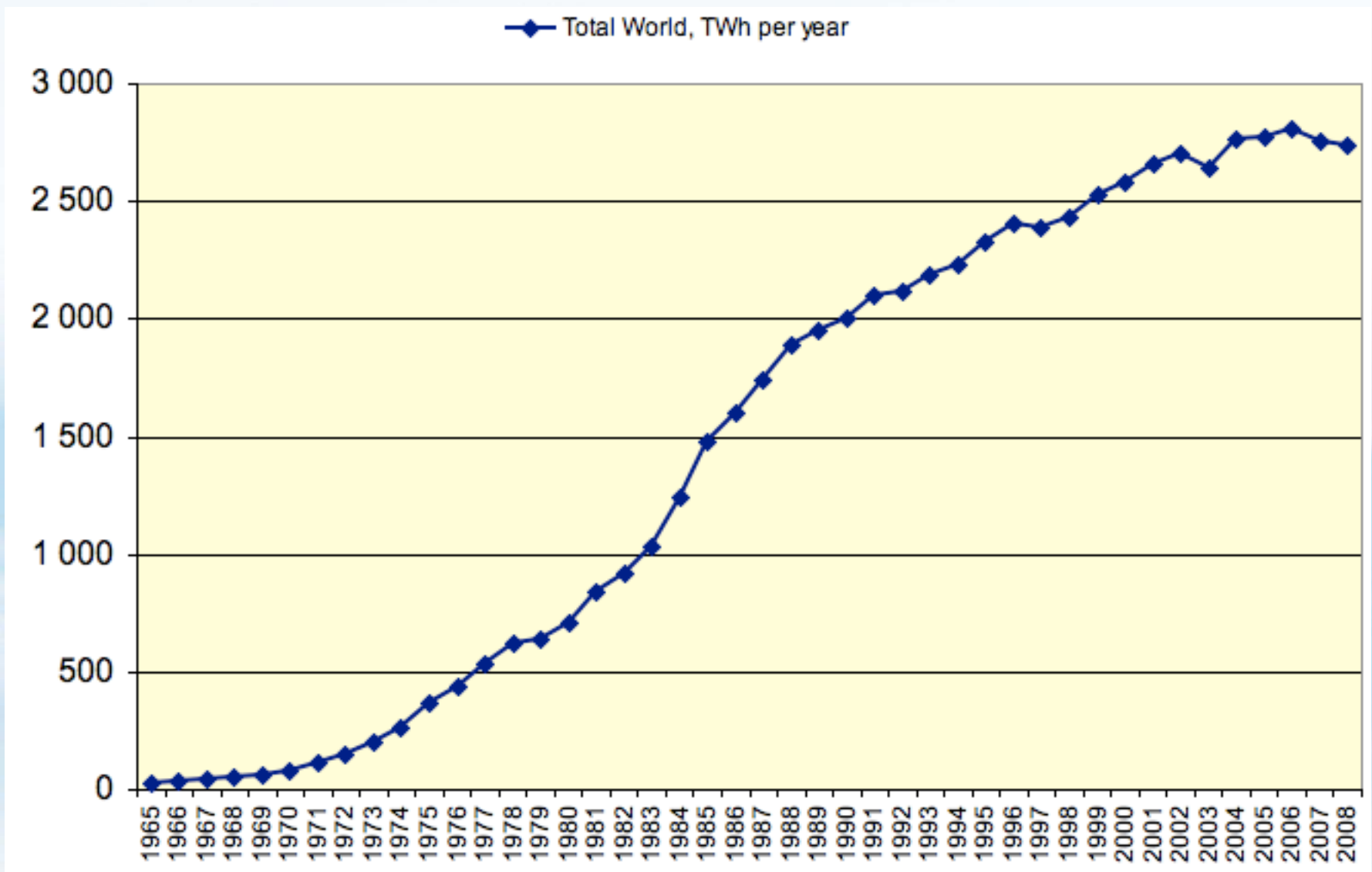
Dès qu'il s'agit de faire bouillir de l'eau (nucléaire, mais aussi charbon, gaz, et fioul lourd, soit 85% de l'électricité mondiale) :

Il faut une source froide

Carnot limite le rendement et on chauffe les petits oiseaux



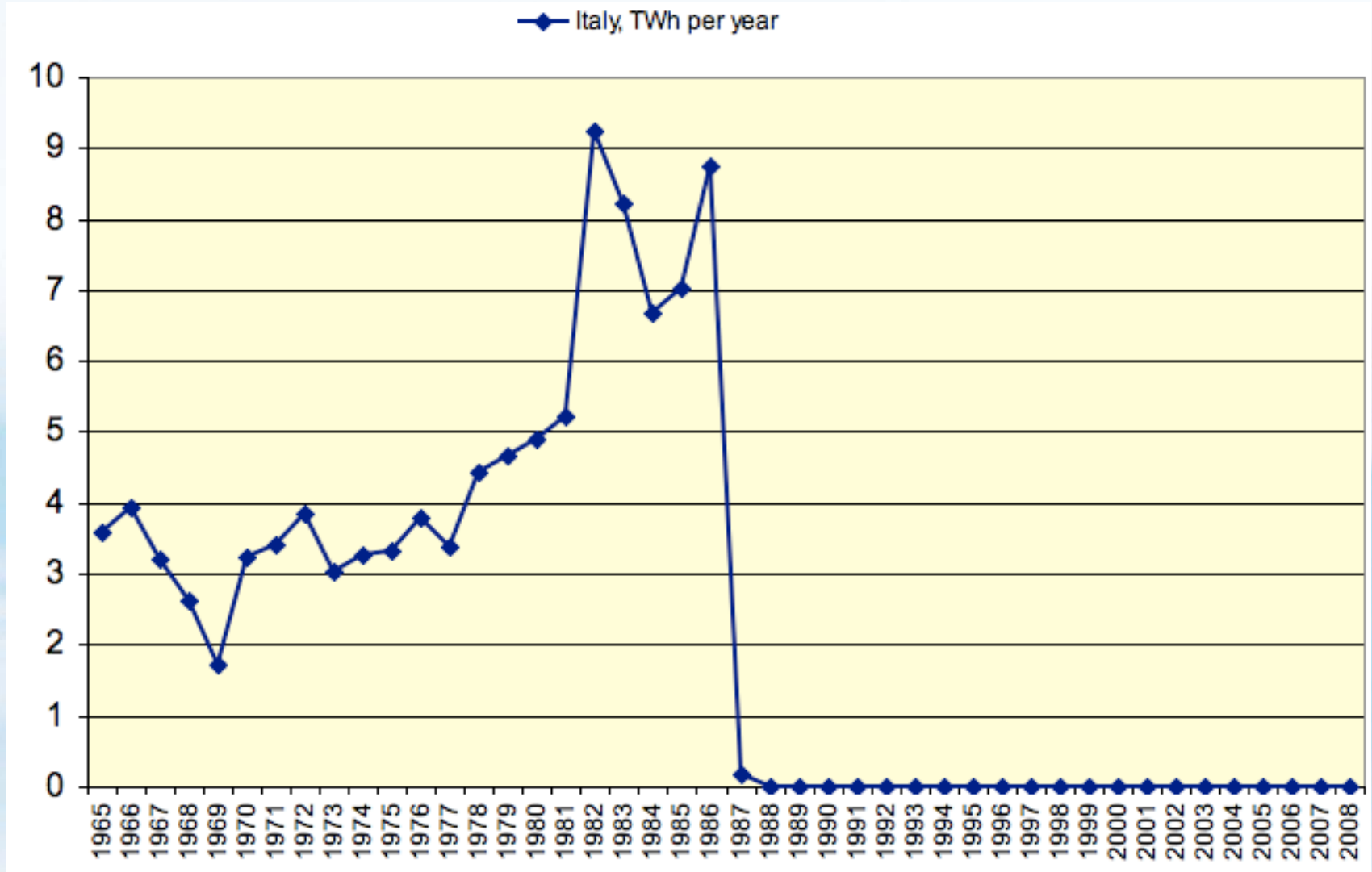
12,4 Gtep_{primaire} → **8,3 Gtep_{final}**



