

ACCUEIL

Entre fusion et fission, l'énergie nucléaire durable : le chaînon manquant, le réacteur à plasma de fission ?

Fabrice Pélestor
Ingénieur en génie atomique (INSTN Saclay)

avril 2012

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

I) L'énergie durable et l'histoire de l'Homme

L'énergie d'origine nucléaire est utilisée, directement, depuis très peu de temps, particulièrement au regard de l'utilisation de l'énergie chimique.



Danse du feu des indiens Kwakiuti (États Unis)

En effet, selon des recherches effectuées récemment, dans les années 1990, le feu (d'origine chimique) était déjà utilisé par l'Homo Erectus de façon domestique, il y a 500 000 ans.

On constate donc (sur la durée) que, pour l'instant, l'énergie est un des maillons du développement durable tel que mis en avant en 1983 par un rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, commission créée en 1983 par l'O.N.U, et présidée par Mr Gro Harlem Brundtland jusqu'en 1987.

En effet le développement durable a été défini comme « le développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de besoin, et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale imposent sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir ». (Rapport Brundtland, Notre avenir à tous, 1987)

Les déséquilibres de la répartition très inégale de la richesse, que la mondialisation n'a pas résolue, et la dégradation de la biosphère sont à l'origine de cette notion qui se veut une réponse à ces déséquilibres.

D'après cette définition, le développement durable doit donc concilier:

- le social
- l'économie
- l'écologie

De mon point de vue, ce développement doit se faire aussi en remettant l'homme au centre de ces préoccupations. Il ne serait en effet question d'entraîner des souffrances humaines pour résoudre ce problème, sans quoi le but même du développement durable serait nié.

Il me semble aussi probable que la seule dimension matérielle, que ce soit via les richesses ou les organisations des sociétés, évidemment urgentes et importantes, ne suffira pas à apporter une solution. La dimension intellectuelle, peut être même spirituelle, ne doit pas être négligée : le 21ème siècle sera spirituel ou ne sera pas a-t-il été dit !

L'accès à l'énergie illustre parfaitement ces inégalités de répartition de la richesse : 20 % de la population utilise 80 % de l'énergie non renouvelable annuellement consommée.



Photos prises par satellite des lumières dans la nuit de la planète Terre

L'énergie est à l'intersection de deux problématiques : la répartition de la richesse et la dégradation de l'environnement.

La sérénité conférée par tous ces millénaires que nos ancêtres ont réussi à traverser, tant bien que mal, est-elle toujours de mise ou pourrait elle être bousculée ?

II) Accroissement de la consommation énergétique : sérénité ou effroi ?

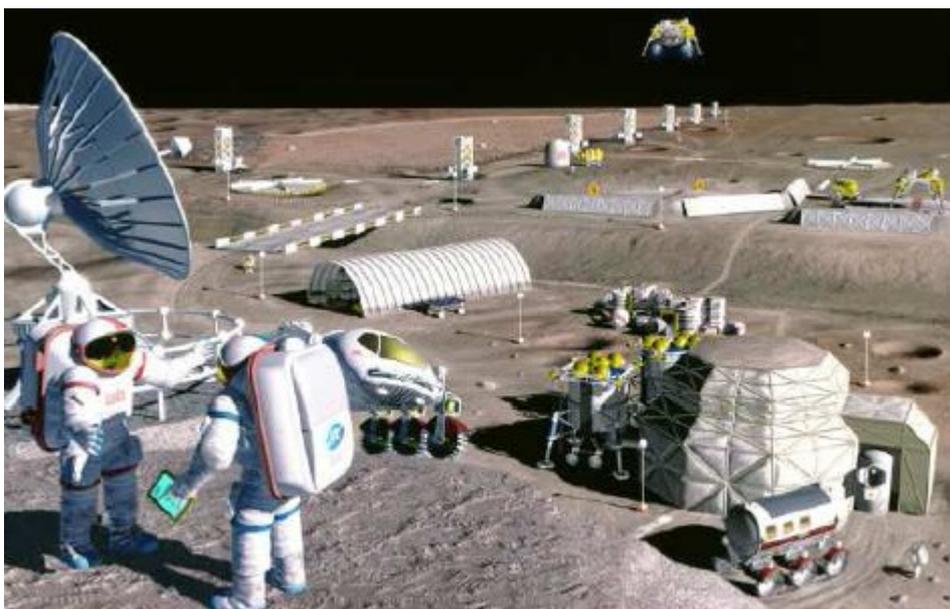
On pourrait penser que l'évolution démographique de l'Europe ne va pas dans le sens d'un accroissement de la consommation énergétique, cependant ce n'est pas le cas : l'augmentation des besoins énergétiques est incontestable :

énergie	1970	1980	1990	1997
charbon (p. 100)	23	16	9	6
pétrole (p. 100)	62	56	42	40
gaz (p. 100)	5	11	12	14
nucléaire (p. 100)	1	7	29	32
hydraulique (p. 100)	8	8	6	6
autres (p. 100)	1	2	2	2
total (en millions de T.E.C.).....	219,4	280,1	307,0	339,1

Consommation énergétique en France (Tonne Équivalent Charbon)

En fait ce sont surtout les pays en voie de développement qui vont demander de plus en plus d'énergie. Sachant que **sans énergie le développement économique paraît impossible**, et que **plus de 2 000 000 000 d'habitants n'ont, actuellement, pas accès aux énergies modernes** (électricité et produits pétroliers), la sérénité est elle toujours de mise : les solutions énergétiques actuelles sont elles en causes, ou y a-t-il d'autres raisons à cet échec ?

Un autre facteur qui ne va pas dans le sens de la sérénité est, hormis l'Europe, l'explosion démographique. D'un point de vue scientifique, une solution pourrait être la conquête spatiale, ce qui éviterait des solutions malthusiennes, qui ne me semblent pas aller forcément dans le sens de la liberté individuelle (politique de l'enfant unique en Chine).



