

**Projet STS 4^{ème} année
Département de Physique**

**LA FUSION THERMONUCLÉAIRE :
PROBLÉMATIQUE DE L'URGENCE
DU DÉVELOPPEMENT D'UN
PROJET À LONG TERME**



RÉSUMÉ

Ce travail est dédié à l'étude de l'application de la technique de fusion thermonucléaire contrôlée dans le contexte énergétique, économique, politique et social actuel.

On démontre que la fusion thermonucléaire contrôlée peut, avec les connaissances technologiques actuelles, être exploitée commercialement de façon rentable. Une analyse à long terme du contexte énergétique et écologique global révèle qu'il est impératif de construire des centrales de fusion dès maintenant, et abandonner temporairement les projets purement scientifiques. Cependant, le contexte politique n'y est pas favorable et rend impossible la construction de telles centrales. Nous présentons les principes à la base de la fusion thermonucléaire pour dévoiler son potentiel, sa sécurité, son respect de l'environnement exemplaire. On explique les causes possibles du manque d'engagement financier dans la fusion, puis propose une ligne d'action concrète pour obtenir les fonds nécessaires et le soutien public. Finalement, des scénarios à long terme de l'évolution écologique, énergétique, sociétariaire et politique globale sont exposés.

Mes remerciements vont au Professeur Minh Quang Tran (CRPP-EPFL) pour les discussions très profitables que nous avons eues.

LA FUSION THERMONUCLÉAIRE :

PROBLEMATIQUE DE L'URGENCE DU DEVELOPPEMENT D'UN PROJET A LONG TERME

Projet STS 4^{ème} année — François Coppex, DP, EPFL — 07/06/2000
 Coordinateur STS : prof. J.-P. Ansermet

0. TABLE DES MATIÈRES

0. Table des matières	1
1. Introduction	2
1.1 Contexte général, position du problème	2
1.2 Buts, champ et méthode de l'étude	3
1.3 Rappel théorique sur la fusion thermonucléaire	3
1.3.1 Le phénomène physique	3
1.3.2 Quels sont les avantages de la fusion par rapport aux autres énergies?	4
1.3.3 Les approches pour réaliser la fusion	6
2. Analyse du problème	8
2.1 L'urgence	8
2.1.1 Bref historique de la recherche en fusion	8
2.1.2 Etat technologique actuel : faisabilité	9
2.1.3 Signification de la consommation énergétique pour le développement	9
2.1.4 Le besoin de la fusion : situation énergétique globale, locale, actuelle et future	10
2.2 Les problèmes socio-politiques et questions économiques	12
2.2.1 L'avenir financier de la fusion	12
2.2.2 Etude de la viabilité économique d'une centrale de fusion avec externalités	12
2.2.3 Comment interpréter l'engagement dans le financement de la fusion	13
2.2.4 Les causes du manque d'engagement financier dans la fusion	14
2.3 Nouvelles approches pour relancer le financement de la fusion	16
2.3.1 Information du grand public	16
2.3.2 Assurer à la fusion un regain de crédibilité	17
2.3.3 Mettre la fusion sur le marché et bénéficier des rouages de l'économie	17
3. Extrapolations et conclusion	19
3.1 Scénarios envisageables	19
3.2 Conclusion	21
4. Références	23
5. Annexes	25
5.1 La centrale à fusion (tokamak sphérique) de Culham (U.K.)	25
5.2 Index des figures	27
5.3 Index	28

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte général, position du problème

A l'époque de l'euphorie informatique, les progrès techniques de notre civilisation n'ont jamais montré une telle effervescence. Cependant, parallèlement à ce développement scientifique très rapide, les structures politiques et économiques actuelles mènent à une consommation absolument irresponsable des ressources de notre planète. De plus, la volonté politique de l'élaboration d'une solution au besoin énergétique est absente car la problématique se pose dans un trop long terme. La problématique actuelle peut être résumée comme suit :

- On estime qu'en 2050 la population mondiale aura doublé et la consommation énergétique triplée.
- Les inégalités de la répartition géographique de la consommation énergétique par rapport aux pays en voie de développement vont s'accroître, touchant ces derniers plus fortement.¹
- Les ressources énergétiques actuellement consommées seront épuisées d'ici environ 70 ans.²
- Une économie dépendante unilatéralement du pétrole devient vulnérable aux fluctuations de prix du baril.³
- La disparition des ressources énergétiques mène inévitablement à des instabilités politiques.
- Les ressources naturelles et renouvelables (énergie photovoltaïque, éolienne, gaz naturel, bio gaz, biomasse, etc.) sont fortement limitées, et ne peuvent pas subvenir quantitativement aux besoins actuels.⁴
- Les matières fossiles consommées en tant que ressources énergétiques peuvent être bien mieux utilisées. Elles sont très précieuses pour l'industrie pétrochimique (par exemple, le plastique est un dérivé du pétrole).
- Les conséquences sur l'écosystème planétaire de l'utilisation prolongée de combustibles fossiles peuvent être désastreuses.⁵
- Il est fort probable que les concentrations de gaz carbonique dans l'atmosphère continueront à augmenter durant de nombreuses décennies.
- Il semble improbable que des mesures limitatives soient prises avant l'épuisement des ressources. En fonction de l'engagement politique actuel, les premières centrales de fusion devraient être opérationnelles vers 2050. Peut-être sera-t-il alors déjà trop tard :⁶ des ressources indispensables auront été gaspillées et l'environnement sera dégradé de façon

¹ En 1990 (resp. 2020), les 75% (resp. 85%) de la population mondiale vivent (rest. vivront) dans les pays en voie de développement actuels, et représentent 33% (resp. 55%) de la consommation énergétique globale.

² Selon la référence [10], charbon : 270 ans, pétrole : 40-50 ans, gaz naturel : 60-70 ans, uranium : 40-50 ans. En fait, l'horizon d'épuisement des ressources pétrolières actuel est le même que celui des années 1930, car de nouveaux puits sont constamment découverts. Néanmoins, la quantité de pétrole découverte, après un maximum dans les années 1960, diminue (cf. Figure 10 p.19). En 1998, on estimait que les réserves de pétrole de l'Arabie Saoudite (223 milliards de barils) seraient à moitié épuisées en 2013, celles de l'Irak (92 milliards de barils) en 2017, Iran (74 milliards de barils) en 2007, Abu Dhabi (66 milliards de barils) en 2017, Koweït (68 milliards de barils) en 2013. Les autres pays en sont déjà à leur deuxième moitié. Les Etats-Unis ayant atteint la moitié de leurs réserves en 1973, ces réserves arrivent à leur fin.

³ La crise pétrolière de 1973, due à la guerre israélo-arabe, ainsi que la guerre du golfe en 1991, nous ont fait prendre conscience de cette dépendance. Si des solutions transitoires ont été élaborées dans le court terme (appliquées par l'Agence Internationale pour l'Energie (AIE) en 1991), rien n'est prévu pour le long terme.

⁴ Pour remplacer une centrale électrique moderne de 1000 MW, il faudrait une surface de 100 km² de cellules photovoltaïques (rendement de 10%), ou bien 6660 moulins à vent avec des pales de 20 mètres de diamètre et un fort vent côtier, dans le cas du bio gaz 60 millions de porcs ou 800 millions de poulets, etc. De plus, nous ne parlons pas du coût de l'énergie obtenue par de tels procédés!

⁵ Effet de serre, fonte des glaciers, pluies acides, inondation de terres habitables (par exemple le Bangladesh qui compte près de 150 millions d'habitants), extinction d'espèces animales et végétales à cause des modifications climatiques, territoires devenant incultivables et menant à des famines, maladies dues à la pollution, etc. Il est déjà possible de mettre en corrélation l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂ et le réchauffement de la planète (cf. références [23], [10]), malgré le cycle de glaciation actuel du globe.

⁶ Ou peut-être est-il déjà trop tard? En effet, des relevés de calottes glacières ont montré que la teneur de l'atmosphère en CO₂ est restée autour de 280 ppm durant 160'000 ans. Or cette teneur a grimpé de 25% à 360 ppm (parties par million) depuis le début de l'industrialisation vers 1800. La réduction de l'excès de CO₂ contenu dans l'atmosphère par l'écosystème terrestre est un processus lent, qui prendrait environ 100 ans. Ainsi, la teneur en CO₂ restera anormalement haute au mieux jusqu'au 22^{ème} siècle si nous arrêtons toute émission dès maintenant. Peut-être donc que la donnée d'une expérience géophysique globale irréversible est déjà définitivement donnée.

catastrophique. Les ressources énergétiques renouvelables actuellement connues ne pouvant satisfaire la demande (cf. note 4 page 2), il est ainsi urgent de développer le projet à long terme qu'est la fusion thermonucléaire, pour proposer une solution énergétique de rechange avant la limite fatidique de l'épuisement des ressources.

- La fusion souffre des préjugés du public, à cause de la similitude linguistique des mots « fusion » et « fission » ainsi qu'à cause d'un manque d'information du phénomène physique. Il attribue trop souvent à la fusion les mêmes dangers que ceux de la fission.

1.2 Buts, champ et méthode de l'étude

Nous désirons montrer à quel point le développement de la fusion s'avère urgent, et de quelle manière il est ralenti par des considérations économiques et des préjugés sociaux. Comme le sujet est relativement vaste, on présente, sans entrer dans les détails,⁷ les sujets les plus conventionnels (situation énergétique, écologique, démographie), pour exposer le contexte général (section 1 page 2 et section 2.1 page 8 en partie). Ceci permettra de se concentrer sur les aspects moins évidents de l'ordre de l'extrapolation (section 2.1 page 8 en partie, section 2.2 page 12, section 3 page 19) basés sur les chapitres précédents. Nous apportons des idées nouvelles, sous forme de solutions possibles à la problématique, ainsi que des extrapolations de l'évolution des sociétés en fonction de la production et consommation énergétique globale. Ceci permet de mieux prendre conscience de la problématique future. Un des buts est de créer un document condensé, court et exhaustif.

Nous gardons le souci constant d'éviter les aspects mathématiques et techniques qui nécessiteraient des connaissances préalables en physique. Ce document est donc lisible pour tout profane en la matière. Néanmoins, la section 1.3 p.3 (ainsi que certaines notes de bas de page) est légèrement technique. Il s'agit d'un rappel théorique nécessaire de la fusion thermonucléaire, où on se restreint à une description qualitative de phénomènes physiques.⁸ En résumé, *ce document ne s'adresse pas forcément à des physiciens ou des scientifiques, mais à toute personne désireuse d'acquiescer des éléments de réflexion sur les aspects économiques, politiques et sociaux de la fusion.*

1.3 Rappel théorique sur la fusion thermonucléaire

Ce chapitre est le plus technique du document, même si le niveau est réduit aux considérations les plus élémentaires. La section 1.3.1 p.3 présente le phénomène physique élémentaire à la base de la fusion thermonucléaire. Toute personne non familière avec la fusion devrait absolument prendre connaissance de la section 1.3.2 p.4, qui expose les avantages de la fusion. Finalement, la section 1.3.3 p.6 survole les différentes solutions envisagées (tokamak, stellerateur, fusion inertielle) par la communauté scientifique pour exploiter l'énergie libérée par la fusion.

1.3.1 Le phénomène physique

Par définition, la fusion thermonucléaire est une réaction exothermique⁹ dans laquelle des noyaux atomiques légers¹⁰ fusionnent pour former un noyau plus lourd. L'énergie libérée ΔE se déduit de la différence de masse par la relation $\Delta E = \Delta m c^2$, c étant la vitesse de la lumière et Δm la différence de masse entre réactifs et produits. Par exemple, le soleil (les étoiles en général) est un gigantesque « réacteur » réalisant la fusion de façon continue. Néanmoins, la réaction du fusion est exigeante dans le sens où il faut arriver à vaincre les forces de répulsion atomique entre les noyaux légers, permettant à ces derniers de s'assembler.¹¹ Ceci peut être réalisé en fournissant une très

⁷ Malgré le souci d'être bref, cette partie nécessite environ 10 pages. Les références de la page 23 donnent au lecteur intéressé une image approfondie.

⁸ Le lecteur intéressé à une approche légèrement moins qualitative peut consulter la référence [14] pour un exposé du niveau du premier cycle universitaire, ou à la référence [15] pour un ouvrage didactique de niveau équivalent au deuxième cycle universitaire.

⁹ C'est-à-dire qui libère de l'énergie sous forme de chaleur.

¹⁰ Dans ce contexte, un atome léger est par définition un atome de nombre atomique inférieur à celui de fer Fe^{56} . Soit Z le nombre atomique de cet atome, alors si $Z < 56$, cet atome peut donner lieu à une réaction de fusion, tandis que si $Z > 56$, il peut donner lieu à une réaction de fission.

¹¹ En fait, dans le cas particulier des réactifs $D + T$ où la fusion se produit lorsque les noyaux respectifs sont à une distance inférieure à $3.15 \cdot 10^{-15}$ mètres, il faudrait une énergie d'environ 400 keV pour vaincre la barrière de potentiel répulsif. Cependant, la réaction se produit déjà pour des énergies de l'ordre de quelques dizaines de keV, grâce au phénomène quantique appelé "effet tunnel".

grande énergie aux atomes, i.e. de grandes températures de l'ordre de la centaine de millions de degrés Kelvin. A de telles températures, la matière se trouve dans un quatrième état,¹² dit état plasma. De façon intuitive, l'état plasma correspond à un gaz complètement ionisé, i.e. à une « soupe » d'électrons et de noyaux.¹³ En effet, la température est tellement élevée que les électrons des atomes sont « arrachés » à leurs noyaux. Ainsi, dans un plasma les noyaux ont une probabilité bien supérieure d'entrer en collision que lorsqu'on prend deux noyaux isolés pour les fusionner. L'état plasma permet donc d'obtenir un grand nombre de collisions entre noyaux par unité de temps.

