

CERCLE DE DOCUMENTATION ET D'INFORMATION

"CLUB DU TEMPS LIBRE"

Mardi 13 Janvier 1981

"La fusion thermonucléaire ; où en est-on aujourd'hui ? son avenir pour la production d'électricité"

Monsieur GOURDON, adjoint au chef du département de fusion contrôlée au Commissariat à l'énergie atomique, a traité le sujet avec un enthousiasme évident, et une richesse telle que le présent compte rendu, malgré sa longueur, n'en présentera que l'essentiel.

D'emblée, Monsieur GOURDON dit que le problème est vaste, que la fusion nucléaire n'en est qu'à ses débuts, qu'elle sera la source d'énergie de l'avenir dès qu'elle sera "contrôlée", sans doute pour l'an 2020 - 2030.

Il abordera quatre questions :

- Qu'est-ce que la fusion nucléaire ?
- Comment peut-on la réaliser ?
- Où en sont les recherches ?
- Quel est son avenir ?

Un rappel concernant les consommations relatives en énergies primaires en 1980 :

- charbon	:	18,8 %	
- pétrole	:	55,2 %	
- gaz naturel	:	13 %	
- hydraulique	:	7,3 %	
- nucléaire	:	5,7 %	(pour la seule production d'électricité)
		<hr/>	
		100 %	

y ajouter : géothermie)
soleil) → faible part
vent)

COMBUSTION - FISSION - FUSION -

La COMBUSTION du carbone (C) dans l'oxygène (O₂) :



Q correspond à l'énergie de liaison de la molécule, ici 4 eV (électron-volt), soit 7800 calories par gramme de carbone,

énergie calorifique (d'origine chimique) suffisante pour élever de 7°8 la température de 1000 g (= 1 litre d'eau).

Ce qui correspond à :

$$\frac{7800 \times 4,185}{3600} \quad 0,01 \text{ kWh environ}$$

FISSION - 1 neutron rencontrant un noyau d'Uranium 235 (U^{235}), le brise en 2 éléments X et Y, éjecte 2,8 neutrons et libère une quantité Q d'énergie de liaison (de l'ordre de 200 millions d'électron-volts : 200 MeV).



Ce qui pour 1 g. d'uranium correspond à 20 milliards de calories.

FUSION - C'est, pourrait-on dire, le contraire de la fission ; dans la fission, on part d'un atome lourd que l'on brise ; dans la fusion, on part de deux atomes légers que l'on réunit en un seul plus lourd.

On peut partir de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium qui, comme l'hydrogène, n'ont qu'un électron périphérique :



Deutérium tritium hélium neutron

$$Q = \text{énergie de liaison} = 17,6 \text{ MeV}$$

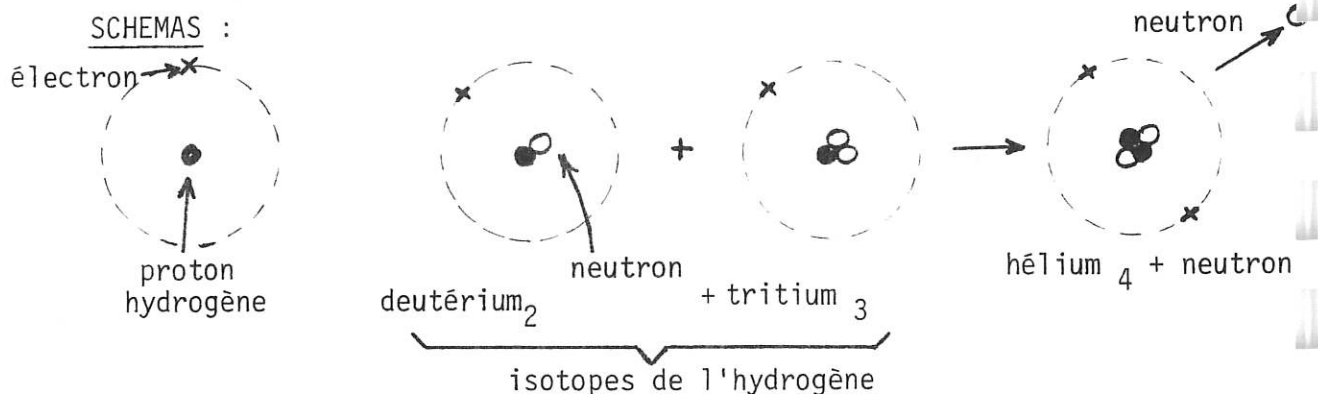
Ce qui par gramme de deutérium et de tritium donne aux environs de 80 milliards de calories, soit 4 fois plus que la fission pour 1 g. de matière,