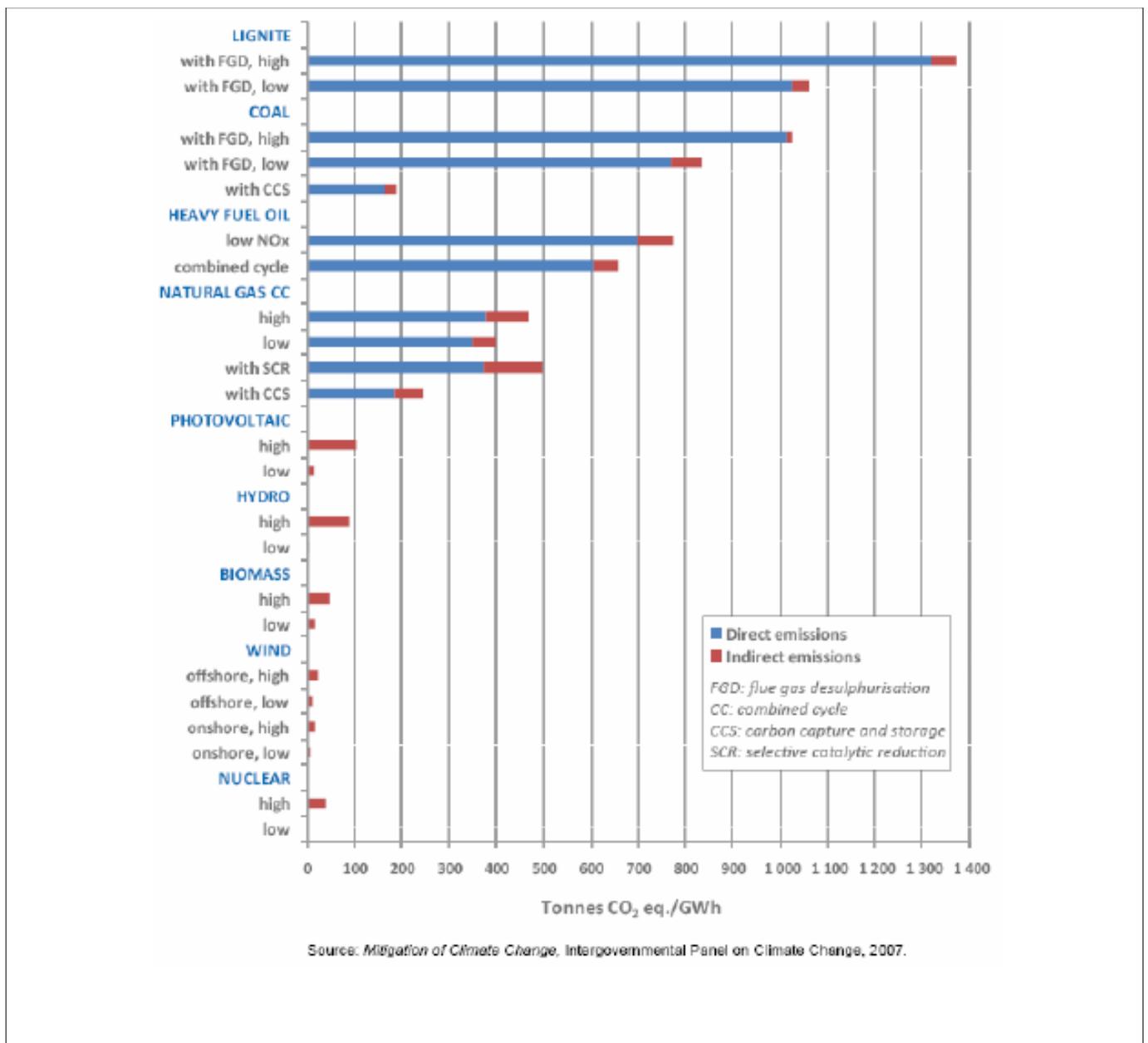
Replacée dans la durée, l'analyse de la situation énergétique pourrait être envisagée du point de vue d'un **certain conformisme**, mais la situation actuelle et prévisible du monde incite à

l'innovation technologique, voir à la *rupture technologique*.

III) L'offre technologique et l'émission de gaz à effet de serre

Il ne serait être question de clamer qu'un concept technologique est meilleur qu'un autre. Bien au contraire chacun a un domaine d'application de prédilection avec des avantages et des inconvénients.

Du point de vue de la production des gaz à effet de serre (CO_2 -0,037%, CH_4 -0,0017%, H_2O -4%, N_2O -0,000032%, CFC, O_3), le document suivant extrait d'une revue de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique) passe en revue les différentes sources d'énergie avec leurs émissions par unité d'énergie électrique produite (Analyse de Cycle de Vie).



On constate que les énergies dites renouvelables, qui ne produisent *pas de gaz à effet de serre en fonctionnement*, ne sont pas si innocentes que cela.

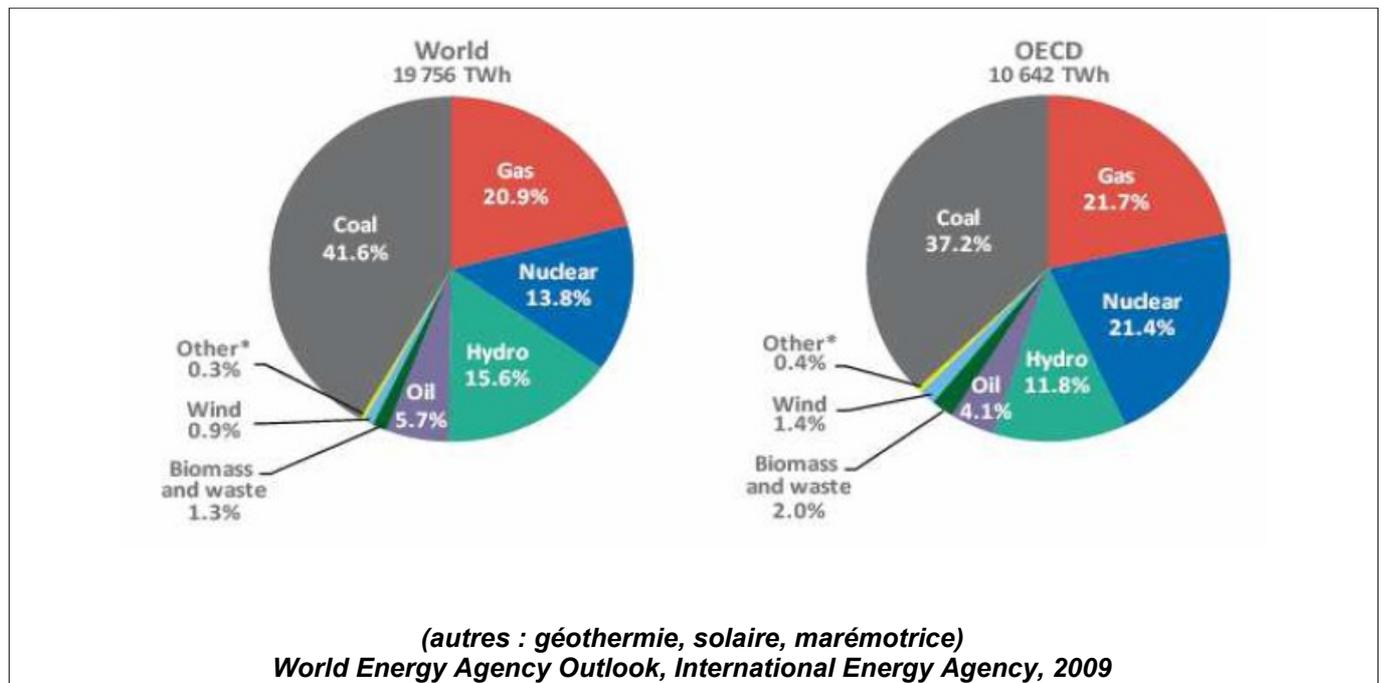
Par exemple l'énergie photovoltaïque produit en fait une quantité non négligeable de gaz lors des phases de *fabrication* ... et de *recyclage*, la durée de vie étant prise en compte (environ

25 ans).