Le calcul de la probabilité de réaction de fusion pour différents réactifs dégage plusieurs réactions envisageables dans l'optique d'une application technique. La plus favorable, exigeant une relativement faible température par comparaison aux autres réactions, est celle à base de D et T (cf. Figure 1 p.4).¹⁴

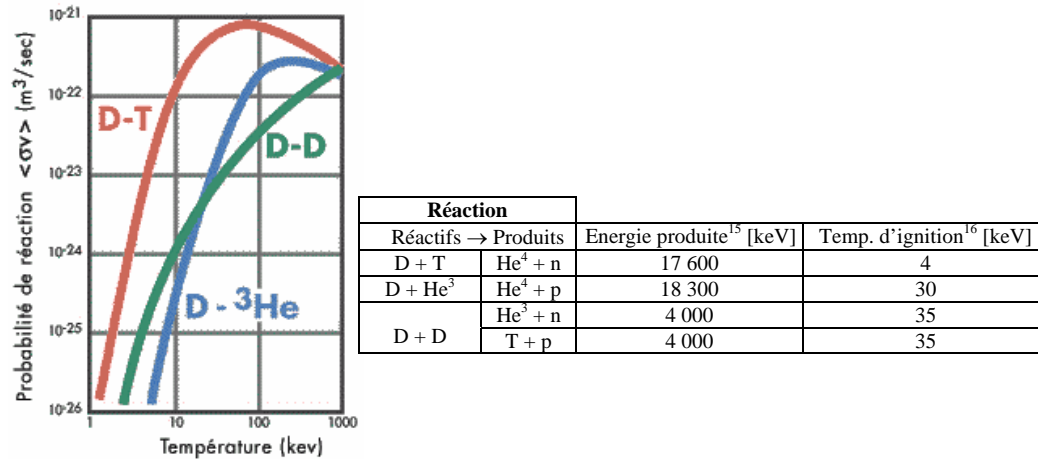


Figure 1: Probabilités de fusion de différents réactifs (source réf. [2])

1.3.2 Quels sont les avantages de la fusion par rapport aux autres énergies?

Quels arguments rendent la fusion plus intéressante que la fission ou d'autres énergies naturelles ou renouvelables ? Nous montrons que la fusion a des avantages que ne possède aucune autre source d'énergie actuellement réaliste.

- **Une centrale à fusion peut-elle présenter les mêmes dangers qu'une centrale à fission conventionnelle ?** La réponse est négative. A fin de démontrer cette affirmation, il faut se poser la question suivante : quelle est la différence entre la fusion et la fission ? Pour cela, commençons par expliquer le phénomène physique de la fission. Prenons par exemple un noyau d'uranium 235 (réaction à la base des centrales nucléaires). La réaction de fission se

¹² Nous ne considérons ici que les états solide, liquide, gaz, plasma, sans parler de l'état supraconducteur et de la superfluidité.

¹³ Une définition plus rigoureuse de l'état plasma se base sur les 4 conditions suivantes: 1) un plasma est un gaz ionisé 2) ce gaz doit être macroscopiquement électriquement neutre 3) soit λ_D la longueur de Debye, n_o la densité de charge électrique, alors cette densité doit être élevée dans le sens où $\lambda_D n_o \gg 1$ (condition assurant l'écrantage de Debye) 4) soit ν la fréquence d'oscillation plasma, τ le temps de libre parcours moyen des électrons, alors l'effet des interactions électromagnétiques doit être supérieur à celui des collisions binaires entre particules dans le sens où $\nu \tau \gg 1$.

¹⁴ Nous notons D pour deutérium et T pour tritium. D et T ne sont rien d'autre que des isotopes de l'hydrogène H, i.e. le D (T) est un atome d'hydrogène avec un (deux) neutron(s) supplémentaire(s), respectivement. L'avantage de la réaction D+T est de nécessiter une relativement faible température. Dans le cas de la réaction D+He³, aucun neutron n'est produit par la réaction, ce qui réduit l'activation de l'enceinte. En effet, l'enceinte contenant le plasma est régulièrement bombardée par des neutrons hautement énergétiques, la rendant lentement radioactive, phénomène appelé "activation" de l'enceinte. Il s'agit d'un problème majeur de la technologie actuelle de fusion. Pour la réaction D+D, l'avantage est que les réactifs sont très abondants et faciles à isoler.

¹⁵ 1 kcal est l'énergie nécessaire pour augmenter de 1 degré la température de 1 litre d'eau, ce contenu énergétique équivaut à 0.01 microgramme de mélange D+T, soit environ $6 \cdot 10^{12}$ réactions.

¹⁶ On définit la température "d'ignition" par la température du plasma pour laquelle la réaction de fusion est auto-entretenu. Une température de 1 eV correspond à environ 11600 degrés Kelvin.

produit lorsque un neutron entre en collision avec l'uranium, produisant d'autres noyaux plus légers, un dégagement d'énergie, et surtout plusieurs autres neutrons. Ces derniers peuvent à leur tour entrer en collision avec un noyau U^{235} , produisant un nouveau dégagement d'énergie et de nouveaux neutrons. Il y a donc une réaction en chaîne qui conduit à une succession de dégagements d'énergie durant un très court intervalle temporel. La difficulté technique de la centrale à fission nucléaire consiste donc à garder constant le nombre de neutrons pouvant créer une réaction, sinon il y a explosion dite atomique. Il est absolument évident que ce problème n'existe pas dans le cas de la fusion thermonucléaire. Au contraire, toute la difficulté réside dans l'entretien de la réaction. En effet, la fusion consiste à unir des noyaux légers pour en former d'autres plus lourds. De plus, les conditions pour faire fusionner deux noyaux (vaincre les forces de répulsion atomiques) requièrent des températures de l'ordre de 100 millions de degrés kelvin, soit environ 10 fois celle du cœur du soleil, condition difficile à maintenir artificiellement sur terre, donc la réaction s'arrête dès l'apparition de perturbations significatives. En résumé, nous avons montré que malgré la forte similitude des mots « fusion » et « fission », les dangers d'explosion associés à la fission dans une centrale de fusion basée sur le principe du confinement *n'existent pas*.

- **La fusion est elle radioactive ?**¹⁷ Pour la réaction à base de D et T, le tritium, seul élément radioactif, est produit à l'intérieur même de l'enceinte du réacteur (cf. Figure 3 p.7). Ceci limite grandement les dangers.

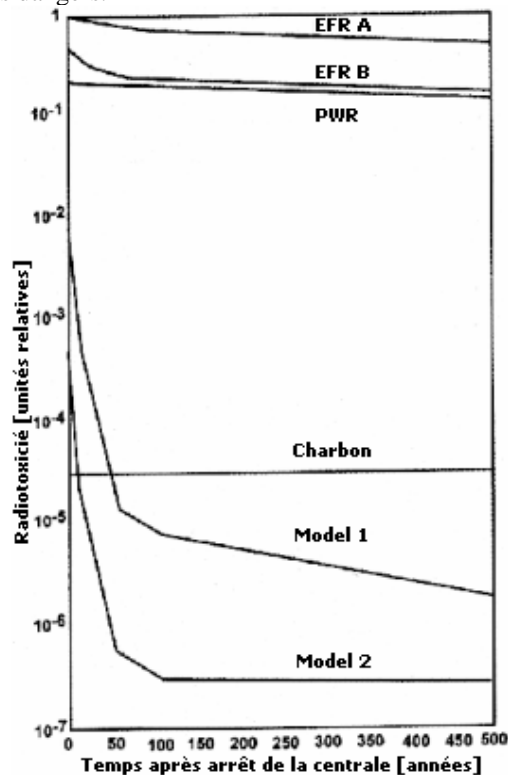


Figure 2: Comparaison de la radiotoxicité de différentes sources en fonction du temps¹⁸

Pour les autres réactions envisageables (cf. Figure 1 p.4), les réactifs et produits ne sont pas radioactifs. Néanmoins, la production de neutrons de haute énergie provoque l'activation de l'enceinte du réacteur (i.e. l'enceinte devient peu à peu radioactive avec le temps). En résumé,

¹⁷ La fission génère de la radioactivité, tandis que la fusion n'est pas radioactive en soi. La radioactivité est une transformation du noyau atomique au cours de laquelle l'atome émet du rayonnement. Les processus de transformation radioactive sont l'émission de particules α (He^4), β^+ (émission d'un positron e^+ et d'un neutrino ν_e) ou β^- (émission d'un électron e^- et d'un anti-neutrino $\bar{\nu}_e$), γ (photon), la capture électronique (capture d'un électron e^- par l'atome, et émission d'un neutrino ν), la conversion interne, l'émission de protons, la fission spontanée. La radioactivité représente un danger pour les êtres vivants dans le sens où la radiation a des effets ionisants et augmente le taux de cancer et de mutations génétiques en général.

¹⁸ On remarque que les centrales à charbon produisent des éléments radioactifs (Thorium), en plus du gaz carbonique. Ces éléments ont une durée de vie très longue, comme le montre la figure (pente nulle). Malgré la faible production radioactive d'une centrale à charbon, cette radioactivité n'est pas négligeable, dans le sens où près du tiers de l'énergie du globe provient de telles centrales (aux Etats-Unis, le charbon produisait 52% de l'énergie en 1993). Cette radioactivité est généralement filtrée. Néanmoins, ce filtrage n'est pas toujours efficace, comme en Chine où l'efficacité est évaluée à 90%. Cette figure est tirée de la référence [4].

la quantité des déchets radioactifs produits peut être comparable en volume à ceux produits par une centrale à fission, à la différence fondamentale que la durée de vie¹⁹ des déchets d'une centrale à fusion est de 100 à 100'000 fois plus courte que celle d'une centrale à fission. La Figure 2 p.5 montre une mesure de la décroissance de la radioactivité pour deux modèles de centrale à fusion et à fission (ainsi qu'une centrale à charbon). Le premier « Model 1 » est basé sur une technologie des matériaux actuelle, tandis que le second « Model 2 » sur la technologie probable lors de la première centrale à fusion. « EFR A », « EFR B » (European Fast Reactor) et « PWR » représentent différents modèles de centrales à fission.

- **Existe-t-il suffisamment de combustible pour la fusion ?** Le deutérium se trouve dans l'eau (H₂O) à raison du rapport D : H de 1 : 6700. Les ressources sont donc, dans le contexte de la consommation humaine, inépuisables.²⁰ De plus, le contenu énergétique est bien meilleur, dans le sens où 1 m³ d'eau contient 34 g de deutérium, d'un équivalent énergétique de 300'000 litres de pétrole !²¹
- **L'énergie de fusion ne sera-t-elle pas trop chère par comparaison aux énergies actuelles ?** Plusieurs études (cf. section 2.2.2 p.12, annexe 5.1 p.25) montrent que l'énergie de fusion sera à terme probablement moins onéreuse que les énergies fossiles et de fission.
- **Pourquoi ne pas développer les énergies renouvelables ou naturelles plutôt que la fusion ?** Comme le montrent le chapitre 2 p.8 et la note 4 p.2, les énergies renouvelables et naturelles (énergie éolienne, solaire, hydroélectrique, géothermique, etc.) ne pourront en aucun cas satisfaire la demande énergétique actuelle et future, celle-ci étant trop forte. Par contre, elles constituent un bon complément au pétrole et à la fission dans l'attente de centrales à fusion.

1.3.3 Les approches pour réaliser la fusion

Actuellement, la recherche en fusion développe deux approches : le confinement magnétique (critère de Lawson²²) et le confinement inertiel.

- Confinement magnétique : tokamak²³ et stellerateur

L'idée de base du tokamak et du stellerateur est la même, seuls les moyens diffèrent. Nous n'entrons donc pas dans les détails distinctifs, et basons notre discussion sur le cas du tokamak, qui représente actuellement l'orientation principale de la recherche. Le mélange de réactifs étant un fluide électromagnétique qui doit être porté à des températures de l'ordre de 100 millions de degrés, l'idée est de confiner ce « fluide » loin des parois du réacteur, à l'intérieur d'un volume dont la géométrie particulière (par exemple un tore) assure à ce fluide une certaine stabilité. Ceci permet de réduire les pertes thermiques, d'augmenter le temps de confinement du plasma, et donc de diminuer l'énergie à fournir pour chauffer le plasma. Le tokamak est donc principalement un

¹⁹ La durée de vie est une mesure du temps qu'il faut attendre pour que l'élément perde sa radioactivité.

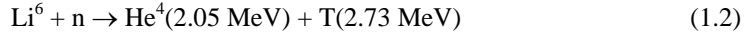
²⁰ Pour la réaction D + T, le tritium, élément radioactif, est produit par une autre réaction se déroulant à l'intérieur même du réacteur (cf. section 1.3.3 p.6). Le nombre d'années des ressources de D et T pour maintenir une consommation énergétique équivalente à celle de 1995 est évalué à 150 milliards pour le D, et 60 millions pour le T.

²¹ Une illustration intéressante est de comparer la quantité de différents combustibles nécessaires pour faire fonctionner une centrale de 1000 MW durant une année. Une centrale à charbon engouffre 2'700'000 tonnes de charbon, avec du pétrole il s'agit de 1'900'000 tonnes, une centrale à fission nucléaire a besoin de 28 tonnes de UO₂, enfin une centrale à fusion aurait besoin d'environ 85 kg de mélange D+T, soit pour D environ 225 m³ d'eau, ce que transportent 8 camions citerne avec remorque.

²² Une condition nécessaire pour réaliser une réaction de fusion auto-entretenu est connue sous le nom de critère de Lawson. Par exemple avec la réaction $D + T \rightarrow He^4 + n$, ce critère donne une condition sur la température, la densité et l'isolation du plasma, pour que la puissance du He⁴ perdue à l'intérieur du plasma suffise à entretenir la réaction de fusion, i.e. à garder la température du plasma au pire constante. Soit P_L la puissance perdue (par rayonnement thermique par exemple) par le réacteur, P_α la puissance fournie par le He⁴ dans le réacteur (les particules He⁴ sont aussi appelées particules α), soit τ_E le temps de confinement de l'énergie (i.e. une mesure de l'isolation thermique du réacteur), soit n la densité du plasma, T la température en électron volt, alors le critère de Lawson dans sa version simplifiée s'énonce comme $P_L = 3 n T \tau_E^{-1} \leq P_\alpha$.

