

VI - LE NUCLÉAIRE



Chapitre 32 - Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

▶ <https://youtu.be/7dmz07zWQrY>

Chapitre 33 - La fission nucléaire

▶ <https://youtu.be/wAnjkkIHAA>

Chapitre 34 - Les contreparties du nucléaire

▶ <https://youtu.be/HHZLfCYONi4>

Chapitre 35 - Avenir du nucléaire

▶ <https://youtu.be/EBJ2gZlt71s>

Chapitre 32 - Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

Deux manières distinctes d'obtenir de l'énergie impliquant un atome :

- réarranger les couches électroniques (excitation ou réaction chimique)
- réarranger les nucléons (énergie nucléaire)

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.

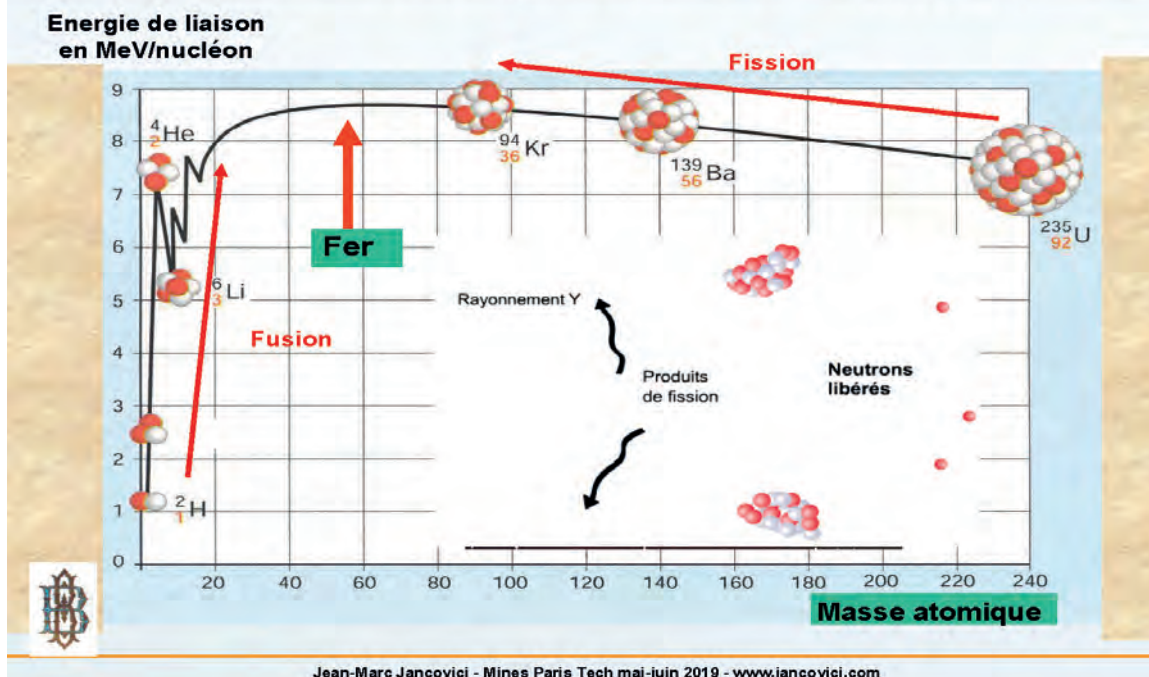
Dans les deux cas de figure, $e = mc^2$: la masse du/des noyaux à l'arrivée est plus faible que la masse du/des noyaux au départ, et la différence est de l'énergie cinétique pour les produits de fission et rayonnement gamma

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Deux manières d'avoir de l'énergie nucléaire :

- l'énergie associée à la fission, qui consiste à casser un gros noyau en 2 gros morceaux et plein d'autres petits morceaux. Réaction qui libère de l'énergie.
- ou au contraire prendre des noyaux très légers pour les fusionner. Processus qui libère également de l'énergie.

Fusion et fission, deux manières de viser la stabilité



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Pourquoi des gros ou des petits noyaux ? Dans les deux cas de figure on profite du fait que l'énergie de liaison dans les noyaux :

- diffère selon la taille des noyaux
- dans les petits et très gros noyaux, l'énergie de liaison est un petit plus faible que dans les noyaux inter- médiaires
- et donc en réarrangeant la taille des noyaux on peut obtenir de l'énergie

Explication physique : la masse du / des noyaux d'arrivée est plus faible que la masse du / des noyaux de départs, la différence constitue l'énergie cinétique pour les produits de fission et rayonnement gamma.

Fission = casser un noyau en 2 avec libération d'énergie, essentiellement contenue :

- soit dans du rayonnement électromagnétique
- soit dans l'énergie cinétique des "bouts" de noyau obtenus suite à la fission

Exact inverse, la fusion : on assemble des noyaux et le différentiel d'énergie de liaison se retrouve égale- ment libéré sous forme de rayonnement électromagnétique et d'énergie cinétique.

L'énergie nucléaire, ca décoiffe

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

A savoir :

- énorme coefficient multiplicateur entre l'énergie chimique (= énergie du réarrangement des électrons) et l'énergie nucléaire (= énergie du réarrangement des nucléons), d'environ 1 million.
- dit autrement, il y a 1 million de fois plus d'énergie dans la fission d'1 gramme d'uranium que dans la combustion d'1 gr de pétrole
- dit encore autrement, la combustion d'1 gr d'uranium (U235 ou Pu239) libère la même quantité d'énergie thermique que de brûler 1 tonne de pétrole

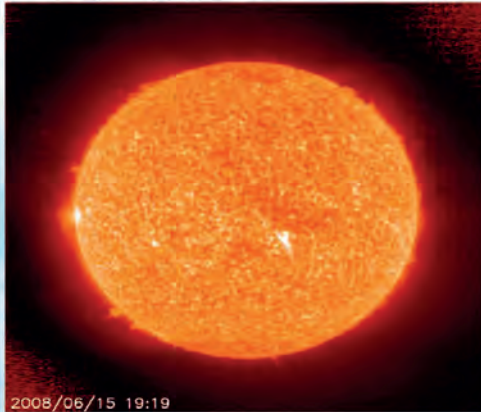
L'énergie nucléaire est très concentrée. Raison :

- l'énergie typique de réarrangement d'une couche électronique, c'est quelques électrons / volts tandis que l'énergie typique d'une réaction de fission c'est quelques centaines de millions d'électrons / volts
- dit autrement l'énergie de réarrangement des noyaux dans un atome est bien plus intense que l'énergie de réarrangement des électrons

Le nucléaire, c'est d'abord la vie...

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le soleil = une grosse bombe thermonucléaire permanente / fusion permanente

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Toutes les énergies que nous utilisons sur Terre sont des dérivés directs ou indirects de l'énergie nucléaire :

- rayonnement solaire bien sûr
- mais également toutes les énergies fossiles (= des énergies dérivées de la photosynthèse)
- végétaux et dérivés
- hydroélectricité (cycle de l'eau = soleil)
- géothermie (= radioactivité naturelle des roches)

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'origine de la physique nucléaire est militaire. Ou presque puisque auparavant (1942) apparaît la pile atomique de Fermi (qui avait la puissance ridicule d'1/2 watt de puissance).

C'est une partie de l'explication de la mauvaise image du nucléaire. Mais pas uniquement (sinon beaucoup de technologies auraient également mauvaise presse : robotique, internet, ...)

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

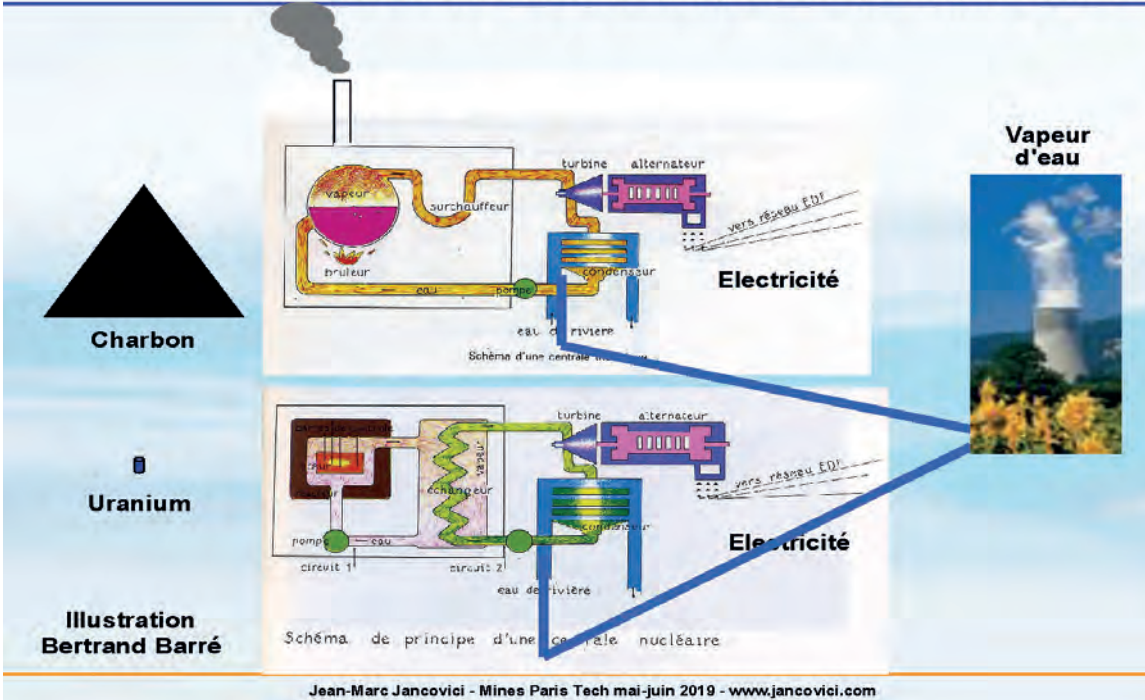
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Une centrale nucléaire = une bouilloire compliquée

Le nucléaire civil est un procédé compliqué consistant à faire bouillir de l'eau

- en grande quantité
- sans combustion / sans utiliser d'oxydation du carbone
- et pour pas très cher

Nucléaire ou charbon, c'est - presque - pareil



La différence entre une centrale nucléaire et une centrale thermique (à charbon, ...) se trouve dans la manière de produire la chaleur :

- dans une centrale à charbon, cela consiste à faire brûler du charbon
- dans une centrale nucléaire, cela consiste à faire fissionner des atomes

Tout le reste est identique :

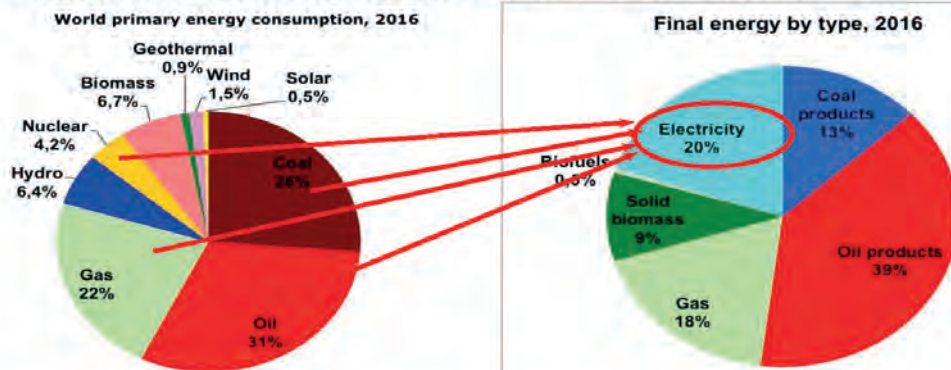
- dégagement de grandes quantités de chaleur
- création de vapeur
- rotation d'une turbine
- au niveau de l'alternateur, le rotor dans le champ magnétique produit du courant
- éventuellement en sortie, présence d'un aéro-réfrigérant (la source froide de la machine de Carnot). C'est l'apanage des centrales électriques en bord de rivière : indispensable si la centrale se situe en bord de rivière car besoin de la chaleur latente d'évaporation pour refroidir car le débit de la rivière n'est pas suffisant pour simplement refroidir par conduction thermique)

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



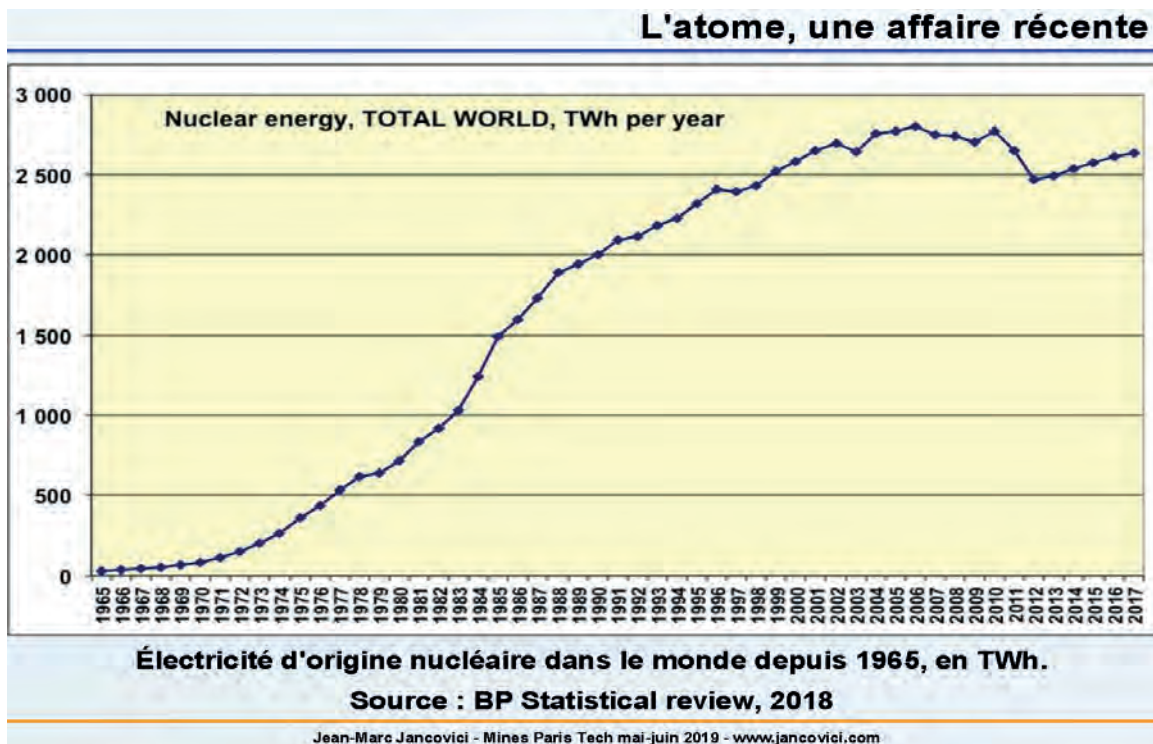
14,2 Gtep primaire → **9,5 Gtep final**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- 85% de l'électricité mondiale est produite par le gaz, le charbon et le fioul lourd

- 15% de l'électricité mondiale produite avec l'énergie nucléaire (en recul)

La production d'électricité nucléaire est très variable selon les pays

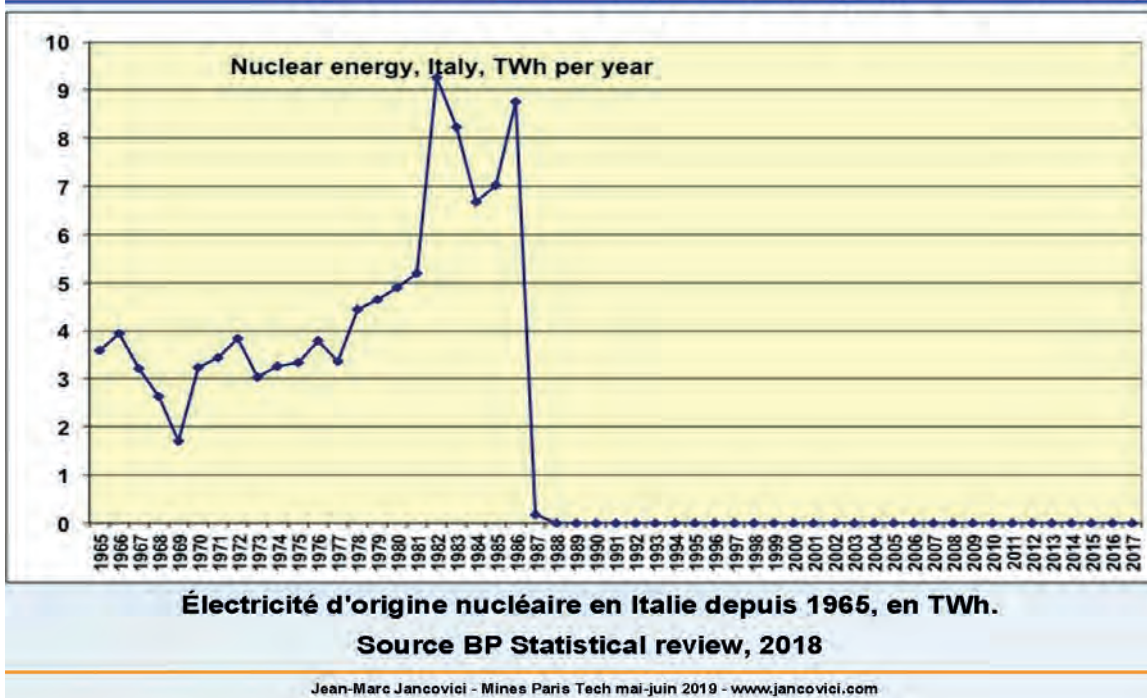


La production d'électricité nucléaire mondiale s'est fortement accélérée après les chocs pétroliers, ralentie durant la période du contre-choc et baisse après l'accident de Fukushima et la crise de 2008. Redémarrage des réacteurs au Japon explique en partie la remontée depuis 2014.