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

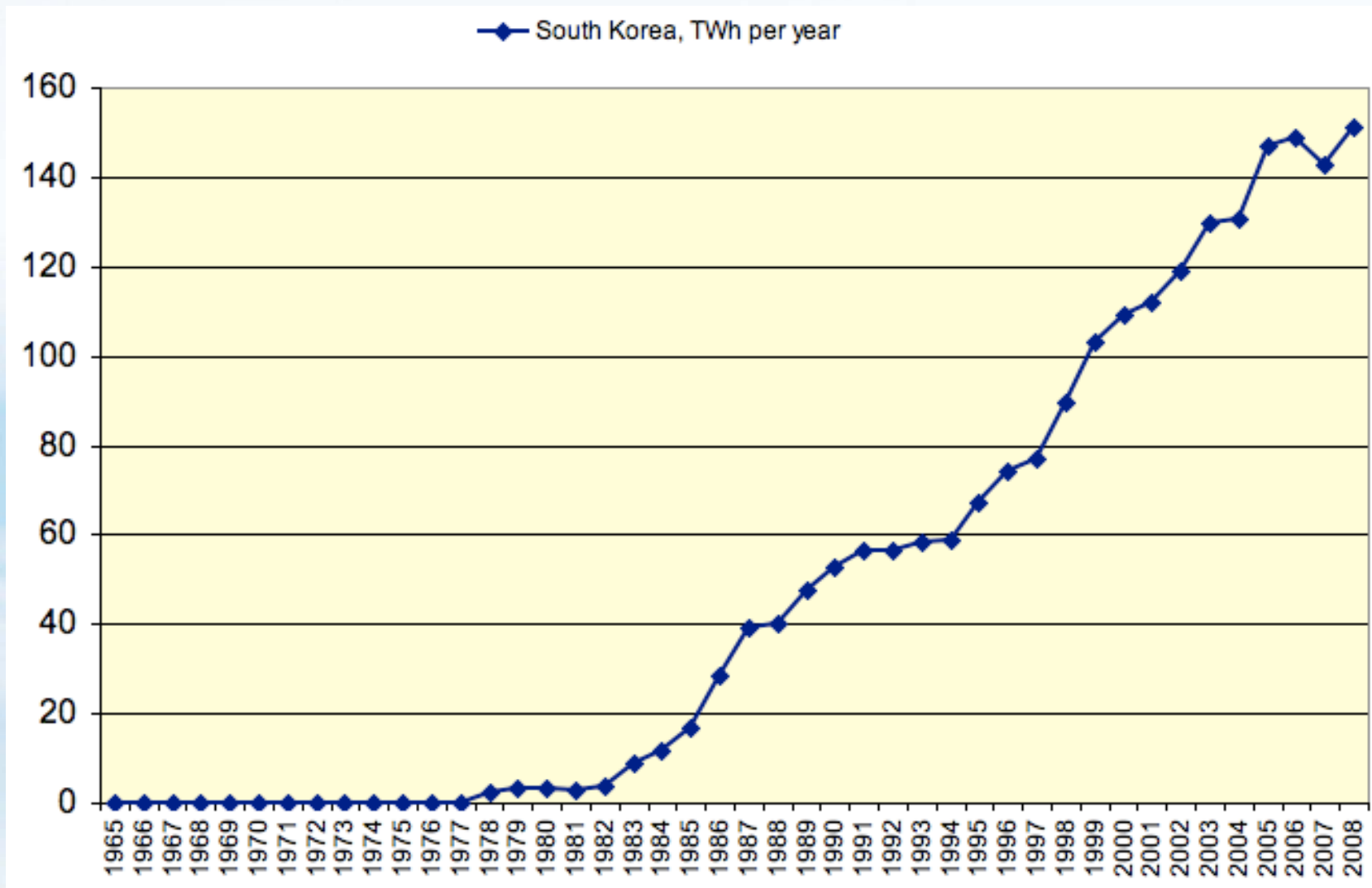
Source : BP Statistical review, 2008

Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



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

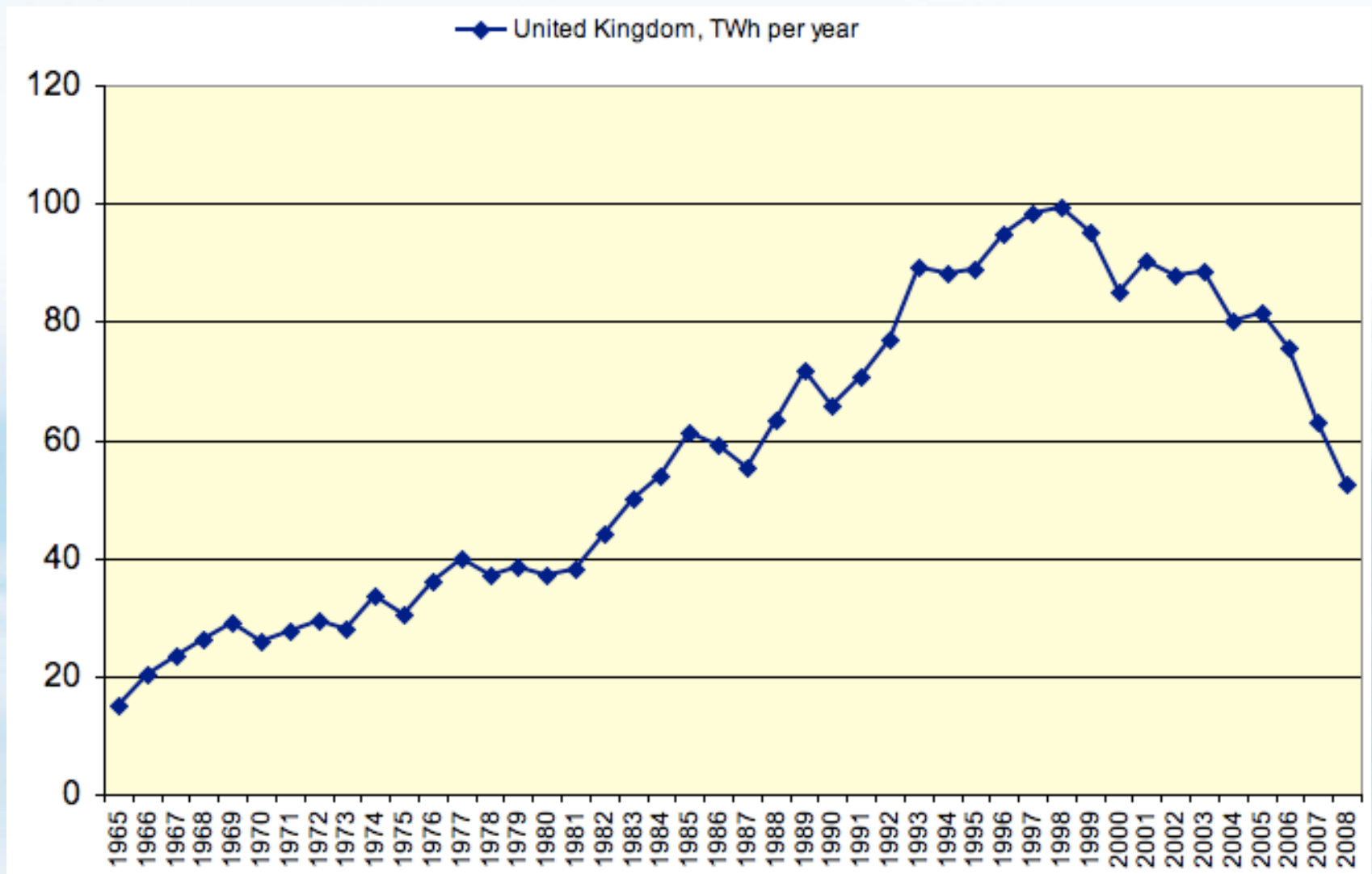
Source BP Statistical review, 2009



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

BP Statistical review, 2009

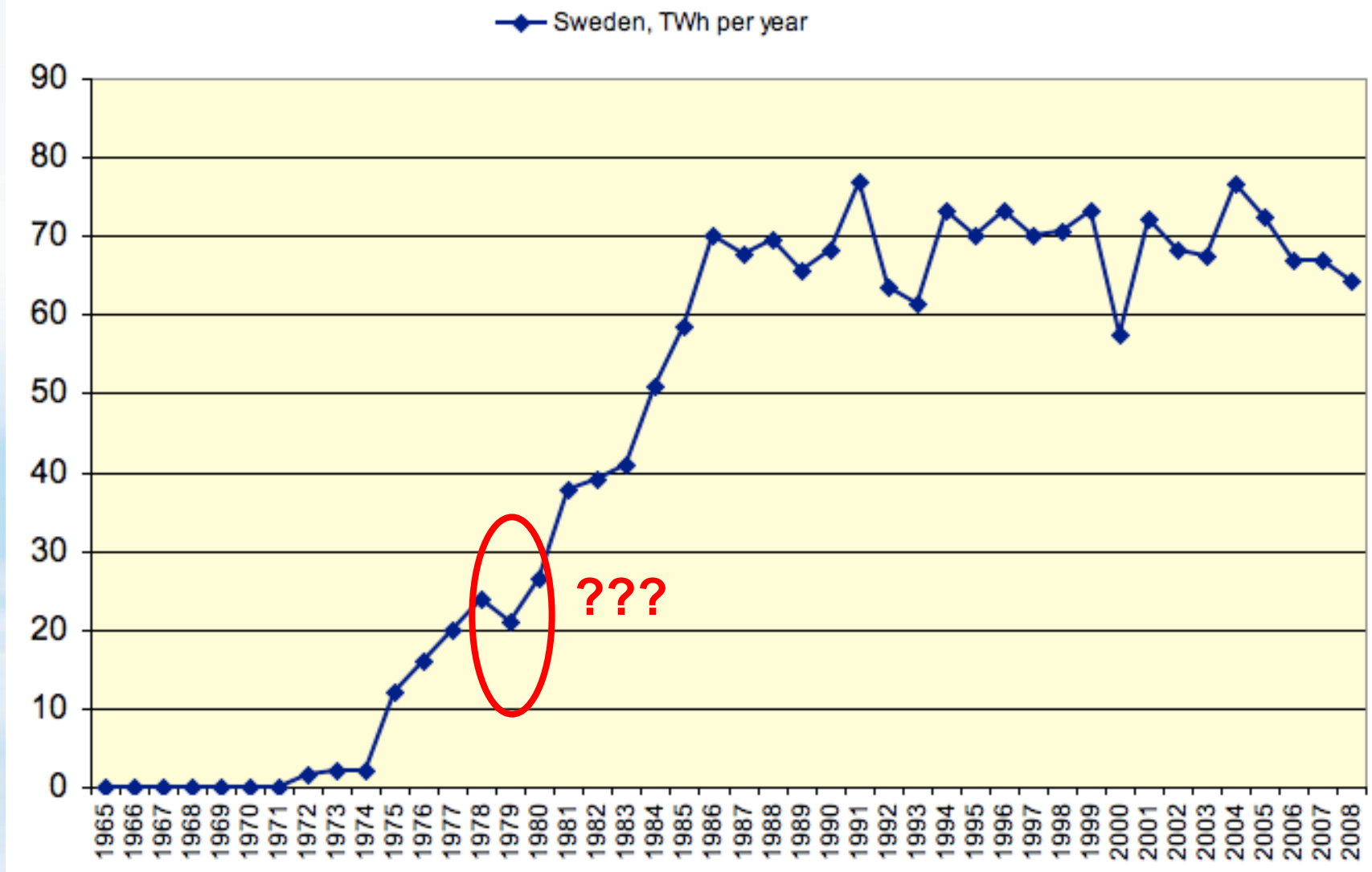
D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point



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

BP Statistical review, 2009

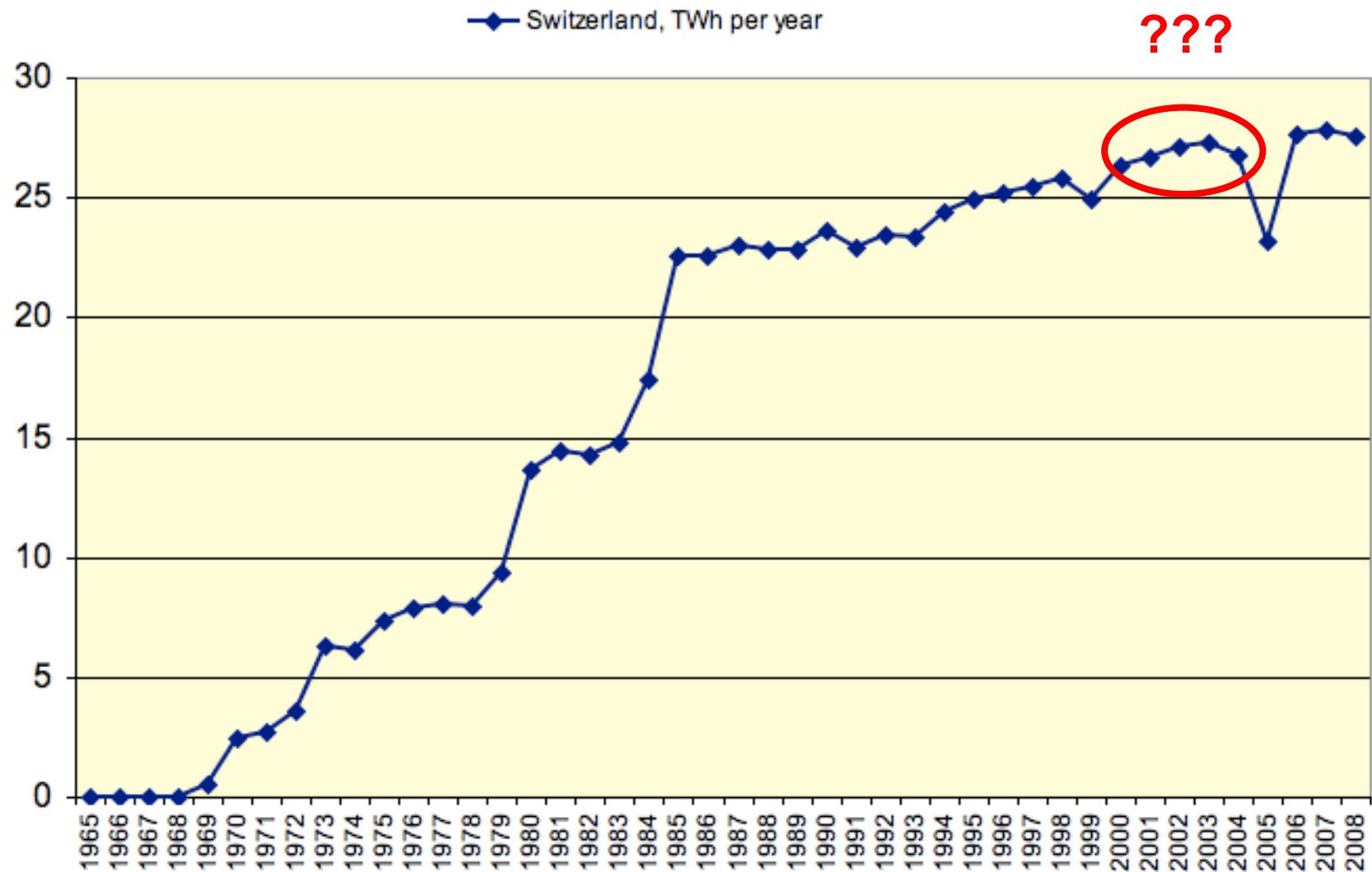
D'autres ont dit qu'ils feraient sans, sauf que...



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

BP Statistical review, 2009

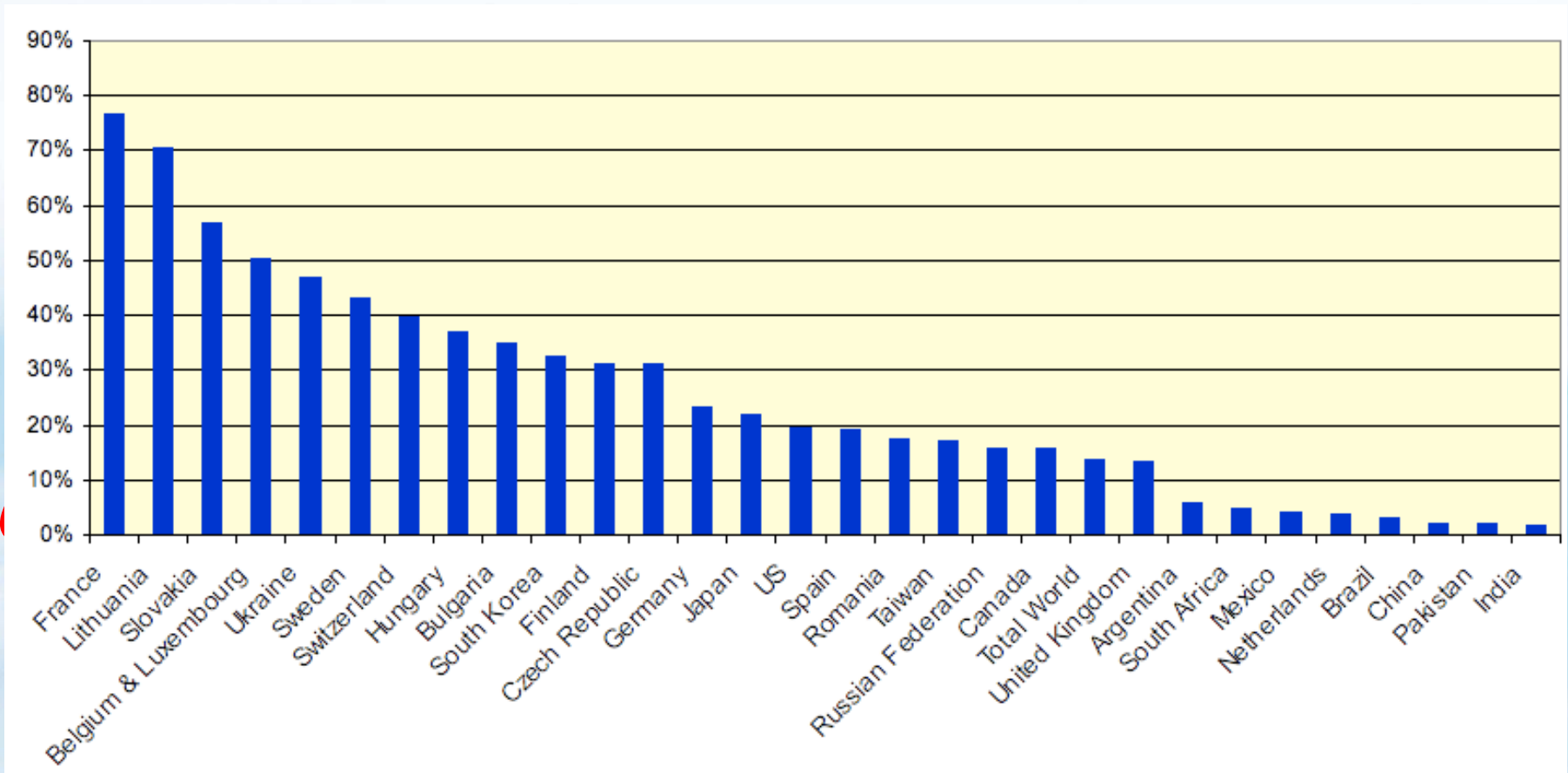
D'autres ont dit qu'ils aimaient, et après ?



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

BP Statistical review, 2009

Atome, qui en fait finalement ?