²³ Le tokamak («Toroidalnaya Kamera Magnitnyy Katushkami», ou bien traduit du Russe : « chambre magnétique torique ») admet un enceinte de forme torique. Il existe cependant des recherches sur les «spheromak», dont l'enceinte est de forme sphérique. Néanmoins, malgré des avantages de taille, le problème de confinement du plasma est plus difficile à résoudre. Un tel réacteur, appelé START (Small Tight Aspect Ratio Tokamak) a été construit entre 1988 et 1990. Le successeur de START, un spheromak nommé MAST (Mega Amp Spherical Tokamak), a produit son premier plasma le 15 décembre 1999. La référence [18] propose même des idées concrètes et très élégantes pour la conception d'une centrale à fusion de 1200 MW utilisant un tokamak sphérique. Pour plus de détails, on renvoie à l'annexe 5.1 p.25.

réacteur constitué d'une enceinte à vide de forme torique, symétrique, entourée d'un réseau de bobines magnétiques assurant le confinement et créant un courant à l'intérieur du plasma. Ce courant assure une partie du chauffage du plasma par pertes ohmiques.²⁴ L'enceinte du plasma (cf. Figure 3 p.7) est constituée en partie de lithium Li^7 et Li^6 . Ainsi, les neutrons issus de la réaction $\text{D}+\text{T} \rightarrow \text{He}^4 + \text{n}$ produisent le tritium T (élément radioactif qui, à cause de sa courte durée de vie de 12.3 ans, n'existe pas à l'état naturel) par une des réactions suivantes :



Le tritium est ensuite récolté pour être injecté dans le plasma. L'énergie déposée dans l'enceinte sous forme de chaleur est récupérée par une machine thermique, pour être ensuite convertie en énergie électrique.

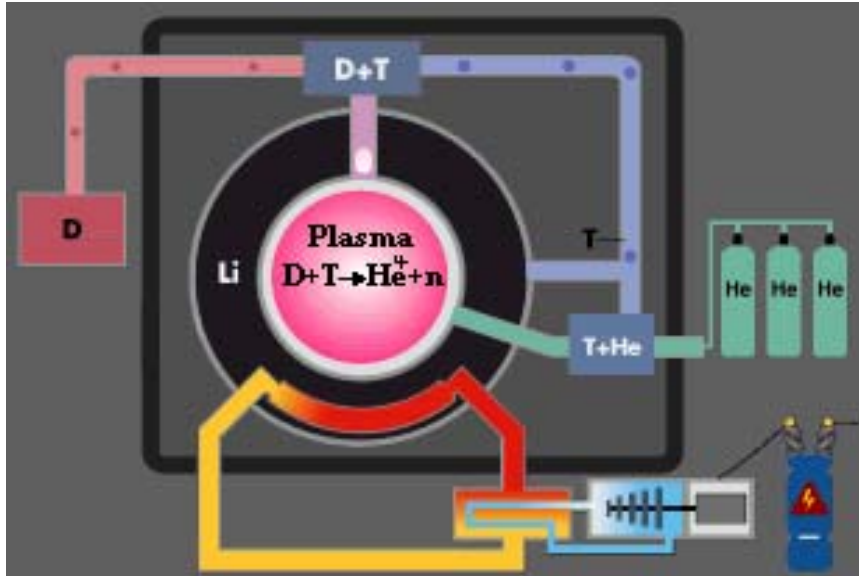


Figure 3: Schéma de principe d'un réacteur à fusion en confinement magnétique (source réf. [2])

- Confinement inertiel²⁵

La différence conceptuelle avec la méthode précédente est de réaliser une suite de réactions de fusion dans un court intervalle temporel, un peu à l'image d'un moteur à explosion. On injecte, à l'intérieur d'une enceinte, une sphère (de diamètre inférieur au micron) de mélange D+T solide. Cette dernière est ensuite comprimée durant un très court instant par un laser pour atteindre une pression comparable à celle du cœur du soleil. Cette implosion provoque la fusion, provoquant ensuite une explosion, dont l'énergie est récoltée sous forme de chaleur dans l'enceinte. En résumé, il s'agit donc de contrôler une succession de mini-explosions thermonucléaires.²⁶

²⁴ La résistivité d'un plasma étant inversement proportionnelle à la température, il faut recourir à d'autres procédés, tels l'absorption d'ondes ou l'injection de particules neutres énergétiques, pour chauffer le plasma.

²⁵ Cette approche bénéficie de fonds supplémentaires par rapport au confinement magnétique dans le sens où il existe des applications militaires associées.

²⁶ Le problème majeur de cette méthode est d'arriver à une implosion satisfaisant certains critères : uniformité de l'attaque de la cible, stabilité hydrodynamique de la sphère en implosion, création d'un point chaud dans la sphère de D-T selon un certain chemin thermodynamique.

2. ANALYSE DU PROBLÈME

2.1 L'urgence

La situation énergétique globale semble à priori confortable, dans le sens où, grâce aux découvertes renouvelées de gisements de pétrole, les réserves n'ont jamais été si grandes. Nous montrons au contraire, après un bref historique de la recherche en fusion qui dégage la lenteur des progrès, qu'il y a une réelle urgence à abandonner les énergies traditionnelles au profit d'une énergie moins polluante et plus abondante, et que la situation énergétique globale (en considérant l'évolution de la répartition géographique de la consommation) n'est pas confortable du tout. Nous concluons alors à l'urgence du développement de la fusion thermonucléaire. Dans un second temps, nous analysons les obstacles politiques, économiques et sociaux à la recherche en fusion, et proposons des solutions.

2.1.1 Bref historique de la recherche en fusion

La réaction de fusion n'a été découverte²⁷ qu'en 1929 lorsque R. d'E. Atkinson et F. G. Houtermans publient un modèle, basé sur la théorie de l'atome de Rutherford et les théories d'Einstein, pour expliquer les réactions à l'intérieur des étoiles : la fusion d'atomes très légers (par exemple de l'hydrogène) produit des atomes dont la somme des masses des produits est plus petite que celle des réactifs. Cette différence de masse est à l'origine de l'énergie radiative émise. Déjà en 1929, la possibilité d'utiliser les réactions de fusion dans le but d'une exploitation énergétique n'échappe pas à certains esprits éclairés.²⁸

En 1932, Rutherford, Walton et Cockroft détectent en laboratoire la capture d'un proton par un atome de lithium 7, par l'intermédiaire de la production de deux particules et d'énergie. Deux ans plus tard, Rutherford, Oliphant et Harteck reproduisent la réaction $D + D \rightarrow \{He^3 + n ; T + p\} + 4 \text{ MeV}$. En 1939 aux Etats-Unis, le premier programme de fusion contrôlée naît grâce à Eastman Jacobs et Arthur Kantrovitz du « Langley Memorial Aeronautical Laboratory ». Ce projet est supprimé peu après par le directeur du laboratoire.

La première (d'une longue série, en passant par la fusion froide) annonce de la production de fusion contrôlée en laboratoire a lieu en mars 1951. Le président de l'Argentine, Juan Perón, annonce alors qu'un scientifique allemand travaillant pour le compte de l'Argentine a réussi à créer une centrale²⁹ à fusion. Ce fait est à l'origine du premier véritable projet de fusion contrôlée. En effet, il s'agit d'une des causes principales qui pousse l'astrophysicien Lyman Spitzer à créer un laboratoire d'étude sur la fusion, qui devient plus tard le laboratoire de physique des plasmas de Princeton. Cette même année, les physiciens soviétiques Andreï Sakharov et Igor Tamm développent ce qui portera le nom de « tokamak ». En 1956, J. D. Lawson énonce son fameux critère (cf. note 22 p.6).

En 1958 est construit, au Royaume Uni, le premier réacteur expérimental de fusion, ZETA (Zero Energy Toroidal Assembly), développé d'abord dans le secret du contexte de la guerre froide. Par la suite, de nombreux réacteurs expérimentaux sont construits (cf. Figure 4 p.9), permettant de se rapprocher sensiblement de la condition du bilan énergétique positif³⁰ ($Q \geq 1$, « breakeven » : l'énergie de fusion produite est égale ou supérieure à l'énergie consommée pour chauffer le milieu) et d'auto-entretien ($Q = \infty$, « ignition » : il n'est plus nécessaire de fournir de l'énergie au système, l'énergie issue des particules He^4 assure l'entretien thermique du réacteur). En 1978, l'Europe finance le réacteur JET³¹ (« Joint European Torus », cf. Figure 4 p.9), qui fonctionne avec la réaction $D + T \rightarrow He^4 + n + 17.6 \text{ MeV}$. JET réalise une puissance de fusion de

²⁷ Les premières réactions de fusion ont eu lieu lorsque l'univers a été assez froid, c'est à dire quelques minutes après le « Big Bang », pour que le deutérium se forme à partir des nucléons d'hydrogène, permettant ainsi la réaction de fusion $D + D \rightarrow He^3 + n$ ou $D + D \rightarrow T + p$. Cette réaction se produit à une température de 35 keV, soit environ 406 millions de degré kelvin, libérant aussi 4 MeV selon la relation $\Delta E = \Delta m c^2$.

²⁸ En effet, Edward Teller raconte, dans une monographie publiée en 1981 (cf. référence [13]), que lorsque George Gamov (à l'époque un jeune physicien russe) a présenté l'article de Atkinson et Houtermans, un membre éminent du parti communiste propose à Gamov l'équivalent financier d'une heure d'éclairage de Leningrad par nuit si ce dernier arrive à produire une réaction de fusion contrôlée en laboratoire.

²⁹ Plutôt que d'utiliser le terme « centrale », il conviendrait de parler d'une installation expérimentale.

³⁰ Dans la suite du paragraphe, on considère uniquement la réaction $D + T \rightarrow He^4 + n + 17.6 \text{ MeV}$.

³¹ Le réacteur JET a permis de réaliser des progrès considérables. Actuellement encore, JET figure parmi les réacteurs expérimentaux de fusion les plus performants. Or, l'année du financement de JET (1978) correspond justement aux crédits de fusion maximaux (cf. Figure 8 p.14).

16.1 MW durant 0.8 seconde et 4.5 MW durant 5 secondes en 1997 avec un facteur Q proche de 1.

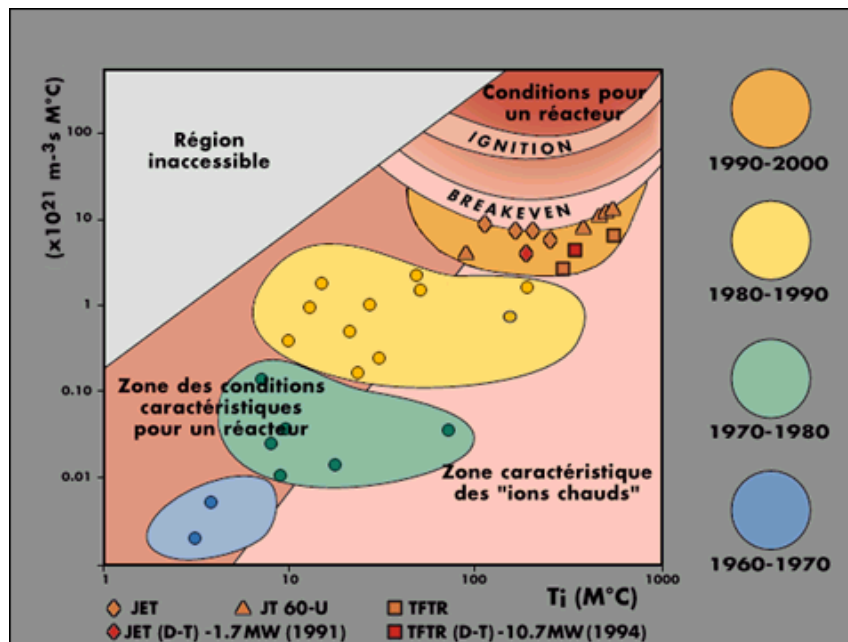


Figure 4: Amélioration en fonction du temps des caractéristiques des réacteurs (source réf. [2])

En 1988 est construit le réacteur JT-60U qui réalise un facteur $Q = 1.25$ en 1998.³² Depuis, de nombreuses expériences ont permis d'obtenir des facteurs Q supérieurs à l'unité, ce qui nous renvoie à un exposé de la situation actuelle de la fusion.

2.1.2 Etat technologique actuel : faisabilité

Actuellement, aucune installation expérimentale³³ n'est capable de remplir la condition d'auto-entretien (ignition³⁴), ni la rentabilité économique $Q \geq 20$. Par contre, le « breakeven » est atteint, nous rapprochant de la condition de rentabilité économique (cf. annexe 5.1 p.25). Il faut souligner dès à présent qu'il n'a pas été découvert d'impossibilité technique à la réalisation de l'ignition. Cependant, il est encore nécessaire d'améliorer de nombreuses techniques³⁵ pour y parvenir.

Le réacteur ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), auquel participent les Etats-Unis, la fédération de Russie, le Japon et l'Europe, devrait théoriquement³⁶ être *le premier réacteur capable d'atteindre l'ignition*, et produire une puissance de fusion de 1500 MW durant des impulsions d'environ 15 minutes. Cependant, comme discuté dans la section 2.2.1 p.12, la construction de ITER a été reportée à une date ultérieure, pour causes financières.

Nous abordons à présent les aspects non techniques de la fusion.

2.1.3 Signification de la consommation énergétique pour le développement

Nous désirons montrer de quelle façon la consommation énergétique est liée au développement des sociétés, ainsi qu'à l'amélioration des conditions de vie. Cela permet de mieux comprendre pourquoi cette consommation va fortement augmenter.