Ou encore la quantité de calories est plusieurs millions de fois plus grande que la combustion d'un gramme de carbone :

$$\frac{80\ 000\ 000\ 000}{7800} = 10\ 000\ 000$$

et pour l'Uranium 235

$$\frac{20\ 000\ 000\ 000}{7800} = 2\ 500\ 000$$



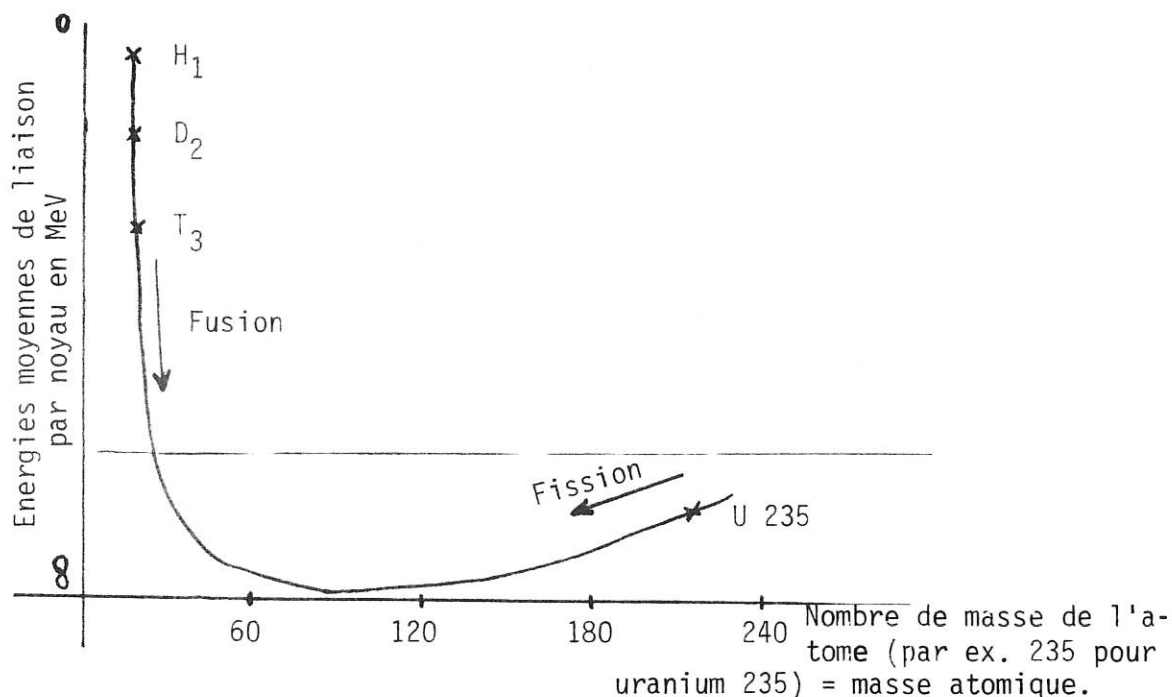
Ainsi :

2 500 000 kg. de charbon donneraient autant d'énergie qu'un kg d'Uranium 235 et 10 000 000 kg de charbon autant qu'un kg d'un mélange de deutérium et de tritium.