Charbon	Lignite	Gaz	photovoltaïque	Biomasse	Eolien	Hydraulique	Fission
900 - 1150	700 - 950	420	25 - 150	20	3 - 22	4	6

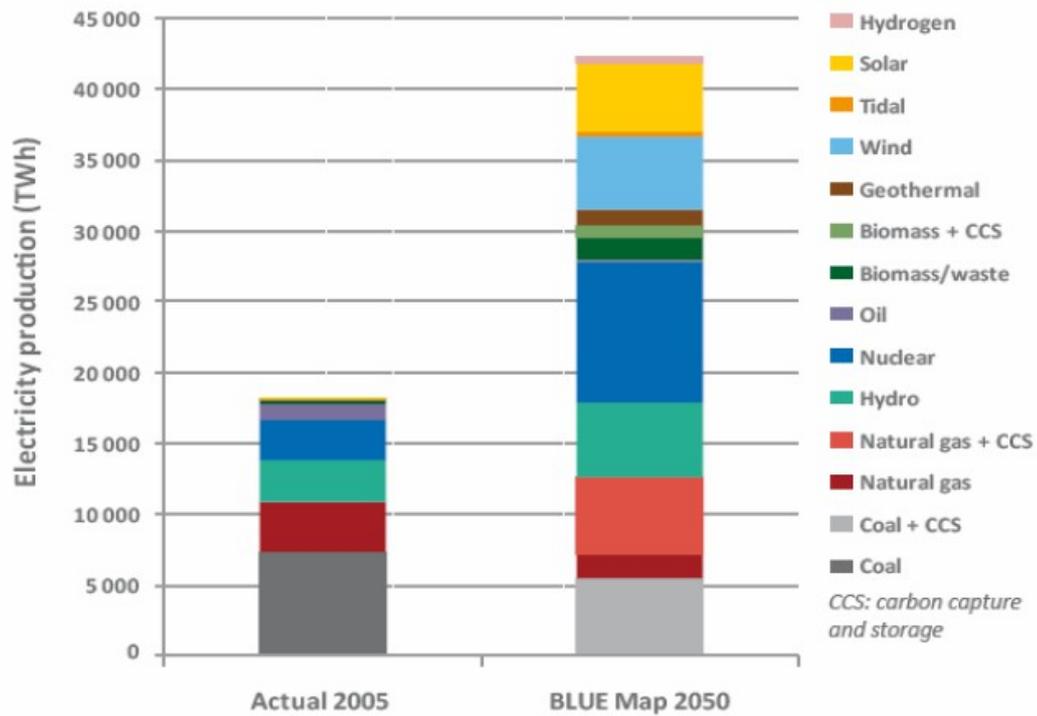
Émission de CO2 (en grammes par kWh)

Il est aussi intéressant de comparer les sources de production d'électricité (ici en 2007):



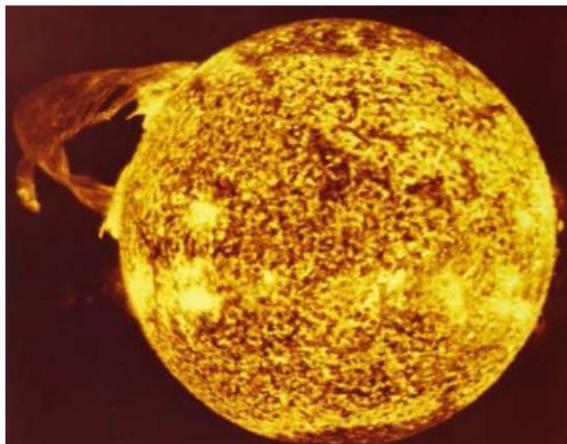
Un des scénarios pour obtenir

$$Prod_{2050}(CO_2) = \frac{Prod_{2005}(CO_2)}{2}$$

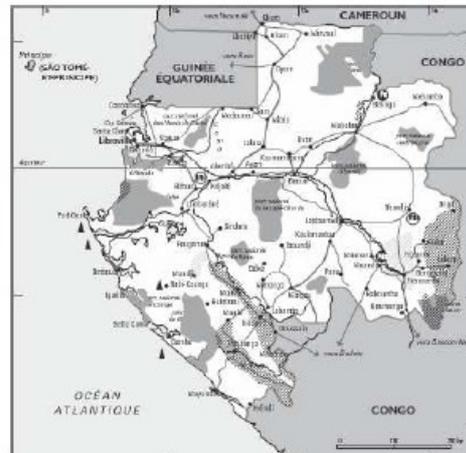


Source: Energy Technology Perspectives, International Energy Agency, 2008.

IV) L'énergie nucléaire, fusion – fission, contexte



Soleil : l'énergie de fusion
peut être disponible dans 100 ans ?



Mines d'Oklo : l'énergie de fission
déjà utilisée depuis 70 ans

Pour les réactions respectivement de fusion et de fission suivantes

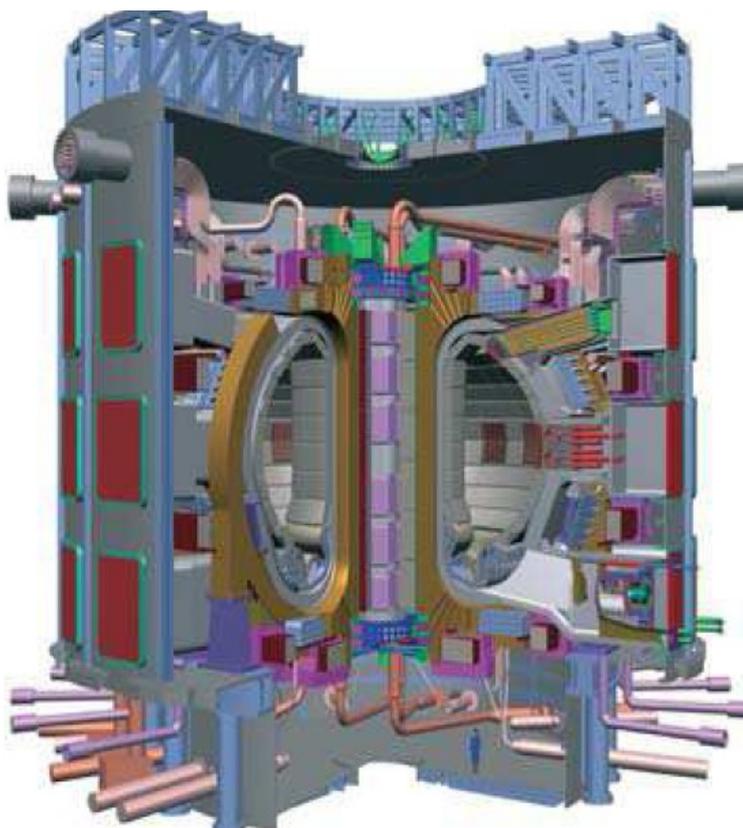


on obtient comme énergie potentielle par kg de combustible :