³² La valeur $Q = 20$ est la valeur minimale estimée pour un fonctionnement économiquement rentable, dans lequel 10 à 15% de l'énergie électrique produite serait utilisée pour le fonctionnement du réacteur lui-même, avec une conversion thermique-électrique de 40%.

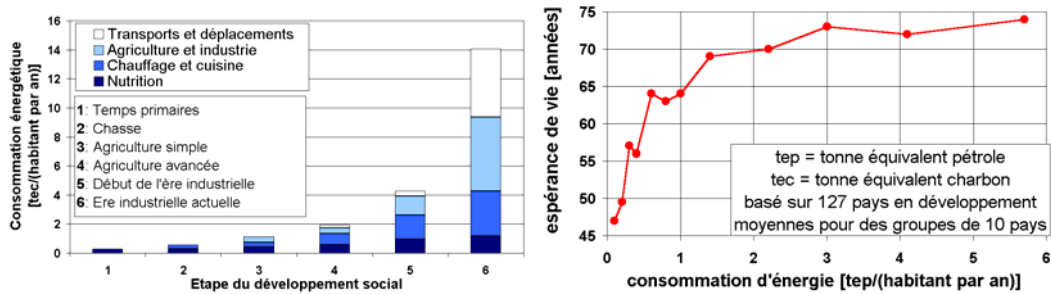
³³ Mentionnons JET (Europe, UK), Nova (USA), ASDEX-U (Allemagne), JT60-U (Japon), Tore Supra (France), TFTR (USA), FTU (Italie), Textor (Allemagne), Gekko (Japon), TCV (Suisse), W7-AS (Allemagne).

³⁴ Remarquons tout de même que les paramètres de fusion actuels du réacteur JET sont éloignés de l'ignition d'un facteur 6 environ, alors qu'aux débuts du réacteur en 1983, ce facteur était d'environ 100.

³⁵ Physique des matériaux, aimants supraconducteurs, technologie du vide, cryogénie, ondes radiofréquence de haute énergie, simulations numériques, transmission de données à haut débit, minimiser l'échappement des neutrons et ainsi l'activation de la structure du réacteur, etc. Le développement des techniques de fusion est donc bénéfique à une multitude d'autres domaines techniques.

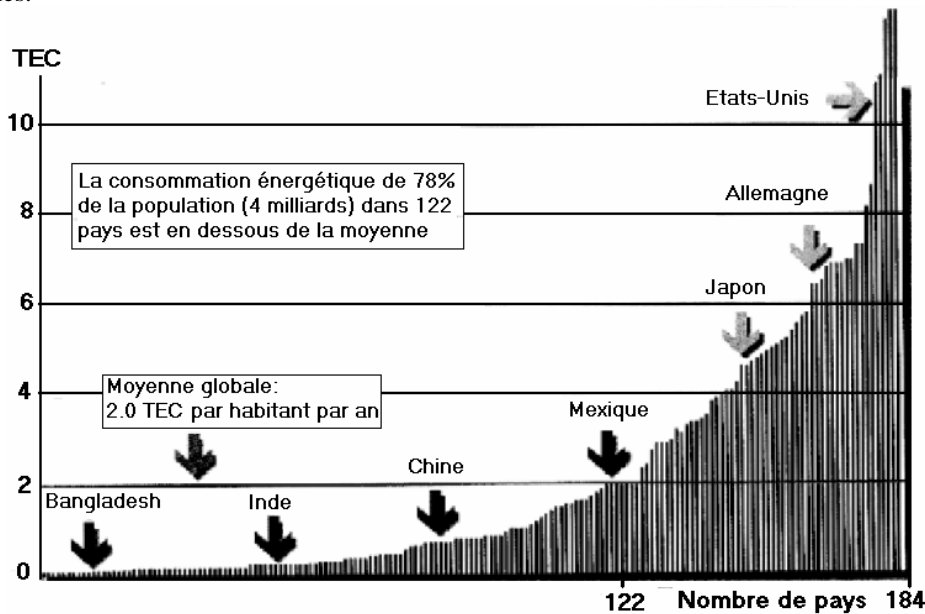
³⁶ Le réacteur ITER est, avec les connaissances technologiques actuelles, tout à fait réalisable.

La Figure 5 p.10 met clairement en évidence que le degré de développement d'une société est proportionnel à sa consommation énergétique. L'être humain accroît son bien être et son efficacité par le biais d'une plus grande consommation énergétique (cf. Figure 5 p.10).



2.1.4 Le besoin de la fusion : situation énergétique globale, locale, actuelle et future

La discussion de la section précédente permet d'arriver au constat suivant. Sachant que les pays en voie de développement et d'industrialisation représentent en 1991 environ 78% de la population mondiale pour environ 35% de la consommation énergétique (cf. Figure 6 p.10), on en déduit que la consommation énergétique globale va fortement augmenter durant les prochaines décennies.



Une autre étude arrive à la conclusion suivante. A 60% de la population mondiale correspond 25% de la consommation énergétique. Cette tranche de population a eu une expansion énergétique annuelle de 5% entre 1987 et 1997, alors que le reste affiche une croissance de 1.5%. En supposant que ces taux de croissance restent à peu près constants durant les 20-30 années à venir, alors la consommation énergétique mondiale augmentera de 50 à 100% dans ce laps de temps.

S'il n'existe alors pas de meilleures ressources énergétiques (i.e. peu polluantes et disponibles en grande quantité) que celles utilisées actuellement, on comprend que la situation énergétique globale s'achemine vers une crise grave, avec comme conséquences possibles une crise écologique, économique et politique.

Démontrons l'affirmation précédente par un exemple concret.³⁹ La consommation moyenne

³⁷ Ces valeurs sont tirées de la référence [11]. La tendance du graphique de droite peut être retrouvée dans le cas de la mortalité infantile et du taux d'analphabétisme.

³⁸ Un graphique plus intéressant serait de combiner la consommation énergétique par pays avec la population de ces pays. Néanmoins, en première approximation et à part certains cas, la population est à peu près inversement proportionnelle à la consommation énergétique.

par habitant par année des pays développés est de 6250 kWh, tandis que la moyenne globale est de 1500 kWh.⁴⁰

PAYS	Canada	Etats-Unis	Japon	Royaume-Uni	Brésil	Chine	Inde
kWh / (habitant · an)	19 000	12 000	7 000	6 000	1 850	500	250

Remarquons que l'Inde a une consommation 6 fois inférieure à la moyenne globale. Un des buts affirmés à court terme (i.e. vers 2020) des pays tels que la Chine et l'Inde est d'atteindre au moins la moyenne globale, sans nouvelle technologie. La réalisation de ce but nécessitera en 2020 l'existence d'un potentiel de production de 450 GW en Inde, et 500 GW en Chine. La répartition de ce panier énergétique est prévue selon la clef suivante :⁴¹

	INDE		CHINE	
	1990 [GW]	2020 [GW]	1990 [GW]	2020 [GW]
Thermique (charbon + pétrole + gaz)	44.5	220	115.0	400
Nucléaire	1.5	30	0.5	45
Hydroélectrique	19.0	180	5.0	55
Sources non conventionnelles	-	20	-	-
Total	65.0	450	120.5	500

Ce qui représente 500 GW supplémentaires obtenus par les énergies fossiles (soit 5% de la production énergétique globale actuelle), avec les conséquences imaginables pour l'environnement et les ressources. De plus, un raisonnement similaire peut être appliqué à la majorité des pays en cours d'industrialisation. A ce stade, 3 solutions sont envisageables :

1. Chaque nation réduit significativement sa consommation énergétique
2. On limite la consommation énergétique des pays en voie d'industrialisation
3. On développe de nouvelles technologies telles que la fusion.

Très clairement, le premier choix est idéaliste et irréaliste. Le second est pris très au sérieux par les pays développés (cf. référence [16]). Mais une telle décision serait des plus dangereuses. En effet, que feraient ces pays si on leur interdit l'utilisation du charbon, si le pétrole et le gaz sont trop chers, et enfin si l'énergie nucléaire leur est interdite pour des raisons de sécurité ? Le meilleur choix est très clairement le troisième, soit le développement de la fusion thermonucléaire.

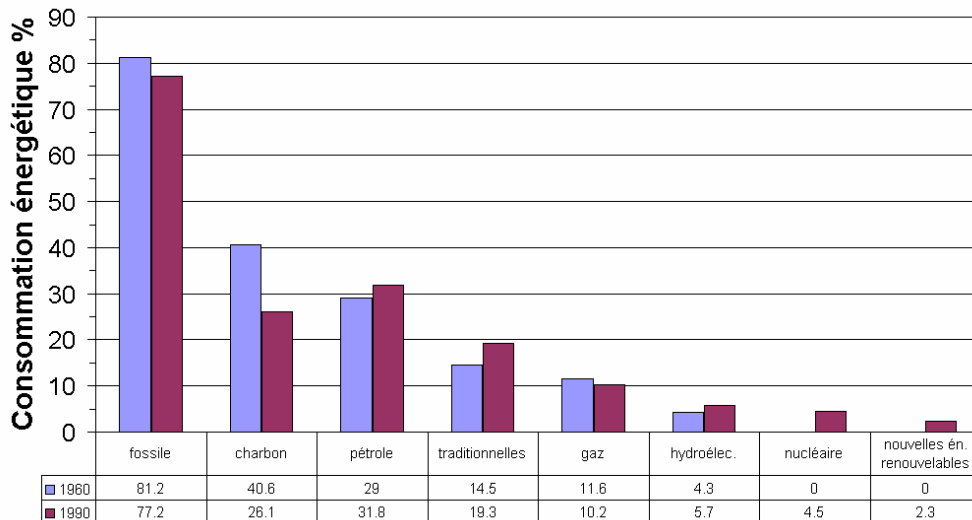


Figure 7: Structure de la consommation énergétique en 1960 et 1990 (source réf. [11])

La structure de la consommation énergétique (cf. Figure 7 p.11) révèle que, de 1960 à 1990 la consommation globale d'énergie fossile est passée de 81.2% à 77.2%, soit une légère diminution grâce principalement à l'émergence des énergies nucléaire, solaire, éolienne, etc. On observe ainsi une légère translation de la consommation vers des énergies moins polluantes⁴².

³⁹ Sauf indication contraire, les chiffres de cet exemple proviennent de la référence [17].

⁴⁰ Les valeurs du tableau sont tirées de la référence [21].

⁴¹ D'après la référence [21].

⁴² L'énergie de fission nucléaire peut être considérée, externalités comprises et pour une production énergétique équivalente, comme moins polluante que le pétrole ou le charbon.

2.2 Les problèmes socio-politiques et questions économiques

Nous exposons dans un premier temps le manque d'engagement financier dans les projets de développement de la fusion. Puis, on démontre la viabilité économique d'une centrale à fusion basée sur la technologie actuelle, ainsi que la grande propreté de cette énergie, dont les externalités sont comparables à celles de l'énergie éolienne. Une tendance intéressante entre les crédits alloués à la fusion et l'industrie pétrolière est dégagée. Enfin, nous proposons une série d'explications possibles au problème financier associé au développement de la fusion.

2.2.1 L'avenir financier de la fusion

Comme discuté dans la section 2.1.2 p.9, le réacteur ITER, auquel participent les Etats-Unis, la fédération de Russie, le Japon et l'Europe, devrait théoriquement être le premier réacteur capable d'atteindre l'ignition, et produire une puissance de fusion de 1500 MW durant des impulsions d'environ 15 minutes. La phase de construction était prévue de 1998 à 2005, pour un coût approximatif de 15 milliards de CHF. ITER aurait été l'étape précédant la construction du réacteur DEMO (initialement prévue autour de 2020), qui aurait permis de démontrer la faisabilité d'une exploitation commerciale de l'énergie de fusion, vers 2050. Malheureusement, en octobre 1998 la construction de ITER s'est vue reportée à une date ultérieure, car le congrès américain a jugé le coût trop élevé,⁴³ le bas prix du baril de pétrole de l'époque facilitant très certainement une telle décision. Une version moins performante du réacteur est à l'étude depuis, reportant ainsi le début de la construction à 2001 au plus tôt. La condition d'ignition sera plus difficile à atteindre à l'aide de la nouvelle version plus petite et moins coûteuse du réacteur (la puissance de fusion est revue à la baisse à environ 500 MW). Ce désengagement est regrettable dans le sens où la situation énergétique actuelle ne semble pas suffisamment catastrophique pour apparaître comme un problème urgent. Si la volonté politique avait été présente dès les années nonante, nous aurions certainement pu disposer de réacteurs commerciaux de fusion avant 2020.

Actuellement, la recherche en fusion traverse une crise dans le sens où les budgets alloués sont en général très bas.⁴⁴ Ces budgets remonteront très probablement lorsque le contexte énergétique aura empiré, mais on ne peut pas prendre le risque d'attendre jusque-là. Ceci amène à la nécessité d'une nouvelle approche de la part de la communauté scientifique.

2.2.2 Etude de la viabilité économique d'une centrale de fusion avec externalités

Peut-on déjà maintenant évaluer le coût à la consommation du kWh d'énergie de fusion ? Cette énergie sera-t-elle meilleure marché que les énergies actuelles ? La réponse est OUI pour les deux questions, ce que nous prouvons dans cette section.

Commençons par montrer que le coût de l'énergie de fusion est, déjà avec la technologie actuelle, inférieur ou égal à celui des autres sources d'énergie. La référence [19] établit une comparaison des coûts pour des centrales d'environ 1000 MW. Définissons « Tech. I » par la technologie actuelle, et « Tech. II » par la technologie disponible dans 30 ans.

	THERMIQUE	FISSION		FUSION À CONFINEMENT MAGNÉTIQUE	
	Tech. I	Tech. I	Tech. II	Tech. I	Tech. II
Puissance MW	2×500	1100	1100	1000	1000
<i>Coût de l'électricité (unités relatives)</i>					
Capital initial (construction)	22	57	30	53	35
Entretien et maintenance	6	13	9	7	7
Combustible et traitement	22	8	7	6	6
Total	50	78	46	66	48

Le coût de l'énergie de fusion est, avec la technologie actuelle, inférieur à celui de la fission, et

⁴³ Remarquons que la somme de 15 milliards de CHF équivaut environ au prix d'un avion furtif américain.