Si pour produire 1 milliard de kWh il faut 330 000 tonnes de charbon, pour la même énergie, il suffit de :

$330\,000\,000 \quad 2\,500\,000 = 132 \text{ kg} = 0,132 \text{ T d}'U^{235}$
et $330\,000\,000 \quad 10\,000\,000 = 33 \text{ kg} = 0,033 \text{ T d'un mélange de}$
deutérium et de tritium.

COURBE DES ENERGIES MOYENNES DE LIAISON PAR NOYAU.



Courbe précieuse pour savoir si une réaction nucléaire libérera de l'énergie.

A mesure que la masse atomique augmente, la courbe descend rapidement ; elle atteint son minimum de 60 (\rightarrow 8,7 MeV par noyau), puis augmente lentement jusqu'aux noyaux les plus lourds (par ex. U²³⁵)

Il y a donc deux façons d'atteindre les énergies de liaison les plus fortes qui assurent la stabilité du noyau =

- soit à partir des éléments les plus légers (à gauche) par fusion.
- soit à partir des éléments les plus lourds (à droite) par fission.

FILM.-

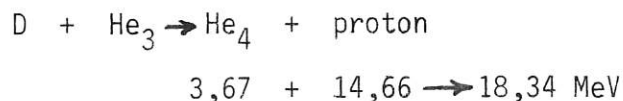
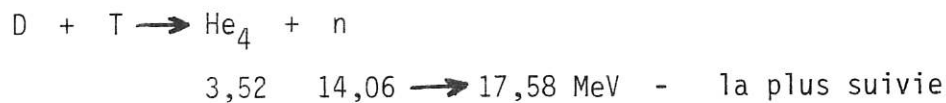
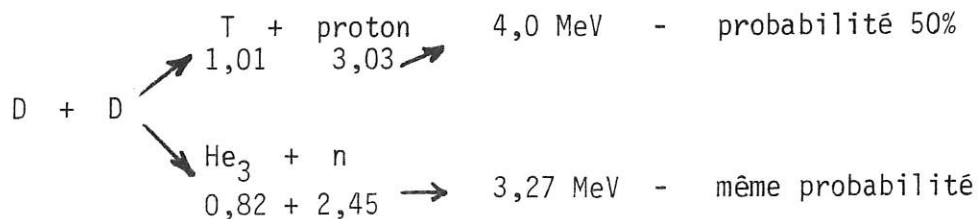
On assiste à ce moment de l'exposé à la projection d'un film très remarquable sur l'énergie de fusion.

Il précise :

. que le deutérium est très abondant dans l'eau de mer en particulier (30 g. par m³) et qu'ainsi il est pratiquement inépuisable.

. que le tritium est instable (12 ans de vie). Il faudra donc le fabriquer à partir du lithium soumis à un bombardement de neutrons.

Il donne des données intéressantes sur les énergies libérées :



CONDITIONS A REALISER POUR OBTENIR LA FUSION.-

Pour deutérium et tritium, il faut :

- un long temps de confinement τ
- une température très élevée,
- un éloignement de toute paroi matérielle,
- et, bien sûr, il faut que l'énergie produite soit supérieure à l'énergie dépensée pour "allumer" la réaction,
- une certaine concentration n .

. En portant le mélange D + T à très haute température (100 000 000 de degrés), on augmente l'agitation thermique des atomes, l'énergie des chocs entre eux, ce qui conduit à leur fusion ; d'où l'expression "réaction thermonucléaire".

La réaction peut s'emballer ... si on ne la contrôle pas, on a la bombe thermonucléaire ... qui a déjà été expérimentée.

. Il faut un certain temps de confinement τ en secondes, et une certaine densité n par cm³ tels que le produit :

$$n\tau \text{ soit au moins égal à } 10^{14}$$

n étant exprimé en nombre d'atomes par cm³ et τ en secondes.

. Comment confiner D + T que les hautes températures ont transformés en un 4ème état de la matière = le plasma mélange d'ions positifs et d'électrons négatifs ?