% de nucléaire dans la production électrique en 2008

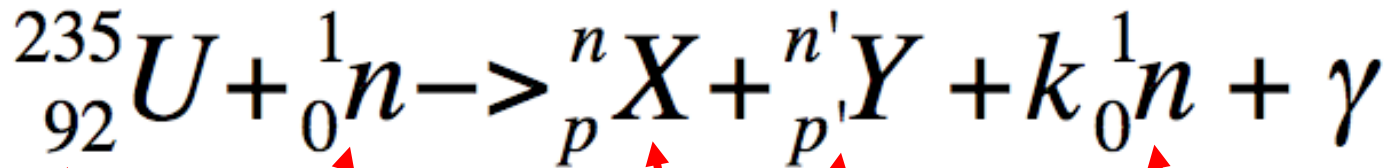
BP Statistical review, 2009

La fission : smaller is beautiful

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 :



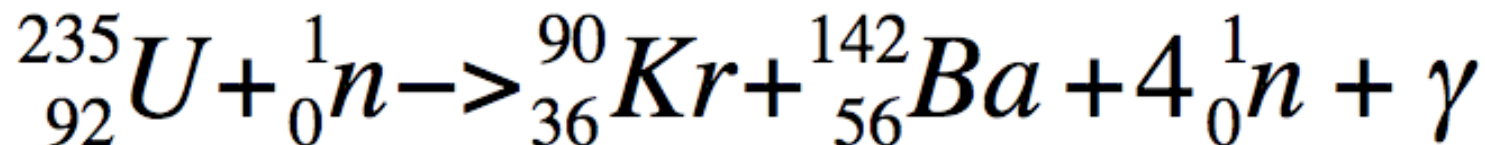
Noyau fissile

Neutron
thermique
($e < 0,625$ eV)

Produits de
fission

Quelques
neutrons à ~2
MeV

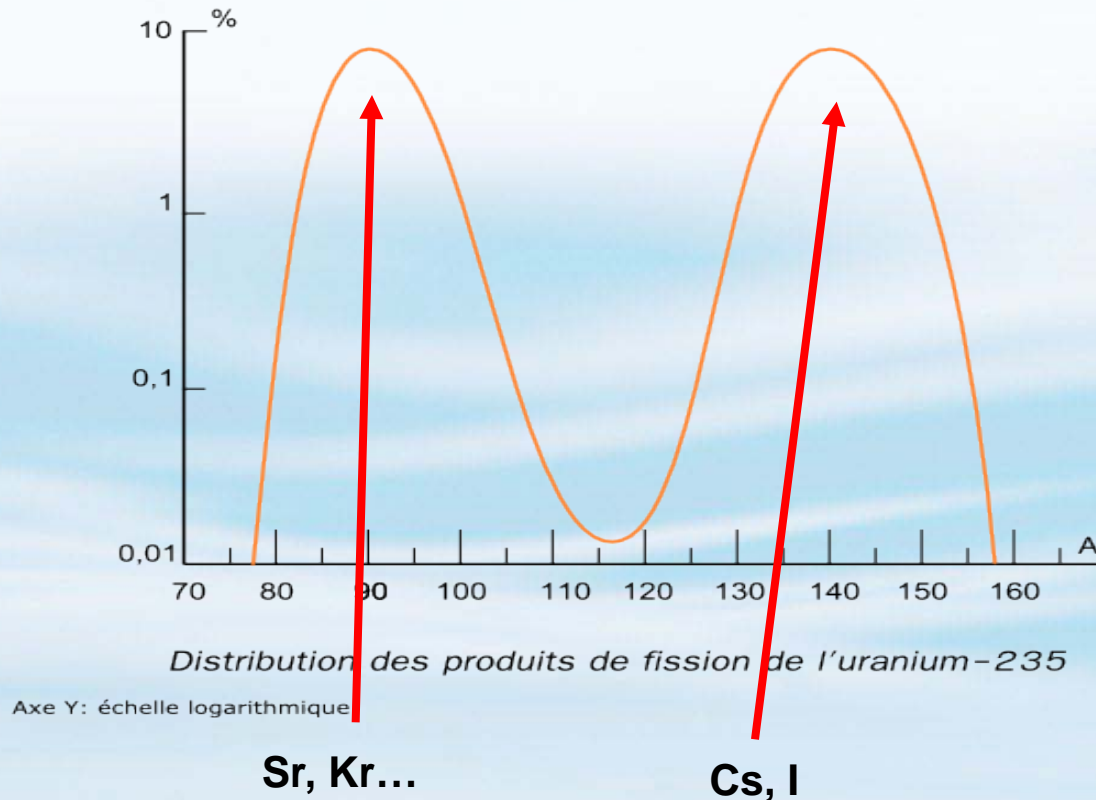
Exemple « pour de vrai » :



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

Après une fission, on obtient :

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

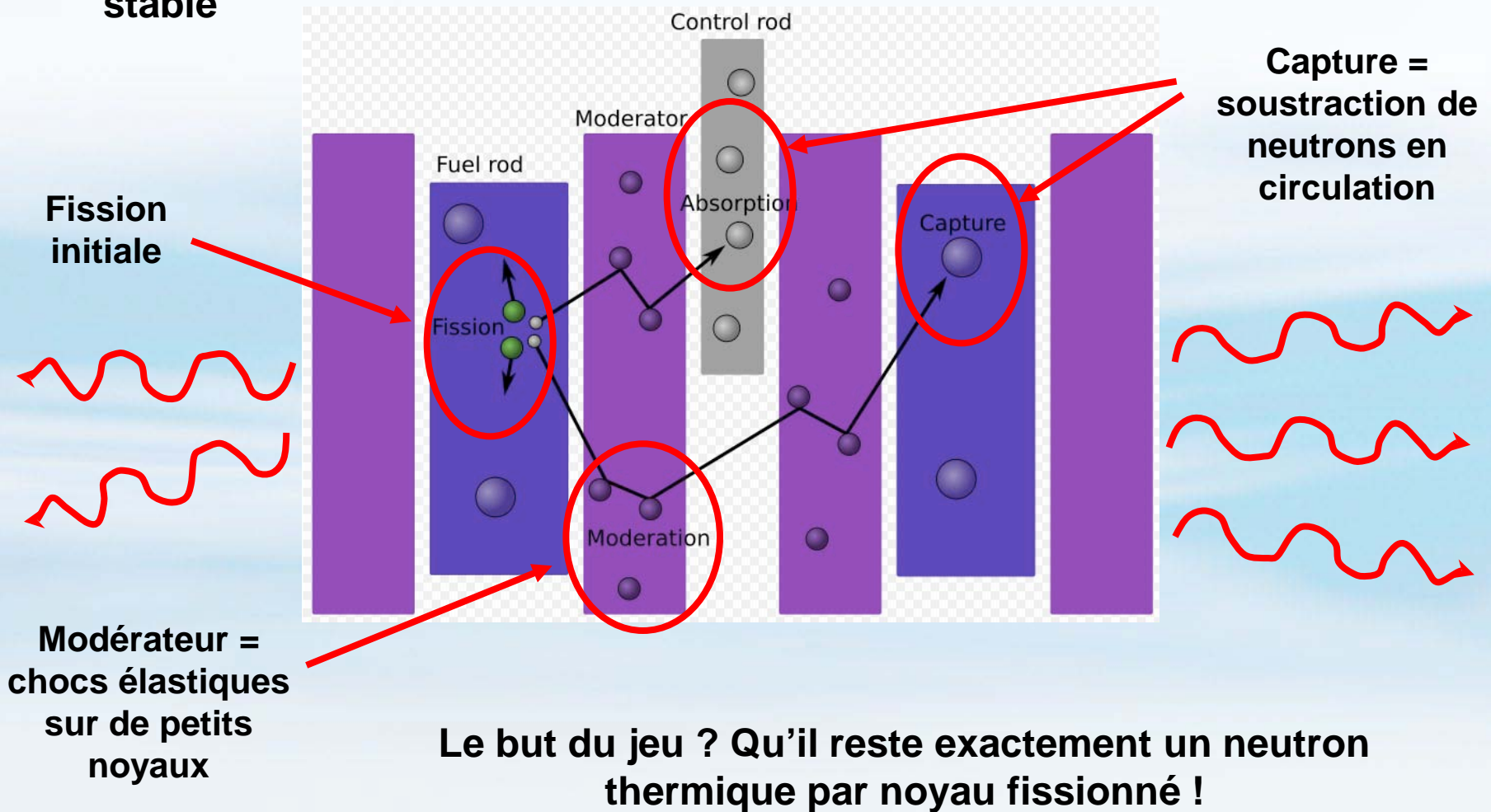


Leur demi-vie est généralement comprise entre quelques heures et quelques dizaines d'années, et leurs descendants sont souvent radioactifs eux-mêmes

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)

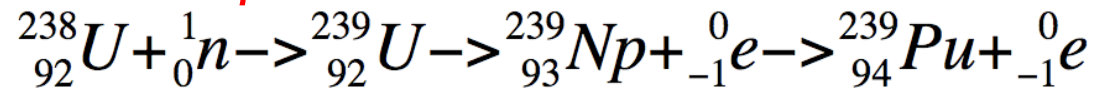
Après une fission, on obtient encore :

Du rayonnement gamma

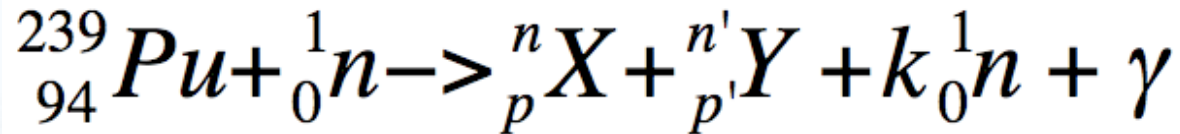
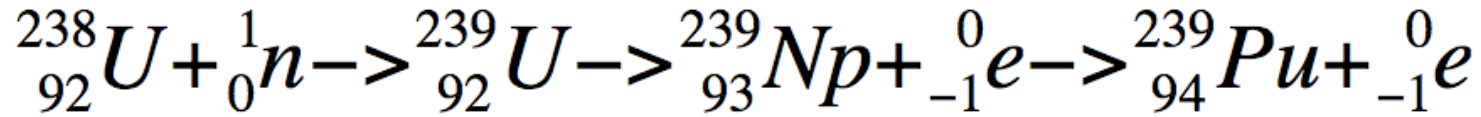
Des actinides, dont le plutonium, dont les isotopes impairs sont fissiles

1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	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
5	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
6	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
7	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

$n+\beta$



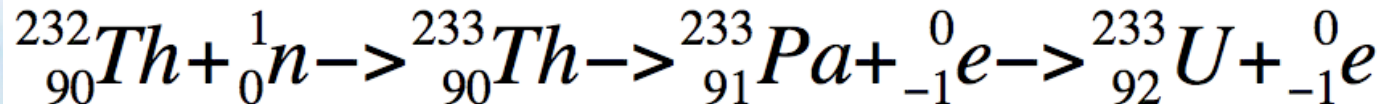
Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



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 » ($e > 0,9 \text{ MeV}$)

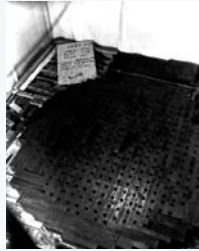
Il existe deux isotopes fertiles présents dans la nature : U238 (99,3% de U total) et Th232 (100% de Th)



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



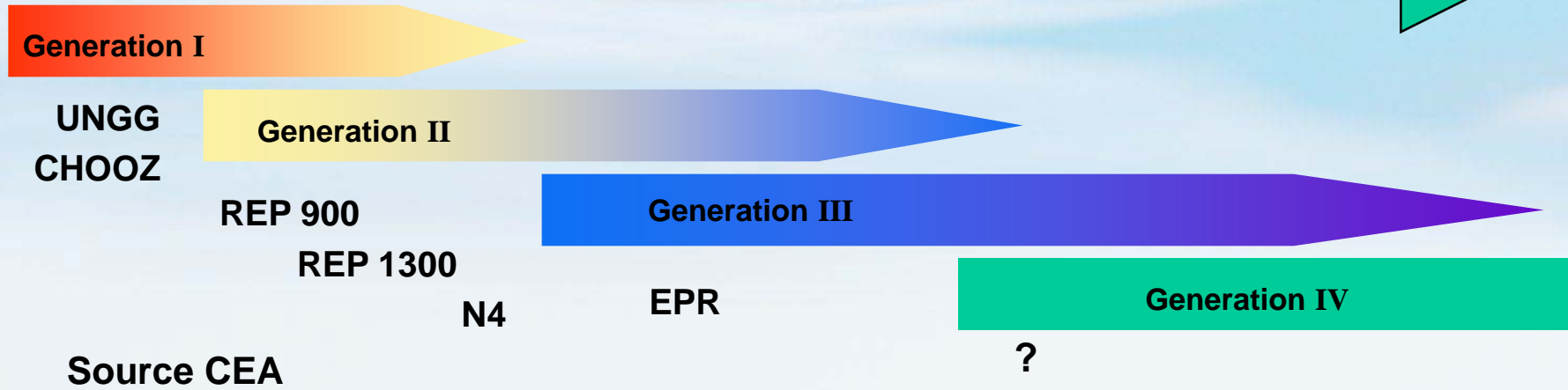
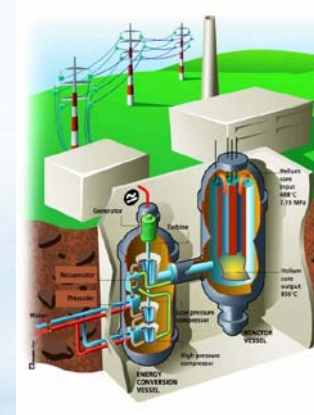
Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Systemes du futur