⁴⁴ Exception faite du Japon qui poursuit des efforts intensifs car le pays ne dispose d'aucune ressource naturelle. Les crédits ont été particulièrement réduits aux Etats-Unis depuis 1981 environ (soit dès que le prix du baril de pétrole a commencé à baisser après la guerre du Kippur et la révolution iranienne, cf. section 2.2.3 p.13), condamnant plusieurs projets d'importance (TFTR, DIII-D, etc., le dernier en date étant ITER).

environ 30% plus cher que la combustion de ressources fossiles. Par contre ce tableau ne tient pas compte de deux facteurs cruciaux.

Le premier est les externalités, très importantes pour les centrales thermiques et comparativement négligeables pour une centrale à fusion. La référence [6] fournit de précieuses indications sur le coût de ces externalités.⁴⁵

ENERGIE	EXTERNALITÉS [mECU/kWh]
Pétrole	64.5
Charbon	42.3
Bio gaz	17.5
Gaz	11.3
Biomasse	7.1
Fission nucléaire	5.7
Fusion nucléaire, Tech.I	2.7
Eolienne sur mer	1.3
Fusion nucléaire, Tech.II	1.3
Eolienne sur terre	1.0

Les externalités de la fusion sont donc comparables à celles de l'énergie éolienne, 2 à 4 fois moindres que pour la fission, et 25 à 50 fois plus faibles qu'avec le pétrole... On est donc en droit d'affirmer que l'énergie de fusion engendre un faible coût externe et est non polluante, à condition d'admettre qu'il en est ainsi de l'énergie éolienne !

Le second facteur est la dépendance du prix total envers le combustible, soit 44% pour les énergies fossiles contre 9% pour la fusion. Or le prix des combustibles fossiles est soumis à d'importantes fluctuations, et va inéluctablement augmenter à mesure que les ressources diminuent. Le capital initial du à la construction de la centrale à fusion devrait aussi diminuer fortement, à mesure que les innombrables techniques de pointes incorporées dans une telle centrale deviennent « familières ». De plus, le prix de l'énergie de fusion baissera à mesure que sa production et consommation augmentera.⁴⁶

On conclut donc que l'énergie de fusion est en définitive, externalités comprises, sensiblement moins onéreuse que les énergies fossiles. De plus, cette tendance s'accroîtra avec le temps.

Qu'en est-il de la viabilité économique d'une centrale de fusion ? Dans la mesure où les externalités sont seulement partiellement incorporées dans les coûts d'exploitation de la centrale,⁴⁷ ce qui a été présenté permet d'affirmer que *le coût du kWh d'électricité de fusion sera inférieur à celui de n'importe quelle énergie actuellement connue*. De plus, à condition de lancer les campagnes d'information nécessaires, la fusion n'est pas assujettie à plusieurs craintes de la population. Prenons pour exemple l'impossibilité de l'emballement du réacteur (dans le sens d'une centrale à fission), l'absence de produits de fusion radioactifs (malgré ceux des structures, mais de courte demi-vie, cf. Figure 2 p.5).

Ces considérations permettent donc de renforcer la position de l'énergie de fusion comme source d'énergie peu polluante, bon marché, illimitée et présentant de très faibles risques d'accident.

2.2.3 Comment interpréter l'engagement dans le financement de la fusion

Une relation entre un indicateur objectif et quantifiable, et les subventions allouées à la recherche en fusion thermonucléaire, est le prix du baril de pétrole. La Figure 8 p.14 montre clairement cette corrélation.⁴⁸ De plus, on constate un décalage d'environ 6 mois entre les brutales

⁴⁵ Ces externalités sont calculées en tenant compte de l'approvisionnement et transport du combustible, de la manufacture des matériaux, la construction de la centrale (émissions lors du transport, accidents routiers, accidents lors de la construction), la maintenance de la centrale (émissions radioactives globales, régionales, locales par inhalation, ingestion, au sol et dans le ciel, exposition directe aux radiations, accidents divers de maintenance), entretien (transport des structures, maintenance du site), exposition des vieilles structures, etc.

⁴⁶ Ce phénomène est observé pour l'énergie photovoltaïque. Aux débuts commerciaux de cette forme d'énergie, soit vers 1975, la production mondiale était de 2 MW, pour un prix moyen de 55\$ par kWh. En 1986, cette production est passée à 25 MW pour un prix moyen de 3\$ par kWh. Actuellement, il est possible à Berne (CH) d'être approvisionné en électricité d'origine photovoltaïque pour 0.8 CHF (0.48\$) par kWh.

⁴⁷ La tendance consistant à incorporer les externalités directement ou non en matière environnementale s'accroît de jour en jour (cf. référence [24]).

⁴⁸ Il s'agit ici du budget américain de la recherche en fusion, et non du budget global. Il est fort probable que le graphe obtenu à l'échelle globale soit similaire, avec un réarrangement d'échelles.

variations du prix du baril et le budget de la fusion : il s'agit du temps nécessaire pour prendre les décisions politiques !⁴⁹

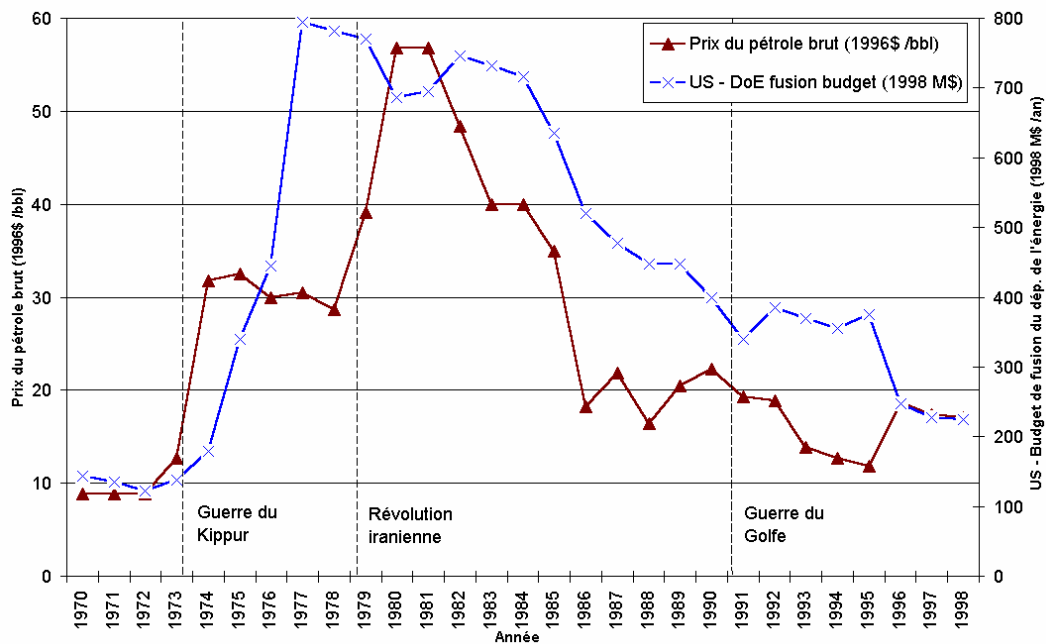


Figure 8: Prix du baril de pétrole et subventions des Etats-Unis à la fusion

Que pouvons-nous en conclure ? La corrélation dégagée met en évidence la relation d'ordre suivante. Une classe d'événements politiques détermine le prix du baril de pétrole. Ceci influence les dirigeants, dans le sens où le budget alloué au département de l'énergie est, a priori, uniquement fonction de la crainte de la trop grande dépendance de l'économie envers les pays producteurs de pétrole. On en conclut que *la question environnementale et des réserves non renouvelables n'existe pas à l'heure actuelle*, et ceci malgré la situation critique à long terme et les discours prometteurs de certains dirigeants. Essayons de comprendre cet état de fait.

2.2.4 Les causes du manque d'engagement financier dans la fusion

Nous avons aisément pu constater à quel point il est urgent de développer une source d'énergie telle que la fusion. Mais alors, pourquoi ce manque d'engagement politique ? Nous allons pouvoir dégager deux catégories de problèmes. Commençons par la seconde qui est essentiellement externe à la nature de la fusion, i.e. aux progrès techniques réalisés et aux démarches des scientifiques. On verra qu'il s'agit de la catégorie regroupant les intérêts politiques principalement. Cette catégorie est la plus problématique, dans le sens où il est extrêmement difficile pour les scientifiques d'y réaliser un changement. En effet, on a démontré par un exemple de la section précédente, que la question environnementale et des réserves non renouvelables n'existe pas à l'heure actuelle dans les programmes réels des politiciens. La réalisation de la fusion passe par une action concrète sur cette classe, pour obtenir les crédits. Par contre, la première catégorie est intimement liée au travail des scientifiques de la fusion. Il s'agit d'une palette de problèmes qui peut être fortement minimisée par l'action et les démarches des scientifiques. Or, bonne nouvelle, nous verrons qu'agir sur la catégorie 1 revient à agir sur la catégorie 2, menant au développement de la fusion. Dans l'état actuel, il n'est pas possible pour les scientifiques d'agir suffisamment sur les dirigeants, ni de réaliser la fusion commerciale plus rapidement sans changement de mentalités. Ce schéma d'action est résumé par la Figure 9 p.15.

⁴⁹ On ne remarque plus de flambée comparable à celle de 1973 par la suite. Ceci est du en partie à la création de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) fondée en novembre 1974, qui compte 23 membres. Son but principal est d'éviter la pénurie pétrolière en obligeant ses membres à constituer des réserves de pétrole.

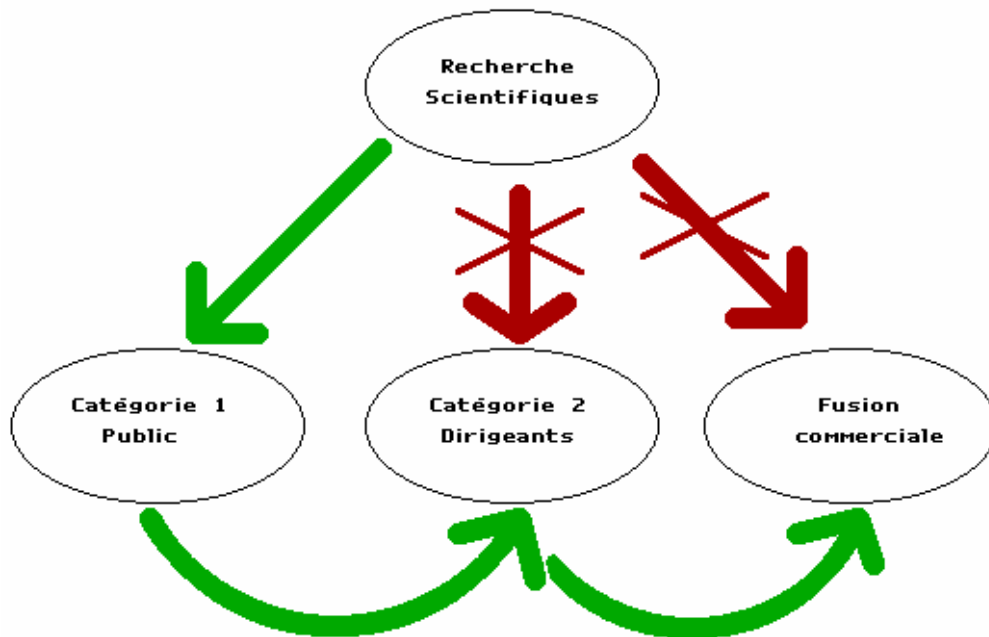


Figure 9: Action des scientifiques sur les catégories pour réaliser la fusion

- Catégorie 2 : dirigeants : points externes à la fusion

Revenons-en au pétrole, ou aux ressources fossiles en général. L'industrie « fossile » représente une voûte clef de l'économie mondiale actuelle. En effet, elle génère d'innombrables places de travail, et des revenus colossaux à ceux qui savent en exploiter les potentialités économiques. La question évidente est la suivante. Est-ce que les magnats de l'or noir, ainsi que les plus modestes ouvriers pétroliers, verraient d'un bon œil que leur dividende, respectivement leur travail, soit menacé par l'apparition d'une nouvelle forme d'énergie sensiblement plus performante sur tous les aspects ? Je vous laisse répondre vous-même à la question. De plus, ces magnats ont le pouvoir politique qui leur est procuré par la richesse. Ne parlons pas seulement de ces richissimes personnes directement impliquées dans le cycle du pétrole, mais plutôt de l'ensemble de l'économie mondiale. Car en effet, l'économie énergétique a des ramifications très profondes. Ainsi, il existe une volonté à maintenir le statu quo, et donc à s'opposer au développement de la fusion, sans pour autant afficher ouvertement ses vues pour ne pas perdre la crédibilité vis-à-vis d'une partie de la population. Mais pourquoi est-ce qu'il existerait une opposition cachée, si la nouvelle industrie de la fusion permettrait de réaliser des progrès technologiques ainsi qu'une hausse du niveau de vie global fantastiques ? A cause de plusieurs points : 1) Les actuels détenteurs du pouvoir et de l'économie craignent la redistribution forcément engendrée par un si profond bouleversement. Ils ne sont pas certains d'obtenir une part de gâteau aussi grande que celle dont ils jouissent actuellement. 2) Est-on certain que l'industrie de fusion remplacera tous les postes de travail perdus par la désuétude des énergies fossiles ? Nous voyons ainsi qu'un capitalisme exacerbé est un frein important au développement de la fusion.