1 kgr charbon	1 kgr U ²³⁵	1 kgr D + T
9 KWH	24 10 ⁶ KWH	94 10 ⁶ KWH

Photovoltaïque	100 km ² ($\rho=10\%$ en Europe centrale)
Eolien	5600 éoliennes de 600 kW, disponibilité de 30% (Mer du nord)
Charbon	2 600 000 tonnes
Pétrole	1 800 000 tonnes
Fission	25 tonnes d'U enrichi à 4%
Fusion	100 kg de D et 150 kg de T

Source d'énergie pour produire 1000 MW pendant un an



ITER : R & D internationale (communauté scientifique)

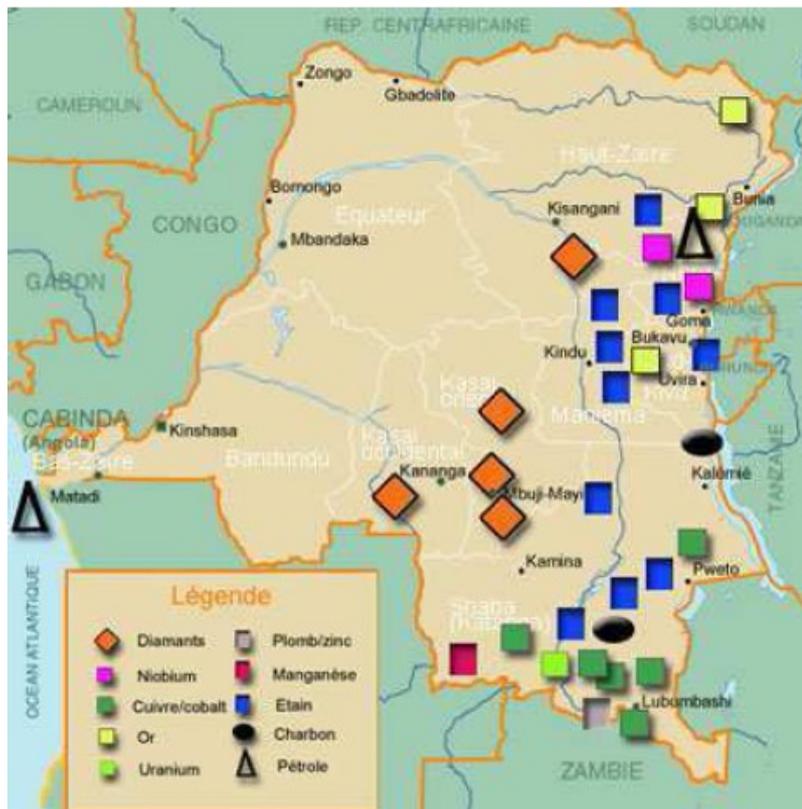
1g de T par plasma, dans 840 m³ (le moins radio toxique des isotopes, très forte diffusion → dilution forte)

Cette comparaison montre que les ordres de grandeur spécifique, c'est-à-dire par kg, sont les mêmes pour la fusion ou la fission (un facteur 5).

Une différence, de taille, est l'approvisionnement en matières premières. Il y a là un avantage important à la fusion, tant d'un point de vue humaniste (!) que d'un point de vue sécurité et durée.

En effet le deutérium, qui a été par le passé (2ième guerre mondiale) un enjeu de guerre (puisque'il a permis de valider le concept de la réaction en chaîne par Joliot Curie, ce qui a montré la faisabilité de l'arme atomique à fission), est maintenant facile à produire et est présent à 0,015 % dans ... l'eau alors que l'U²³⁵ est présent à 0,7 % dans ... l'uranium (naturel), lui-même présent en faible pourcentage dans les mines (quelques gr/tonnes) !

Le coté humaniste, c'est que, par exemple, depuis la découverte, longtemps tenue secrète, des mines d'uranium de Shinkolobwe au Congo, le pays est dévasté par une anarchie entretenue par des guerres d'origine obscure ou opaque, avec leurs horreurs quotidiennes.



L'approvisionnement en uranium ne doit pas se faire au prix de la moindre souffrance humaine

Il suffit de lire l'actualité, rien de plus à ajouter.

Remarque sur les finances:

Le budget dévolu au projet ITER, projet de recherche sur la fusion thermonucléaire (il y a d'autres moyens d'obtenir la fusion : froide - muonique, impact, explosif ?) est actuellement compris entre 10 et 20 G€ sur 20 ans, dont 90 % partagé entre 34 pays sous forme d'apport des éléments de fabrication, à comparer avec la LGV qui est pas loin de 80 G€ pour gagner ... des minutes. ITER est un bel exemple de travail et de partage entre les peuples, c'est assez rare pour ne pas le citer.

Les enjeux sont d'ailleurs incomparables (énergie au niveau du développement de l'humanité) et on peut se poser la question si l'on ne devrait pas plutôt transférer les crédits alloués au LGV à la R & D, ce qui permettrait d'embaucher beaucoup d'étudiants et de valoriser les études longues.

D'un point de vue scientifique, la fusion, ici sous forme thermonucléaire, est un défi passionnant qui donnera peut être lieu à de nouvelles découvertes scientifiques, et donc à de futurs prix Nobel.

Je trouve très importantes les objections d'éminentes personnalités comme Mr Koshiba et comme Mr de Gennes (avec qui j'ai eu l'honneur de discuter lors d'une de ses conférences à Saclay, lorsque j'étais étudiant à l'INSTN).



prix Nobel de physique 2002
astrophysique, neutrinos cosmiques



prix Nobel de physique 1991
ingénieur du CEA (cristaux
liquides, polymères)

Pour être constructif, il est évidemment nécessaire d'entendre ce qu'ils ont dit (sinon il faudrait être prix Nobel pour contre argumenter !). Donc, dans le cadre d'un débat démocratique (on est dans un pays où l'on peut encore exprimer des points de vue scientifiques sans se voir accuser en procès de sorcellerie, ou d'alchimie), j'oserai effectuer quelques commentaires qui permettront aussi de montrer l'intérêt du réacteur à plasma de fission.

Notre prix Nobel, Pierre-Gilles de Gennes, parle avec suspicion d'un réacteur à fusion, tout en précisant qu'il a pourtant connu l'enthousiasme des chercheurs des années 1960.