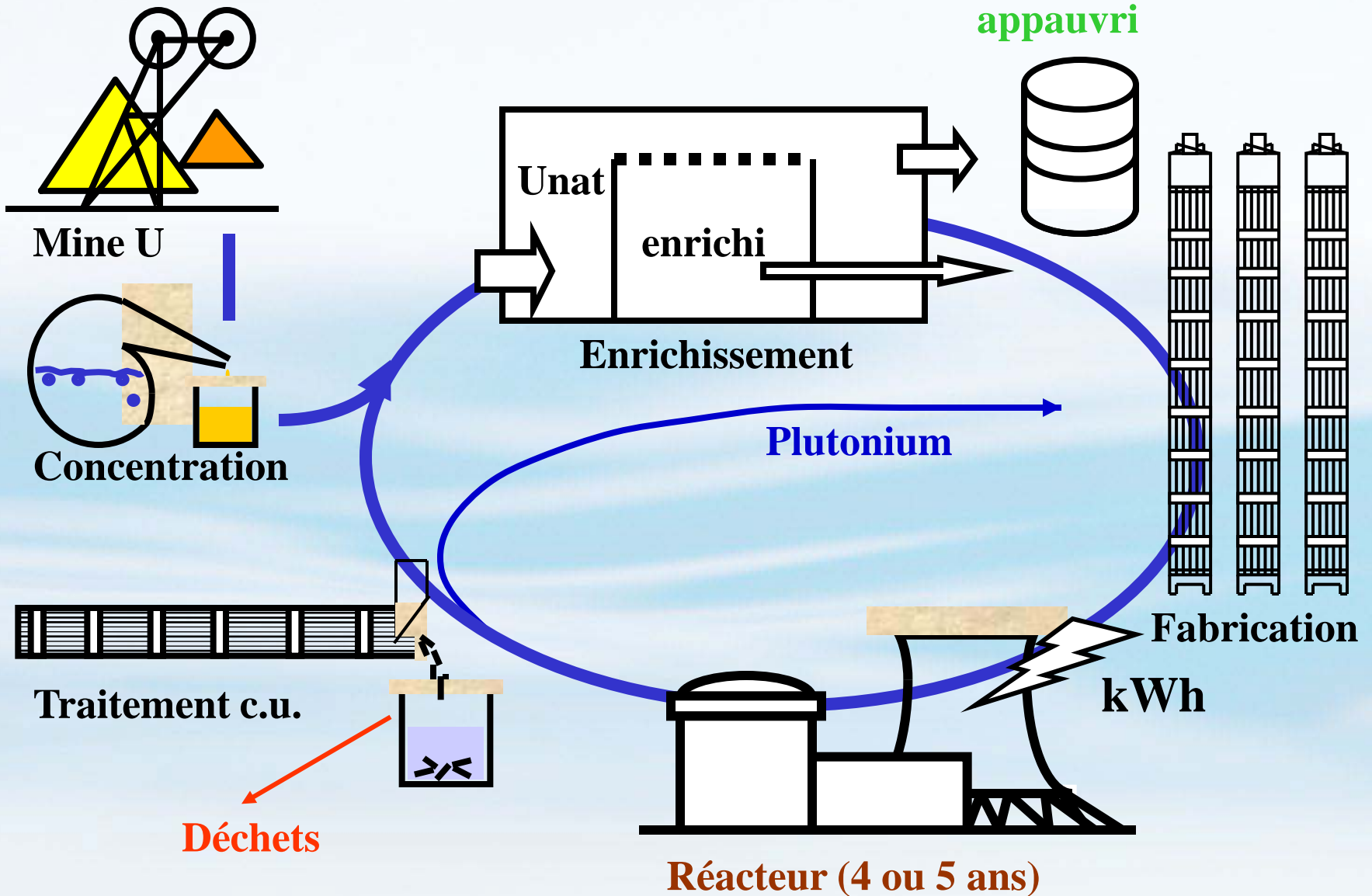
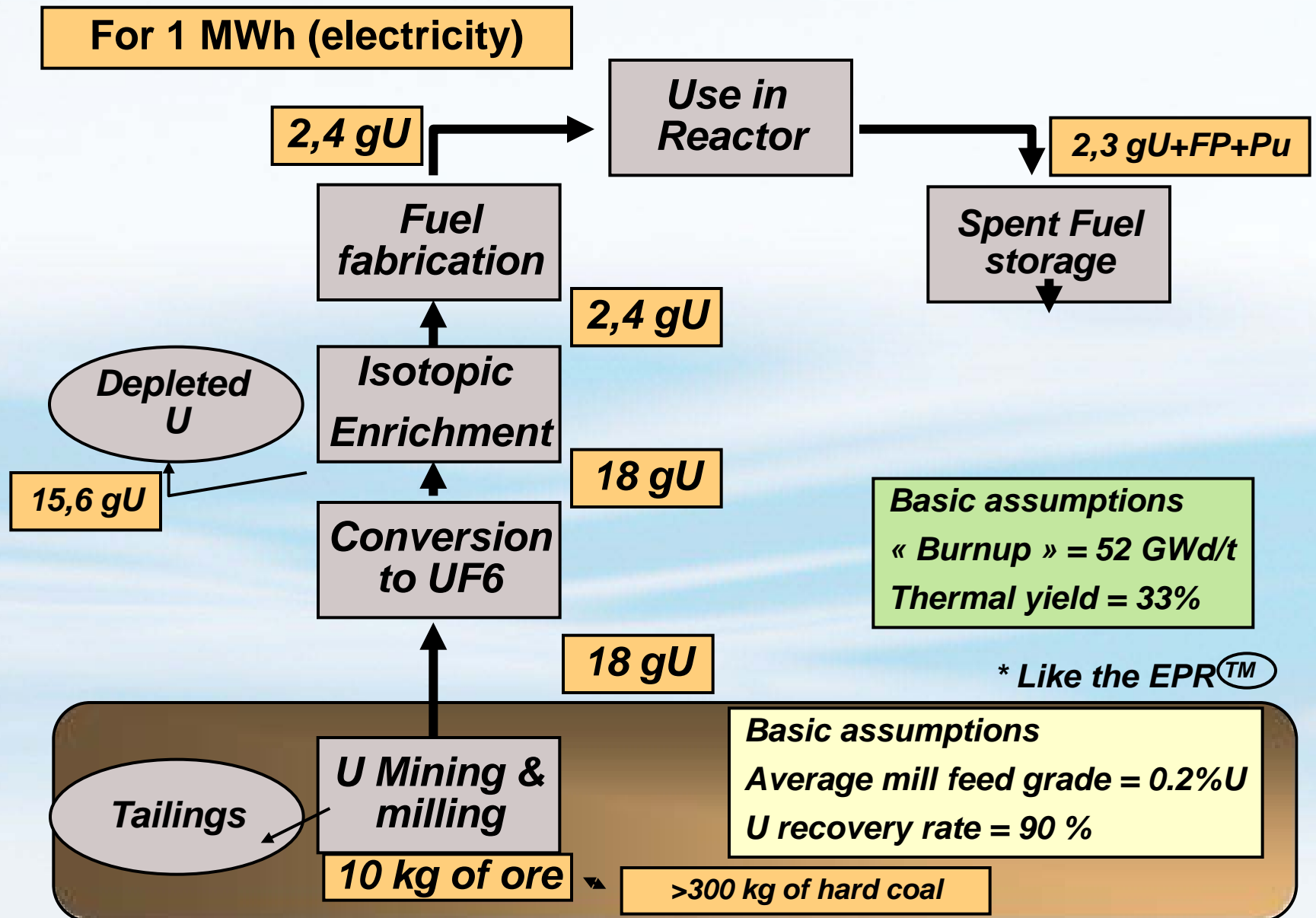
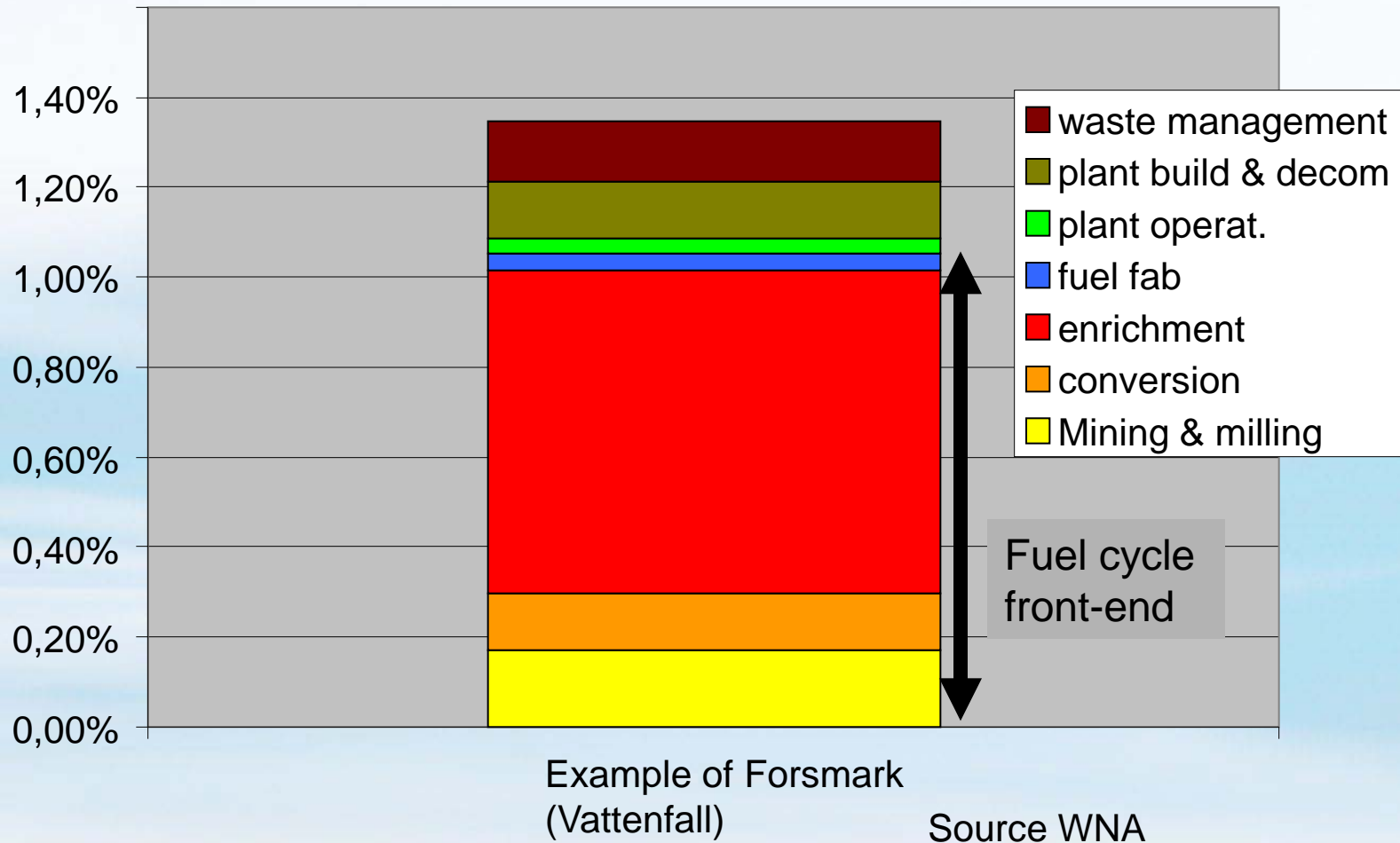


Illustration Bertrand Barré

Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids

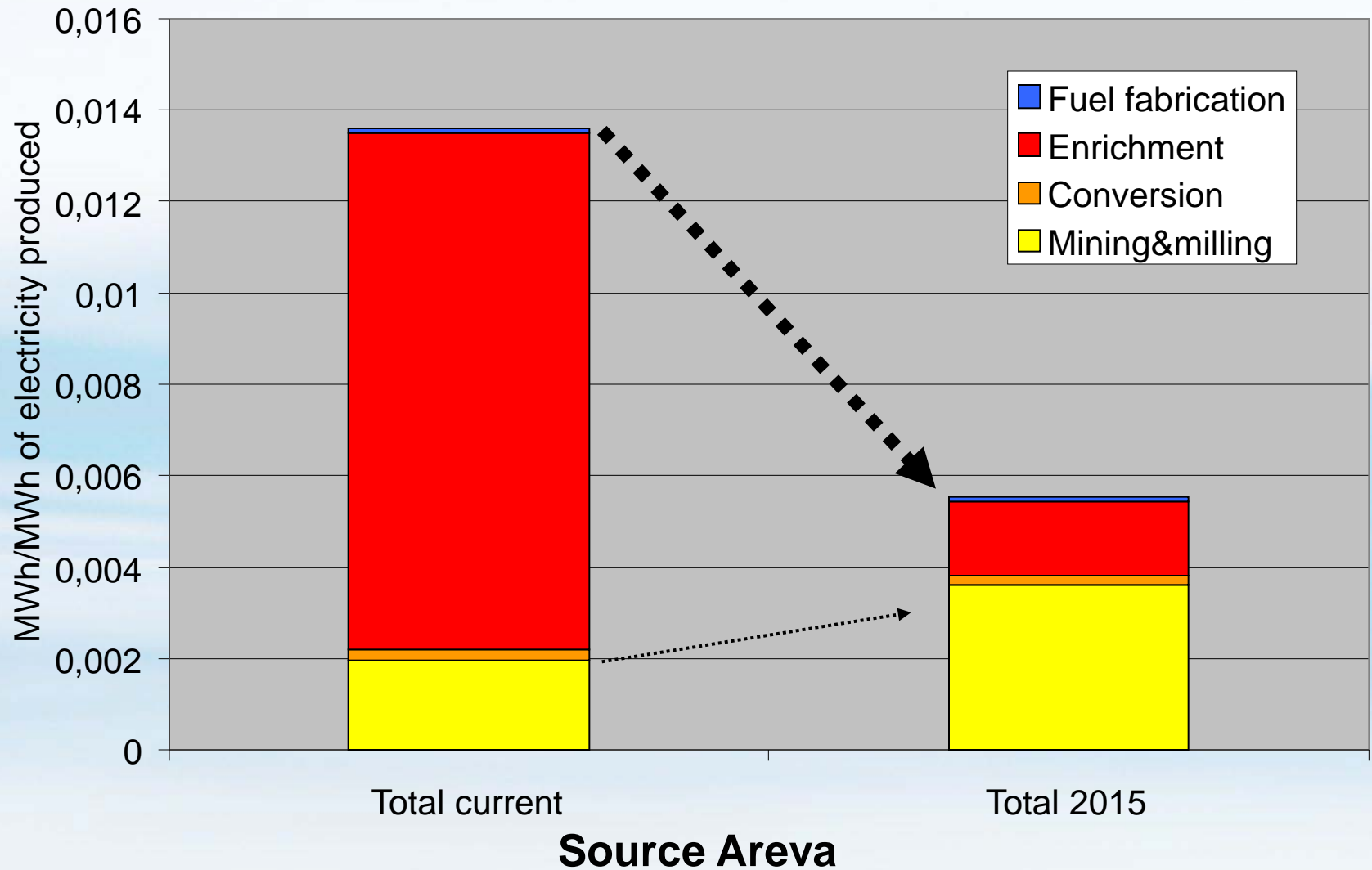


CO₂ or not CO₂ : il faut compter...

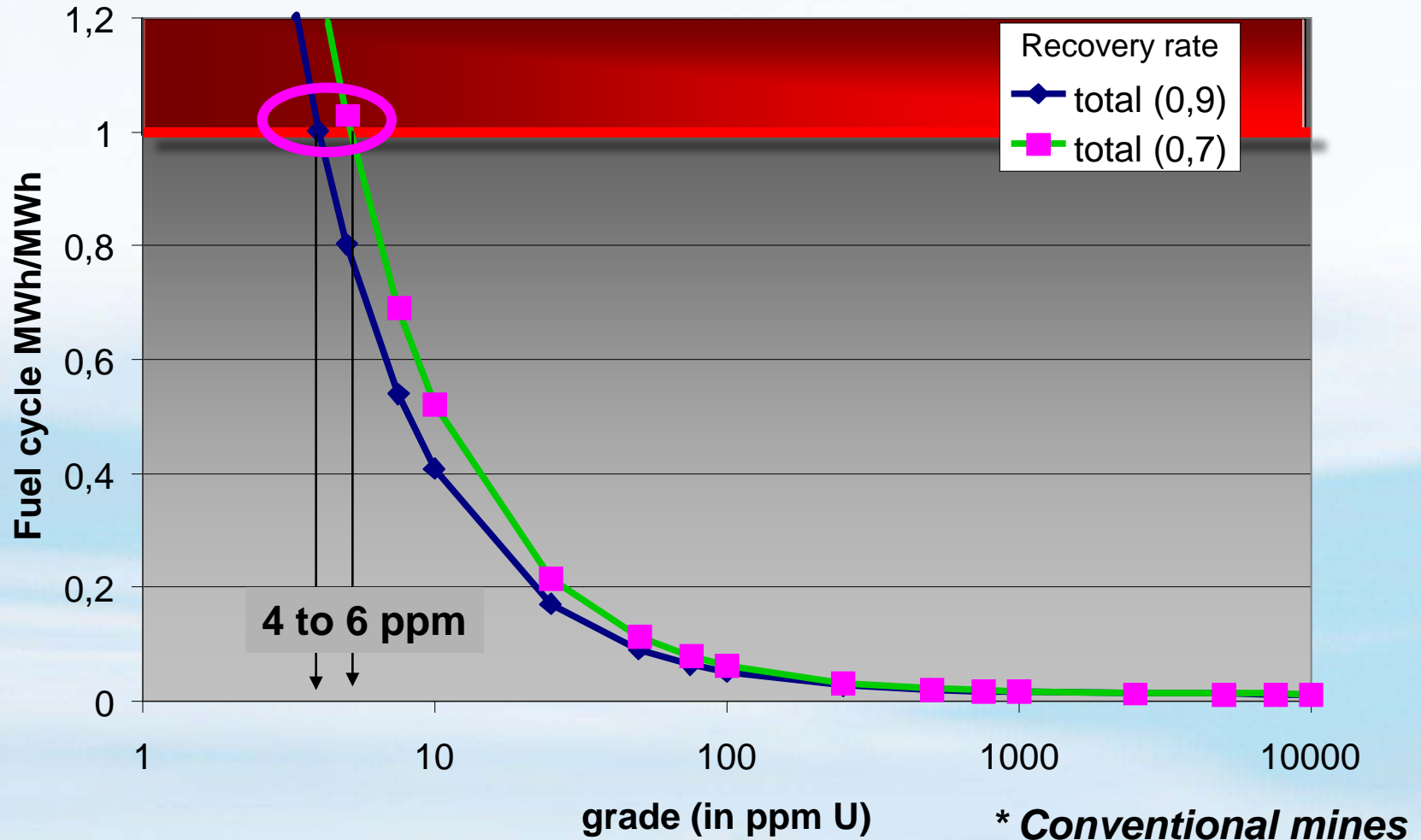


% de l'énergie finale du réacteur consommée par chaque étape de préparation du combustible. Source Areva

CO₂ or not CO₂ : il faut compter...