Puissance typique d'un réacteur nucléaire :

- entre 1/2 Gw et 1 Giga watt (1,5 Gw pour un EPR)
- 2760 Giga watt / heure sur 1 année (8,8 tera watt heure)
- avec les arrêts / maintenance, de 6 à 8 tera watts / heure par an

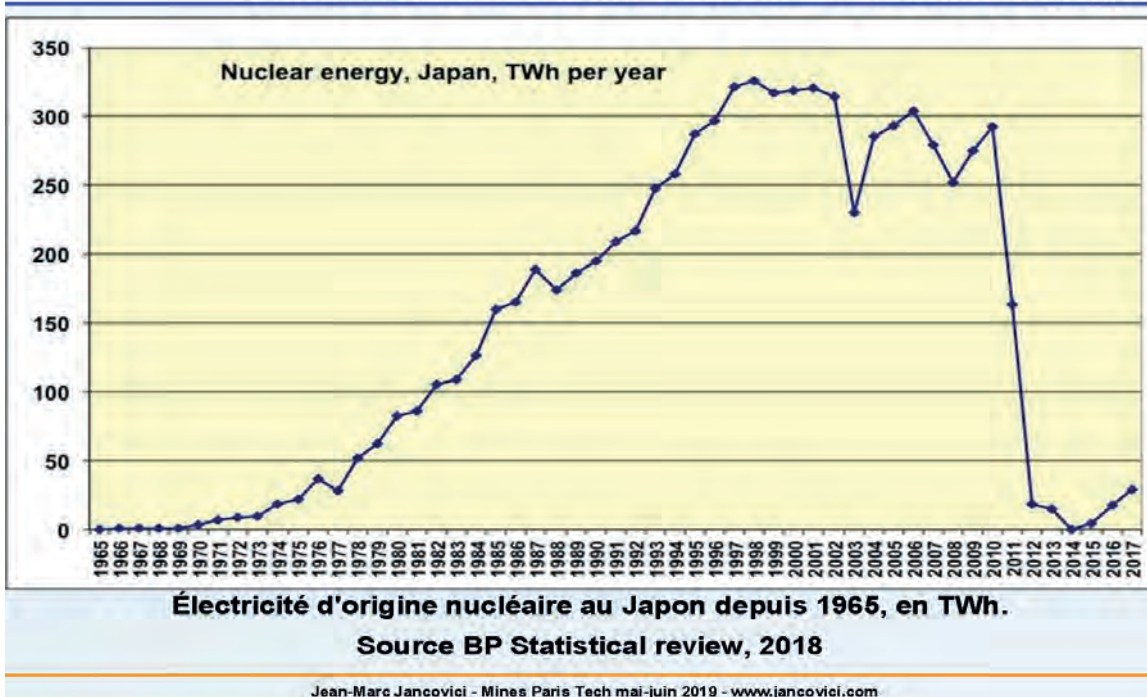
Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



Production en Italie à l'arrêt depuis l'accident de Tchernobyl :

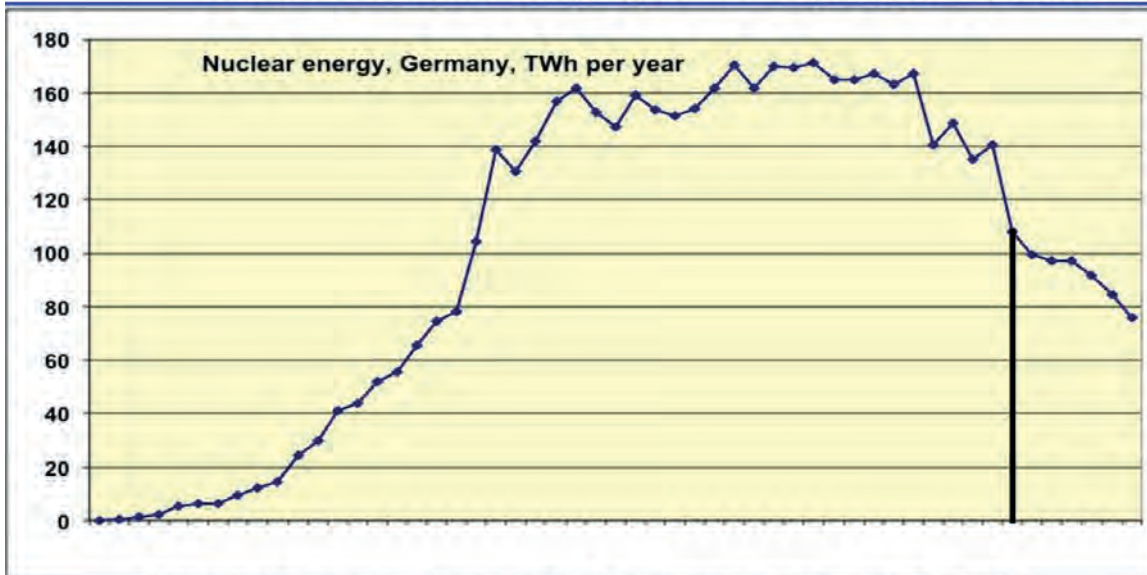
- sortie du nucléaire décidée par référendum
- arrêt de ses 2 centrales

D'autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage



Redémarrage progressif des centrales au Japon suite à l'accident de Fukushima.

D'autres ont peu de plages mais quelques électeurs



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

Source BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Début du plan Schröder coïncide avec une baisse sensible de la production nucléaire d'électricité. Lorsque l'Allemagne accélère sa sortie du nucléaire suite à l'accident de Fukushima, elle ne fait qu'entériner une tendance amorcée au début des années 2000 : l'accident de Fukushima rend impossible politiquement le redémarrage souhaité par Merkel.

D'autres mettent le paquet



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

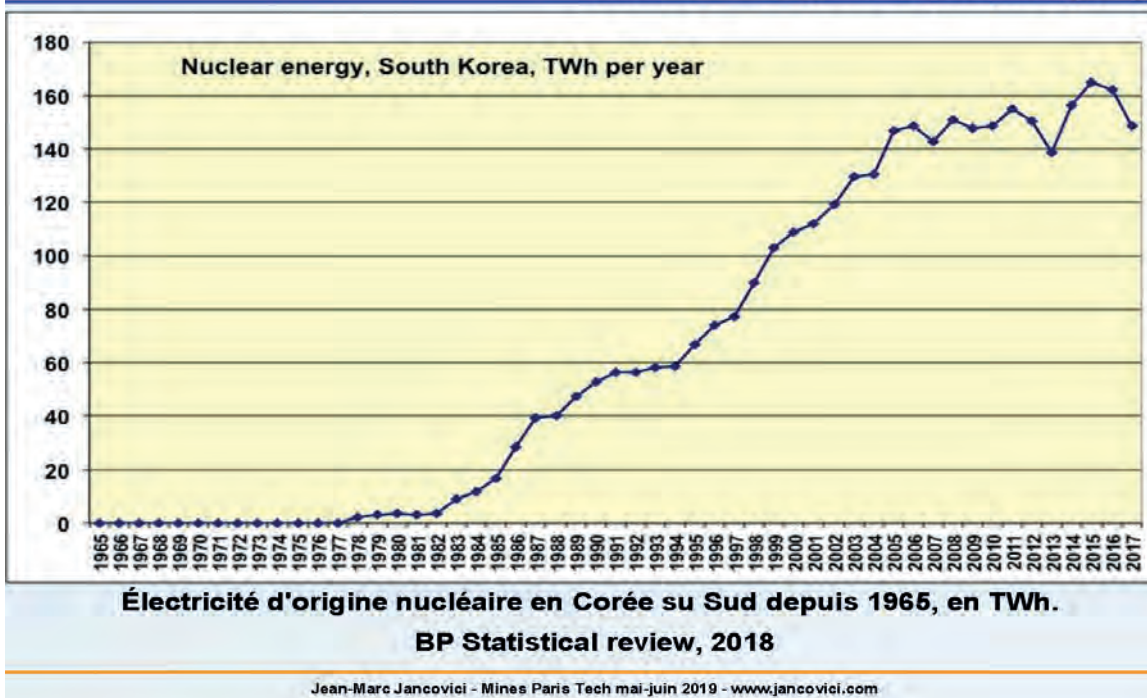
BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Chine

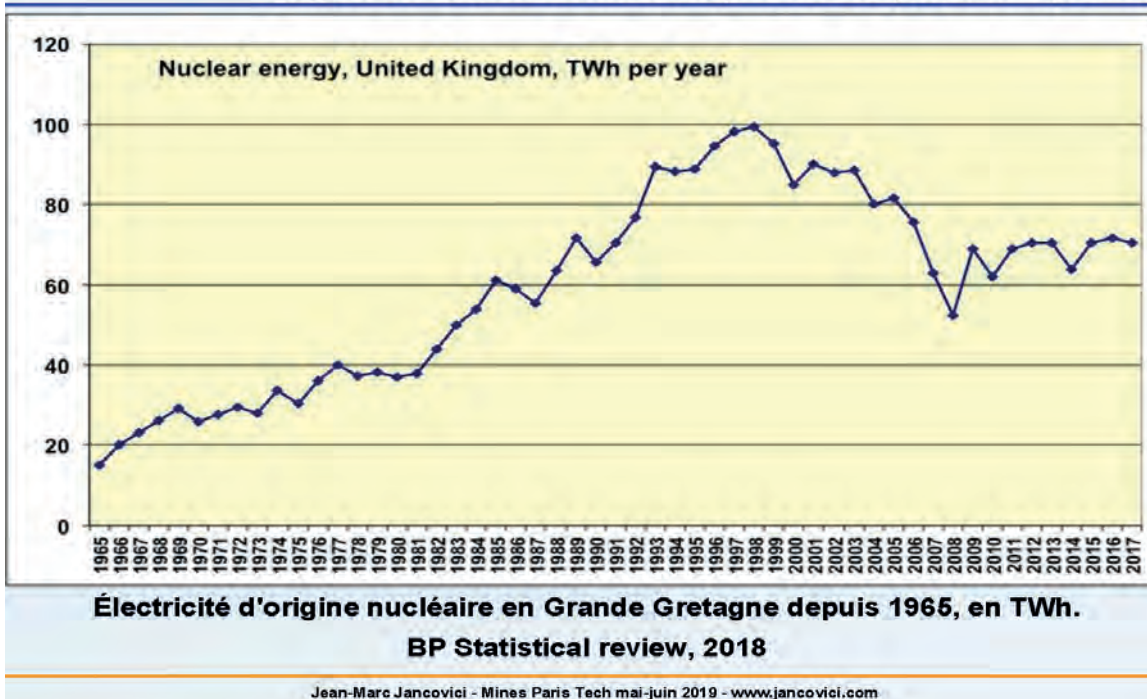
- plus d'1/3 des réacteurs en construction se trouvent en Chine
- plusieurs EPR en service

D'autres mettent le paquet (bis)



La Corée du sud a une part significative de son électricité produite avec de l'énergie nucléaire. S'interroge sur une sortie.

D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point

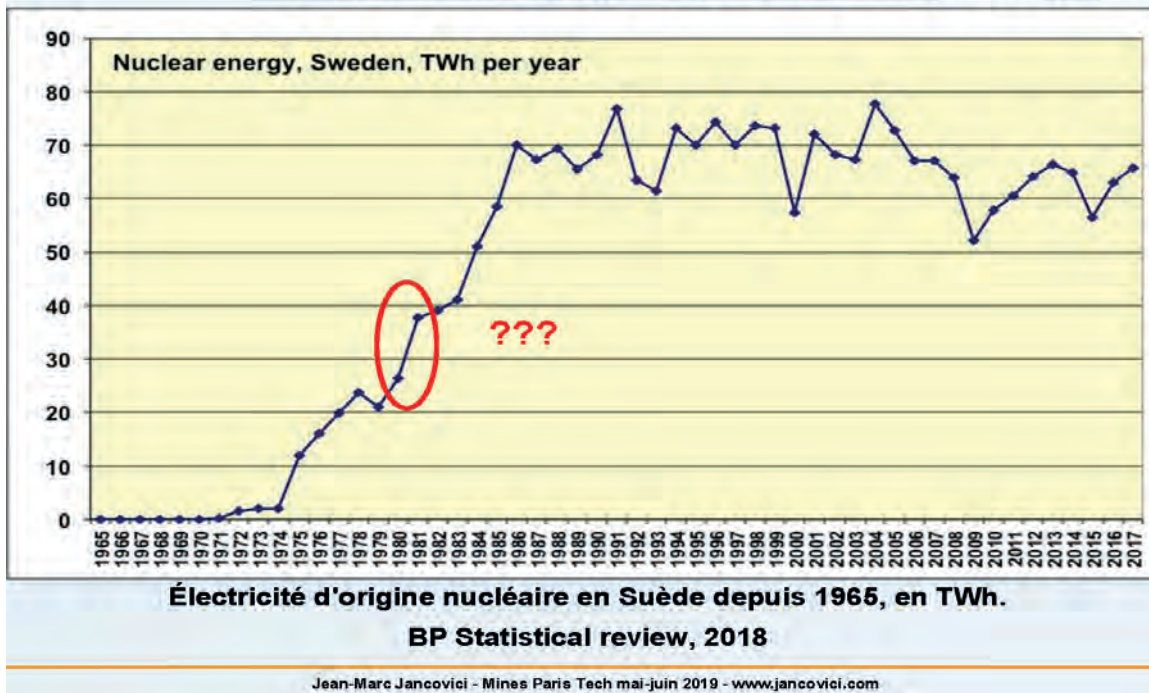


Le Royaume Uni

- très intéressé par la production d'électricité nucléaire
- mais en produit de moins en moins par défaut d'investissement (secteur de la production électrique dirigé par le privé)

La logique d'une économie libérale (court terme) pas compatible avec un programme nucléaire car il faut un investissement massif avant de pouvoir produire la moindre électricité (parfois plus de 10 ans avant le démarrage d'une centrale neuve)

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

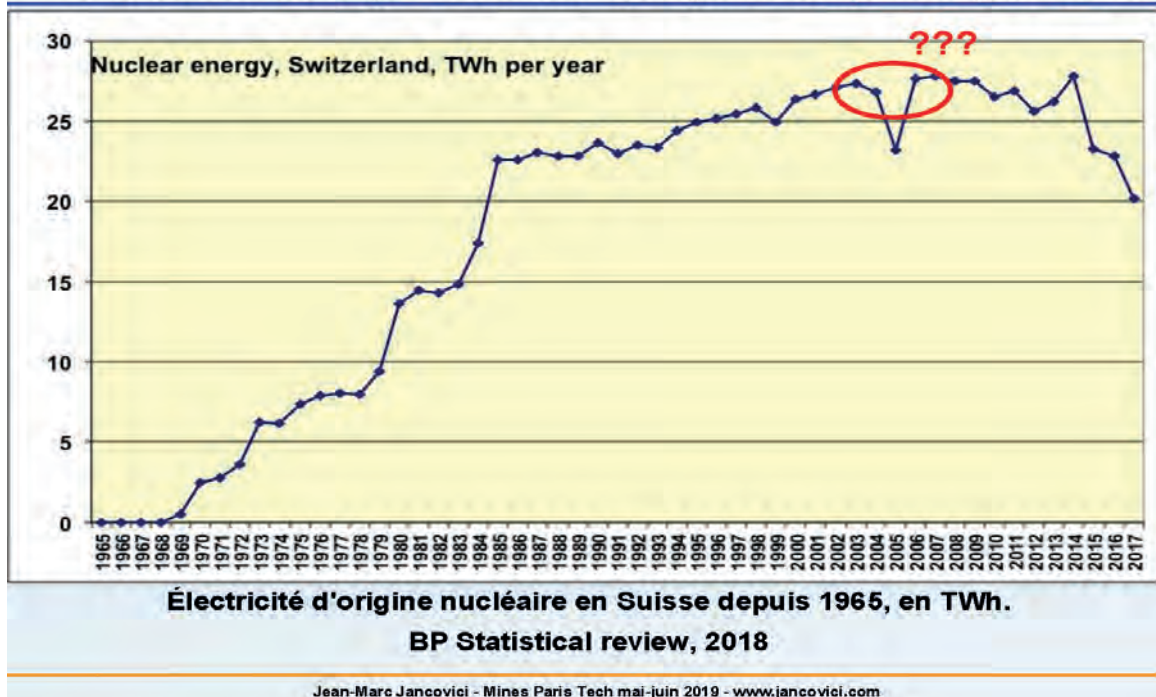


La Suède a une production nucléaire conséquente.

Pourtant référendum en 1981 décide la sortie du nucléaire. Les investissements étant déjà réalisés et l'amortissement de la production d'électricité nucléaire étant extrêmement peu chère (une fois les équipements en place), la production a continué à croître au cours des 10 années suivantes.

Remplacer le nucléaire est très coûteux et il est très difficile d'en sortir.