Je retiens trois points de son discours :

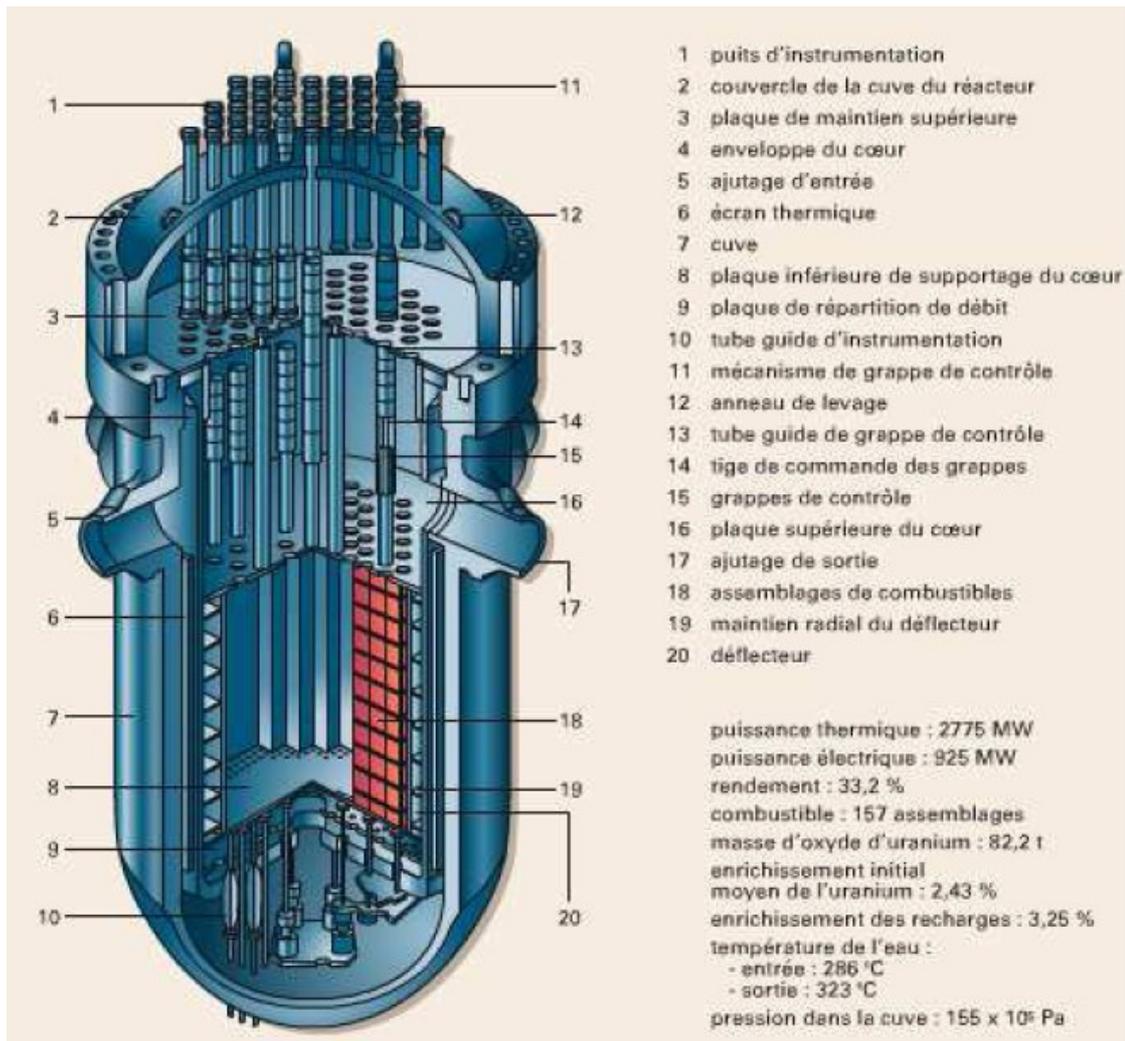
- Un réacteur de fusion est à la fois Superphénix (surgénérateur) et une usine de retraitement. Je note que l'on parle maintenant d'ITER non en tant que réacteur à fusion, mais en tant que machine de R & D, ce qui est différent.
- Les instabilités des plasmas de ce type, et les fuites thermiques des systèmes actuels ne sont pas totalement comprises : pour tenir compte de son avis, il me semble important non seulement de maintenir, mais de développer Tore Supra qui est un tokamak de R & D. Une instrumentation plus complète pourrait, par exemple, être installée. Cela aurait aussi pour avantage de garder l'excellente compétence technique (je pense au contrôle commande et à son informatique) et scientifique gravitant autour de cette machine.
- Les neutrons de 14 MeV doivent être pris en compte dans la tenue des matériaux, notamment des supra-conducteurs, dans la durée. Ceci est effectivement nécessaire pour un réacteur amené à fonctionner en continu des années, mais tant que l'on reste dans le concept d'une machine de R & D où les plasmas d'étude ne dureront que quelques minutes, nous ne sommes plus dans un contexte de longue durée.

Mr Koshiba alerte sur les dangers du tritium.

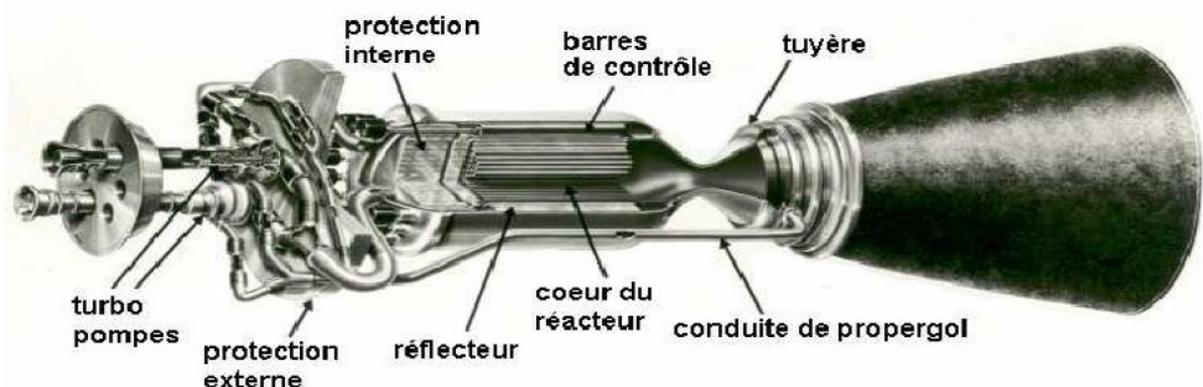
V) Réacteurs classiques et réacteurs à plasma de fission

Il y a beaucoup à dire sur les réacteurs nucléaires de fission, bien sûr du point de vue de la physique, mais aussi du point de vue technologique (beaucoup de variantes), et du point de vue de l'impact écologique.

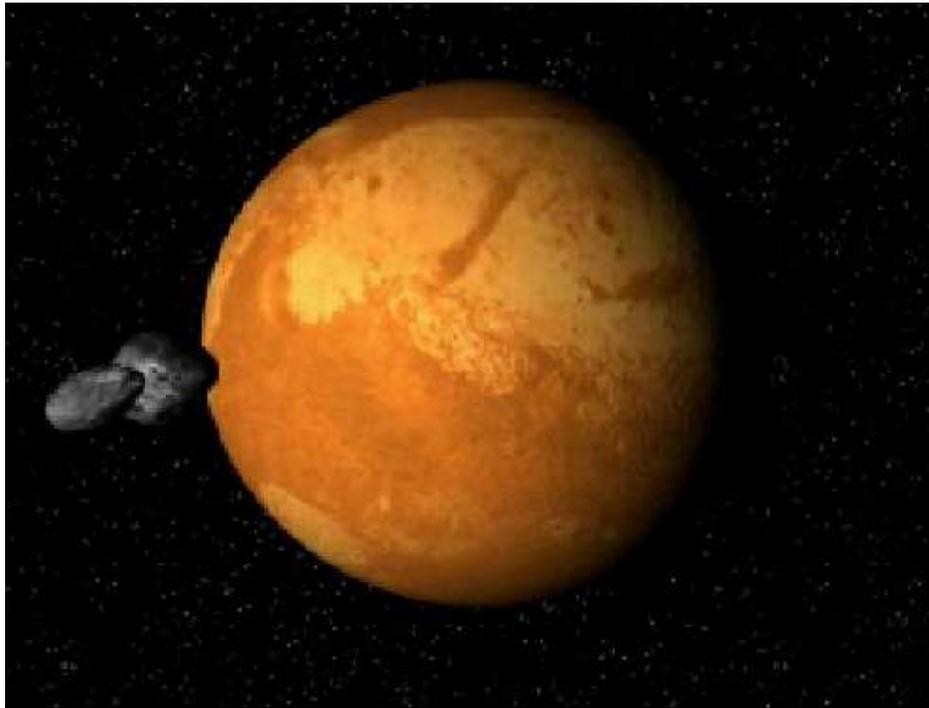
Il y a les machines classiques, utiles, complexes, mais éprouvées et ...