Une autre cause du manque d'engagement est le trop long terme. En effet, les scientifiques parlent souvent d'un horizon de 50 ans avant de disposer de réacteurs commerciaux de fusion. Il semble que les scientifiques soient trop honnêtes avec leurs prévisions. En effet, le délai de 50 ans correspond au contexte actuel, i.e. le manque d'engagement. Mais il serait possible de disposer de tels réacteurs dans moins de 20 ans, avec un réel engagement financier. Revenons-en au trop long terme. Le problème central est que les décideurs politiques n'acceptent pas toujours d'avoir des perspectives au-delà de leur date d'élection. De plus, qui seront les dirigeants dans 20 ou 50 ans ? En tous cas pas les détenteurs actuels du pouvoir, donc pourquoi investir dans une cause dont on ne profitera pas des fruits ?

Remarquons encore qu'il existe un indicateur pertinent des progrès réalisés en fusion, ainsi que du dilemme financier. En effet, la question qui se pose actuellement en général à propos de la fusion c'est « Combien ça va coûter ? », et non plus « Est-ce que c'est possible ? »...

- Catégorie 1 : public : à cause de la fusion

Il s'agit d'une classe d'obstacles intimement liée à la nature de la recherche en fusion. Commençons par le coût exorbitant de cette recherche. L'engagement financier existe

actuellement, mais est largement insuffisant. Les coûts exorbitants en fusion découragent les investissements : quel investisseur apprécie que ses 10 millions de dollars soient considérés comme une goutte dans une mare ? On estime à 50 milliards de dollars le coût total de la recherche en fusion de 1990 à 2010. Par contre en comparaison de l'enjeu, cette somme n'est absolument pas excessive, car le développement de cette technologie satisfera aux besoins énergétiques de la planète pour une durée indéterminée, et permettra d'améliorer sensiblement la qualité de vie.

Un autre thème est la relation de confiance entre la communauté des chercheurs en fusion et la population. En effet, dans les années 1950, il a été affirmé à plusieurs reprises que la fusion commerciale serait développée dans moins de 30 ans.⁵⁰ Or 50 ans se sont écoulés, et la communauté scientifique affirme qu'il en faudra encore 50. Les scientifiques qui ont à l'époque annoncé ce premier délai ont pu bénéficier de certains crédits débloqués suite à l'euphorie provoquée par une telle annonce à court terme. Mais c'était sans compter sur le contexte économique et l'empire de l'or noir, qui fait de son mieux pour laminer de pareilles percées scientifiques.

La fusion possède aussi un nom bien peu flatteur. En effet, pour la grande majorité du public, les mots « fusion » et « fission » sont trop similaires pour pouvoir être distingués.⁵¹ Ainsi, la fusion jouit malencontreusement des peurs associées à la fission, ainsi que de souvenirs tels que Tchernobyl. Aussi longtemps que ce discernement n'existe pas, chaque nouvel accident d'une centrale nucléaire relaté par les journalistes ne fait qu'aggraver cet état de fait. Ce public ignore tout des avantages de la fusion. Le schéma conceptuel peut être caricaturé par : « fusion = fission = Tchernobyl ». Par expérience personnelle, j'affirme que cet état de fait reste vrai même pour des universitaires de formation non scientifique. En effet, sans toutefois généraliser, j'ai constaté leur ignorance de la situation énergétique globale dans le sens où on m'a affirmé qu'il n'existe pas d'autre alternative (et qu'aucune autre alternative n'est envisagée) que l'énergie solaire, et que cette énergie suffirait à satisfaire la demande.

Un problème supplémentaire associé à la fusion est que la réalisation du but n'implique pas de découverte scientifique majeure. Les progrès se font par petits pas, représentés par les améliorations techniques d'une multitude de domaines différents. La fusion ne bénéficie donc pas des retombées médiatiques potentielles que procureraient une découverte majeure.

Résumons-nous. La population est mal informée sur la situation énergétique, ainsi que sur la fusion, qui jouit de préjugés malencontreux. La communauté scientifique a le pouvoir d'informer le public, donc de réaliser une opération fructueuse sur la catégorie 1 (cf. Figure 9 p.15). Ce changement est alors à même de modifier la ligne d'action de la catégorie 2, qui est très sensible au pouvoir, lequel lui est fourni par la catégorie 1. Ainsi, les scientifiques seraient capables de se procurer des crédits supplémentaires par action indirecte, et de réaliser la fusion commerciale plus rapidement.

2.3 Nouvelles approches pour relancer le financement de la fusion

Proposons quelques approches plus concrètes qui doivent être entreprises par la communauté scientifique pour relancer le financement de la fusion. Nous rappelons avoir démontré que dans le contexte qui nous intéresse, l'intérêt principal des dirigeants demeure en fait la finance et le pouvoir. Actuellement, la clef réelle du problème est la méconnaissance de la fusion par le public.

2.3.1 Information du grand public

Tout d'abord, un minimum de culture s'avère nécessaire. Le grand public devrait connaître le contenu du rappel théorique de ce rapport (cf. section 1.3 p.3), ainsi que du contexte énergétique (cf. section 2.1.4 p.10) et de la viabilité économique de la fusion (cf. section 2.2.2 p.12, annexe 5.1 p.25). Cela représente peut-être beaucoup d'informations, et est un souhait trop idéaliste. Restreignons-nous alors à un objectif plus modeste. Ouvrons le débat public sur la fusion. Essayons de faire en sorte que le public en parle, de montrer les potentialités de cette forme d'énergie. On ne peut pas rester indifférent devant les comparaisons des rendements énergétiques de la fusion et des énergies fossiles, au contraire, cela interpelle (cf. note 21 p.6). La science profite toujours d'un intérêt certain du public, à condition que ce public comprenne de quoi on

⁵⁰ Lors de la première conférence internationale sur les applications pacifiques de l'énergie nucléaire de Genève en 1955, Homi Bhabha (physicien indien responsable de la mise en œuvre de l'énergie nucléaire en Inde, préside cette conférence) déclarait que la fusion serait développée en deux décennies.

⁵¹ Ceci est vrai pour les francophones et anglophones, mais pas pour les germanophones par exemple. En effet, les traductions allemandes de fission et fusion sont "Kernspaltung" et "Kernfusion" respectivement.

parle. Exploitions cet avantage qu'a la science. Comment ? Commençons simplement par de la publicité, à la télévision et dans les journaux. Un grand pas sera déjà réalisé lorsque la population se posera des questions sur ce que représente la fusion. Bien sur, les scientifiques ont plus besoin de cet argent pour le financement de leurs expériences que pour informer le public. Mais est-ce que les retombées financières ne seraient-elles pas, finalement, plus grandes en informant la population, grâce à la relation dédagée dans le chapitre précédent ? Dans un second temps, cette campagne publicitaire devrait être accompagnée d'une offre concrète d'électricité de fusion (cf. annexe 5.1 p.25).

Nous avons vu que la fusion jouit de sérieux préjugés (« fusion = fission = Tchernobyl ») à cause de la ressemblance malencontreuse des mots « fusion » et « fission », ainsi que de l'existence du mot nucléaire. Ce genre de ressemblance peut être plus puissant que beaucoup d'efforts informatifs. Comment faire alors ? Faisons comme dans le cas de la tomographie en résonance magnétique nucléaire (RMN), renommée « imagerie par résonance magnétique » (IRM). En effet, le grand public a beaucoup de peine à accepter la sécurité des méthodes médicales de RMN à cause du mot « nucléaire », alors même que la tomographie RMN est une méthode non intrusive, ne présentant pas les dangers de la radiographie aux rayons X. Cette dernière méthode est pourtant communément acceptée, sans questions ni craintes. Proposons un autre nom pour la fusion, scientifiquement moins précis, mais jouissant de préjugés psychologiques favorables. Par exemple, utilisons le mot « réunion énergétique », scientifiquement non optimal mais correct, et par contre très « à la mode » !

Pour informer le public, il est aussi nécessaire que les chercheurs en fusion apprennent à lui parler de façon simple, et comprennent ce qui l'intéresse. Ils doivent arriver à expliquer ce qu'ils ont réussi à obtenir de façon à intéresser le public, i.e. toujours dans l'optique de la réalisation d'une centrale à fusion. Prenons par exemple la caricature suivante: il n'y a aucun intérêt à savoir qu'il a été possible d'obtenir un facteur β normalisé de 8.2 avec un courant plasma de 31 MA et un rapport de la densité sur la densité de Greenwald de 0.71. Par contre, l'idée plus concrète est de révéler que l'installation produit 1000 MW durant par exemple 1 seconde, et donc que l'on produit bien de l'énergie de fusion ! Un renseignement encore plus intéressant est la comparaison avec les centrales conventionnelles. Une grande quantité de « détails », malgré tout centraux, comme quoi il est nécessaire de dépenser bien plus que 1000 MW pour chauffer le plasma, ou bien le paramètre β , etc., viennent ensuite seulement.

Un autre aspect qui peut décourager et désintéresser consiste à répéter que l'horizon de la fusion commerciale est de 50 ans. Cette affirmation n'est d'ailleurs pas tout à fait correcte. En effet, il est techniquement possible de construire une centrale de fusion actuellement (la technologie nous le permet, par exemple ITER ou l'annexe 5.1 p.25), mais elle ne sera pas rentable dans le sens où le prix du kWh sera très cher. L'horizon de 50 ans correspond à une centrale commerciale à prix compétitifs réalisant l'ignition, mais il est actuellement déjà possible de produire de l'énergie de fusion. Les reste des développements, ceux qui prendront beaucoup de temps, consiste à améliorer la rentabilité et promouvoir cette énergie.

2.3.2 Assurer à la fusion un regain de crédibilité

L'énergie de fusion souffre du manque de crédibilité au niveau de plusieurs organisations internationales. La campagne d'information évoquée au chapitre précédent permettra aussi de résoudre ce problème. Plusieurs ouvrages de référence sur l'avenir énergétique ne mentionnent même pas la fusion. Par exemple, la référence [11], excellente par ailleurs, ne se réfère même pas à la fusion thermonucléaire dans ses 368 pages. La fusion n'apparaît ainsi pas comme une énergie potentielle du 21^{ème} siècle, et les auteurs n'ont pas envisagé la possibilité du développement d'une telle nouvelle énergie. Cela illustre parfaitement le manque de crédibilité associé à la fusion. Ce genre de lacunes ne doit pas se produire, et le regain de crédibilité par une meilleure information est essentiel. Ceci d'autant plus que, des projets concrets basés sur la fusion, attrayants écologiquement et financièrement, voient le jour (cf. annexe 5.1 p.25).

2.3.3 Mettre la fusion sur le marché et bénéficier des rouages de l'économie

Une autre méthode pour relancer l'intérêt associé à la fusion ainsi que son financement, consiste à utiliser le marché. La construction de petits réacteurs permettrait de prouver la faisabilité de l'énergie de fusion. Par suite, il est nécessaire de mettre au plus vite cette énergie sur le marché, pour qu'elle soit soumise à la compétition, facteur évolutif central. Un exemple d'un tel réacteur, dont la construction n'est pas en cours pour la simple raison de l'absence de financement (le réacteur coûterait environ 12.5 milliards de CHF), est le tokamak sphérique de Culham en

Angleterre, qui serait à même de produire de l'électricité à des prix concurrentiels (0.58 CHF par kWh) tout en présentant des attraits financiers de taille pour les investisseurs (cf. annexe 5.1 p.25).

Dans un monde idéal, la construction de ITER serait une priorité. Malheureusement, comme nous l'avons constaté, notre monde est loin d'être idéal. C'est pourquoi, j'affirme que *la construction de ITER n'est plus une priorité*.⁵² En effet, ce réacteur expérimental arriverait à faire progresser considérablement la science, mais peu l'opinion public. Or, la priorité actuelle (cf. schéma d'action de la Figure 9 p.15) est d'informer et convaincre la population. Il faut donc impérativement construire au moins une centrale de fusion (par exemple similaire ou moins puissante que celle de Culham, cf. annexe 5.1 p.25), et mettre l'électricité produite sur le marché. Il s'agit donc d'une réorientation : compte tenu du contexte, la fusion progressera plus rapidement en démontrant sa faisabilité et exploitabilité commerciale qu'en réalisant des installations purement scientifiques.

⁵² Le but ultime des réacteurs de fusion est d'obtenir l'ignition, ce que devrait réaliser ITER durant des impulsions finies. Mais pourquoi focaliser sur ce but alors que la condition de rentabilité économique $Q \geq 20$ peut actuellement être réalisée en continu (cf. annexe 5.1 p.25), permettant la réalisation de réacteurs commerciaux ?

3. EXTRAPOLATIONS ET CONCLUSION

Après avoir exposé le contexte et la problématique (cf. chapitre 1 p.1, section 2.1 p.8, section 2.2 p.12), puis une ligne d'action (cf. section 2.3 p.16), nous proposons dans ce chapitre des extrapolations sous forme de scénarios futurs sociétaux, énergétiques et politiques. Nous avertissons donc le lecteur qu'il s'agit d'une partie *particulièrement subjective*, mais qui dégage des axes de réflexion interpellants.

3.1 Scénarios envisageables

Commençons par le scénario le moins spéculatif, et le plus probable. Dans ce scénario la fusion ne joue qu'un rôle mineur. Pour cela, on se base malheureusement sur des projections pessimistes. En effet, l'être humain ne prend que rarement, avant qu'il ne soit trop tard, des décisions susceptibles de réduire sa puissance politique ou économique, décisions allant donc dans un but différent de la croissance de ces mêmes intérêts. Il est fort probable que le pétrole reste indispensable durant le 21^{ème} siècle (cf. note 2 p.2). Par contre, la part des énergies renouvelables va croître fortement (cf. Figure 7 p.11). Les réserves pétrolières vont diminuer et le coût augmenter. La demande énergétique des pays en voie de développement va augmenter probablement jusque vers 40% de la consommation globale. Par contre, le surendettement des pays du tiers monde sera maintenu, et donc leur accès aux énergies fossiles devenues plus chères va être restreint. Ceci sera à la base de tensions politiques. De plus, l'Occident restera un otage des pays producteurs de pétrole du Golfe, générant de nouvelles tensions politiques. On prévoit que cette escalade des prix aura lieu avant 2050. Ce problème sera encore aggravé car vers 2050 les trois quarts de la population mondiale seront urbanisés. Ainsi, les conditions de vie (logement, assainissement, qualité de l'eau et de l'air, soins médicaux, mobilité, etc.) ne peuvent être maintenues que si la consommation énergétique augmente fortement. Or justement, l'accès aux ressources énergétiques sera problématique. Les conséquences écologiques seront graves : émission de gaz carbonique et effet de serre, élévation de la température et du niveau de la mer, régions entières submergées (Bangladesh), migrations de populations, famines, etc. Des efforts seront fournis pour découvrir de nouveaux grands gisements de pétrole, mais probablement en vain. En effet, les investissements consentis pour découvrir de nouveaux gisements ne cessent d'augmenter, tandis que les gisements pétroliers découverts forment une gaussienne centrée sur les années 1960 (cf. Figure 10 p.19).