Deux solutions :

- par confinement inertiel -

+ cas de la bombe H. L'"allumette" est une petite bombe A (au plutonium ou à l'uranium 235). Elle sert de détonateur. L'énergie dégagée est considérable mais elle n'est pas "contrôlée".

+ cas du laser qui provoque une micro explosion

où $\tau = 10^{-10}$ et $n = 10^{25}$

d'où le produit :

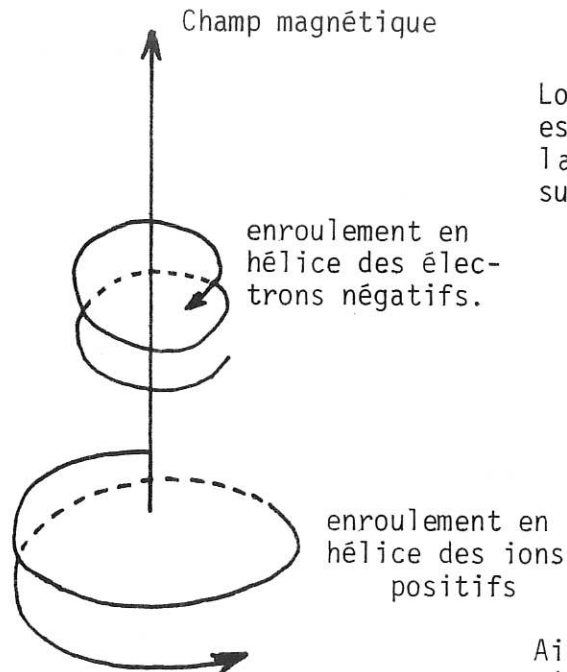
$$10^{-10} \times 10^{25} = 10^{15}$$

produit supérieur au produit requis 10^{14} .

- par confinement magnétique -

C'est le physicien soviétique SAKHAROV qui a découvert la "bouteille magnétique", enceinte immatérielle qui maintient le plasma.

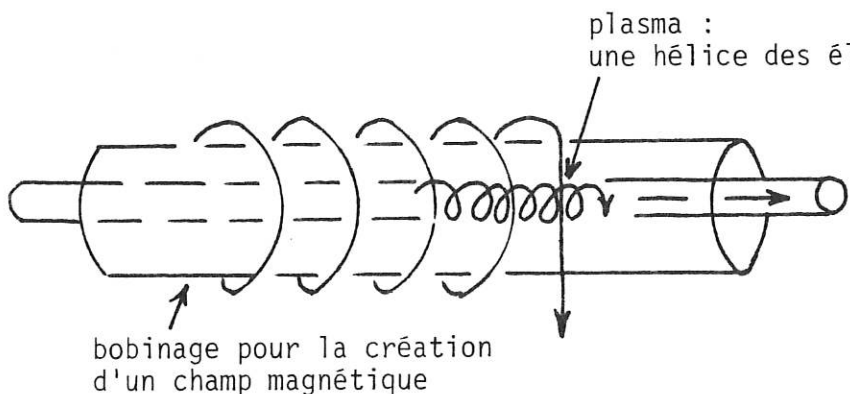
Le plasma suit, en décrivant des hélices, les lignes du champ magnétique plutôt que de les traverser ; il est ainsi enfermé.



Lorsque la trajectoire des électrons est inclinée sur le champ magnétique, la trajectoire s'enroule en hélice sur un cylindre circulaire.

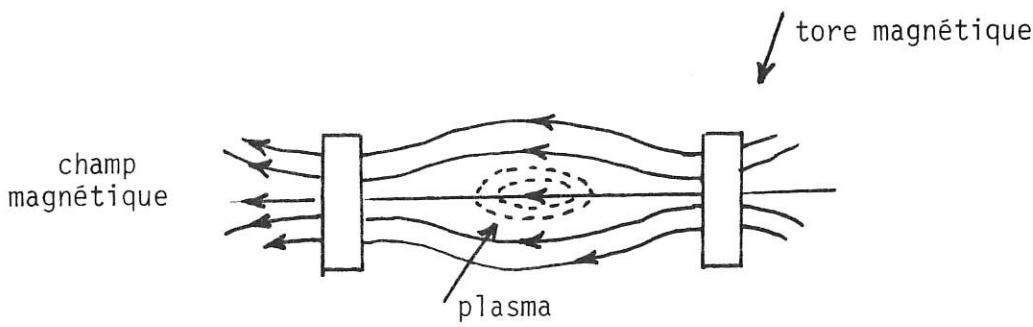
Il en est de même pour les ions positifs, en sens inverse.