les machines de rêves d'ingénieurs



qui pourraient peut être permettre à l'humanité d'explorer d'autres mondes.



L'aspect technologique:

Ces machines ont un grand nombre de pièces soumises à des conditions thermiques sévères (300°C dans la cuve) et à de fortes pressions (150 bars dans la cuve), ceci parfois sous flux neutronique (pour la cuve en tout cas qui contient 72 tonnes d'U à 2,43 % de ²³⁵, renouvelé par tiers annuel de 24 t d'U à 3,25%). Un nombre important de pièces favorise un taux de pannes non négligeable (par exemple, les crayons présentent parfois des fissures sans gravité, mais suffisantes pour laisser échapper des produits de fission gazeux, les mécanismes divers et variés, les conduites sous pression...).

L'idéal serait donc d'avoir une machine sans, ou avec très peu d'éléments soumis à des contraintes importantes.

L'aspect sécurité:

La fission du combustible donne des produits de fissions radio-actifs, de durée de vie plus ou moins longue. Les machines actuelles ne peuvent pas brûler in situ ces déchets, de plus leur extraction du combustible brûlé ne peut être faite qu'une fois celui-ci déchargé dans des usines complexes de retraitement. Ce qui fait qu'en cas d'accident, une bonne partie des dizaines de tonnes de combustible, fortement contaminées si l'accident se produit longtemps après le démarrage, peut être disséminée dans l'atmosphère (rappelons pourtant que ce cas « improbable » s'est quand même produit lors de la catastrophe de Tchernobyl, et que ces produits de fission, portés par les vents, n'ont pas été arrêtés par les autorités à la frontière !)

L'idéal serait de pouvoir « brûler » in-situ ces produits de fissions, c'est-à-dire à l'endroit même où ils se produisent : la cuve. Une amélioration pourrait aussi être un retraitement en temps réel, ce qui permettrait d'avoir du combustible en permanence quasi « propre » dans la cuve. En cas de déconfinement brutal (explosion voulue ou non), le combustible disséminé ne serait pas porteur de ces produits radio-actifs (la toxicité chimique de l'uranium (non brûlé) est plus grande que sa toxicité radio-active – quilles de bateaux de Tabarly) et donc la pollution serait bien moindre.

Une faible masse critique serait aussi un atout, permettant d'avoir de petites masses de

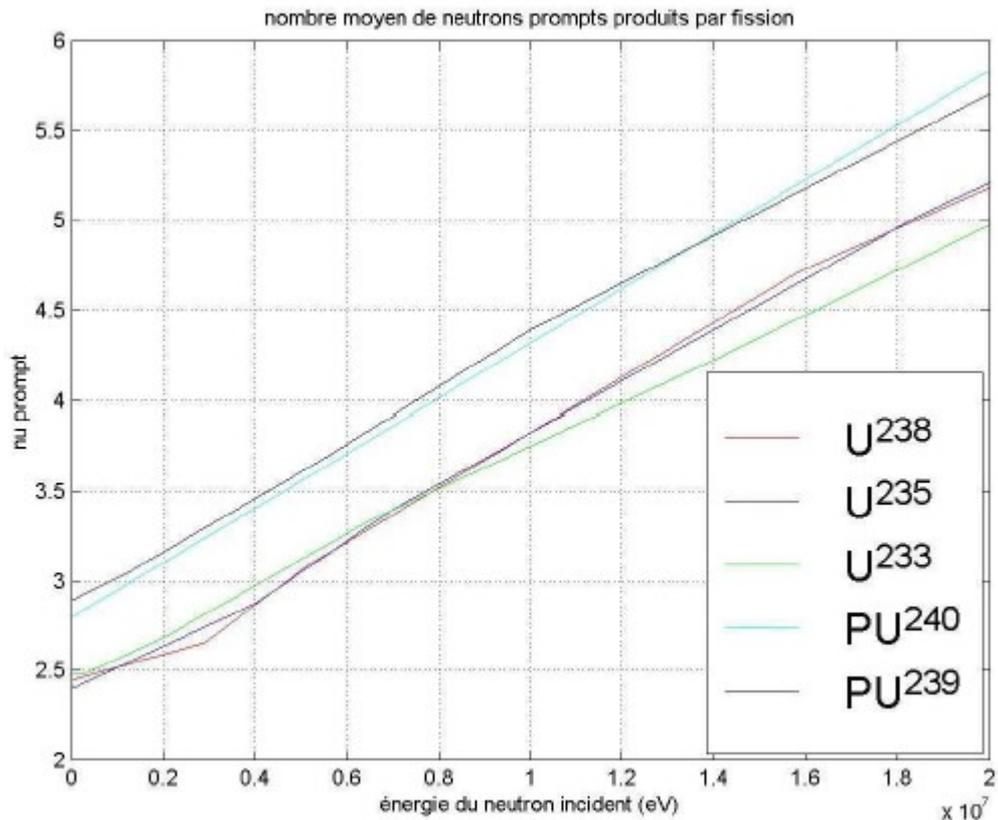
combustible présentes dans la cuve.



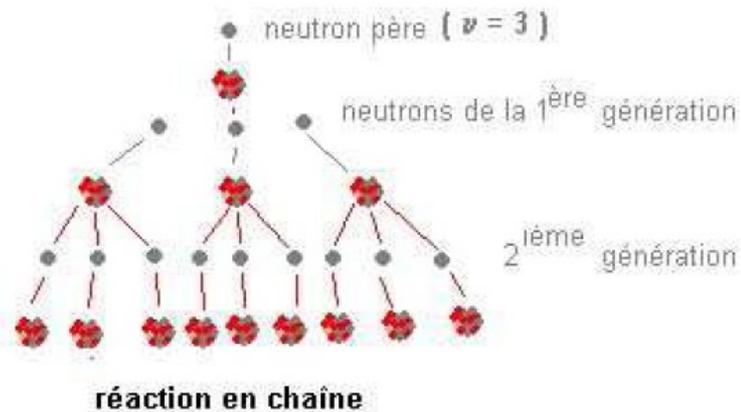
Catastrophe de Tchernobyl

Mais il y a un problème, qui n'a été que très peu évoqué. C'est un problème que j'appellerai de **sûreté intrinsèque**. Ce problème peut se produire à tout moment, peut être demain, peut – être dans mille ans, il s'agit d'une propriété purement naturelle, liée au caractère profondément aléatoire du phénomène fondamental de la fission.