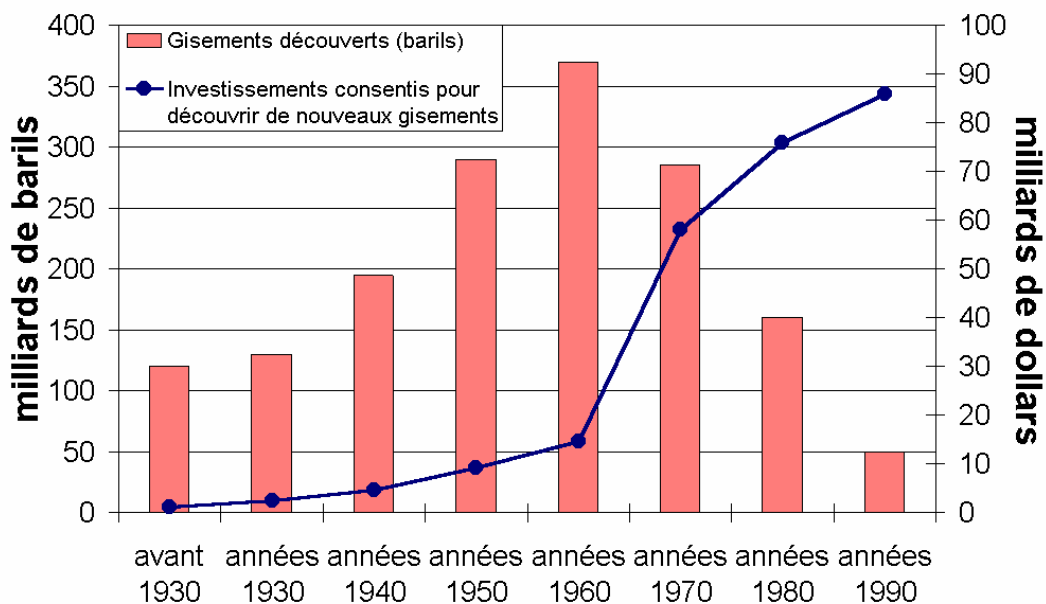


Figure 10: Investissements consentis et gisements découverts (source ref. [20])

Les impôts à la consommation énergétique grimperont, pour tenir compte des externalités non comprises dans le prix du marché. Peut-être même que certains gouvernements introduiront, à l'image de la Chine en matière de natalité, des quotas de mobilité. Par exemple, la population se

verra attribuée une limite supérieure de déplacements en fonction du niveau social. Ainsi, la possibilité de prendre des vacances à l'étranger ne sera plus uniquement une question financière. Il s'agit donc d'un retour vers une économie planifiée au détriment de la libéralisation. C'est seulement à ce stade que naîtra la volonté politique sincère de développer la fusion. Les politiciens qui présenteront alors au public la fusion thermonucléaire comme l'unique alternative seront peut-être perçus comme des génies, visionnaires et sauveurs de l'humanité. Leur mandat sera renouvelé. A présent, on envisage une bifurcation au scénario de base. Personnellement, j'opte pour la première version, plus optimiste, que voici.

1. On suppose que la clef de répartition énergétique ne changera pas significativement jusqu'à ce que les réserves de pétrole soient presque totalement épuisées. Néanmoins, les nouveaux gisements, quoique de mauvaise qualité et chers, découverts dans les régions difficiles d'accès, suffisent à satisfaire les besoins de l'industrie pétrochimique. Les tensions politiques ont mené à des guerres économiques, des embargos commerciaux, et éventuellement des guerres non atomiques. Les conséquences écologiques sont catastrophiques dans le sens évoqué précédemment. Le climat s'est réchauffé, menant à des modifications graves de l'écosystème terrestre, des famines, des épidémies, des exodes, etc. Néanmoins, l'expérience géophysique globale ainsi réalisée ne mène pas, à long terme, à des modifications menaçant le développement de l'espèce humaine. Les pays développés accusent un certain ralentissement de leur développement social, économique et technique. Ainsi, la fusion est mise en œuvre peu après 2050, avec de gros moyens financiers. Les centrales à charbon de Chine, des Etats-Unis, etc. sont remplacées au profit de centrales à fusion. Il en va de même pour les autres centrales à combustible fossile. Les pays développés interdisent aux pays en développement le recours aux énergies fossiles, et y soutiennent financièrement l'implantation de centrales à fusion. Des recherches sont entreprises pour remplacer les moteurs à explosion, en se basant sur des « piles » dont le procédé de fabrication requiert une grande quantité d'énergie (ce qui est adapté à l'énergie de fusion).
2. La seconde branche de bifurcation est très similaire à la première, à la différence près de l'impact sur l'environnement, et éventuellement d'un changement de mentalité plus tardif. En effet, il est possible que les conséquences de notre expérience géophysique globale irréversible soient particulièrement dramatiques. Par conséquent, on peut imaginer un bouleversement de l'écosystème terrestre tel qu'il empêche, durant une période indéterminée, le développement de l'espèce humaine, et engendre directement ou non la décimation de la population. Je ne pense pas que l'espèce humaine sera menacée. Par contre, une rétrogradation du degré d'avancement global de nos civilisations, ainsi qu'un arrêt du développement technologique et social à plus ou moins long terme sont à craindre.

Le second scénario, plus optimiste mais selon moi sensiblement moins probable que le précédent, table sur une action concrète de la fusion thermonucléaire. La première étape consiste en un travail de la communauté scientifique pour informer la population (cf. section 2.3.1 p.16), campagnes limitées aux pays développés dans un premier temps. Ceci permet un regain de crédibilité de la fusion, et par action de la population (cf. Figure 9 p.15) débloque les fonds nécessaires à la construction d'au moins une centrale de fusion commerciale (par exemple similaire à celle décrite dans l'annexe 5.1 p.25) rapidement (dans les 10 ans au maximum). L'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), dont les membres doivent constituer des réserves de pétrole pour minimiser les effets d'une crise, a le pouvoir d'ordonner autoritairement la réduction de la consommation pétrolière de ses membres, ainsi que de changer d'énergie dans la mesure du possible. Par conséquent, il faudra que l'AIE s'y prenne suffisamment rapidement pour permettre aux économies nationales de réorienter leur consommation dans un moindre mal. Il faudra aussi diversifier les origines géographiques des énergies fossiles utilisées et continuer à promouvoir les énergies nouvelles, dont la fusion principalement. Les premiers réacteurs construits, les retombées seront positives auprès de la population qui aura alors pris conscience du véritable potentiel de la fusion. Grâce à la campagne d'information, une partie de la population accepte de payer légèrement plus cher pour l'utilisation de cette énergie. Ceci permet des retombées financières positives, qui favorisent encore le développement de la fusion et abaissent les prix grâce aux recherches améliorant la technique des centrales. A ce stade, soit vers 2020, la nouvelle orientation de la politique énergétique est définitivement favorable à la fusion. Ainsi, grâce à cette réorientation économique en douceur, il est probable que l'industrie pétrochimique puisse encore disposer de ressources durant une longue période. Les conséquences écologiques et les tensions politiques (Nord-Sud, pays en développement et développés) peuvent ainsi être minimisées.

Supposons que la fusion soit enfin développée, et sa viabilité économique prouvée. On peut alors se poser une question légitime. Il est clair que le coût d'une centrale à fusion thermonucléaire

sera dans un premier temps très élevé. Alors, est-ce que les pays en voie de développement pourront acquérir une telle centrale ? Certainement pas. Ces pays auront alors la possibilité d'importer de l'énergie de fusion. Mais pour un nombre non négligeable d'entre eux, l'importation sera toujours difficile pour des raisons financières ou simplement de proximité avec un pays exportateur. Ainsi, alors que l'Europe, le Japon, les Etats-Unis, le Canada et d'autres, disposeront de centrales de fusion, les pays en voie de développement continueront d'utiliser principalement des ressources naturelles. Il faut espérer que l'implémentation dans les pays tels que l'Inde, la Chine ou le Bangladesh, ne sera pas excessivement tardive. Ce délai ne fait que rendre le développement de la fusion plus urgent. Des recherches devront donc être poursuivies pour améliorer la technique du réacteur et en diminuer les coûts. Cette réflexion montre que, malgré l'existence des premières centrales, les chercheurs et ingénieurs ne devront pas pour autant relâcher leurs efforts ! De nouveaux budgets devront être alloués, et le travail poursuivi. Mais cela ne devrait à priori plus présenter un grand problème politique car à ce moment l'énergie de fusion aura démontré son efficacité.

Permettons-nous de rêver un peu. Quel serait l'impact sur la société future de l'énergie de fusion thermonucléaire non polluante, illimitée, bon marché ? Dans un premier temps, les réacteurs basés sur la réaction du D+T seront développés. Puis arriveront les réacteurs à base de D+D (cf. Figure 1 p.4), nécessitant une température près de 9 fois supérieure à celle de la réaction précédente. L'avantage est alors de disposer d'une quantité réellement illimitée de produits (le D se trouve dans l'eau à raison de 1 atome de D pour 6700 atomes de H), éliminant aussi tout réactif radioactif (i.e. le tritium). De nouveaux matériaux seront développés, limitant l'activation du réacteur au minimum. Puis, les réacteurs seront miniaturisés dans la limite du possible. Le contenu énergétique fantastique de la réaction de fusion (34 kg de deutérium suffit théoriquement au fonctionnement d'une centrale de 1000 MW durant 1 an) ouvre la perspective de progrès phénoménaux dans l'exploration spatiale. Revenons sur terre. L'énergie de fusion permettra de développer (indirectement) de nouveaux moyens de propulsion (par exemple des piles à combustible), modifiant la mobilité et améliorant considérablement le cadre de vie rural, auquel seront soumis au moins 80% de la population globale. Les pays actuellement en développement pourront donc assouvir leurs exigences énergétiques grâce au faible coût de la fusion future, et leur consommation rejoindra la moyenne. La répartition des richesses et du pouvoir économique entre les différents pays, actuellement très inégale, en sera fortement nivelée.

Le facteur énergétique joue un rôle absolument central dans le développement des civilisations, et nous ne pouvons que difficilement imaginer les bouleversements et progrès qu'engendreraient l'accès du globe à l'énergie de fusion.

3.2 Conclusion

Rappelons les idées centrales démontrées.

- Nous vivons une expansion démographique galopante et la consommation énergétique va augmenter considérablement (cf. section 2.1.4 p.10) pour maintenir un niveau de vie acceptable (cf. section 2.1.3 p.9).
- L'énergie provient principalement des ressources fossiles non renouvelables (cf. Figure 7 p.11), qui s'épuisent rapidement (cf. note 2 p.2) et polluent dramatiquement (cf. note 5 p.2).
- Ce contexte énergétique peut mener à de graves instabilités politiques.
- Les énergies renouvelables sont en tous cas insuffisantes pour satisfaire la demande énergétique actuelle et future (cf. note 4 p.2).
- La fusion peut résoudre le problème énergétique car elle génère une radioactivité quasi négligeable, les centrales sont sûres, le combustible inépuisable et non radioactif (de l'eau !) (cf. sections 1.3.2 p.4, 2.2.2 p.12).
- Une centrale de fusion serait, avec la technologie actuelle, économiquement compétitive (cf. section 2.2.2 p.12, annexe 5.1 p.25).
- L'économie "pétrolière" capitaliste globale génère la prédominance de l'absence de volonté politique du développement de la fusion (cf. section 2.2.3 p.13).
- Les approches pour accélérer l'utilisation de la fusion sont (plan d'action):
 1. Informer la population sur la fusion (préjugés : dangers ? On est proche du but ! Contexte énergétique, etc.) (cf. sections 2.2.4 p.14, 2.3.1 p.16).
 2. Abandonner (dans un premier temps) les projets purement scientifiques similaires à ITER et construire de petites centrales commerciales (cf. section 2.3.3 p.17).

Les scénarios présentés relèvent pour une grande part de l'extrapolation très subjective.

Néanmoins, il est très probable que, à un moment donné, il sera nécessaire d'abandonner la libéralisation et la privatisation énergétique au profit d'une planification globale ou régionale de la consommation. Une certaine planification du marché énergétique constitue certainement un meilleur contexte pour le développement de la fusion. Mais sera-t-il déjà trop tard ? L'inertie des perturbations climatiques engendrées par la production de dioxyde de carbone et autres déjections provoquera des changements climatiques catastrophiques plusieurs décennies après ces bonnes résolutions. Restera-t-il suffisamment de ressources fossiles pour permettre à l'industrie pétrochimique de poursuivre sa production indispensable ? Aurons-nous sombré dans un conflit Nord-Sud encore plus grave ?