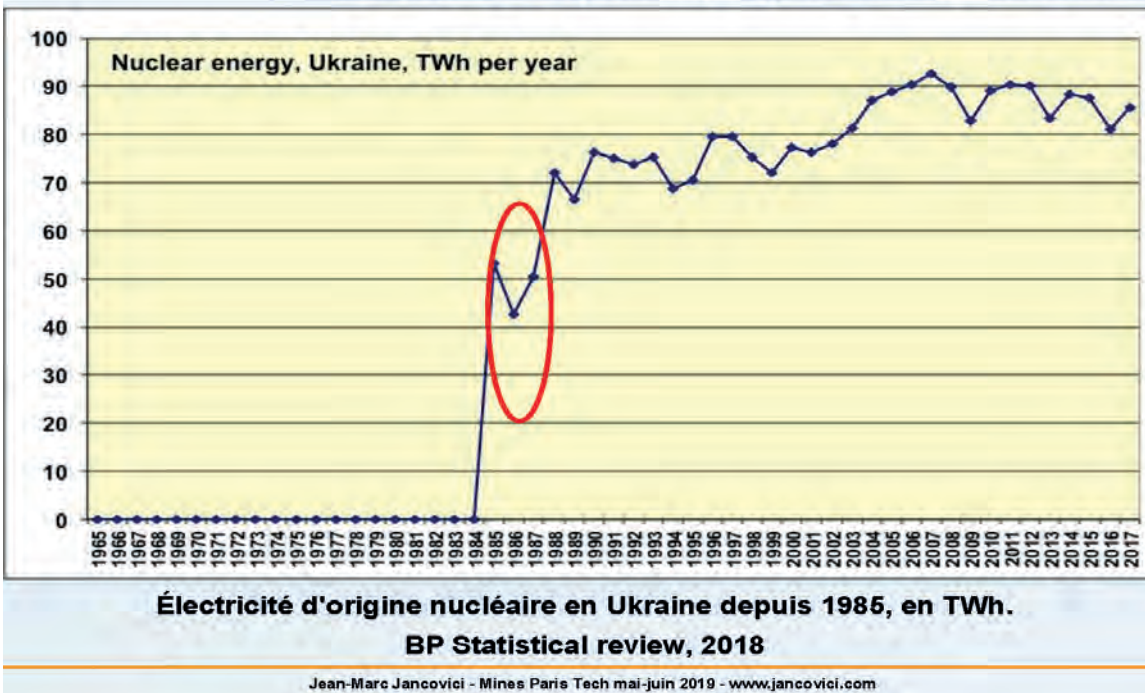
D'autres ont dit qu'ils aimaient, et puis non, et oui, et non...



Hésitation des Suisses

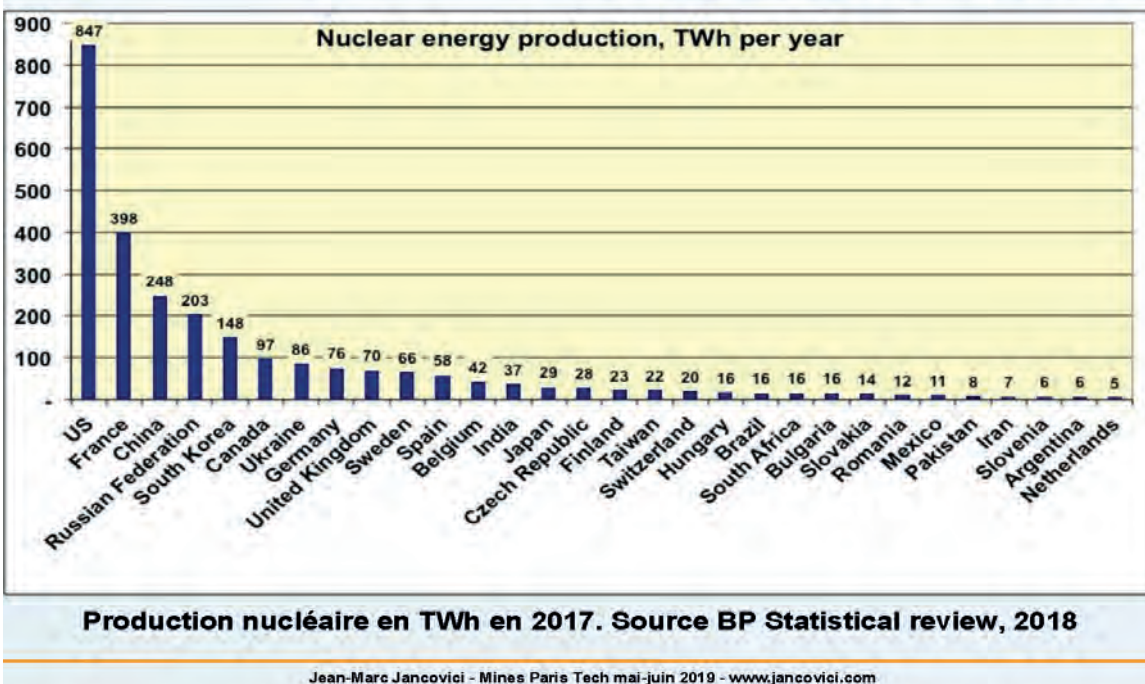
- un moratoire sur la construction de nouvelles centrales, on s'interdit de construire de nouvelles centrales
- 2003, levée du moratoire, la construction redevient une possibilité
- depuis décision de sortie du nucléaire

D'autres « explosent », puis « redémarrent »



Après l'accident de Tchernobyl, l'Ukraine a doublé sa production nucléaire.

Atome, qui en fait finalement ?

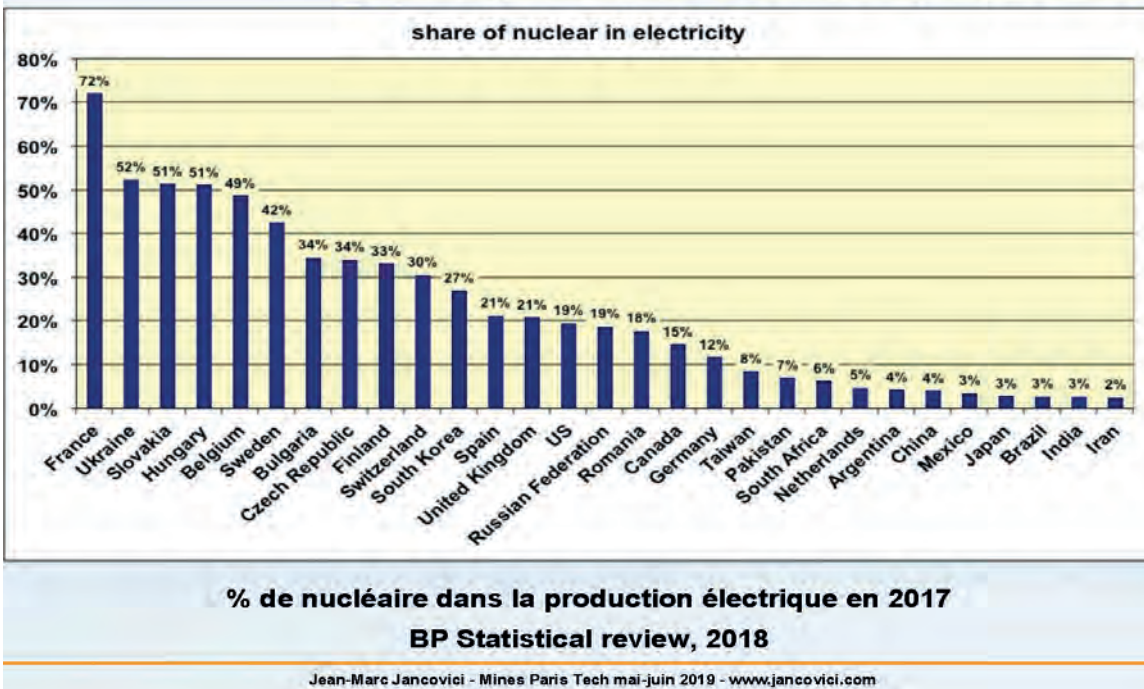


Pays producteurs d'électricité nucléaire, classement par valeur absolue

1ère place pour les Etats-Unis avec 847 Twh par an

- 20% de la production électrique)
- un peu plus du double du 2e
- une centaine de réacteurs en activité

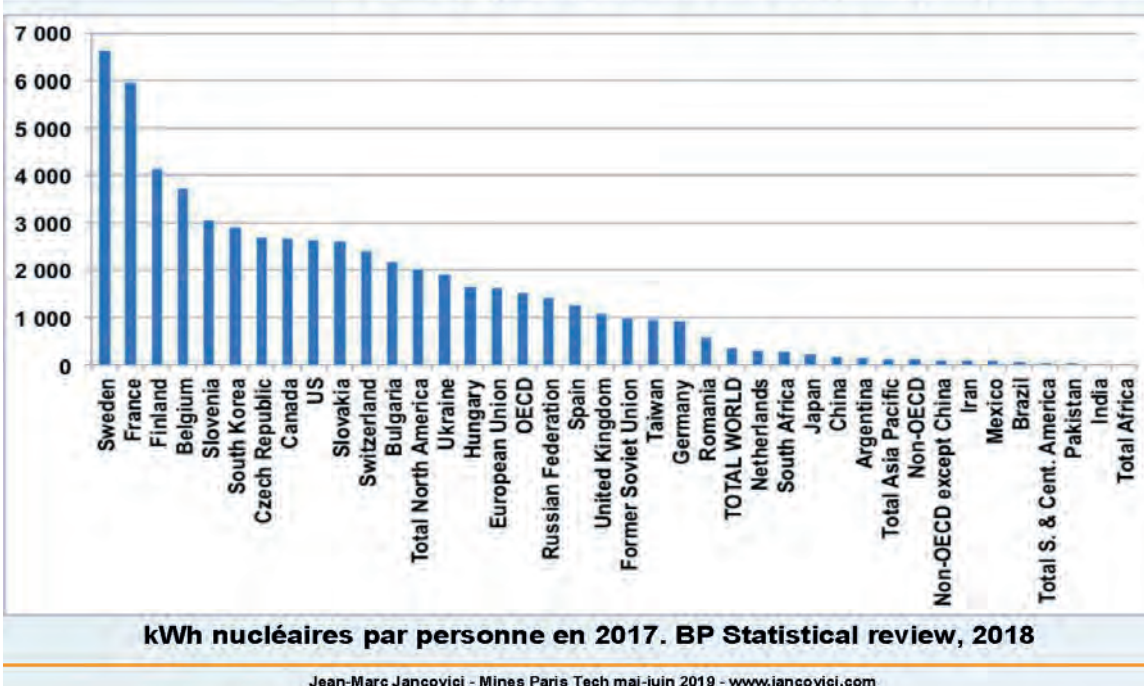
Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?



Classement des pays producteurs d'électricité nucléaire par part dans la production électrique

- 1ère place pour la France avec 70%
- plusieurs pays ont la moitié de leur électricité produite avec l'énergie nucléaire : Ukraine, Slovaquie, Hongrie, Belgique

Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?



Classement par pays en fonction de la production en valeur absolue par personne (= la quantité de kWh nucléaire utilisée par personne et par an dans le pays)

- 1ère place : la Suède a la plus grosse capacité nucléaire installée et la plus grosse production par personne
- signifie également une très forte consommation électrique par personne en Suède (comme celle de la Norvège, 3 fois supérieure à celle de la France)

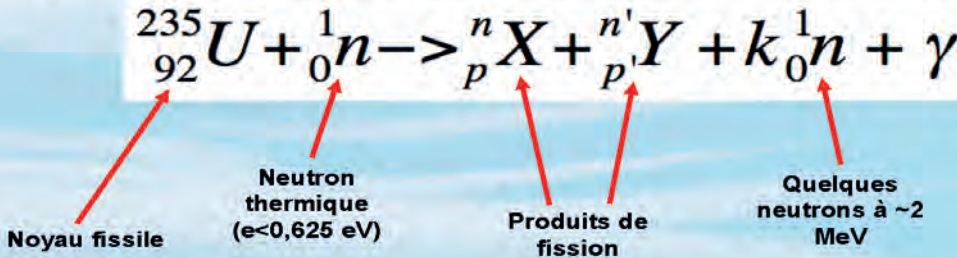
La fission : smaller is beautiful

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

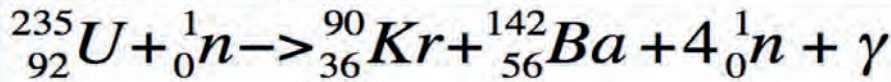
Cette fission peut intervenir spontanément (cas rare)

Elle peut intervenir après absorption d'un neutron (cas standard).

Exemple de l'uranium 235 :



Exemple « pour de vrai » :



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Fission :

- casser un très gros noyau en 2 pour libérer de l'énergie
- exploiter l'énergie libérée par le fractionnement en plusieurs petits noyaux d'un gros noyau

A savoir :

- ne peut se pratiquer que pour les noyaux dont le numéro atomique (Z) est supérieur à 89
- ne peut se pratiquer qu'avec des isotopes impaires (par exemple l'uranium 238 ou le plutonium 240 ne fissionnent pas)

Equation générale d'une fission :

01 : un noyau d'uranium capture un neutron, d'un type particulier. Il y a 2 catégories de neutrons présents dans un réacteur nucléaire,

- les neutrons rapides, les neutrons éjectés juste au moment de la fission nucléaire qui ont une énergie de quelques millions d'électrons-volts (eV). Ces neutrons sont absorbés par des atomes
- les neutrons lents ou neutrons thermiques, avec une énergie cinétique de l'ordre de l'électron-volt

02 : cela lui donne une "indigestion", il éclate en n morceaux

- 2 gros morceaux, dits "produits de fission" (X et Y)
- et plusieurs très petits, quelques neutrons (x4)
- et du rayonnement gamma / rayonnement électromagnétique

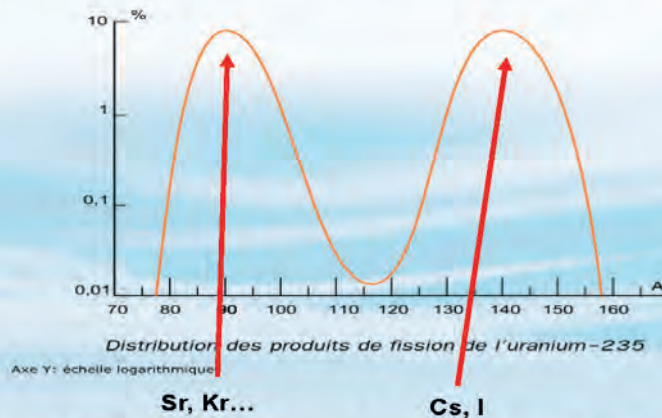
Fission d'un noyau d'uranium :

- X = 1 noyau de krypton (un gaz noble, inodore et incolore, chimiquement il ne s'associe à rien et tendrait à sortir du cœur)
- Y = 1 noyau de baryum
- 4 neutrons
- du rayonnement gamma

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les produits de fission de l'uranium initial (n° atomique 92) ne sont jamais identiques à chaque fission :

- couvrent une très large variété de numéros atomiques
- avec deux "pics" aux alentours de 30 et 60

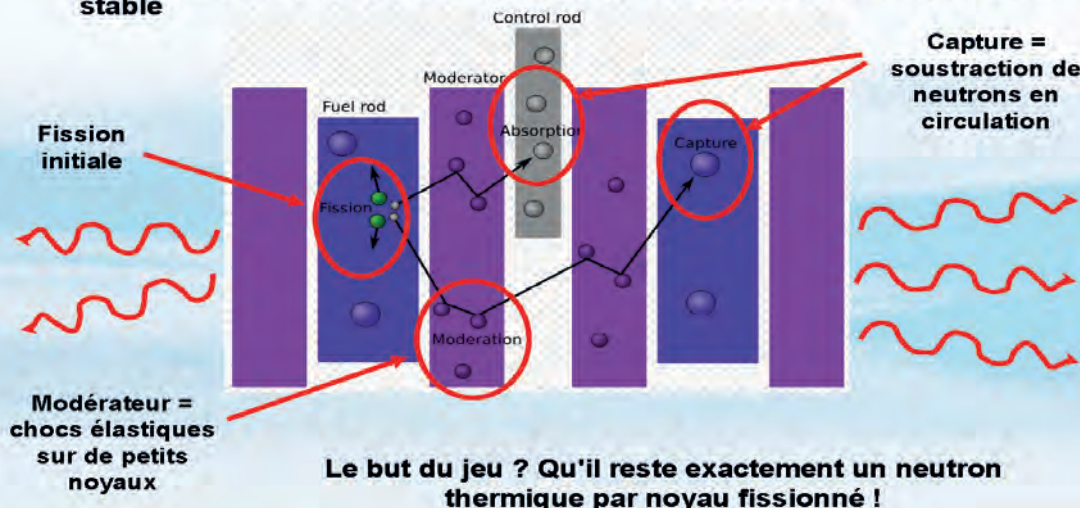
Les noyaux produits par la fission

- sont très souvent radioactifs : iode (53), césium (55), strontium (38), krypton (36)...
- avec des "demi-vies", d'une fraction de seconde à des milliers d'années, avec pour l'essentiel quelques dizaines d'années. Par conséquent la radioactivité des produits de fission est une radioactivité qui décroît très vite.

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



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les neutrons créés par la fission

- une partie va être absorbée par les noyaux d'uranium présents dans le réacteur (en particulier l'Uranium 238)
- ce qui crée des noyaux dont le numéro atomique est au-delà de l'uranium (92) : plutonium(94), américium (95), curium (96)...
- dans le tableau de Mendeleïev, il s'agit des actinides. Présents en petite quantité dans la barre d'oxyde d'uranium du cœur de la centrale, ils sont qualifiés d'actinides mineurs.
- On les retrouve dans le combustible utilisé des centrales

L'uranium 235 "apprécie" les neutrons thermiques : au moment de leur éjection consécutive à la fission, ces neutrons sont trop énergétiques pour pouvoir être récupérés par un autre noyau d'uranium 235.