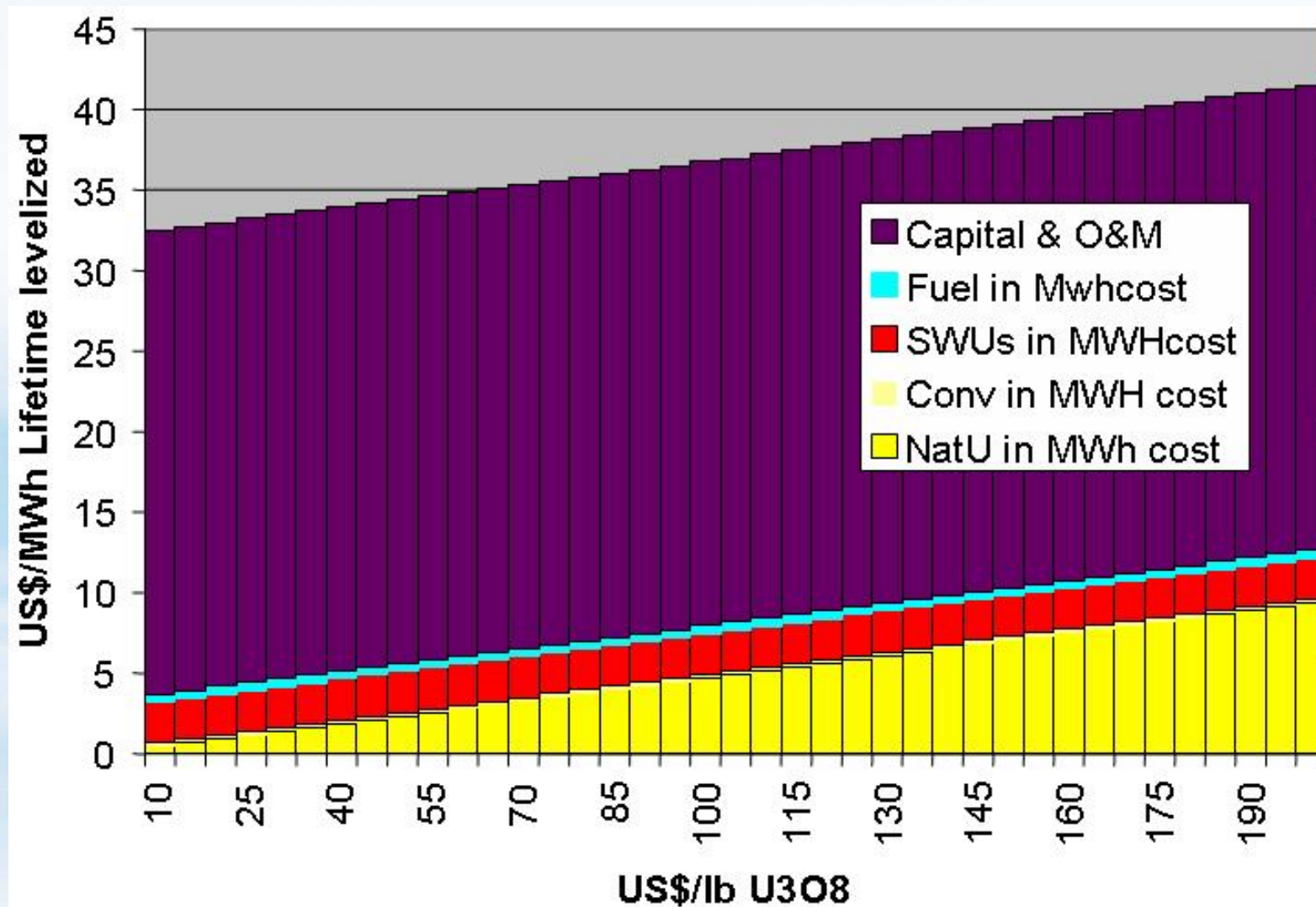


CO₂ or not CO₂ : il faut compter...



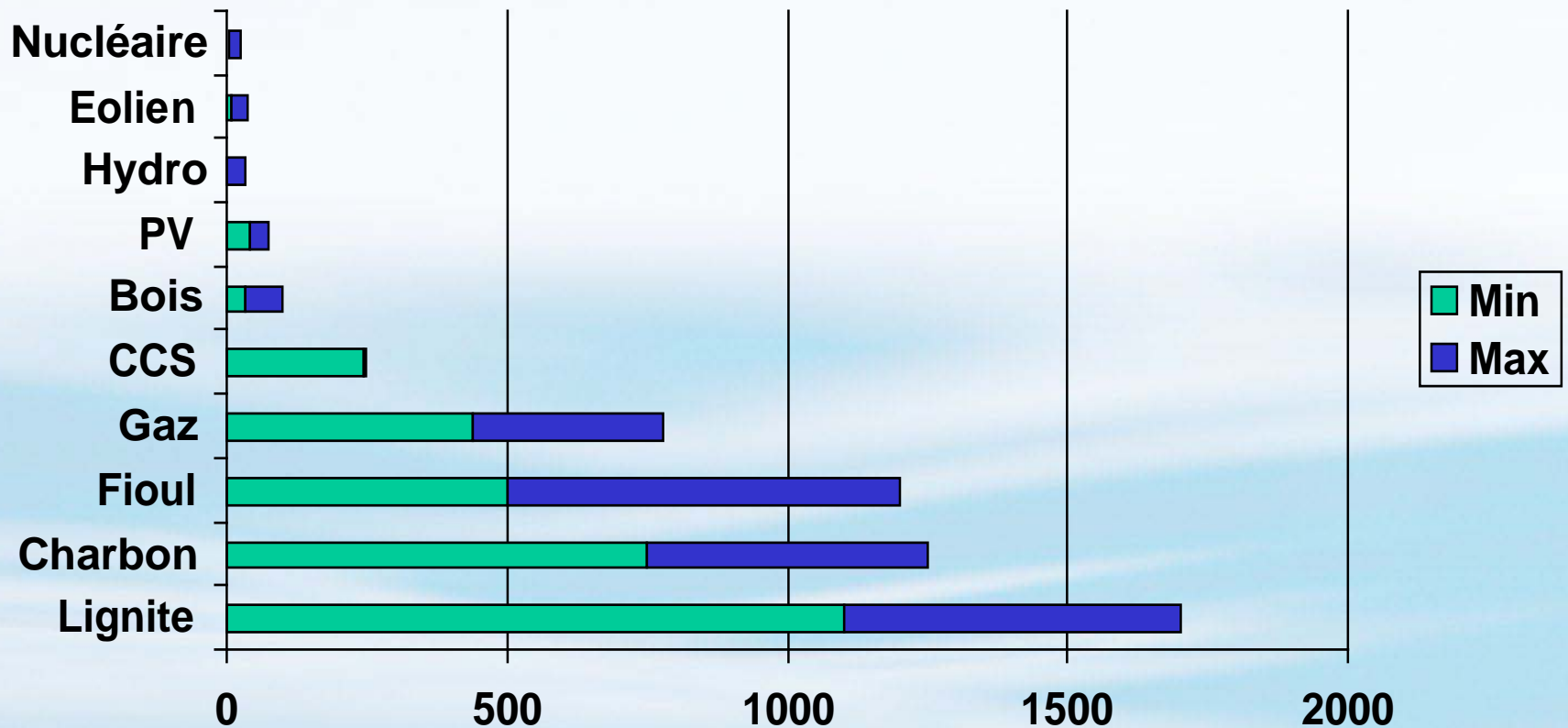
Consommation d'énergie du cycle du combustible en fonction de la teneur du minerai en U. Source Areva.

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 U₃O₈)
Source AREVA

CO₂ or not CO₂ : il faut compter (bis)...



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

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

Les causes perçues du changement climatique

Question : Pour chacune des activités humaines suivantes, dites-moi si d'après vous elle est une des causes possibles du risque de changement climatique ?

en %



IFOP, novembre 2006

Le nucléaire, parfois sujet préféré des journalistes

Plus généralement, 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 \$/kgU		Reasonably Assured Resources	Inferred Resources ①	Prognosticated Resources ②	Speculative Resources ③	
\$/lbU308						
<15	< 40	1.95	0.80	1.7	4.6	① Based on direct geological evidence ② Based on indirect geological evidence ③ Extrapolated values
15 - 30	40 to 80	0.70	0.36			
30 - 50	80 to 130	0.65	0.29	0.82		
> 50	> 130	-	-	?	2.9	
Subtotal		3.30	1.45	2.52	7.5	Unconventional
General total		4.75		10.0		15 to 25
		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

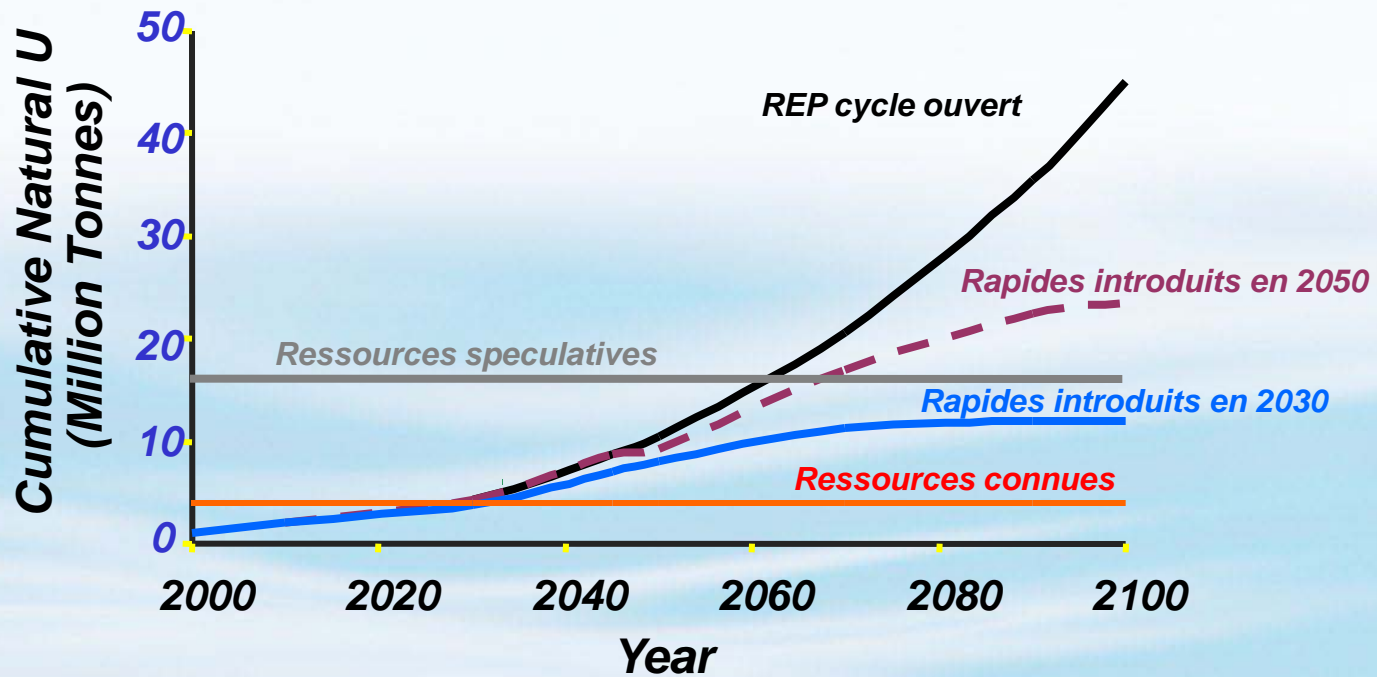
≈ Équivalent du 2P

Phosphates, eau de mer...

Total haut de fourchette : > 30 à 40 Mt

Source AREVA

On joue au petit jeu des exponentielles ?

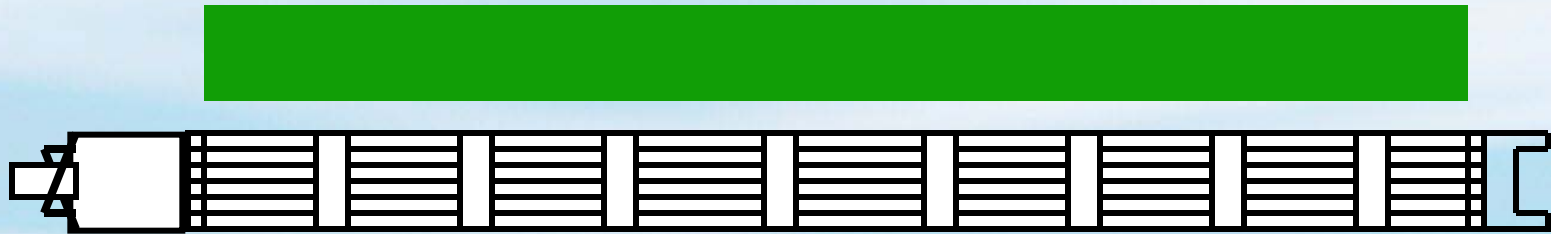


« Durabilité » des réserves d'U si le nucléaire se développe.
Source CEA

Combustible, mais ne se consume pas !