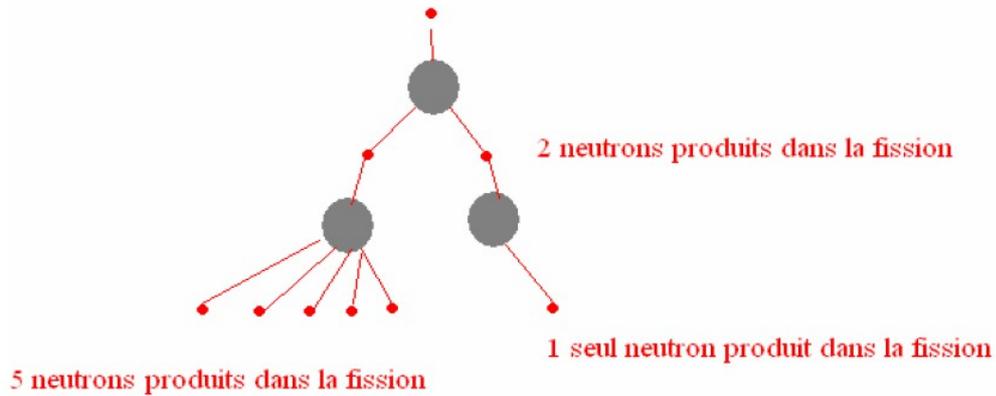
Cette caractéristique est petit à petit oubliée, hormis dans certains milieux (par exemple celui des concepteurs de détecteurs de neutrons). Pourquoi ? Parce que l'**on calcule en « moyenne »** : une fission d'un noyau d'Uranium, de Plutonium, produit en moyenne, disons 2,5 neutrons lorsque le neutron incident a une vitesse thermique.



Or la majorité des codes de calcul, des boîtes noires, ne tiennent compte que de cette moyenne. Par exemple, ici, on montre le démarrage d'une réaction en chaîne avec des fissions provoquant 3 neutrons prompts par neutron incident, c'est-à-dire avec un nombre moyen de neutrons produit lors de chaque fission de 3.



Mais ce n'est pas comme cela que ça se passe. En fait une fission peut produire 0, 1, 2, 3, 4, ... 8 neutrons, chacun de ces événements ayant une certaine probabilité d'arriver.



P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
0,001	0,106	0,125	0,538	0,106	0,058	0,048	0,009

Probabilité d'obtenir 0, 1, 2, ... 7 neutrons lors d'une fission du Pu239 à 80 keV

« There is then, for example, a certain probability that the reactor may go beyond prompt critical before any neutron signal is detected » ; Bell & Glasstone (Nuclear Reactor Theory, ed Van Nostrand, 1970, Reinhold, page 36)

Juste pour voir une équation, voici l'une de celle modélisant (d'une façon simplifiée) ce phénomène:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = g \left[\sum_{o=1}^s (x^o - 1) S_o(t) \right] + \frac{\partial g}{\partial x} \left[\frac{-x}{l} + \frac{P_{cs}(t)}{l} + \sum_{i=0}^6 \sum_{v=0}^8 x^v y_i \frac{P_f(t) P_{v,i}}{l} \right] + \sum_{i=1}^6 \frac{(x - y_i)}{\tau_i} \frac{\partial g}{\partial y_i}$$

Bell & Glasstone, deux autorités de la neutronique en parlent très peu (quelques lignes), mais citent ce problème. : il y a une certaine probabilité qu'un réacteur devienne prompt critique avant qu'aucun détecteur ne puisse détecter l'arrivée de ce phénomène !

Le problème est alors de calculer la probabilité qu'une seule réaction en chaîne diverge (provoquant un pic de puissance destructeur) dans les phases de démarrage, ou en régime de croisière. Et même si cette probabilité est très très faible, vu le nombre colossal de réactions en chaîne se produisant dans un réacteur, on peut se poser des questions !

De mon point de vue, l'humanité ayant, je l'espère des siècles devant elle, ce problème doit être abordé sereinement, avec circonspection, précision et résolu.

Le réacteur à plasma de fission avec un cycle deux temps, compression détente, comme dans un moteur à explosion, pourrait être une solution à ce problème, avec en plus de nombreux autres avantages. Contrairement aux réacteurs actuels, ou même à ceux de la future 4^{ème} génération, où le combustible est solide, le combustible du réacteur à plasma de fission est gazeux.

L'idée du réacteur à plasma de fission n'est pas nouvelle, elle date des années 50 et vient d'ingénieurs dits « thinkers » du Los Alamos. En l'occurrence Aamodt et Colgate.

Cependant, si eux proposaient un tube à choc, je proposerai plutôt un cylindre, ou une sphère à choc fonctionnant en deux temps : implosion et explosion !

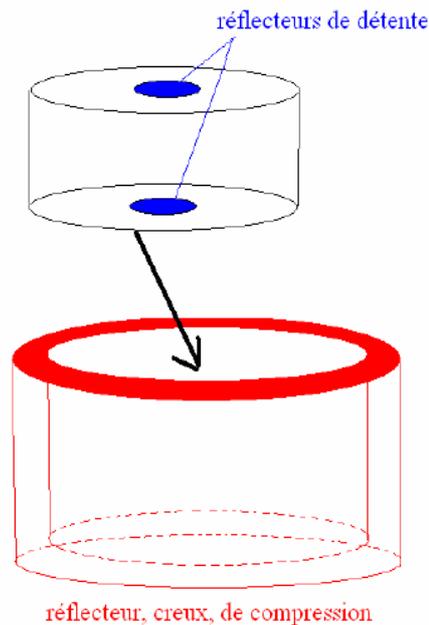
La machine d'Aamodt et de Colgate, ainsi que le réacteur classique, statique, a été étudiée et reprise par moment. Elle semble connaître depuis peu un regain d'intérêt outre-Atlantique, ainsi qu'en Allemagne pour un nombre, il est vrai restreint, d'ingénieurs.

Pourquoi : les technologies ont évolué, notamment sous l'impulsion des études de fusion

thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique.

L'intérêt : les plasmas de fission sont beaucoup moins chauds que ceux de fusion, 10 000 K au lieu de 100 000 000 K, les pressions sont tout à fait raisonnables en fonctionnement : une sphère de 2 m de diamètre, remplie de gaz $^{235}\text{UF}_6$ (enrichissement à 100%) est critique avec 17,35 kg de gaz sous une pression de 0,3 atmosphère, la sphère étant entourée d'un réflecteur en glucide (BeO).