Ces neutrons sont utilisés dans la réaction nucléaire pour fissionner d'autres noyaux d'uranium 235 :

- le neutron qui va aller fissionner un nouveau noyau d'uranium 235 ne doit pas aller trop vite sinon il n'est pas attrapé par le noyau
- il faut donc le ralentir, c'est-à-dire utiliser un modérateur, qui consiste à faire rebondir le neutron sur de petits noyaux (en l'occurrence, les plus efficaces : noyaux d'hydrogène de l'eau) jusqu'à ce qu'il perde une part de son énergie cinétique et devienne un neutron thermique
- c'est pourquoi le modérateur d'un réacteur nucléaire est juste de l'eau (qui sert en plus de caloporteur, à évacuer la chaleur)

Il s'agit d'un élément de sécurité passive : si on perd le caloporteur (par exemple une fuite dans le circuit), on perd certes la faculté de refroidir le cœur, mais d'un autre côté la fission s'arrête d'elle-même.

Chaque fission d'uranium produit entre 1 et 4 neutrons. Pour obtenir toujours la même quantité d'énergie et empêcher l'emballlement, il faut, par fission, faire capturer 1 neutron par noyau d'uranium. Et surtout pas plus : 2 neutrons capturés revient à faire une bombe atomique, où les premières fissions provoquent une réaction en chaîne.

Du coup lorsqu'il y a plus d'1 neutron créé par la réaction de fission, il faut absorber les neutrons excédentaires. Présence dans le réacteur de 2 constituants essentiels :

- les absorbeurs de neutrons, notamment le Bore (5)
- un modérateur, typiquement de l'eau. Il existe aussi des modérateurs en graphite comme à Tchernobyl mais moins sécurisé car en cas de dysfonctionnement il n'y a pas de sécurité passive, pas de possibilité de refroidir le cœur. N'existe pas en France en fonctionnement (certains en cours de démantèlement).

But de l'opération : qu'il reste exactement 1 neutron thermique par noyau fissionné. Possibilité de réguler très légèrement pour faire monter en puissance ou au contraire faire baisser la production.

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**

$${}_{92}^{238}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\text{Np} + {}_0^{-1}e \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_0^{-1}e$$

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'émission de rayonnement gamma

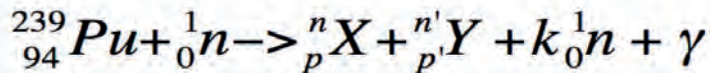
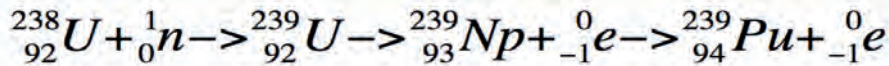
Un réacteur en fonctionnement (cuve en acier contenant l'assemblage d'oxyde d'uranium et l'eau circulant autour) émet des rayonnements gamma, ce qui explique la présence autour d'une enceinte de confinement en béton qui empêche les rayons de sortir.

Les actinides sont les produits qui

- se situent au-delà de l'uranium dans le tableau périodiques des éléments (= table de Mendeleïev)
- et qui sont créés par absorption successive de neutrons et désintégration radioactive

Exemple passage au Plutonium (actinide) à partir de l'Uranium 238 : cela commence par l'absorption d'un neutron (uniquement à partir de l'uranium 238, s'agissant de l'uranium 235, s'il absorbe un neutron il fissionne)

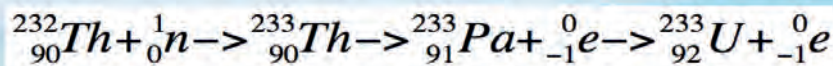
Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



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 »**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dans un réacteur nucléaire

- on trouve les 2 isotopes : uranium 235 et 238
- l'uranium 235 dans un réacteur (français) au départ représente 3,5% du total de l'uranium enfourné (96,5% est donc de l'uranium 238)

Note : 3,5% est le taux de concentration idéal. Au-dessus, cela devient incontrôlable (et à 90% c'est une bombe nucléaire). En dessous, la fission ne crée pas assez de neutrons et la réaction en chaîne ne se produit pas.

Certains réacteurs dans le monde fonctionnent avec de l'uranium "naturel", c'est-à-dire avec 0,7% d'uranium 235. Nécessite de l'eau lourde pour fonctionner.

Le plutonium peut fissionner : on pourrait donc imaginer un réacteur basé non pas sur la fission de l'uranium 235 mais sur

- la génération en continue de plutonium
- puis sur sa fission

C'est ce qu'on appelle le surgénérateur (Phœnix ou Super Phœnix) où

- c'est l'uranium 238 qui sert de combustible
- en ayant besoin de 2 neutrons

C'est une réaction plus complexe à piloter : elle n'est pas instantanée,

- il faut tenir compte des temps de formation U238 / U239
- et des temps de décroissance radioactive pour obtenir le plutonium

2 avantages aux réacteurs au plutonium

- pas besoin de modérateur : le plutonium s'est fissionné avec des neutrons lents / thermiques et des neutrons rapides, pas besoin de modérer les neutrons
- au lieu de profiter d'une toute petite partie de l'uranium (l'uranium 235 représente 0,7% de l'uranium trouvé dans la nature),

on peut utiliser la totalité de l'uranium trouvé dans la Nature

Autrement dit, faculté à augmenter très sensiblement (x100) le potentiel énergétique de l'uranium trouvé dans la Nature.

Super Phœnix, "réacteur rapide" industriel qui a longtemps fonctionné en France, a été démantelé. Phœnix a fonctionné pendant 30 ans est en fin de démantèlement.

Le thorium peut également être exploité :

- après absorption d'un neutron il se transforme en Uranium 233
- l'Uranium 233 est fissile (impair)

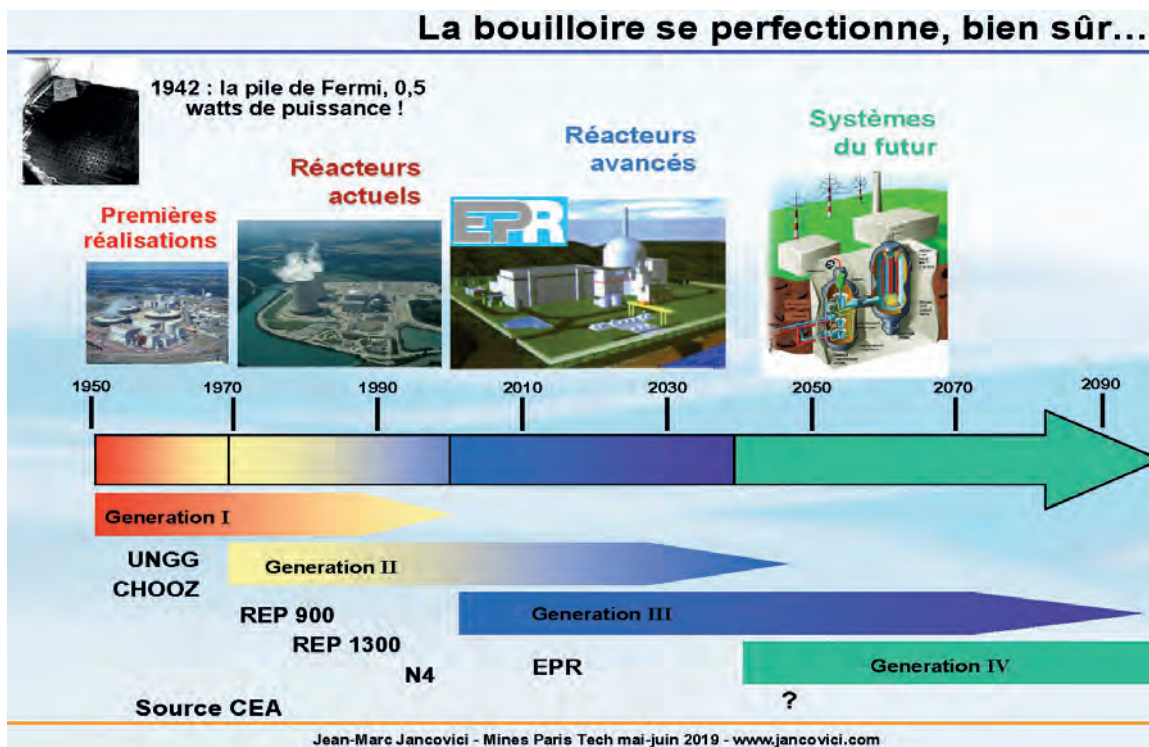
2 couples dans la Nature peuvent servir dans des réacteurs nucléaires (à neutron rapide et surgénérateurs)

:

- Uranium 238 / Plutonium 239
- Thorium 232 / Uranium 233

Pour faire fissionner l'Uranium 238 ou le Thorium 232, il faut leur envoyer des neutrons et donc nécessité de disposer d'une source de neutrons pour démarrer la réaction. Par conséquent pour démarrer un réacteur nucléaire, on a besoin d'une matière qui fissionne naturellement (Uranium 235).

Faire fissionner l'Uranium 238 ou le Thorium 232, c'est mettre en place des cycles qui permettent d'augmenter le potentiel d'une énergie nucléaire qui existe déjà à base d'Uranium 235. Mais cela ne permet pas de remplacer en totalité l'Uranium 235.



Dans les réacteurs actuels :

- une petite partie du Plutonium fissionne
- mais on en retrouve dans le combustible utilisé en sortie de réacteur

Dans les réacteurs imaginés pour la génération 4, les ingénieurs souhaitent exploiter le plutonium au fur et à mesure qu'il est généré.

Génération I : réacteur à Uranium naturel graphite - gaz

- ont tous été arrêtés en France
- mise en conformité / sécurisation non rentable,
- donc vague d'arrêt de réacteurs avant terme non pour des motifs politiques mais sur avis de l'autorité de sûreté de l'époque et après calcul de rentabilité

Génération II : en activité aujourd'hui en France, essentiellement des réacteurs à eau pressurisé (existe aussi en version "eau bouillante")

Génération III : EPR, une version améliorée de la précédente, reposant sur le même principe de fonctionnement

Génération IV : à l'état de concepts, avec un cahier des charges consistant

- à exploiter tout l'uranium
- à fermer le cycle (ne pas sortir dans le combustible utilisé une matière pouvant encore être valorisée à des fins énergétique, par exemple le plutonium)
- à minimiser les déchets
- et disposant de réacteurs à sûreté passive



Assemblage d'uranium tel qu'il est utilisé dans les réacteurs français :

- de grands tubes en alliage de zirconium, des "crayons"
- à l'intérieur desquels se trouvent des pastilles d'uranium et où l'eau circule

Manipulation sans risque, aucune protection radiologique nécessaire : aucune toxicité de l'uranium au moment de l'enfourner dans le réacteur. Radioactivité naturelle de l'assemblage sans risque.

Extraction de l'uranium, ressource gratuitement fournie par la Nature : l'uranium provient de la génération précédente d'étoiles.

Phases successives au cours des 14 milliards d'années :

- Big bang
- grande soupe de protons
- première génération d'étoiles
- par fusions successives, création de tous les éléments présents dans le tableau de Mendeleïev
- certaines étoiles créent des super-novae qui expédient tous ces éléments dans l'espace
- tandis que la formation d'étoiles continue, ces poussières se mettent en orbite autour des nouvelles étoiles, se condensent et forment des planètes telluriques (10 milliards d'années après le Big bang)

Les mines d'Uranium permettent de le récupérer sous forme d'oxyde mais l'extraction récupère également des éléments "sans intérêt" : il est donc nécessaire de concentrer l'uranium récupéré.

3e opération consiste à enrichir l'uranium :

- un mélange compliqué de chimie et de physique
- consistant à extraire dans l'uranium l'isotope 235

Difficulté : les propriétés chimiques des uranium 235 et 238 étant identiques (même nombre de protons, donc d'électrons), il est nécessaire de recourir à une séparation non chimique des 2 isotopes. La purification chimique de l'uranium 235 n'est pas possible, il faut recourir à des centrifugeuses :

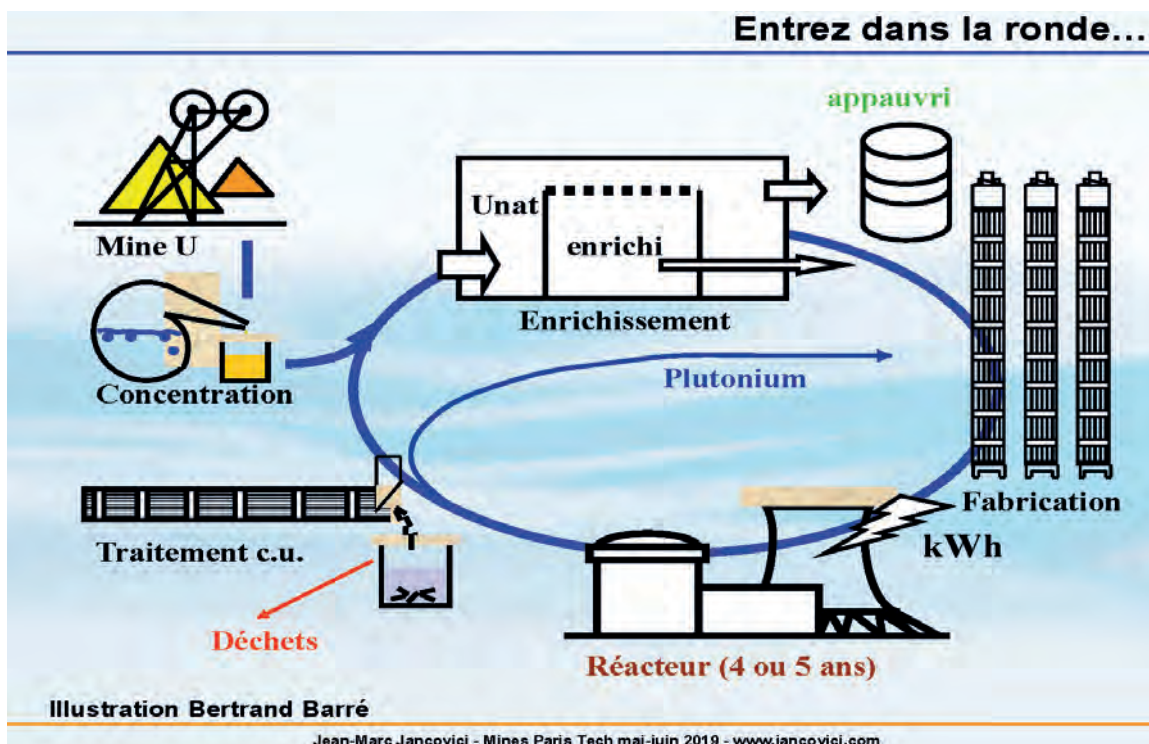
- un petit cylindre dans lequel on fait tourner un gaz, l'hexafluorure d'uranium
- équipé de deux écopés pour "attraper" les éléments centrifugés : l'uranium 238 est capturé par l'écope en bord de cylindre (la force centripète évacue en périphérie l'uranium 238, plus lourd) tandis que l'uranium 235 est capturé par l'écope proche de l'axe de rotation (capture très partielle, une fraction / 1000)
- la centrifugeuse tourne jusqu'à obtenir un Uranium enrichi à 3,5% avec l'isotope 235

Pour avoir 1 tonne d'uranium enrichi à 3,5%, il faut 5 tonnes d'uranium à 0,7% :

- soit 1 tonne d'uranium propre à servir de combustible
- et 4 tonnes d'uranium inutilisées (= uranium appauvri). A servi pendant un temps à faire des lests pour des voiliers de course (intérêt d'une très grande masse dans de petits volumes)

Note : la centrifugeuse sert pour le civil mais technologie identique pour le militaire (il faut juste augmenter la concentration à 90%, c'est-à-dire disposer de plus d'uranium).

4e transformation : l'uranium enrichi est conditionné en pastilles d'uranium, placées dans des tubes en alliage de zirconium. Les assemblages sont enfin placés dans le réacteur.



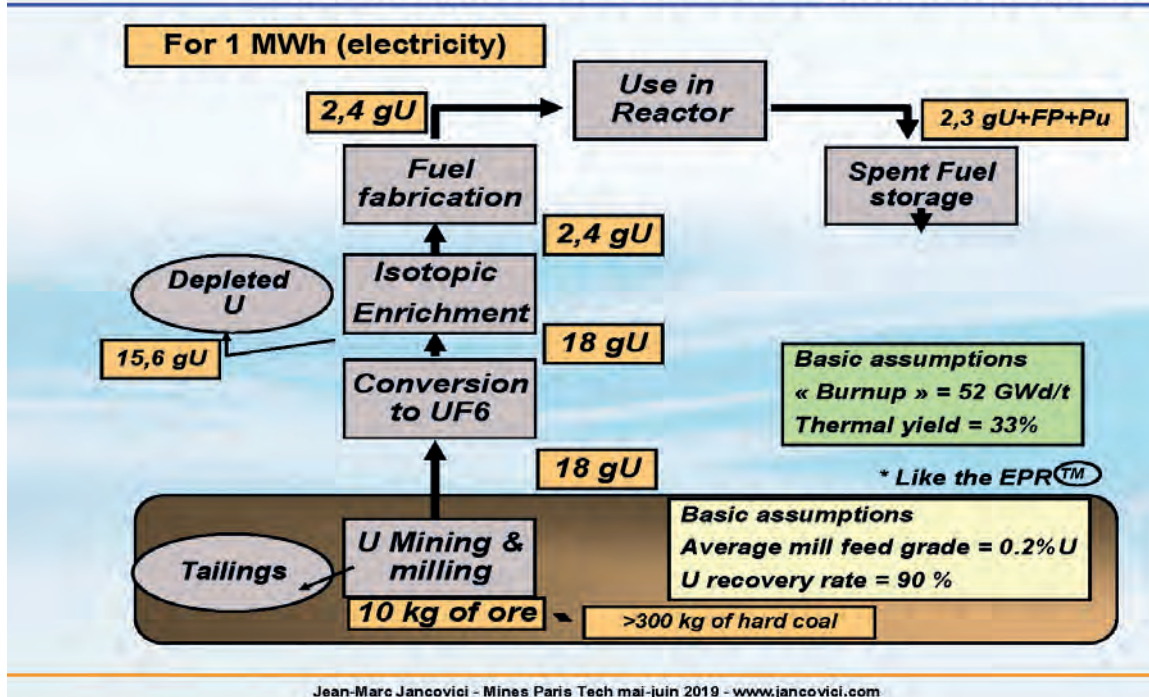
L'uranium fissionne pendant 4 à 5 ans puis extrait du réacteur.