Combustible neuf

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



Uranium (0,9% ^{235}U) : 475 kg

Pu : 5kg

PF* : 20 kg

←————— *recyclables* —————→

Combustible utilisé

***(et quelques Actinides mineurs)**

Illustration Bertrand Barré

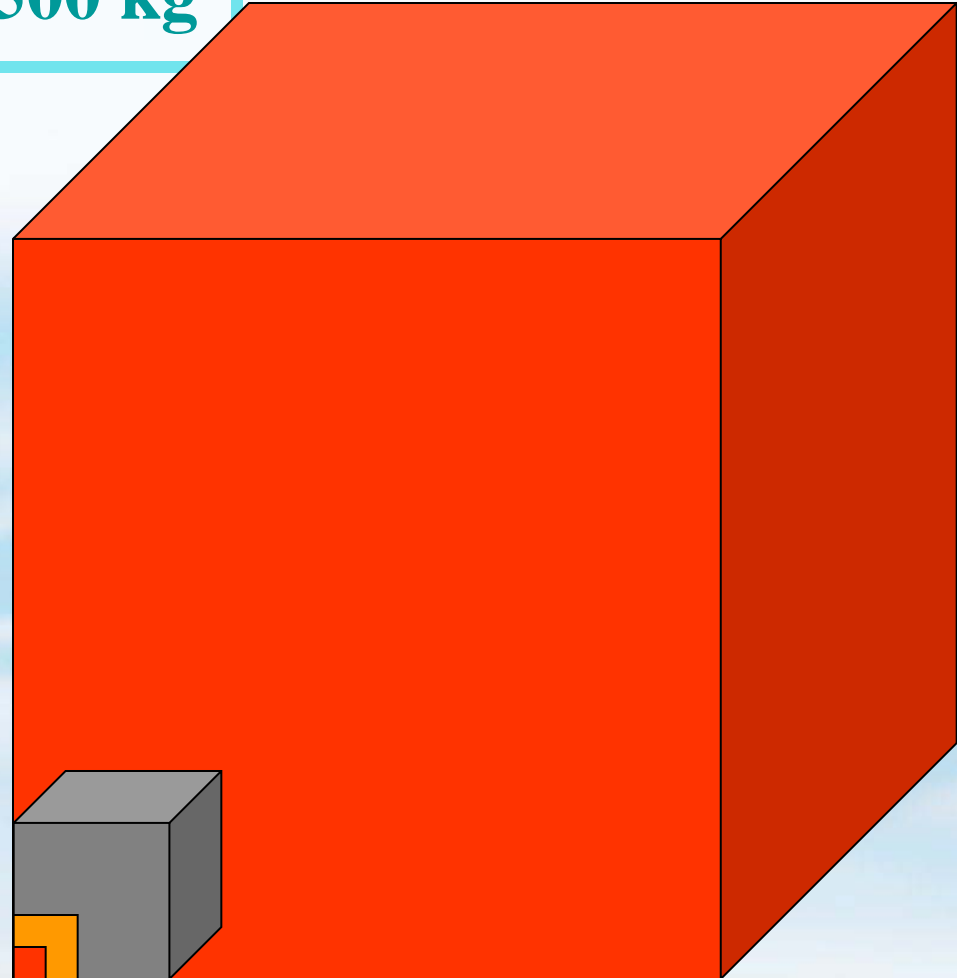
Déchets industriels : 2 500 kg

**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)
TFA (hors résidus miniers)	1 □ 2 000 000 m ³
FMA à vie courte	1 300 000 m ³ (stocks)
FMA à vie courte - Déchets tritiés	3 500 m ³
FA à vie longue - Graphites	14 000 m ³
FA à vie longue - Radifères	> 100 000 m ³
MA à vie longue	60 000 m ³
HA - Produits de fission vitrifiés	5 000 m ³

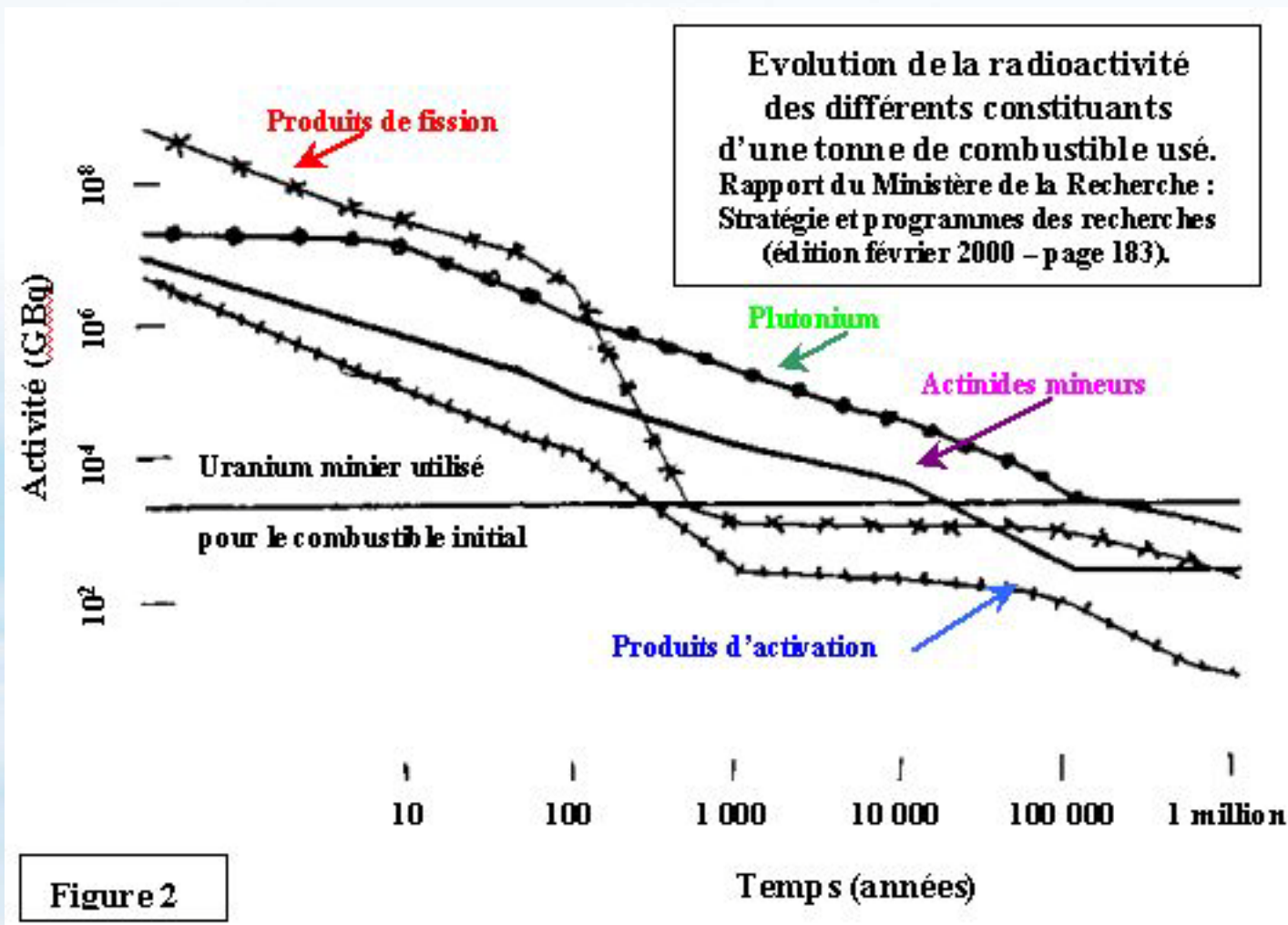
Volumes de déchets pour 40 ans d'exploitation du parc actuel.
Source ANDRA



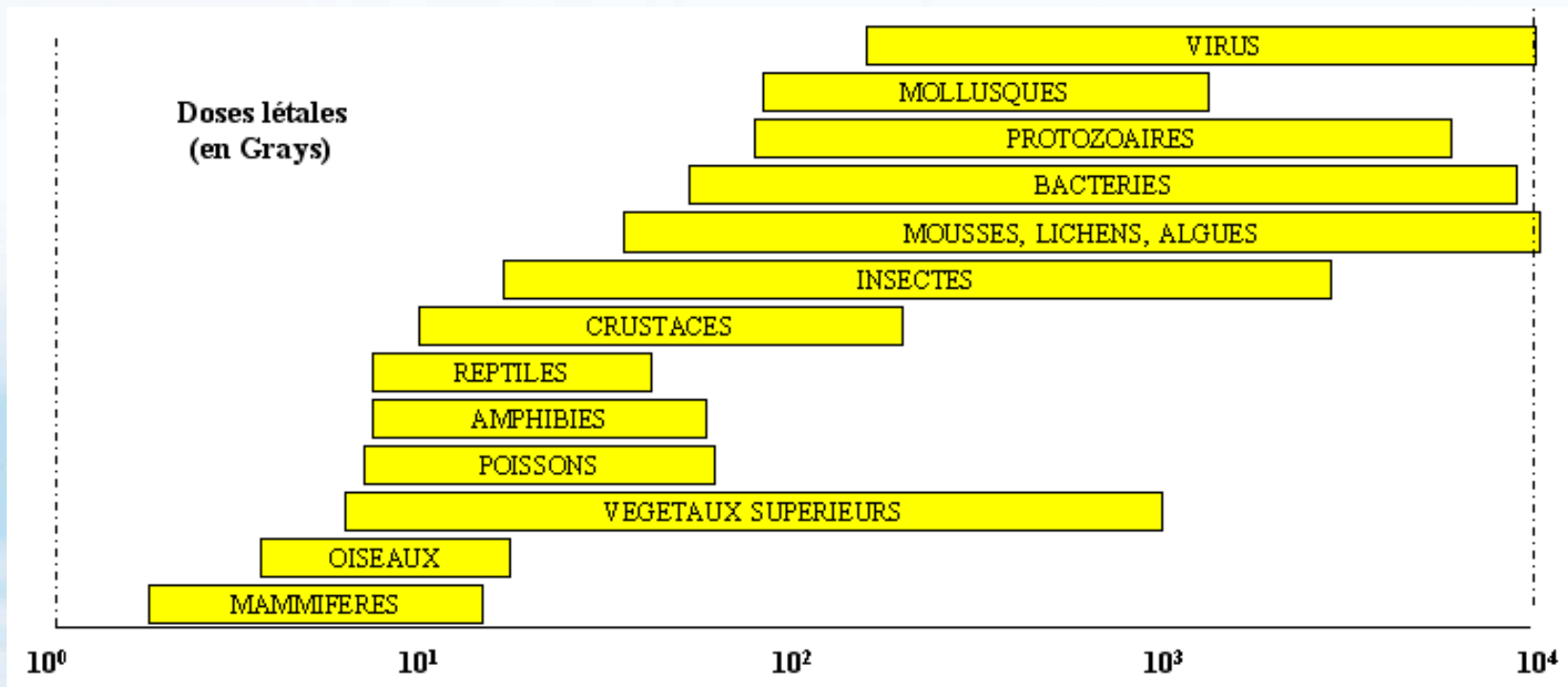
Stockage faible activité à Soulaines



Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment



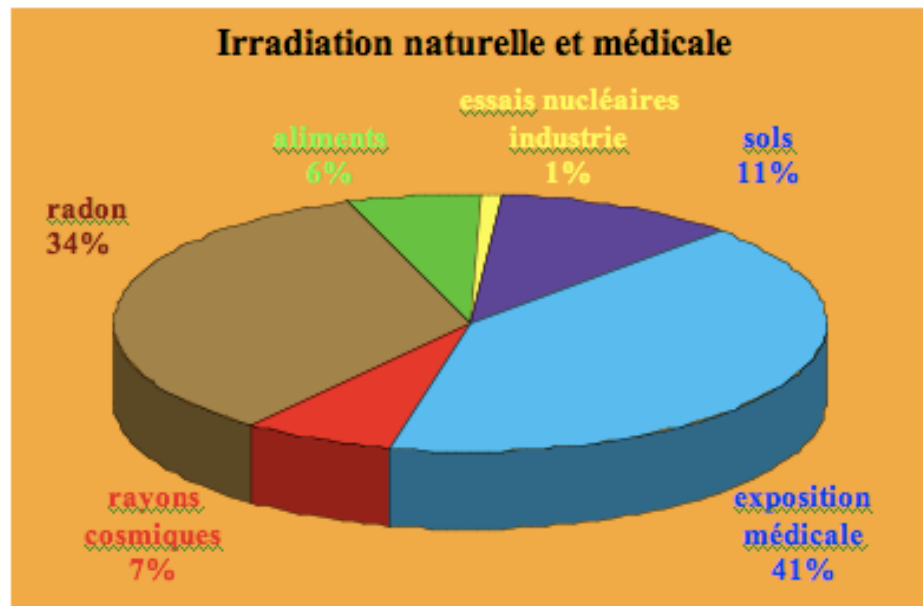
L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



**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

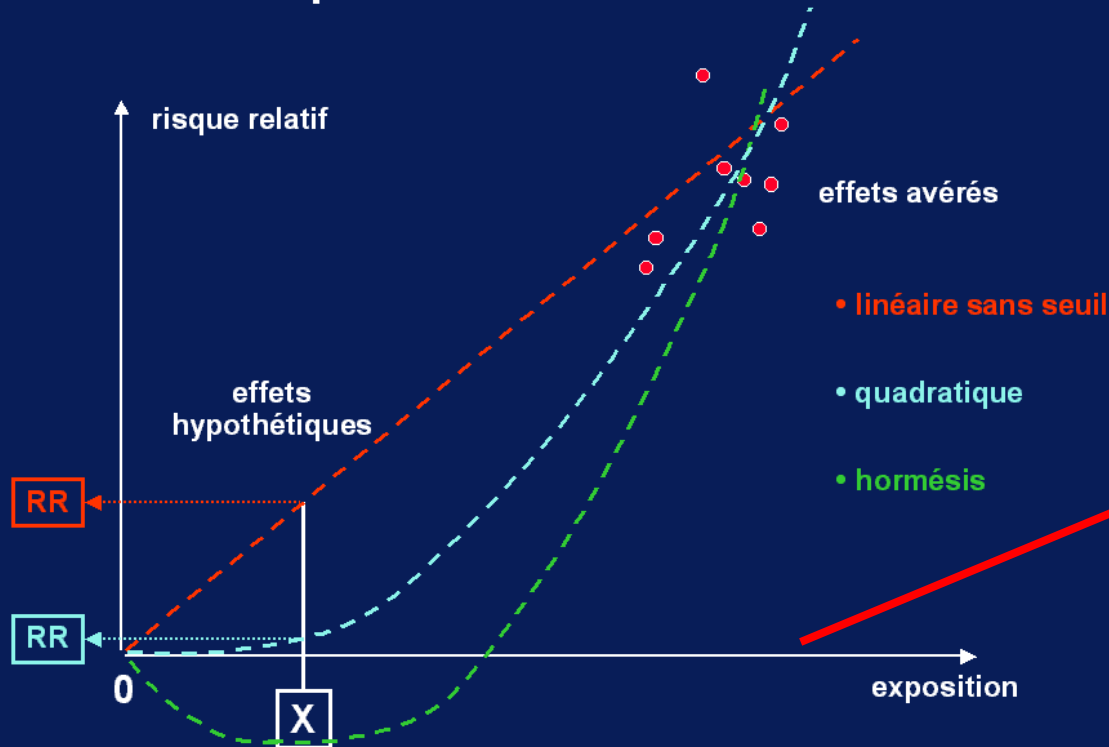
- eau d'Evian 0,03 mSv/an
- eau de St Alban 1,25 mSv/an