Ainsi, électrons et ions ne peuvent s'échapper du champ magnétique.

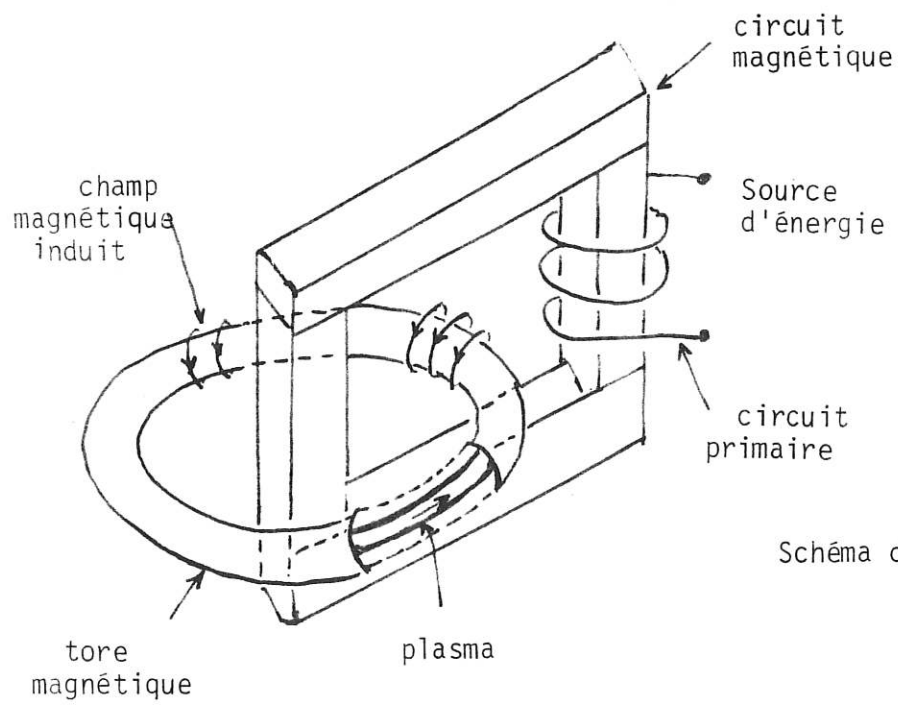


Confinement du plasma par un champ magnétique intense qui éloigne le plasma des parois du conteneur (en forme de tore, par exemple)

- cas d'une bouteille ouverte :