Deux écoles selon les pays :

- considérer que ce qui sort du réacteur est un déchet bon à stocker (Etats-Unis sous Yucca Mountain, Suède dans des fûts en cuivre placés sous terre, ...)
- considérer qu'une étape de recyclage est nécessaire avant enfouissement : une partie peut être réassemblée et ré-enfournée dans les réacteurs (rôle de l'usine de La Hague)

Quelques ordres de grandeur à avoir à l'esprit quant aux masses en présence.

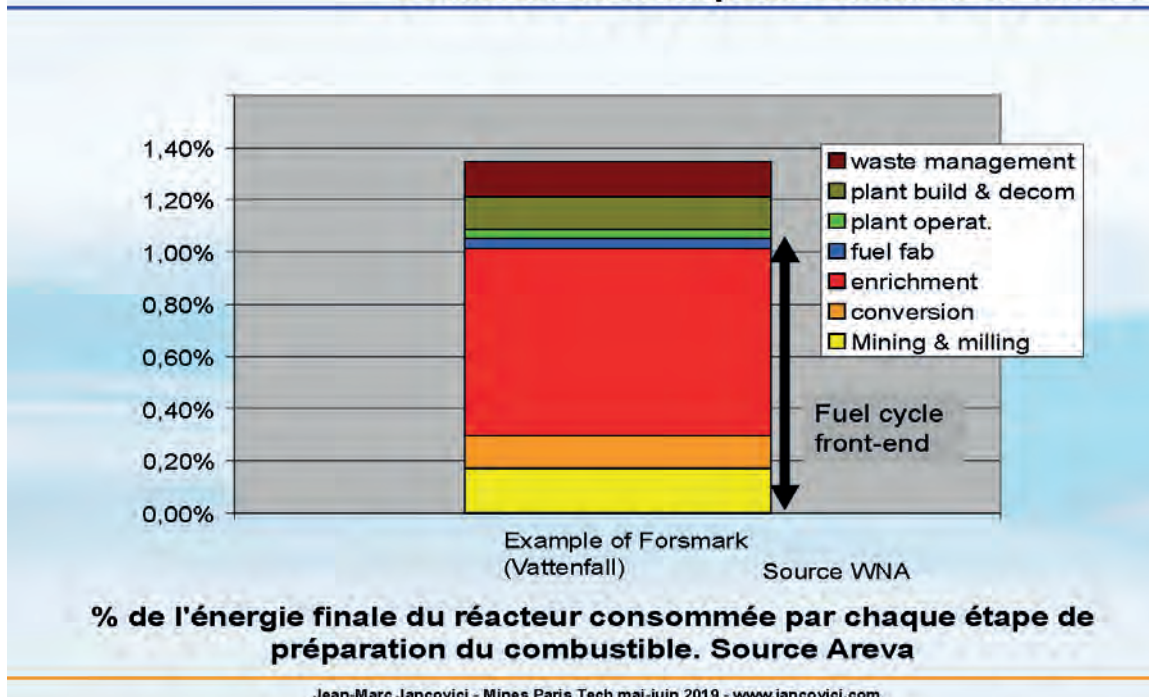
Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids



- Pour 1 megaWatt / h électrique : 1 kg de minerai nécessaire, dans lequel se trouve quelques grammes d'uranium
- A partir de 10 kg de minerais, environ 18 g d'uranium (gU). La concentration du minerai est en ordre de grandeur pour 1000, de l'ordre du kilo par tonne, faible concentration donc. A titre de comparaison : l'or a une concentration encore moindre, environ 10 grammes de minerai par tonne.
- Fabrication de l'uranium enrichi / 7 : 2,4 g d'uranium

La caractéristique par excellence du nucléaire : la manipulation de toutes petites quantités de matière pour produire de grandes quantités d'électricité.

Combien de kWh pour combien de kWh ?



Rendement énergétique ?

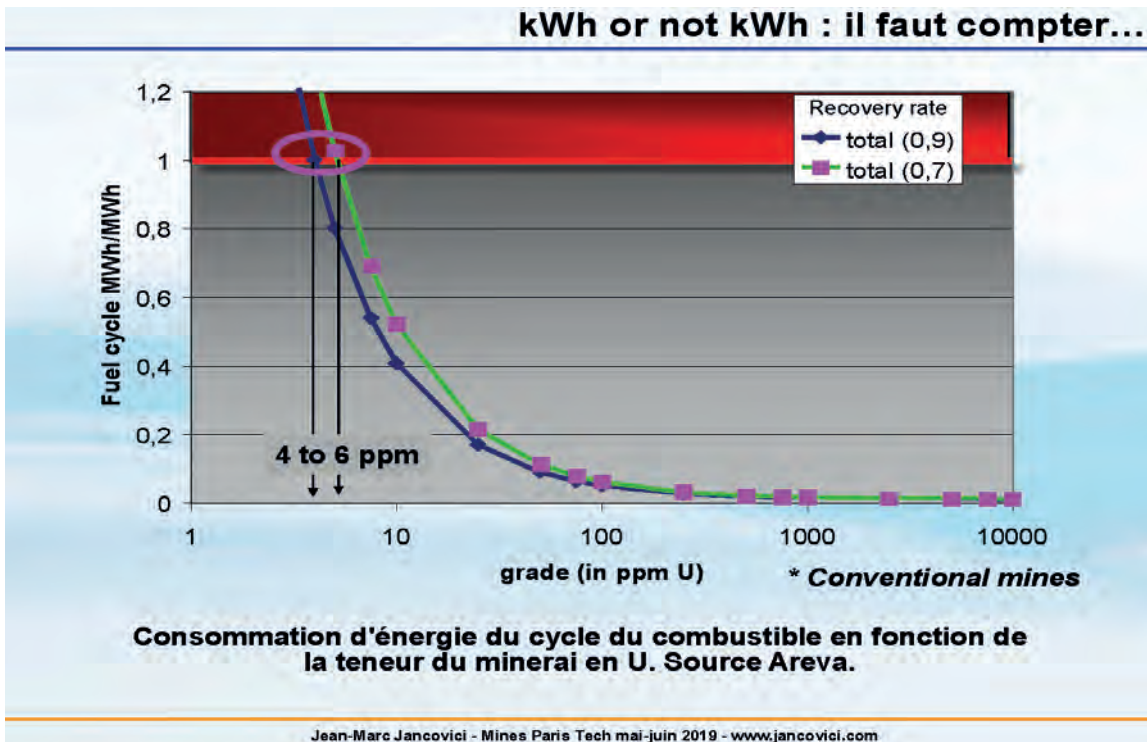
Comme pour le pétrole, où une partie de l'énergie extraite sert à pomper le pétrole, le raffiner et le transporter, pour l'uranium une partie de l'énergie fournie est nécessaire pour faire fonctionner la chaîne de production :

- du diesel dans les engins de mines
- de l'électricité dans l'usine d'enrichissement

- de l'énergie pour la gestion des déchets
- ...

Pour la production nucléaire, une petite partie est utilisée pour la filière : entre 1 à 2 %

Dit autrement la fraction qui est utilisée dans l'ensemble du cycle pour permettre à l'énergie nucléaire d'être produite équivaut à 1 à 2% de l'énergie produite.



Rentabilité extrêmement dépendante de la teneur en uranium du minerai.

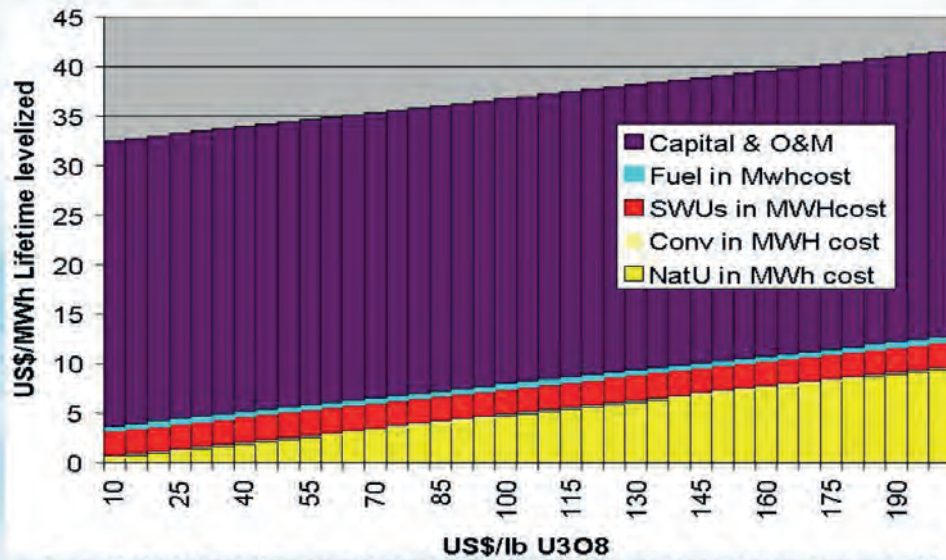
Un minerai pauvre oblige à charrier énormément de terre et à filtrer beaucoup de matière. Avec un minerai 100 fois plus pauvre, la production nucléaire n'est plus rentable.

Puisque les quantités de "combustible" sont très faibles pour produire de grandes quantités d'électricité, le nucléaire est une industrie à coût fixe. L'essentiel du coût de la production d'électricité nucléaire se situe

- dans la construction de la centrale
- et dans la construction des infrastructures amont / aval qui permettent à la filière de fonctionner

Les coûts variables, et notamment le coût des combustibles, représentent des coûts extrêmement faibles dans la chaîne. Dit autrement, une fois que la centrale est construite, qu'elle fonctionne ou qu'elle ne fonctionne pas, cela ne change pas le prix. C'est le point commun, du point de vue de la structure de coût, avec la chaîne éolienne ou solaire. Coûts de maintenance faibles, l'essentiel du coût se situe dans la mise en place du dispositif initial.

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



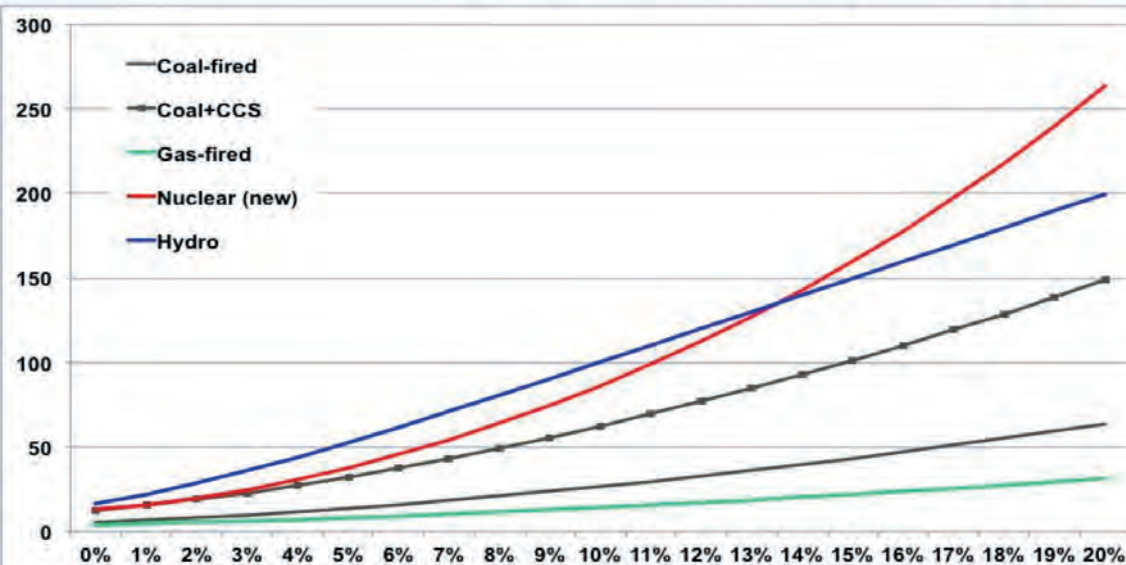
Sensibilité du kWh nucléaire au prix de l'Uranium (\$ par livre de U₃O₈)
Source AREVA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dans un dispositif où l'intégralité de l'investissement précède l'exploitation, les clients et les recettes, le coût du megaWatt / heure dépend de 2 facteurs centraux :

- le coût de construction de la centrale
- mais aussi le coût de l'argent, c'est-à-dire le taux d'intérêt à régler à l'actionnaire / au banquier au titre de l'argent avancé pour construire la centrale.

Bien plus important : le cout de l'argent



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

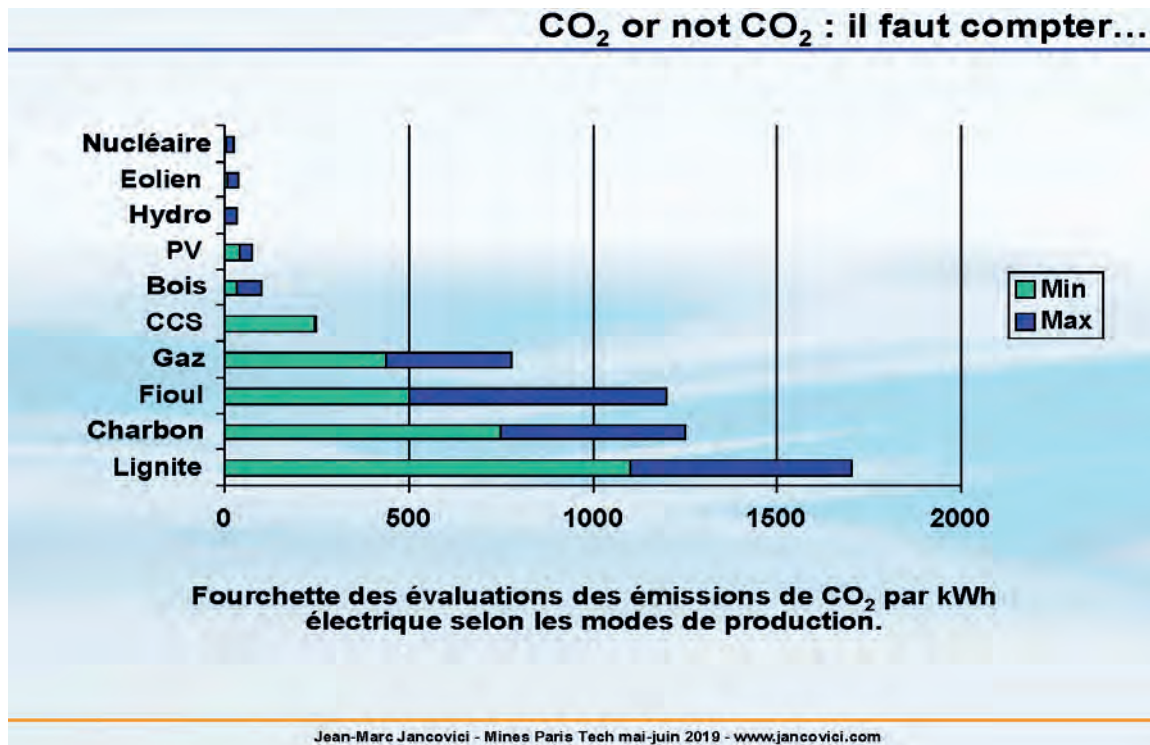
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Un très grand écart de prix de l'électricité nucléaire peut être observé en fonction de ce que demandent les actionnaires et les banquiers en taux d'intérêts sur l'argent avancé. Exemple : 10% demandé pour la construction d'Hinkley Point. Impossible dans ces conditions de passer sous les 100 € par mGh alors que sans taux d'intérêt le coût aurait été de 20 € par mGh.

Le nucléaire pas fait pour le privé.

Chapitre 34 - Les contreparties du nucléaire

Le nucléaire est un manière d'obtenir de grandes quantités d'énergie avec très peu de matière et sans combustion. Cet avantage a ses contreparties.



La production d'énergie nucléaire ne nécessite pas de combustion, pas d'oxydation de la source de carbone, par conséquent les émissions de CO₂ par kWh sont faibles. Si on analyse le cycle, le CO₂ est tout de même présent :

- engins de mines au diesel (1 t à extraire pour obtenir 10kg)
- enrichissement
- transport du combustible
- construction de la centrale (cimenteries / aciéries)
- déplacements des salariés
- traitement des déchets
- démantèlement (faible émission CO₂, pas plus qu'un complexe industriel ... comme pour le coût, qui représente 10 à 15% du prix de construction)

Reste bien plus faible que les modes concurrents de production d'électricité.