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

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

évaluation du risque d'une irradiation



Effets sanitaires :

Déterministes > 700 mSv ; effet croît avec dose

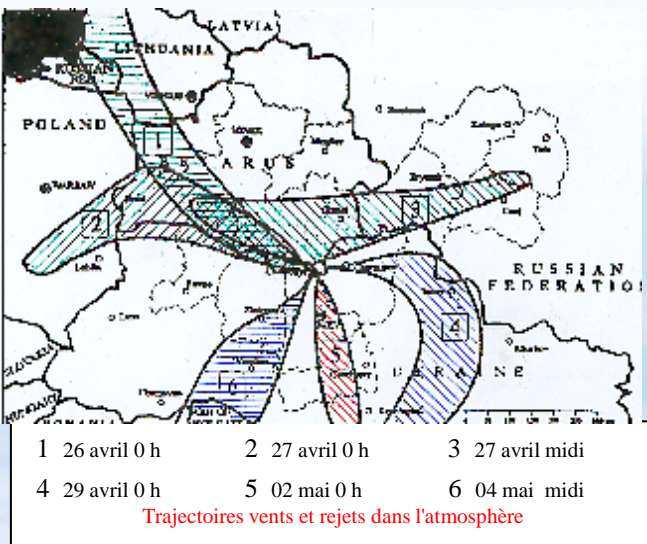
Stochastiques adultes > 200 mSv ; proba croît avec dose, pas effet

Stochastiques enfants > 100 mSv

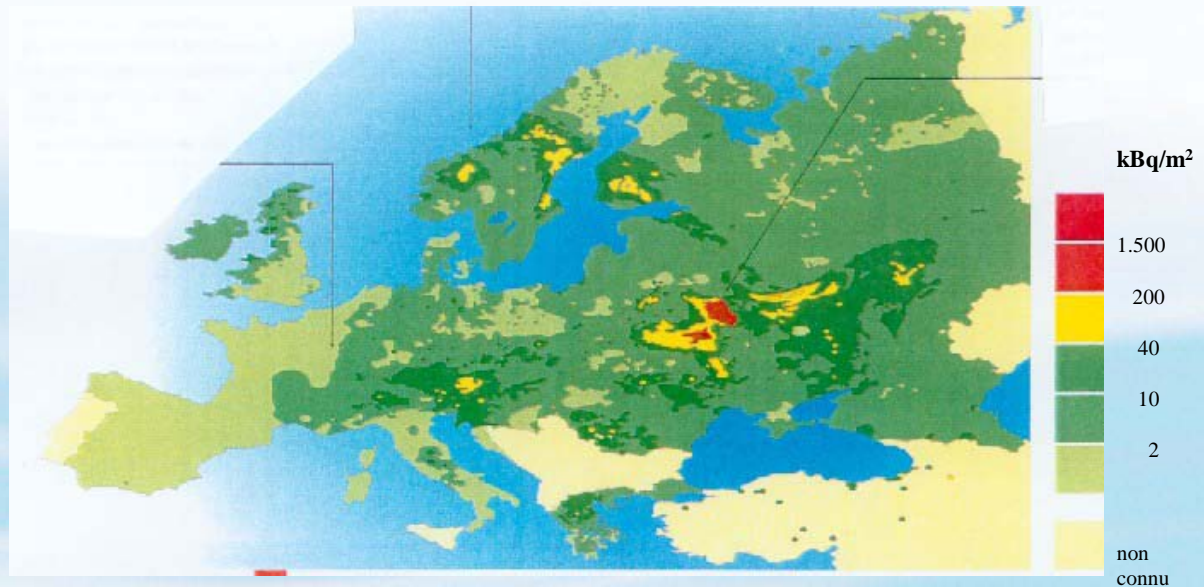
Stochastiques foetus > 20 mSv

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

Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent

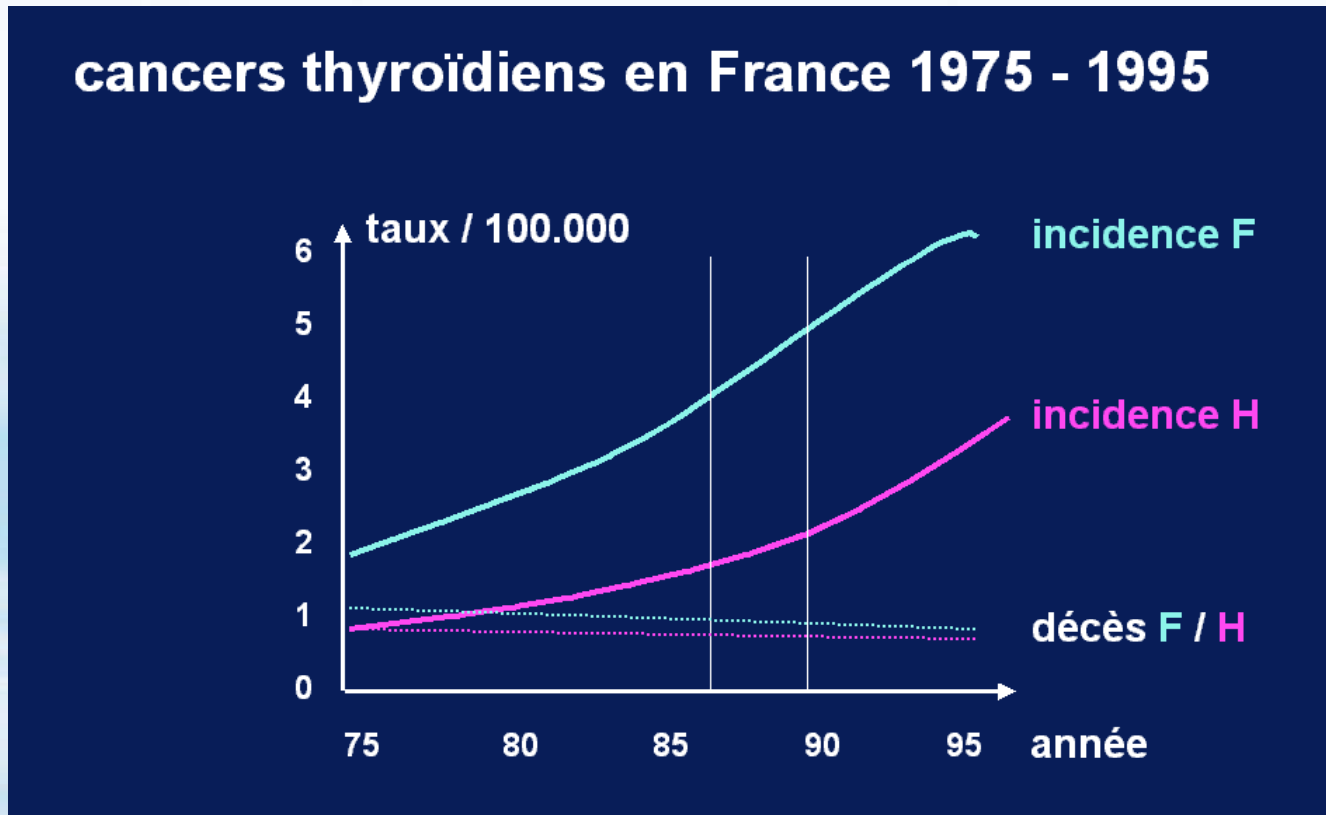


Trajectoires (évaluées) des panaches de Tchernobyl



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

Quand les études épidémiologiques existent, quid ?



Source André Aurengo

Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ?



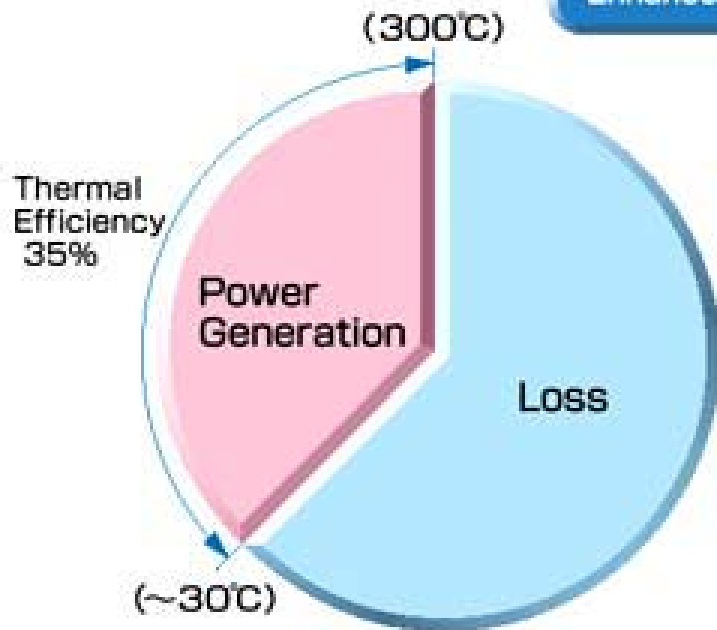
Il y a indiscutablement des bases scientifiques communes

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...)

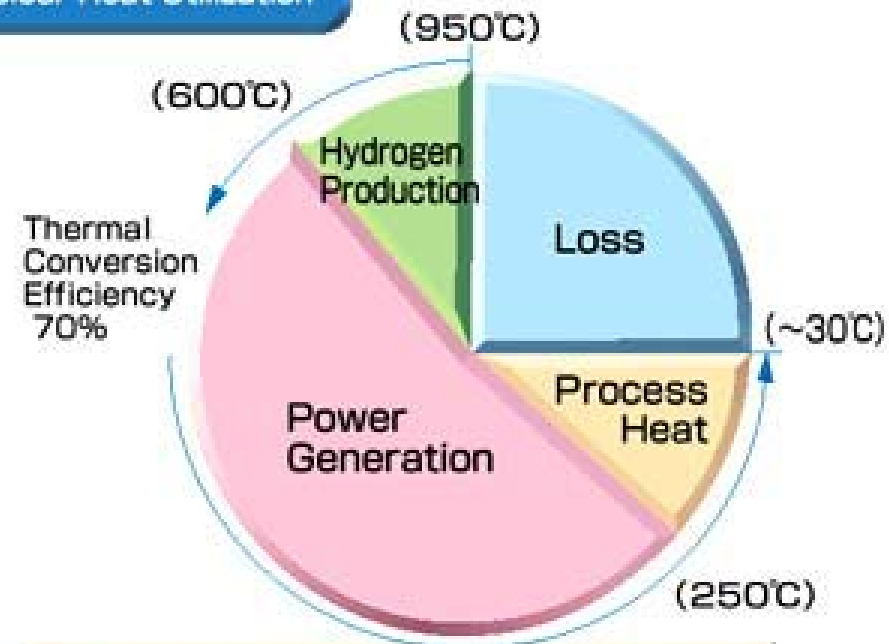
Développer l'électricité nucléaire fait entrer dans un système international d'engagements, de contrôles, qui rend plus détectables les activités clandestines (N.K., Iran)

Enhancement of Nuclear Heat Utilization



Light Water Reactor

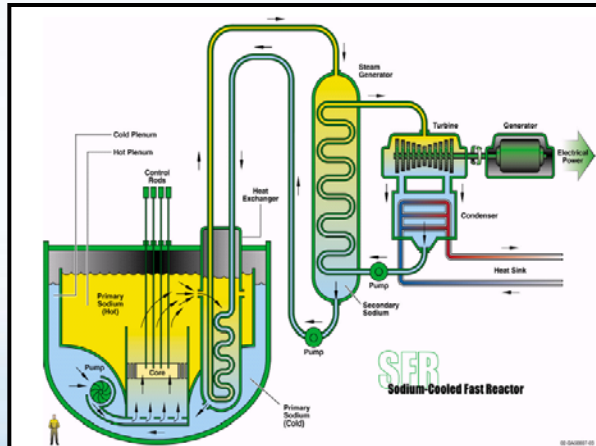
Steam Temperature: ~300°C
— Steam Cycle —