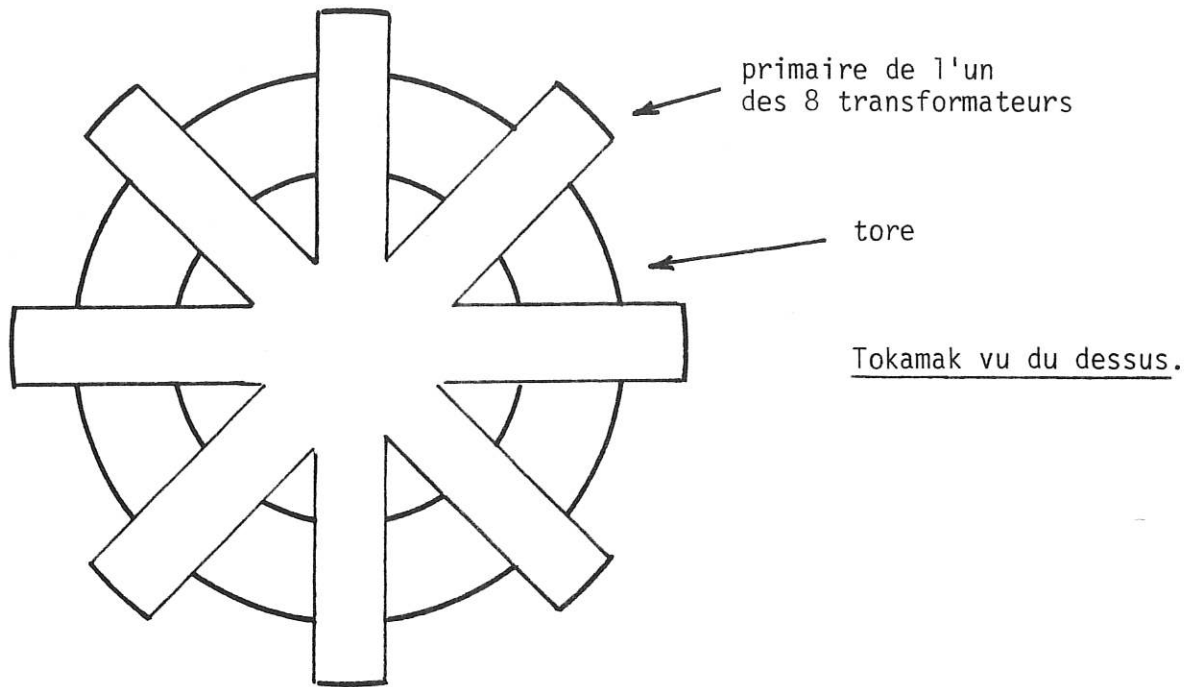
- bouteille fermée :



Les ions et les électrons se déplacent très rapidement en hélice autour des lignes de force du champ magnétique tout autour de l'anneau.

L'appareil fonctionne à la façon d'un transformateur : le secondaire est le plasma ; le primaire y induit un courant de forte intensité dépassant 100 000 ampères qui crée la haute température.

Schéma d'un des 8 transformateurs de TOKAMAK



La réaction est amorcée par des oscillations à haute fréquence entre l'anneau et le tube qui renferme le deutérium à basse pression.

On peut obtenir $n \approx 10^{14}$

$\tau \approx 1 \text{ sec}$

ce qui donne le produit requis 10^{14}

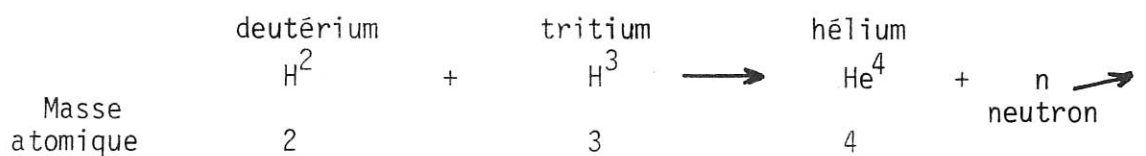
On a pu obtenir des températures de 10 000 000 de degrés.

Le film a montré le montage du "transformateur" dont le secondaire est le cordon de plasma, appareil considérable digne de l'industrie lourde.

Il s'agissait en particulier de l'appareil TOKAMAK du centre de Grenoble.

Le confinement magnétique interdit au plasma de rencontrer les parois et maintient au plasma une densité suffisante pour maintenir la réaction.

Le film a fait apparaître la notion de "défaut de masse".



$$\text{défaut de masse } m = (2 + 3) - 4 = 1$$

Cette perte de masse m correspond à la libération d'une énergie E

$$E = m c^2 \quad (\text{relation d'Enstein})$$

ou c est la célérité de la lumière.