... 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 au gaz au charbon ou au fuel	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

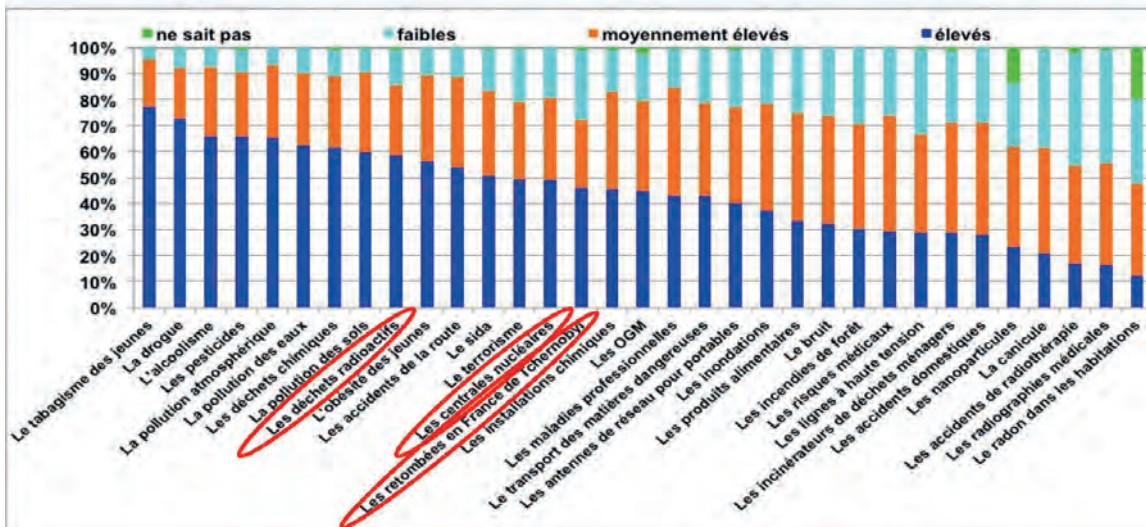
- La formulation de cet item a changé en 2014 : l'Ademe a ajouté « au gaz, au charbon ou au fuel », ce qui a provoqué une augmentation artificielle de cet item

Baromètre Ademe / CSA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité

L'avis qu'on en a



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Risques perçus et risques réels sont décorrélés (en France) : peur du nucléaire.

Enquêtes de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) analyse régulièrement cette perception du risque nucléaire dans des sondages.

La dangerosité des déchets radioactifs perçue comme un des risques les plus élevés : avant l'obésité par exemple.

Ce que disent les chiffres

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

- Tabagie ≈ 70.000 morts par an
- Drogue ≈ 1.000 morts par an (y compris accidents de la route)
- Alcoolisme ≈ 30.000 morts par an
- Pollution atmosphérique ≈ 10.000 morts par an
- Les déchets nucléaires : 0 mort par an**
- Obésité ≈ 50.000 morts par an
- Accidents de la route ≈ 3.000 morts par an
- SIDA ≈ 300 morts par an
- Terrorisme ≈ 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 ≈ 500 morts par an
- Accidents domestiques ≈ 10.000 morts par an
- Le radon ≈ 2.000 morts par an

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dangerosité réelle :

- tabagisme 70 000 morts / an
- alcoolisme 30 000 morts / an
- obésité 50 000 morts / an
- accidents domestiques 20 000 / an (2 à 3 000 pour les escaliers)
- pollution atmosphérique 10 000 morts / ans
- accidents de la route 3 000 morts / an (jusqu'à 20 000 dans les années 70)

Pas de mort dans le secteur nucléaire en France. Pas même dans le cœur des centrales où l'exposition des salariés est surveillée / plafonnée (exposition maximale 9 fois moindre que les astronautes)

La hiérarchie des risques perçus n'est pas du tout conforme aux données d'observation.

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 ?

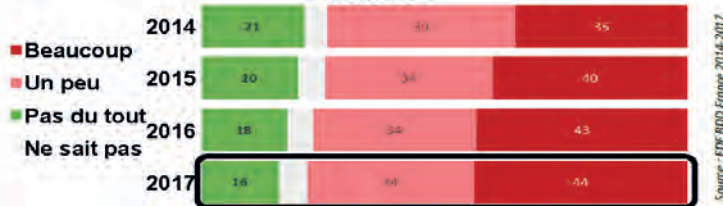


Figure 12: distribution des réponses selon l'année d'interrogation
Lecture : en 2017, 44% des personnes de 18 ans ou plus vivant en France estiment que les centrales nucléaires contribuent beaucoup à l'effet de serre.



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.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre asymétrie relative à la perception que les Français ont du risque nucléaire. Contribution du nucléaire dans les émissions de GES.

Ce que dit la physique : casser un noyau de métal en 2 n'est pas oxyder un atome de carbone, donc absolument aucune émission de GES.

Explication :

- renvoie à l'image d'Epinal de la Centrale nucléaire et de son panache de fumée. De la vapeur d'eau, totalement insignifiant pour le climat d'une planète à 2/3 recouverte d'océans, comme toutes les émissions de vapeur d'eau émises par l'homme (à une exception près : le gigantesque barrage d'Assouan)
- fait écho aux débats récurrents sur la nécessité de fermer les centrales et à la lutte contre les GES (association d'idée fausse)

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 »

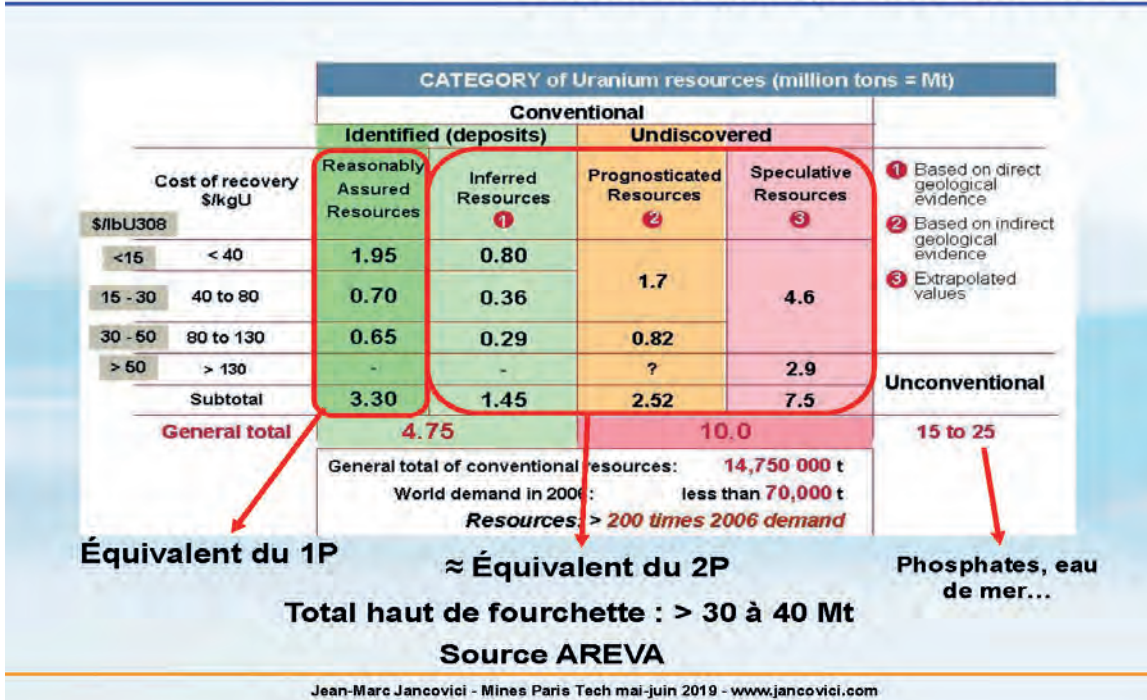
Pas assez d'uranium...

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Débats récurrents mélangeant vrais et faux problèmes. Les contreparties du nucléaire :

- déchets
- accidents
- maladies
- coût
- opacité
- raréfaction de l'uranium

On joue au petit jeu des réserves ?



La raréfaction de l'uranium

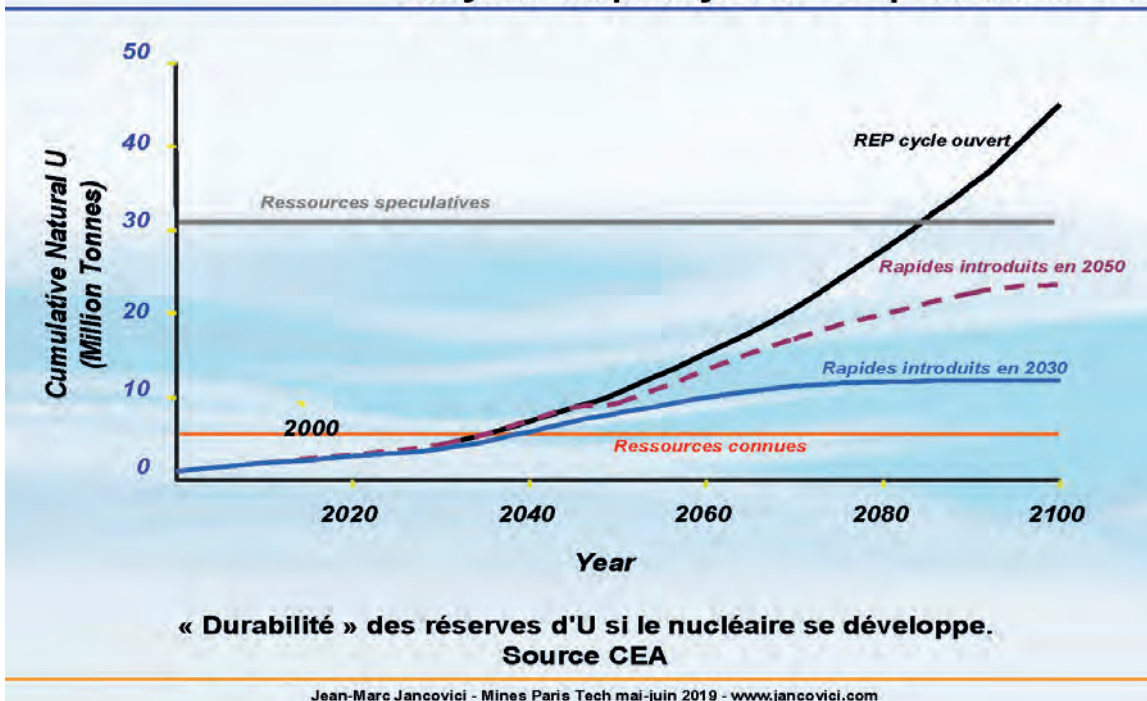
Comme pour tout métal, la quantité qui reste disponible dépend de la quantité d'énergie / de ressources économiques que l'on est prêt à consacrer à son extraction.

Les moyens déployés sont fonction du prix payé (comme pour le pétrole, 1 à 3P).

- Plusieurs dizaines de millions de tonnes d'uranium enfoui sous terre. Suppose d'exploiter l'uranium "non conventionnel" présent dans les phosphates ou dans l'eau de mer, sources non exploitées aujourd'hui.
- Aujourd'hui pour l'uranium conventionnel, 4,75 millions de tonnes assurées et 10 millions de tonnes supplémentaires estimées

La consommation annuelle (2006) est de 70 000 tonnes / an.

On joue au petit jeu des exponentielles ?



Est-ce que les stocks disponibles d'uranium sont suffisants pour se débarrasser du charbon et du gaz ?

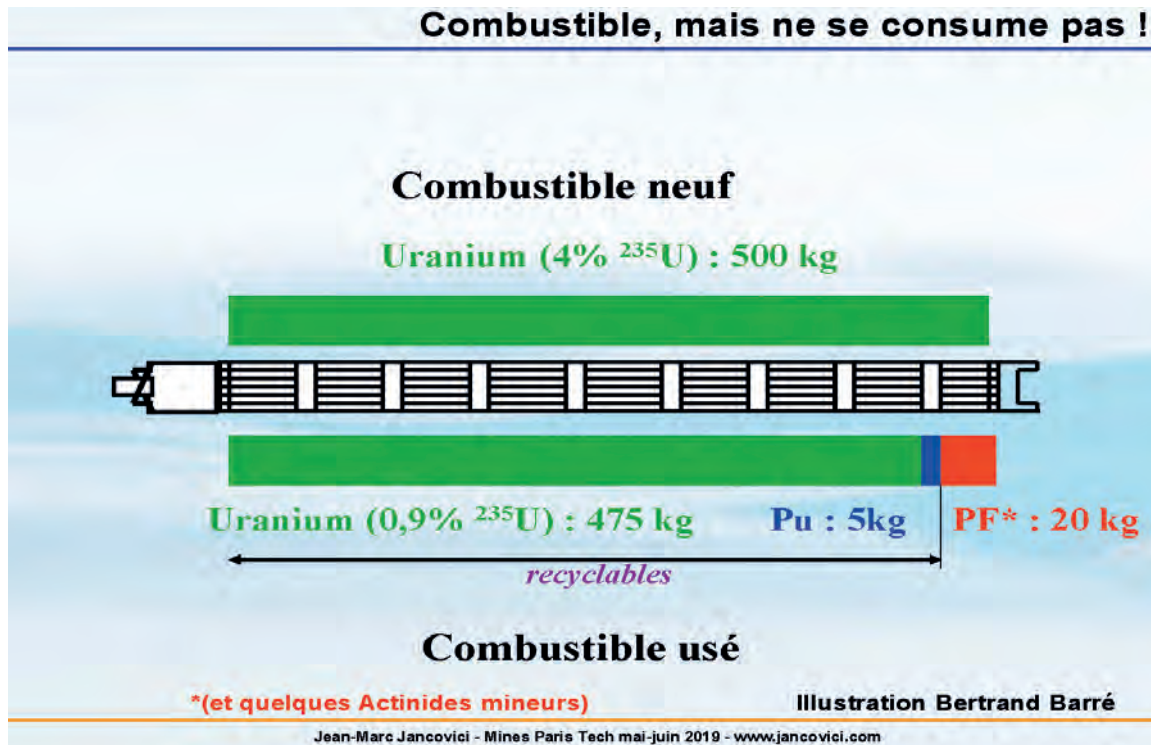
- non, en cycle ouvert : si on conserve la technologie des réacteurs à uranium 235 et que l'on augmente le parc de 5 à 10% par

an (rythme nécessaire pour limiter les GES selon les engagements pris), un problème de ressource survient avant la fin du XXI^e siècle.

- oui, en introduisant rapidement une nouvelle génération de réacteurs : en partant du parc actuel pour démarrer les réacteurs de la génération IV (passage en cycle fermé), la disponibilité de l'uranium n'est plus un problème majeur

Dit autrement, pour un nucléaire "durable" (= qui contribue significativement à la baisse des GES en remplaçant les combustibles fossiles et qui ne pose plus aucun problème de disponibilité de la ressource) il est impératif de passer à la génération suivante de réacteurs

- qui exploitent l'essentiel de l'uranium
- voire qui exploitent le thorium (4 fois plus abondant que l'uranium)



Traitement des déchets.

Pas d'usages possibles (hormis pour l'anecdote des flèches antichar et des quilles de bateau en uranium appauvri).

A l'entrée dans la centrale : Uranium 235 à 3,5% A la sortie au bout de quelques années :

- Uranium 235 à 0,9% (sur 500 kg initiaux, restent 475 kg)
- création de 5 kg Plutonium, dont 1 partie fissile (Pu 239 & Pu241) et 1 partie non fissile (Pu240, voire 242). Note : le Plutonium 239 est celui qui sert à fabriquer les bombes atomiques, toutefois en sortie de centrale au bout de quelques années il est totalement impropre pour cet usage militaire. Il faudrait qu'il soit utilisé seulement quelques mois : cela explique que les centrales "plutonigènes", conçues pour fabriquer des bombes atomiques, sont des centrales dites à "déchargement en continu" dans lesquelles, en cours de fonctionnement, il est possible de charger et de décharger du combustible. Exemple : Tchernobyl, dangerosité accrue par rapport aux centrales purement civiles installées en France.
- création de 20 kg de produits de fission : éléments centrés autour de numéros atomiques 30 et 60 qui n'ont pas déjà disparu dans le cœur du réacteur

Les déchets, quelques ordres de grandeur

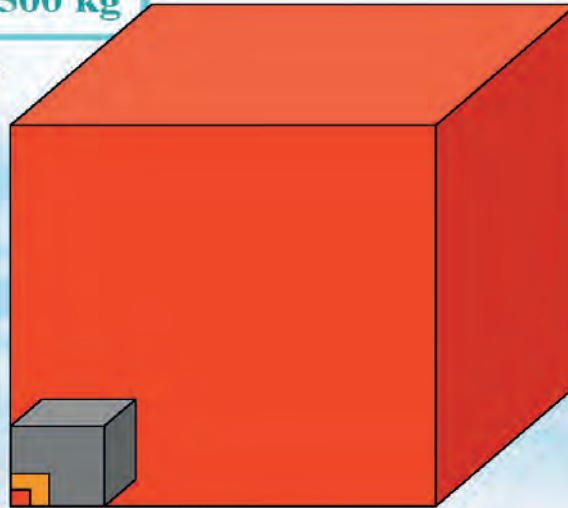
Déchets industriels : 2 500 kg

**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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Ordre de grandeur des déchets nucléaires :

- par personne, 2,5 tonnes de déchets industriels par an (principalement à l'étranger, en Chine), dont 100 kg de déchets toxiques (filière spéciale de retraitement requis)
- par personne, 1 kg de déchets nucléaires par an, dont 100 gr ont une vie longue et 10 gr de déchets à Haute Activité et à longue durée de vie nécessitant un stockage particulier (enfouissement)

Dit autrement, les déchets nucléaires à enfouir (= déchets à haute activité et à longue durée de vie) :

- pour 40 ans d'activité du parc nucléaire pour la population française, 5000 m³
- par an, l'équivalent du volume d'un appartement 3 pièces ou un amphi de fac, 200 m³

Les déchets, quelques ordres de grandeur

Catégorie de déchets	Production totale (part française)
TFA (hors résidus miniers)	1 à 2 000 000 m ³
FMA – vie courte	1 300 000 m ³ (stockés)
FMA – vie courte - Déchets tritiés	3 500 m ³
FA – vie longue - Graphites	14 000 m ³
FA – vie longue - Radifères	> 100 000 m ³
MA – 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**

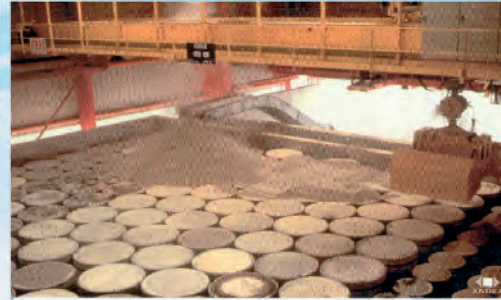
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le mode de stockage des déchets nucléaires diffère selon leur radio toxicité.