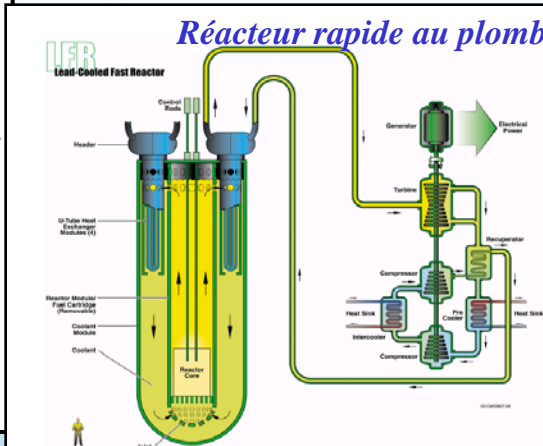
High Temperature Gas-cooled Reactor

Gas Temperature: ~1000°C
— Cogeneration —

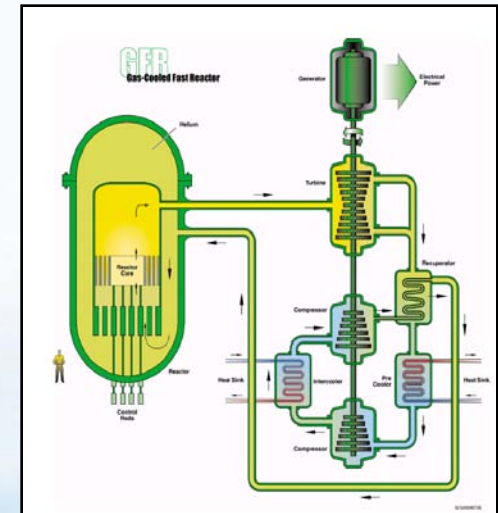
Les projets dans les cartons



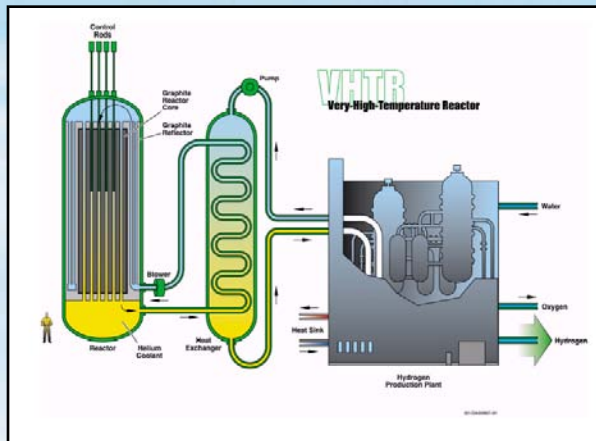
Réacteur rapide Sodium



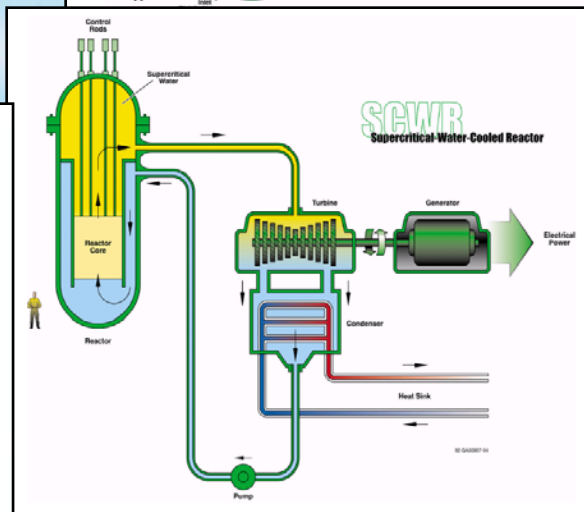
Réacteur rapide au plomb



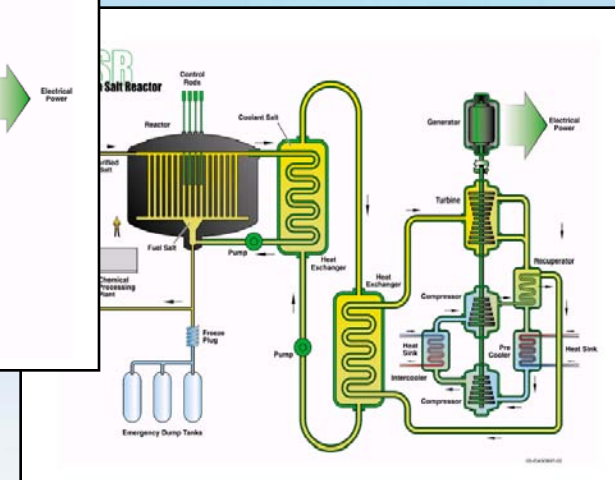
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température

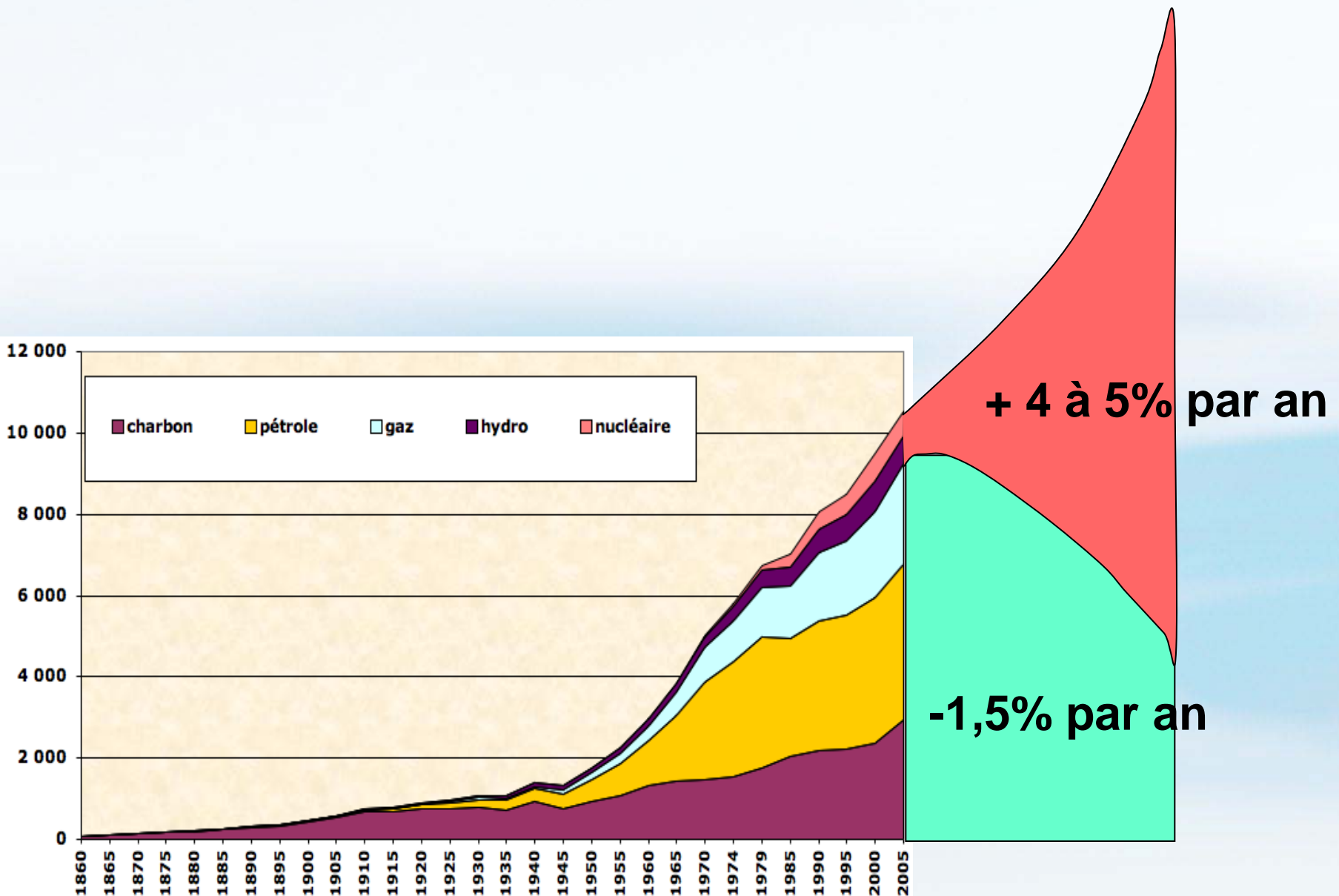


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

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



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 minimales 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... 4% de croissance sur 45 ans, c'est **2.500 réacteurs nucléaires en 2050** (400 aujourd'hui), 5.000 si 50% de pertes après production de l'électricité (stockage, conversion en H₂, etc), **10.000** si peu de contribution des renouvelables.

Y aura-t-il les capitaux ? (10.000 réacteurs ≈ 20.000 G\$, ≈ 50% du PIB mondial 2000)

Y aura-t-il les compétences ?

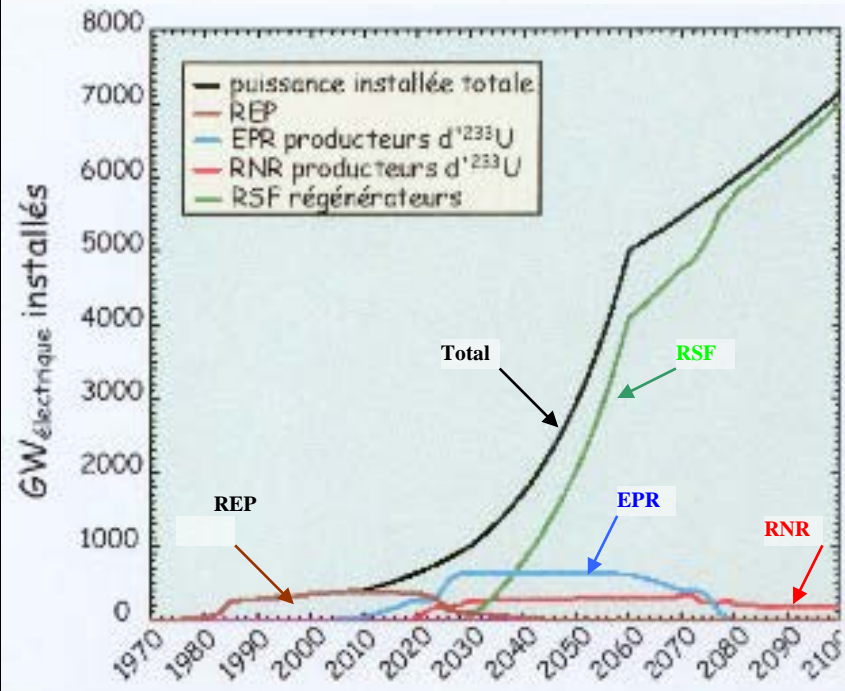
Y aura-t-il la volonté en démocratie, avec 20 ans de préavis ?

Y aura-t-il les emplacements ? Etc etc

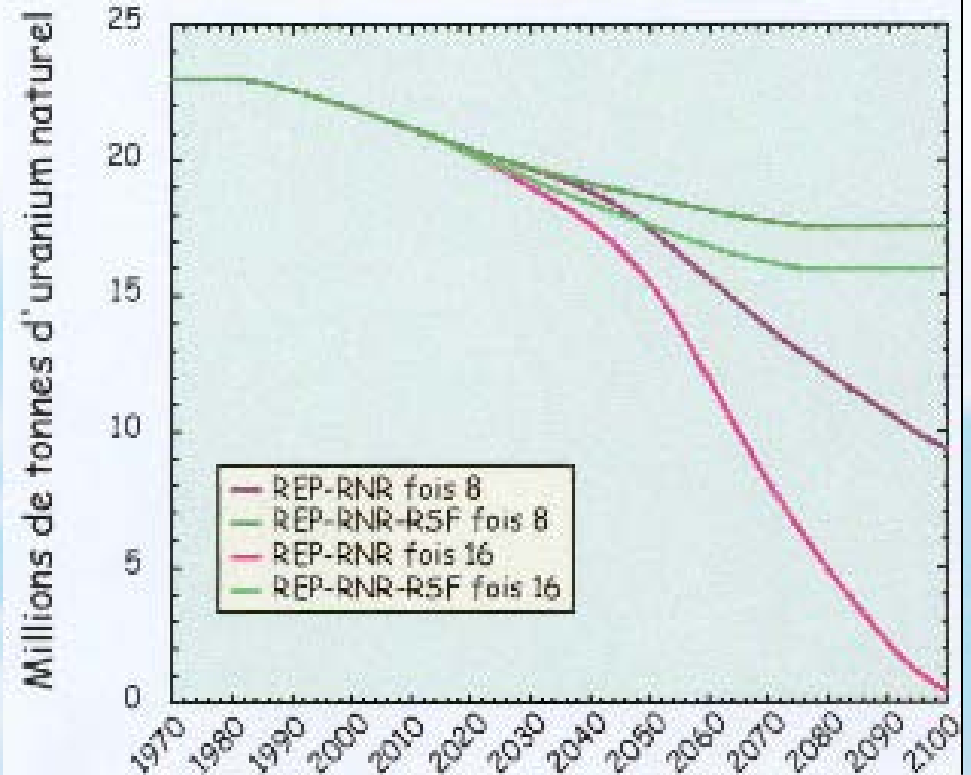
La contribution du nucléaire à « la » solution : encore et toujours une question d'ordre de grandeur !

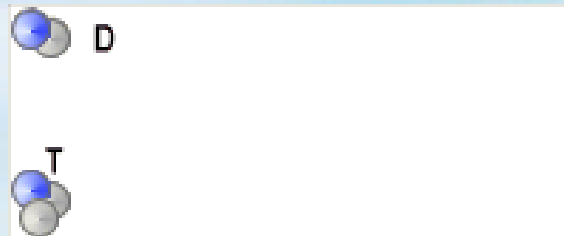
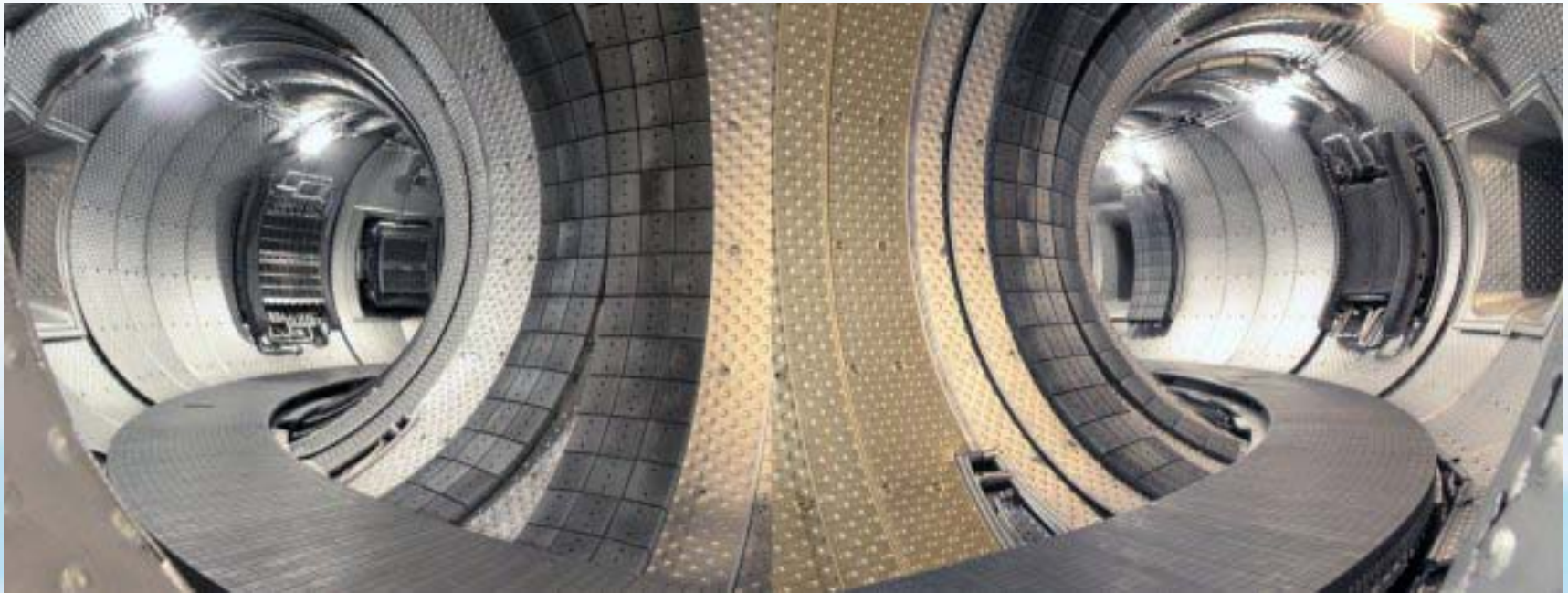
Sur le papier, d'aucuns disent que oui... mais après le peak oil

Hypothèse : Puissance installée multipliée par 16
Scénario REP - RNR - RSF



Réserves restantes Uranium naturel





La fusion, c'est mieux que la fission ?

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 produits de fission 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 (qu'il va donc falloir attendre encore un peu)

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 ?