On est loin des 150 bars d'une cuve de réacteur classique, en fait on est 500 fois plus faible ! La configuration d'Aamodt a des inconvénients (P et T aux parois du tube à choc). Je propose une nouvelle configuration (je n'ai pas pris connaissance dans la littérature de l'existence du type d'engin que je propose). C'est une configuration, toujours cylindrique (voir sphérique), mais que je propose de mettre en position verticale afin de travailler en centrifuge - centripète.



Le fonctionnement s'effectue en deux temps :

1. Le gaz est rassemblé sur l'axe par un « pinch effect », puis dès que la configuration est légèrement sur-critique, alors les réflecteurs de « détente » vont provoquer des réactions en chaîne, ce qui aura pour effet de détendre le gaz via une « explosion nucléaire », ceci due aux zones centrales de grandes importances neutroniques.

2. Un choc centrifuge se propage alors et va heurter les parois latérales de la cuve cylindrique. L'onde de choc s'y réfléchit et revient centripètement sur l'axe du cylindre.

Un nouveau pinch est provoqué et le cycle recommence.

L'avantage d'une telle configuration réside dans l'**absence totale de pièces à l'intérieur de la cuve**.

En effet **les températures importantes dégagées par la fission étant alors localisées principalement au centre de l'engin**, cette configuration permet de s'affranchir notablement de contraintes thermiques excessives aux parois. De plus le régime de détente-compression génère un piston ionisé, mais cylindrique en expansion, qui pourra fournir de l'énergie à un solénoïde placé autour de la cuve par variation de l'inductance de l'engin (MI, et **non MHD**).

Des expériences prometteuses, **statiques**, ont été réalisées dans les années 60 – 70, ayant bénéficié de l'expérience acquise lors des projets Rover ou Nerva de fusée atomique.

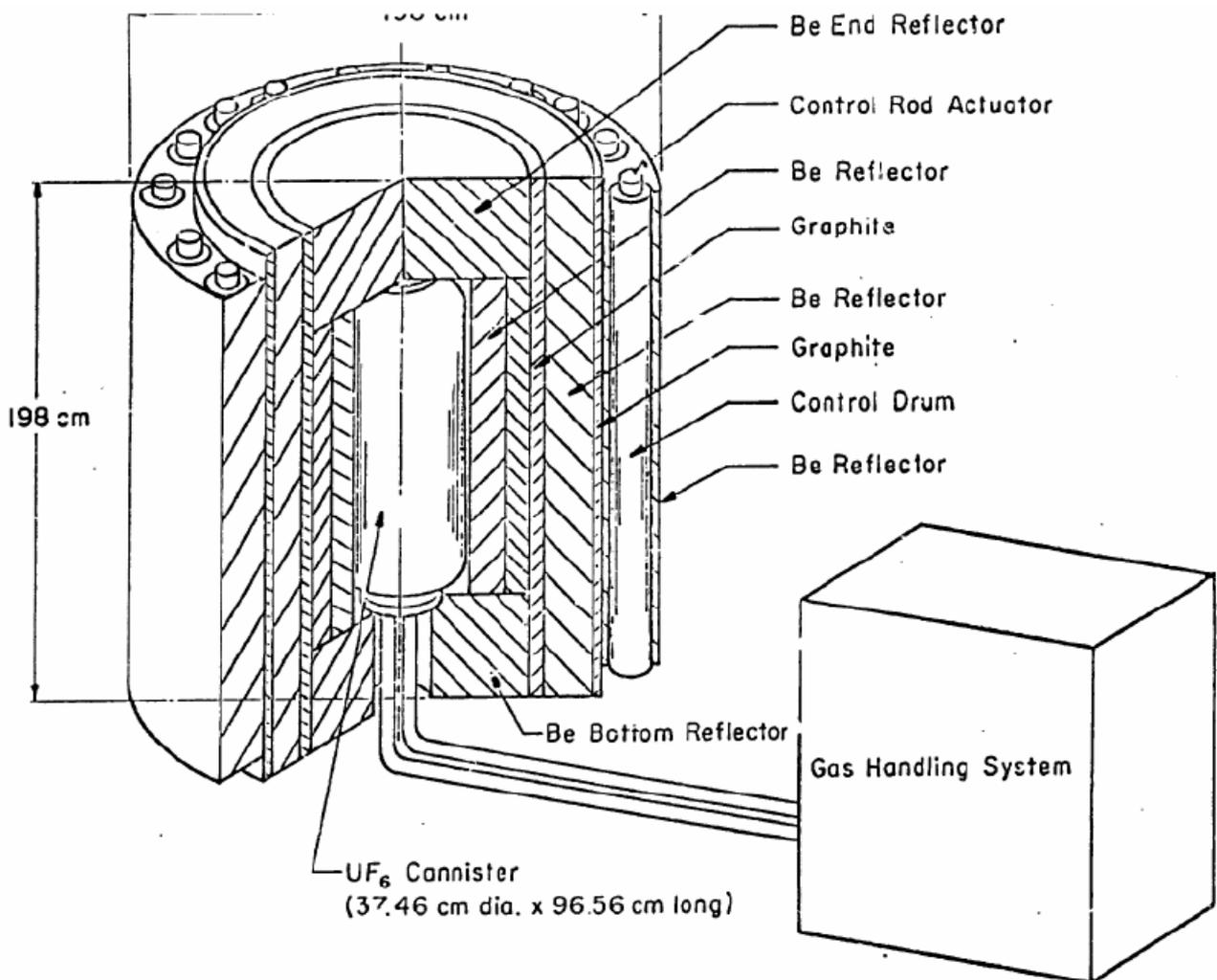


FIGURE 2

Gas Reactor Experiment

Avantages du réacteur implosion – explosion :

- La sécurité intrinsèque est assurée car il est prévu pour fonctionner en explosion (régime critique ou légèrement prompt critique – peu d'inertie).
- La faible densité du gaz fait que les ondes de choc ont des pressions raisonnables.
- Les températures élevées générées par les réactions nucléaires se produisent au centre de la machine, zone de grande importance neutronique : pas de contact direct du gaz chaud avec les parois.
- Le combustible étant gazeux, les déchets radioactifs peuvent être récupéré (voire peut être transmutés en parti in situ) au fur et à mesure de leur apparition : sécurité en cas de déconfinement.
- Aucune pièce dans le cœur : pannes fortement diminuées et applications spatiales pour des longues missions (Mars, astéroïdes).
- Utiliser les technologies mises au point pour les engins à fusion, fonctionne à une température 10 000 fois moindre que les températures de la fusion.
- Neutrons entre 0 et 2 MeV (neutrons de fissions donc aucun neutron à 14,03 Mev).
- Pas de tritium.
- Principes physiques connus et éprouvés : la fission.
- Possibilité de fonctionnement en Magnéto Inductance.

- Une sphère de 2 m de rayon, avec un réflecteur en 50 cm d'épaisseur de BeO, contenant 2 tonnes d'UF6 à 4% d'enrichissement est critique sous une pression légèrement inférieure à 4 bars, soit environ 35 fois moindre que la pression des réacteurs actuels.

Inconvénients :

- Innovations scientifiques et technologiques, risques financiers et techniques.
- Production de déchets radioactifs, à quantifier.

Je vous remercie de votre attention

Fabrice Pélestor