Un exemple de poubelle



Stockage faible activité à Soulaines



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les déchets “peu radioactifs” (dits de faible activité) sont empilés dans des fûts puis recouverts de terre. Il s’agit par exemple

- des combinaisons que portent les opérateurs de La Hague
- de résidus de traitement

Et une poubelle naturelle !



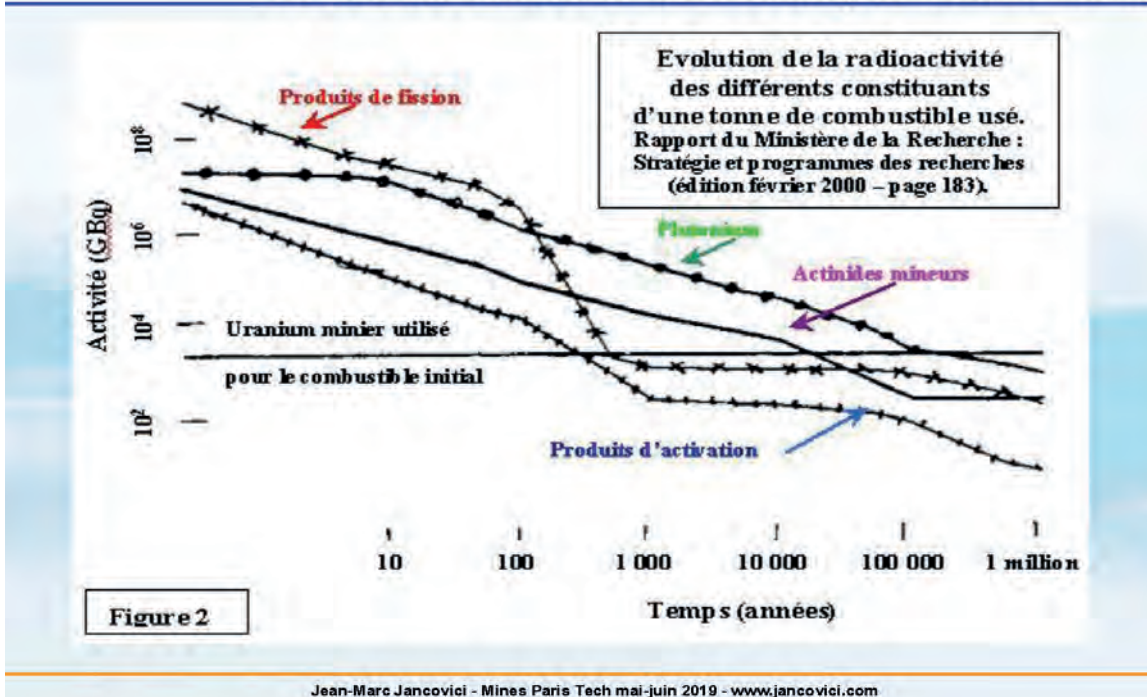
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le gisement d’Oklo au Gabon peut être considéré comme le plus vieux site de stockage au monde : 2 milliards d’années. Présence de manière naturelle de tous les éléments d’une centrale : Uranium enrichi (U235

à 3,5%) et le modérateur (eau par-dessus). La réaction de fission se met en route : alternance de création de vapeur d’eau / disparition de l’eau et retour de l’eau / fission.

Ce réacteur pulsé qui a fonctionné pendant des centaines de milliers d’années a produit des déchets / des produits de fission. Restés sur place.

Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment



Décroissance radioactives des différents types de produits obtenus en sortie de réacteur.

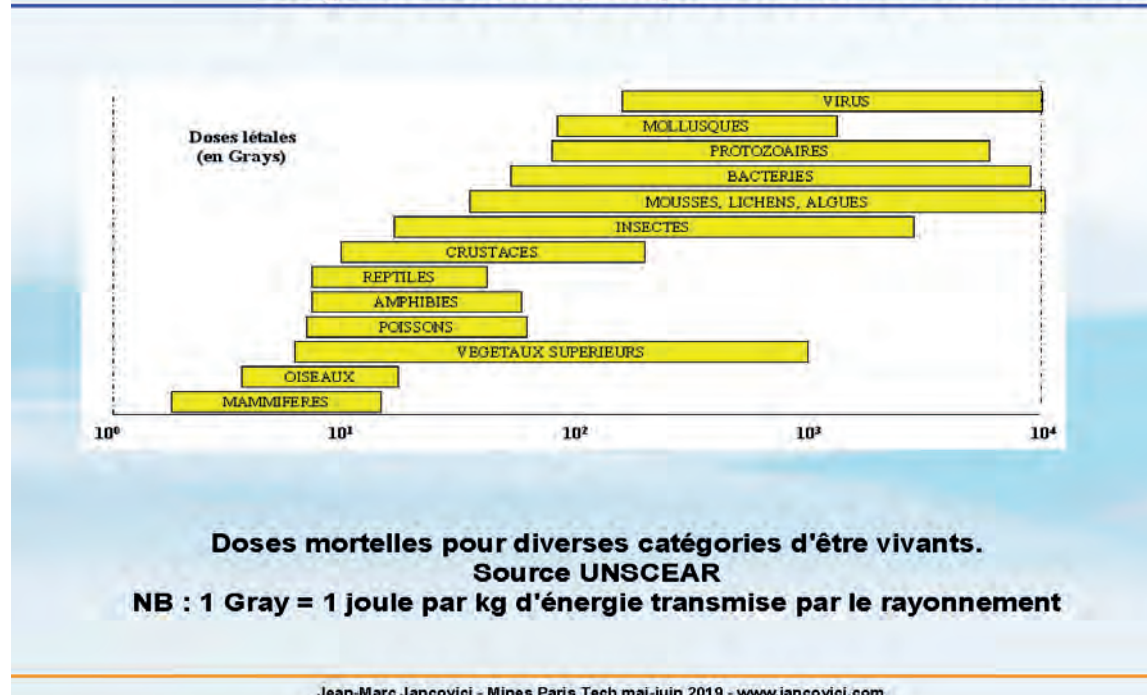
Les déchets de fission constituent les principaux déchets. Ils "crachent" énormément de radioactivité, par conséquent leur demi-vie n'est pas extrêmement élevée : les produits de fission perdent leur radioactivité (= retrouvent la radioactivité de l'uranium minier, qui se manipule à main nue) au bout de quelques siècles.

Les substances qui conservent une radioactivité très longue

- le plutonium (plus de 100 000 ans)
- les actinides mineurs (plus de 10 000 ans)

... l'enjeu serait de les consommer dans les réacteurs de génération IV

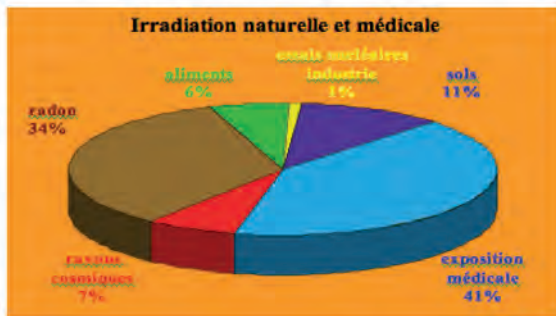
L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



Maladies / exposition aux radiations

Tous les êtres vivants sont exposés à la radioactivité depuis qu'il y a de la vie sur terre. L'ADN sait se défendre jusqu'à un certain stade contre les rayonnements ionisants. Les mammifères les plus sensibles.

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les hommes exposés à la radioactivité :

- bombardement naturel du rayonnement cosmique (explique que l'altitude fasse varier l'exposition, et qu'on soit plus irradié à La Paz qu'au niveau de la mer)
- radioactivité naturelle des roches (radon)
- la première source pour les population des pays riches, les expositions médicales (scanners, radio des poumons, ...)

Note : sous les 200 mSv par an, pas d'effet documenté sur la santé.

Est-ce Tchernobyl ?



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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Retombées de Tchernobyl

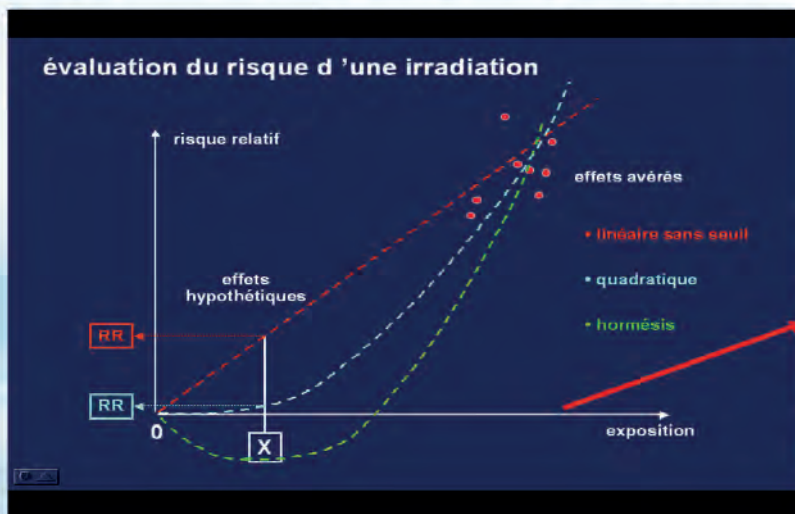
Pour connaître l'effet des retombées radioactives de Tchernobyl, il faut étudier de 2 cohortes : population exposée et population non exposée, en prenant soin d'avoir des populations identiques (âges, modes de vie, sexe, ...)

Difficulté avec les comparaisons de cohortes de populations exposées aux radiations, c'est qu'il n'est pas possible de mesurer avec précision le taux / la durée d'exposition. Il faut reconstituer / calculer cette exposition. C'est plus facile pour analyser les

effets du tabagisme : il suffit de demander aux fumeurs combien de cigarettes / jour.

Pour mesurer l'impact des effets ionisants, on utilise l'unité de dose reçue le sievert / le milli sievert.

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



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

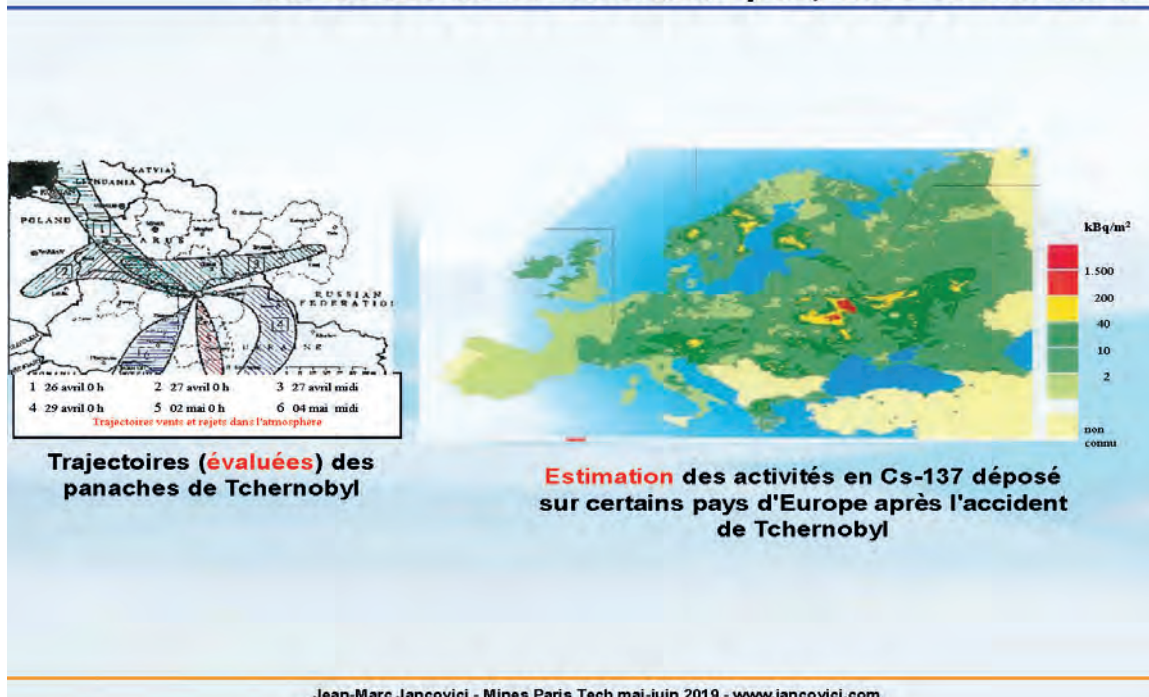
Décomposition du rayonnement reçu par Français et par an en mSv Source André Aurengo, 2003

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Etudes épidémiologiques nous apprennent :

- sous 100 mSv par an, strictement aucun effet constaté. 10 (personnel navigant des compagnies aériennes) ou 80 mSv, aucune différence
- au-dessus de 200 mSv, on observe des effets qui sont proportionnels à la dose reçue

Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent

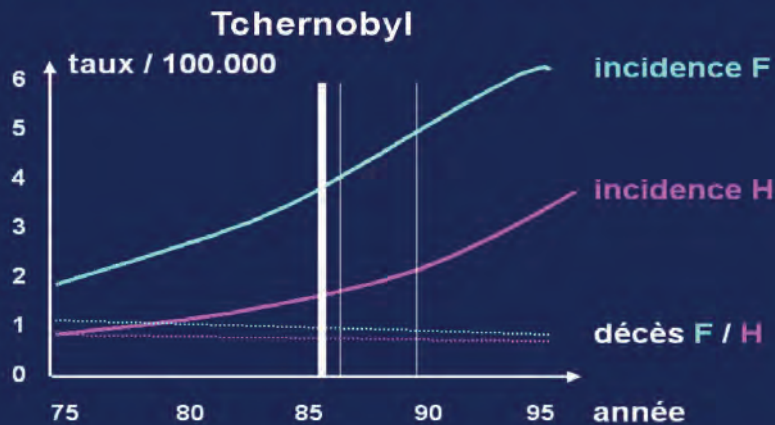


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Nécessité de reconstituer l'exposition des populations aux rayonnements reçus. Pour cela, les épidémiologistes doivent disposer d'un modèle capable de reconstituer la circulation atmosphérique qui fait suite à l'accident de Tchernobyl, en prenant en compte la demi-vie des isotopes, etc... Modélisation permet de savoir qui a été exposé à quoi, sachant qu'il demeure nécessairement des approximations sur l'évaluation des trajectoires des panaches de Tchernobyl et que les activités en Cs-137 déposés sur le continent européen sont des estimations.

Quand les études épidémiologiques existent, quid ?

cancers thyroïdiens en France 1975 - 1995



Source André Aurengo

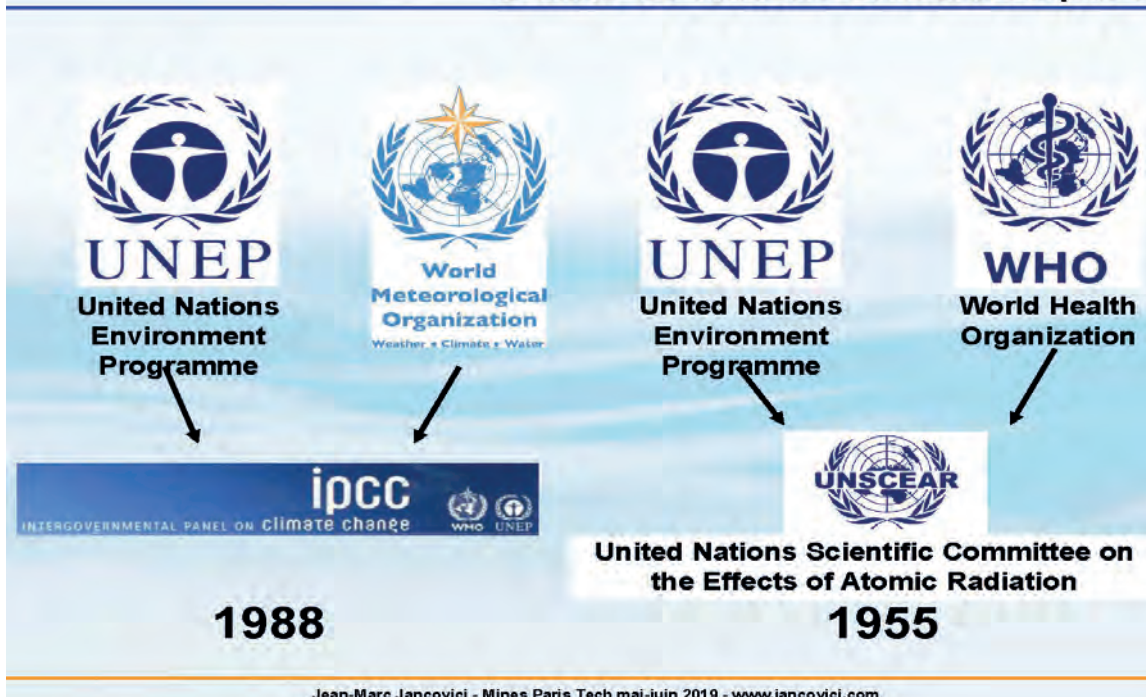
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Etude épidémiologique des cancers de la thyroïde dans la population française 10 ans avant et 10 ans après. Effet discernable ?
Non :

- augmentation constante parce qu'on détecte de mieux en mieux cette pathologie (pathologie mieux connue, plus souvent recherchée et plus facilement détectable grâce aux progrès de l'imagerie)

Augmentation du taux de cancer de la thyroïde à Tchernobyl : chez les enfants (dont la thyroïde se forme, absorbe de l'iode en plus grande quantité) mais pas chez les adultes. Remarque : les pastilles d'iode servent surtout aux enfants, pas aux adultes.