LA BARRIERE ENERGETIQUE.-

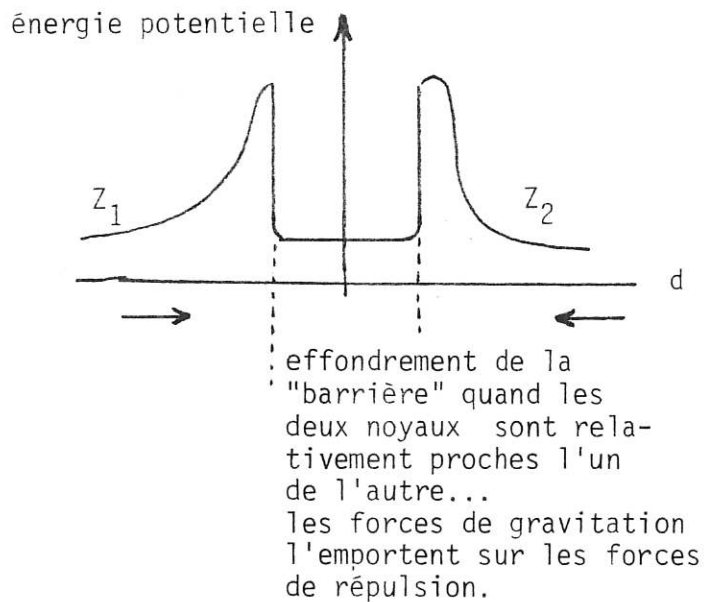
Pour que deux éléments légers, comme les isotopes de l'hydrogène, se fusionnent, il faut vaincre les forces de répulsion électrostatique entre deux noyaux positifs. Il faut leur communiquer, par haute température, une énergie suffisante pour leur faire franchir la "barrière".

Elle est de l'ordre de 0,28 MeV.

Elle obéit à la relation

$$E = \frac{Z_1 Z_2}{d^2}$$

(E = énergie potentielle de la barrière
 { Z₁ } charge des 2 noyaux
 { Z₂ }
 { d = distance entre les 2 noyaux



OU EN EST-ON ?

- pour les températures	1956	-	U.R.S.S.	2 millions de degrés
	1973	-	" "	5 " " " " "
	1976	-	France	20 " " " " "
	1978	-	U.S.A.	60 " " " " "

- produit n x τ	1970	-	U.R.S.S.	5 x 10 ¹¹
	1976	-	France	2 x 10 ¹²
	1978	-	U.S.A.	3 x 10 ¹³

on approche donc de nτ ≥ 10¹⁴

- moyens - personnel : 3000 ingénieurs et physiciens sont attelés au problème dans le monde.
- budget : U.S.A. = 1,5 milliards de francs
 Japon = 1 milliard de francs
 Communauté européenne = 1 " " " " " (dont 130 millions pour la France)
 U.R.S.S. = mal connu.
- énergie récupérée -
 - 20% restent dans plasma pour maintenir la fusion (il faut noter en effet que contrairement à la fission, il n'y a pas de réaction en chaîne). Il faut un auto-entretien.
 - 80% sont évacués par les neutrons qu'on arrête dans une "couverture" dans laquelle circule le fluide caloporteur (eau - hélium).
- entretien -
 - introduire du deutérium.
 - introduire du tritium qu'il faut fabriquer par bombardement du lithium par les neutrons. L'opération se fait dans la "couverture".

Les problèmes qui se posent sont :

- porter le plasma à 100 000 000°C,
 - avoir une "couverture" fertile,
 - avoir des bobinages pouvant être parcourus par de fortes intensités, sans échauffement (faire appel à la supra-conductivité).
 - régénérer le Tritium,
 - problèmes de protection.
- Il y a lieu de noter que la fusion ne donne pas de déchets radioactifs.

AVENIR :

- Faisabilité physique.
 JET = en 1985
- Faisabilité technologique
 NET = en 1990
 DEMO = en 2000 prototype de réacteur de démonstration.
- Filière de distribution au public
 pour 2020 - 2030

Belle promesse, la quantité de deutérium étant illimitée à l'échelle humaine tandis que celle de l'Uranium 235 s'épuisera ... comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel.

Conférence de haute qualité, vivement applaudie.