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



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

GIEC / IPCC : une instance onusienne créée en 1988 sous la double tutelle du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et de l'organisation météorologique mondiale. Son mandat est de faire une compilation de la littérature scientifique disponible sur l'impact de l'homme sur le climat.

UNSCEAR : instance onusienne créée en 1955 sous la double tutelle du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et

de l'OMS. Même mandat consistant à compiler la littérature disponible mais appliqué aux impacts des rayonnements ionisants sur les êtres humains.

Les antinucléaires, en phase avec les Nations Unies ?

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

321 pages (personne ne les lit)

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

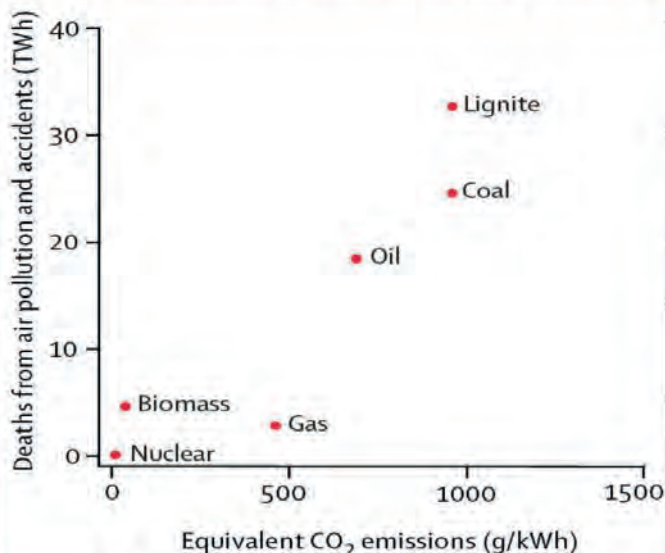
Page 10 : The doses to the general public, both those incurred during the first year and estimated for their lifetimes, are generally low or very low. **No discernible increased incidence of radiation-related health effects are expected among exposed members of the public or their descendants.**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Rapport 2013 de l'UNSCEAR à propos de Fukushima : pas de conséquences radiologiques de l'accident de Fukushima sur les hommes. Les conséquences existent mais liées aux évacuations de populations, pas aux retombées.

Tchernobyl selon l'OMS : quelques milliers de décès prématurés en 40 ans. Tabac + alcool + route + mal- bouffe : 1 million.

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

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Morts par tWh selon les différentes sources de production électrique : le nucléaire est, médicalement, le moins mortel des modes de production d'électricité, accidents compris.

Environ 30 morts par tWh pour le charbon (maladies pulmonaires des mineurs, morts dans les mines, pollutions urbaines, ...)

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)

Lorsque le nucléaire civil est en place, le nucléaire militaire est plus facilement accessible :

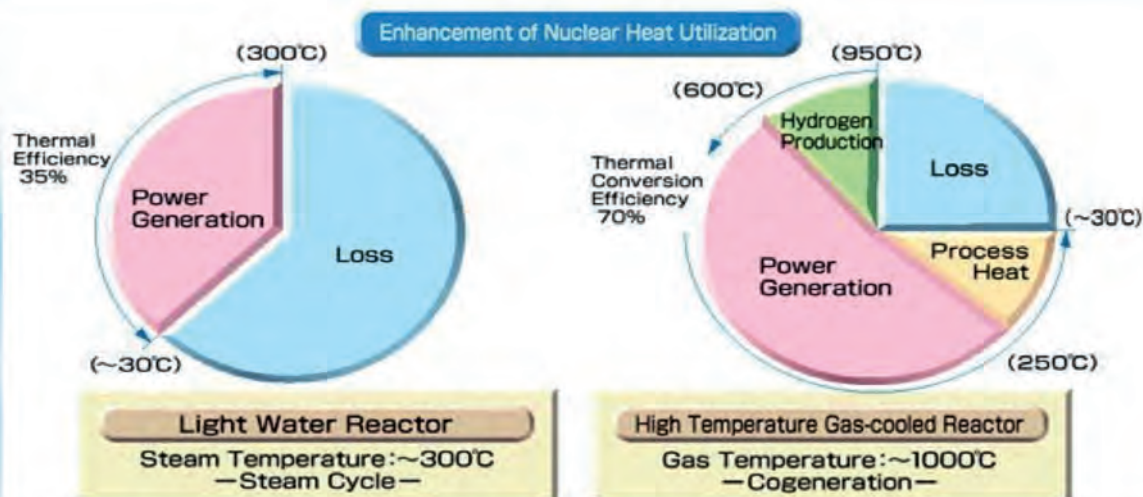
- 1 corpus commun de compétences (même si les technologies diffèrent)
- la filière d'enrichissement du combustible est potentiellement profilérante puisque la procédure est la même pour alimenter les centrales et fabriquer des bombes

Certains pays ont eu la bombe sans avoir de nucléaire civil : USA, URSS, Israël par exemple.

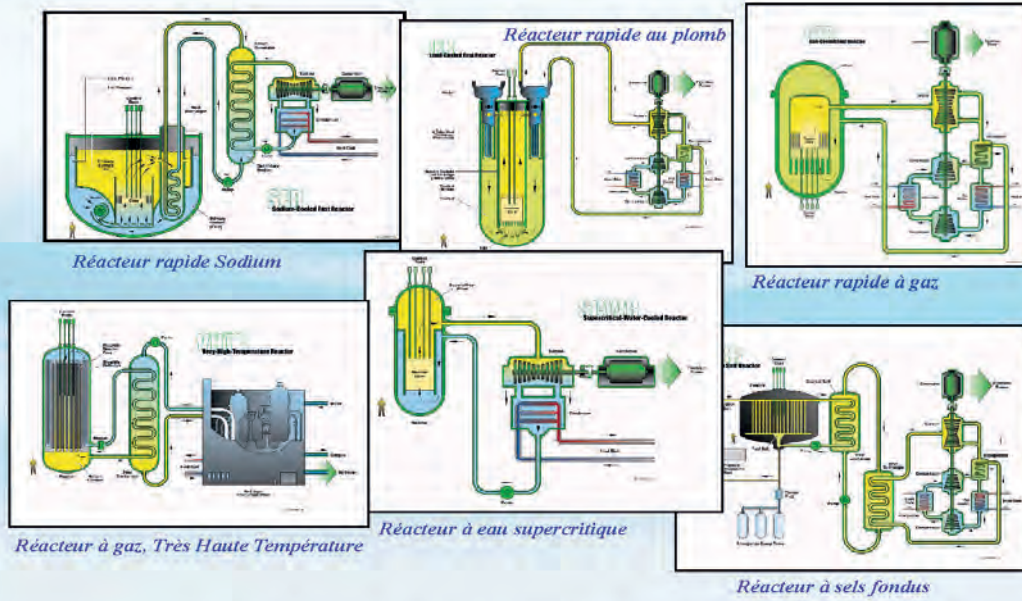
Démanteler son stock de bombe peut passer par le développement du nucléaire civil : cela permet de se débarrasser de son uranium enrichi et du plutonium.

Chapitre 35 - Avenir du nucléaire

Peut mieux faire !



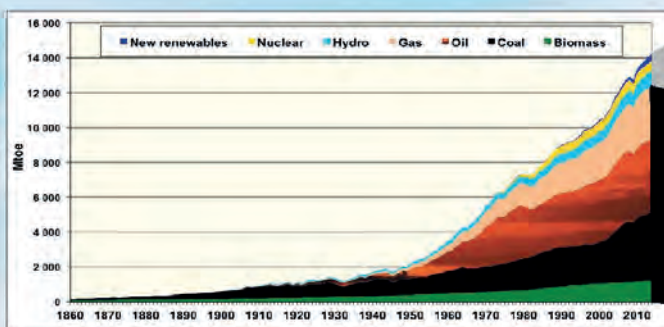
Les projets dans les cartons



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité. Génération IV

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



**+7% par an
(incl. nucléaire)**

-3,1% par an

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Si on souhaite que le nucléaire soit

- un contributeur très significatif à la décarbonation de la production d'énergie
 - pour une civilisation qui ne renonce pas à son confort
- ... il faudrait que le secteur nucléaire augmente sa production de +5 à +10% par an

Le nucléaire peut-il faire +5% 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 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... 7% de croissance sur 35 ans, c'est ≈ 3000 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 ≈ 20.000 G\$, ≈ 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 !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Réaliste de prévoir une augmentation de la production d'électricité nucléaire ?

Fort potentiel du nucléaire plaide pour son développement :

- pas d'émission de GES
- peu létal
- quantité de déchets moindre
- réserves à disposition (et illimitées si capacité à exploiter l'Uranium 238)

Mais :

- capacité en quelques décennies à augmenter le parc nucléaire de 7% par an, à passer des 300 GW actuels à 3000 GW en 2050 ? Voir passer à 6000 GW si la production électrique connaît de nouveaux usages (production d'hydrogène, stockage, ...). Passer des 450 réacteurs actuels à quelques milliers ?
- est-on en mesure d'investir le capital nécessaire ?
- a-t-on les compétences ?
- capacité à planifier ?
- décision des emplacements ? A l'emplacement des centrales à charbon ?

Tous les scénarios d'émission du GIEC qui permettent de rester sous la barre de 1,5° sont des scénarios qui voient

- le développement des énergies renouvelables
- les économies d'énergie
- et la production de l'électricité nucléaire multipliée entre 2 et 6 d'ici 2100.

Un monde qui renonce au nucléaire est paradoxalement un monde qui accepte de courir plus de risques qu'un monde qui souhaite davantage recourir à cette source d'énergie. Faire moins d'énergie nucléaire c'est s'exposer à 3 risques :

- augmenter le recours aux modes fossiles qui aggraveront la situation / le dérèglement climatique
- parier sur les nouvelles énergies renouvelables, mais d'avance on sait qu'elles ne suffiront pas
- miser sur la capacité de la société à s'adapter à une contraction rapide de son approvisionnement énergétique

Paradoxe de la baisse de charge du parc nucléaire :

- la fermeture de centrales nucléaires en France régulièrement évoquées mais ne se fera pas rapidement
- le plus probable c'est la baisse de charge (comme en Allemagne) du parc actuel, compensé par les ENR
- avec le risque de le rendre moins rentable et donc moins fiable

Les autorités françaises sont très contradictoires concernant le nucléaire. Contrairement aux gouvernements britannique, russe (30 réacteurs en construction) et chinois (une vingtaine de réacteurs en construction).

Perception du nucléaire en France est assez particulière.

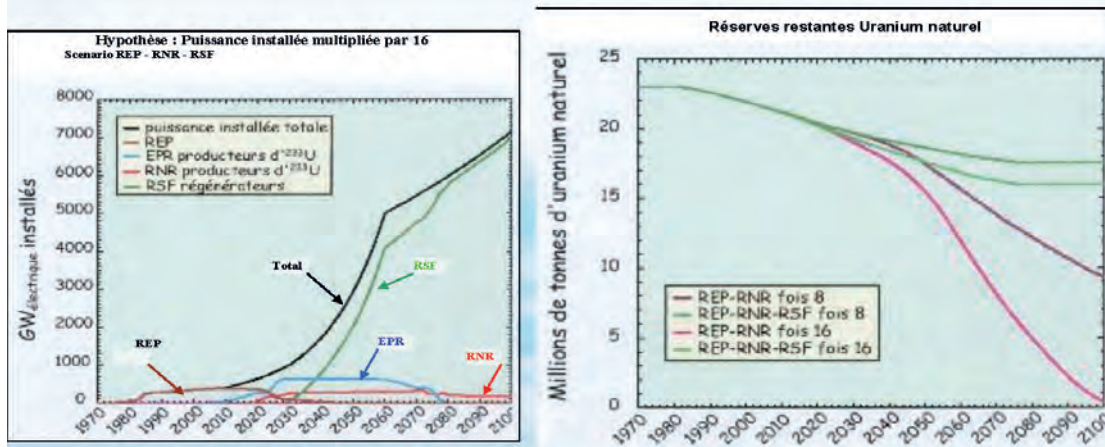
Hypothèse média :

- rôle de la presse qui diffuse un message anxiogène
- et parti anti-étatique (pour les médias du Service public qui entendraient ainsi montrer leur in- dépendance)

Hypothèse relations internationales :

- couple franco-allemand
- suivisme français

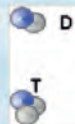
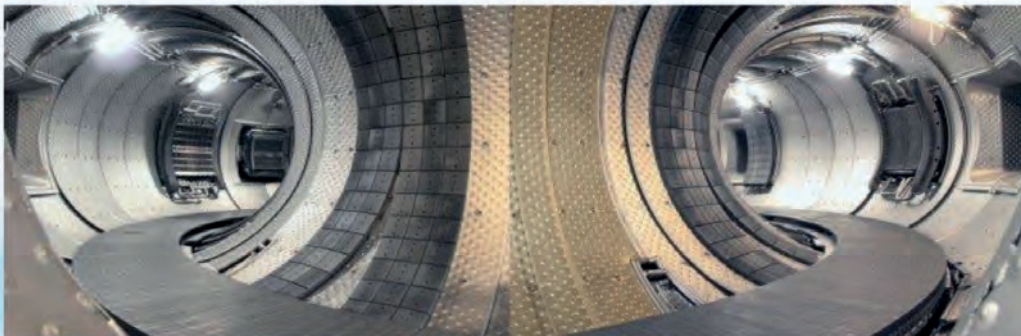
Et quid de l'uranium ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité

Et la fusion ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Fusion nucléaire :

- matière mise sous forme de plasma (quelques millions de degrés)
- la matière ainsi mise en fusion est confinée dans un champ magnétique (seul moyen pour canaliser le plasma) sous forme de

Tor

- une réaction de fusion est alors déclenchée dans le plasma

Actuellement EDF construit ITER, un gros tokamak / un engin destiné à vérifier expérimentalement la possibilité de retirer un peu plus d'énergie de fusion que l'énergie utilisée pour mettre le plasma en chauffe. Destiné à produire de la fusion pendant quelques minutes.

Planning

- Le premier plasma est prévu en 2025, le temps d'achever la construction d'ITER.
- Les tests auront lieu pendant 10 ans : 2035 résultats définitifs.
- plans pour construire un prototype capable de fonctionner pendant 5000 heures sans s'arrêter (jusqu'à 24000 heures pour les réacteurs nucléaires Génération III), 2040 début de la construction
- 2060, le prototype démarre
- 2070, fonctionnement concluant
- 2075, construction de la première tête de série dont l'achèvement sera en 2090 / 2100

Technique fonctionnelle mais pas à l'échelle industrielle avant la fin du XXIe siècle.

La fusion n'est pas, dans le cadre contraint du dérèglement climatique, une solution pour remplacer la technologie de fission. Les échéances sont trop courtes.

ITER : un gaspillage de 30 milliards d'euros (voire deux fois plus aujourd'hui), l'argent aurait été mieux employé à accélérer le développement du programme des réacteurs de Génération IV

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 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 ?

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Durée de vie d'une centrale nucléaire

Une centrale n'est pas un bloc unique, notion de durée de vie assez relative pour une centrale. Tous les éléments peuvent être remplacés une fois usés, sauf la cuve du réacteur. C'est la cuve du réacteur qui éventuellement a un DLC.

La centrale de Fessenheim était paradoxalement une des plus neuves du parc français : une des plus anciennes constructions mais également une des plus mises à neuf. Tout y a été changé.

Concrètement l'Autorité de Sûreté du Nucléaire passe régulièrement / tous les 10 ans et demande des rénovations / remplacements. Suite à Fukushima, l'ASN a demandé à EDF des normes de sécurité plus élevées : par exemple placer sous le réacteur un radier capable de récupérer le thorium si le cœur fond.

Le grand carénage des centrales consiste pour partie à satisfaire à l'élévation des normes de sûreté de- mandées par l'ASN. Prolongation de 40 à 50 ou 60 ans des centrales existantes.

Aux Etats-Unis, environ 100 réacteurs en fonctionnement

- soumis à d'autres règles de sûreté (le réacteur doit être conforme aux spécifications de départ, pas d'augmentation des normes de sûreté)
- autorisés pour fonctionner pendant 60 ans