En conclusion, les humains sont en train de mener une expérience géophysique globale qui peut avoir des conséquences telles qu'elles menacent le développement de l'espèce humaine, ainsi qu'une grande partie des formes de vie sur cette planète. Il est nécessaire d'agir rapidement. La solution au problème existe, il s'agit de la fusion. Avec la volonté politique, il serait possible de disposer de réacteurs de fusion d'ici moins de 20 ans. On pourrait ainsi disposer *d'une source d'énergie illimitée, non polluante*, et dans un second temps moins onéreuse. Très certainement, cela impliquerait un développement inimaginable de nos sociétés, *l'énergie étant un facteur clef de toute civilisation*. Malheureusement, les intérêts économiques à court terme prédominent, et on s'achemine probablement vers une catastrophe dont l'ampleur nous est encore inconnue.

L'être humain, en général, souffre d'un grand problème. Il se croit immortel... En effet, la courte phrase de Earle Robinson s'applique à tout le monde : « I am immortal, so far... » (« Je suis immortel, jusqu'à présent... »). De plus, ce sentiment d'immortalité est renforcé par notre courte mémoire historique : l'espèce humaine n'existe que depuis environ 3 millions d'années, ce qui n'est qu'une fraction insignifiante par rapport à l'âge de notre planète, soit environ 5 milliards d'années. Depuis 3.5 milliards d'années, des espèces ont vu le jour, se sont éteintes, d'autres on vu le jour, puis se sont éteintes, etc. L'espèce humaine ne fait pas exception à la règle. Notre avancée technologique n'est qu'une voie de développement parmi d'autres, qui n'assure pas forcément notre protection. Nous vivons une époque euphorique d'expansion et de consommation insouciante des précieuses ressources naturelles, de confiance en l'immortalité de son espèce. Mais à jouer ce jeu, nous risquons ainsi de menacer notre propre existence, ou tout au moins notre civilisation actuelle.

Les solutions à la problématique existent, et sont de plus extrêmement bonnes, idéales. Malheureusement, la fusion est aussi excellente scientifiquement qu'exécrable socio-économiquement. En effet, elle requiert l'information des masses, des investissements faramineux, de nouvelles options politiques à long terme. Nous sommes réellement confrontés à un problème crucial, qui déterminera les conditions de vie de l'espèce humaine durant plusieurs siècles à venir. Ce problème révèle tout de l'épineuse difficulté du développement d'un projet à long terme, tel que la fusion thermonucléaire.

Lausanne, le 07/06/2000



François Coppex

4. RÉFÉRENCES

- [1] PASCAL BRADU
L'univers des Plasmas
Flammarion (1999)
- [2] CRPP EPFL
Maîtriser l'énergie des étoiles
Association Suisse – Euratom (cédérom) (1997)
- [3] RON PARKER
ITER, A Major Step Towards a Fusion Reactor
Europhysics News 29/6/98, 228-229
Springer-Verlag
- [4] S. BARABASCHI, C. BERKE, F. FUSTER JAUME, SIR J. HILL, L. INGELSTAM, F. TROYON, H. VAN DER LAAN, J.-P. WATTEAU
Fusion programme evaluation 1996
Science, research, développement - European Commission (1996)
- [5] MICHEL GRÉGOIRE, ROBERT DAUTRAY, JEAN-PAUL WATTEAU
Art. fusion thermonucléaire 22-582
Encyclopaedia Universalis (1995)
- [6] SERF
Socioeconomic research on fusion
Ciemat (1997-1998)
- [7] ERICH TENCKHOFF
Mankind, Technology, Responsibility
Siemens AG (1998)
- [8] J. ONGENA, G. VAN OOST, PH. MERTENS
La fusion thermonucléaire – une chance pour l'humanité
Trilateral Euregio Cluster (TEC) (1999)
- [9] FUSION EXPO CONSORTIUM
Harnessing the energy of the stars
European Union (1993)
- [10] J.P.H.E. ONGENA, G. VAN OOST
Energy for future centuries
Transactions of Fusion Technology (1998)
- [11] CONSEIL MONDIAL DE L'ENERGIE
L'énergie pour le monde de demain
Editions Technip, Paris (1993)
- [12] T. KENNETH FOWLER
The Fusion Quest
The Johns Hopkins University Press (1997)
- [13] TELLER EDWARD
ed. *Fusion*, Vol. 1, pts A, B.
New York Academic Press (1981)
- [14] FRANCIS F. CHEN
Introduction to Plasma Physics
Ed. Plenum Press (1974)
- [15] R. J. GOLDSTON, P. H. RUTHERFORD
Introduction to Plasma Physics
Institute of Physics Publishing Bristol & Philadelphia (1997)
- [16] C. FLAVIN, A. DURNING
State of the World 1988 (A Worldwatch Institute Report)
Ed. L. Stanke, Prentice Hall of India (1989)
- [17] D. ZHOU, G. WRITE, C. HU
IAEA Bulletin 3, 24 (1990)
- [18] G. M. VOSS, S. ALLFREY, A. BOND, Q. HUANG, P. J. KNIGHT, H. R. WILSON
A Conceptual Design of a Spherical Tokamak Power Plant
Euratom, UKAEA Fusion association (1999)
- [19] R. CON
Nuclear Fusion 30, 1924 (1990)

-
- [20] *Notre insouciance énergétique*
Le Temps stratégique, Janvier/Février 1998, p.67-77
- [21] P. K. KAW
Fusion Power, who needs it ? !
Artsimovich Memorial Lecture, 14th IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Würzburg, Germany (1992)
- [22] UNITED NATIONS (UN)
Energy Statistics Yearbook 1991
- [23] JOSEPH TARRADELLAS
Introduction à l'écologie
PPUR (1996)
- [24] PHILIPPE THALMANN
Impôts écologiques
PPUR (1997)

5. ANNEXES

5.1 La centrale à fusion (tokamak sphérique) de Culham (U.K.)

Cette annexe se base sur des informations très récentes (mars 2000), de première source. Les chercheurs de Culham proposent une centrale de fusion, économiquement viable, basée sur le concept du tokamak sphérique, et sur la technologie actuelle (cf. Figure 11 p.25). Le lecteur désireux d'une description détaillée du réacteur peut consulter la référence [18]. La puissance de fusion serait de 1200 MW, et le coût de construction du réacteur est évalué à environ 12.5 milliards de CHF, soit légèrement moins que le coût de ITER. Le plus faible coût initial provient du concept même du tokamak sphérique, dont la taille est sensiblement inférieure et la complexité moindre. Ce réacteur serait à même de fonctionner en continu, sans pour autant atteindre l'ignition. Pour chauffer le plasma, on prévoit l'injection de particules neutres ainsi que l'induction d'un fort courant dans le plasma. Néanmoins, le rapport de la puissance de fusion par celle de chauffage sera de 40 (i.e. $Q = 40$). Cette valeur est bien au-delà du critère de viabilité économique minimal $Q = 20$. On évalue en première approximation que le coût de production du kWh serait d'environ 19 centimes.

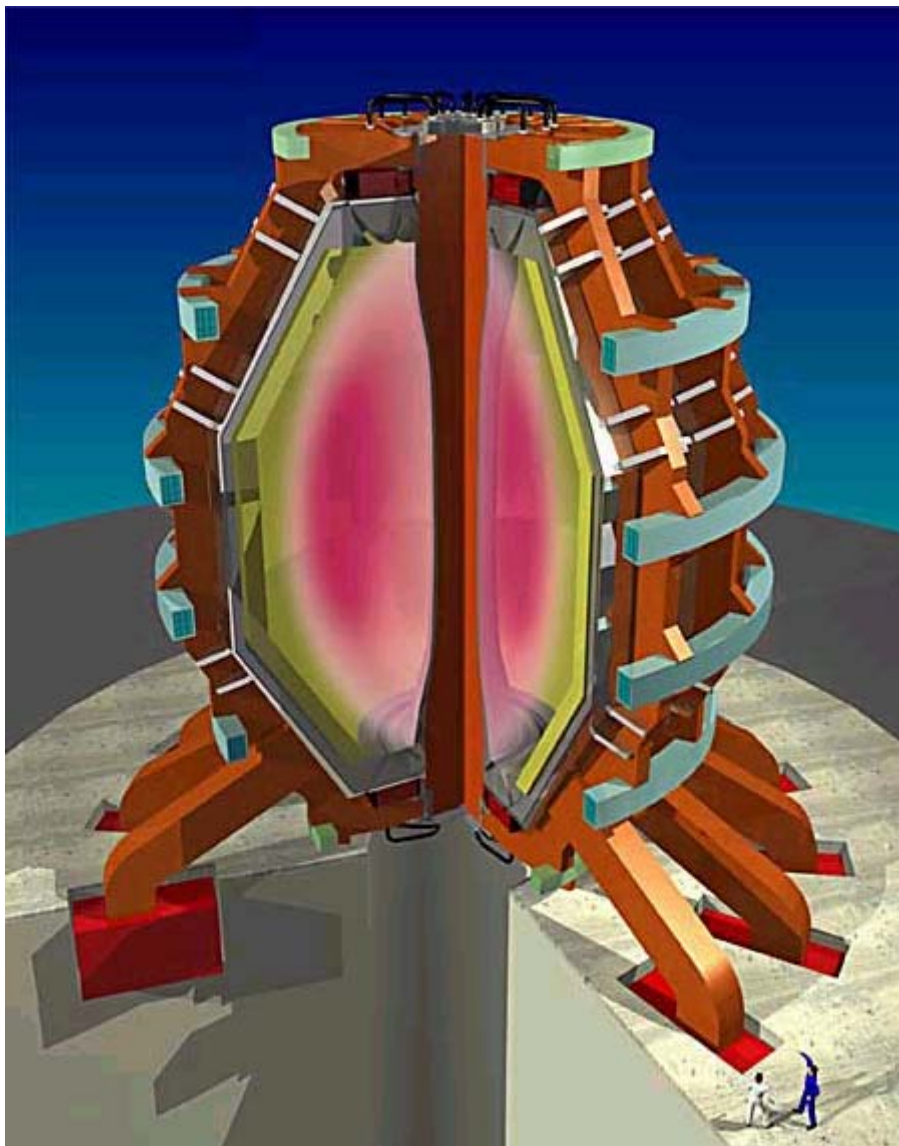


Figure 11: Représentation du réacteur de fusion (tokamak sphérique) de Culham (U.K.)⁵³

⁵³ Cette image est tirée du site internet www.fusion.org.uk/st/index.html.

Il est à présent possible de présenter quelques considérations élémentaires d'ordre économique, pour démontrer une fois de plus la possibilité de disposer *actuellement* de réacteurs de fusion compétitifs. Supposons que le réacteur de Culham soit construit pour un coût de 13 milliards de CHF. Supposons aussi que le coût de maintenance global atteigne 1 milliard CHF par an. De plus, le réacteur fonctionnera durant 90% de l'année, le reste du temps étant nécessaire aux opérations d'entretien. On suppose que les investisseurs désirent amortir le coût de construction en 5 ans. La question est alors la suivante : combien coûte le kWh à la consommation ? Avec ce modèle très simpliste, on obtient le prix du kWh d'énergie de fusion suivant :

$$1 \text{ kWh} = 0.58 \text{ CHF}$$

Ce qui est environ 3 fois supérieur au prix actuel, et inférieur au prix exigé en général pour l'énergie solaire. Je vous pose alors la question suivante : est-ce trop cher pour l'enjeu que cela représente ? Je n'hésiterais pas une seule seconde à utiliser de l'énergie de fusion à ce prix. Dans l'optique d'une rentabilisation de la centrale sur 10 ans, ce prix serait même de 0.29 CHF par kWh. Par contre, cela serait moins alléchant pour les investisseurs ou actionnaires qui auraient investi 13 milliards et qui désirent de gros dividendes. Revenons au scénario de l'amortissement en 5 ans. Après 5 ans sans bénéfices, la centrale rapporterait environ 2.7 milliards de CHF par an. Ces gains peuvent alors soit servir d'argument pour attirer les capitaux lors de la construction, soit servir à financer de nouvelles centrales, ainsi que la recherche en fusion permettant de diminuer les coûts d'exploitation de centrales futures.

Nous concluons ainsi que, *dans l'état technologique actuel, la fusion est une source d'énergie écologiquement et financièrement avantageuse*. Une campagne d'information s'avère ainsi nécessaire pour porter l'argument écologique à la connaissance de la population, et l'argument financier aux investisseurs potentiels.

5.2 Index des figures

<i>Figure 1: Probabilités de fusion de différents réactifs (source réf. [2]).....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2: Comparaison de la radiotoxicité de différentes sources en fonction du temps.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3: Schéma de principe d'un réacteur à fusion en confinement magnétique (source réf. [2])</i>	<i>7</i>
<i>Figure 4: Amélioration en fonction du temps des caractéristiques des réacteurs (source réf. [2]).</i>	<i>9</i>
<i>Figure 5: Consommation énergétique, développement social et espérance de vie.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6: Consommation énergétique par pays (source réf. [22]).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 7: Structure de la consommation énergétique en 1960 et 1990 (source réf. [11])</i>	<i>11</i>
<i>Figure 8: Prix du baril de pétrole et subventions des Etats-Unis à la fusion.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 9: Action des scientifiques sur les catégories pour réaliser la fusion.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 10: Investissements consentis et gisements découverts (source ref. [20])</i>	<i>19</i>
<i>Figure 11: Représentation du réacteur de fusion (tokamak sphérique) de Culham (U.K.).....</i>	<i>25</i>

5.3 Index

A	
Atkinson R. d'E	8
B	
bombe	
fission (atomique)	5
fusion	7
breakeven.....	8
C	
capture électronique.....	5
centrale de fusion	
tokamak sphérique, Culham (U.K.)	25
confinement	
inertiel.....	7
magnétique.....	6
critère de Lawson.....	6
D	
deutérium	4
durée de vie.....	6
E	
énergie	
biomasse	13
éolienne.....	13
fission.....	11, 12, 13
fossile.....	11, 12
fusion	12, 13
hydroélectrique	11
naturelle	6
renouvelable.....	6
externalité	13
F	
fission nucléaire.....	4
fusion	
thermonucléaire	3
G	
Gamov George.....	8
H	
Houtermans F. G.....	8
I	
ignition.....	8
imagerie par résonance magnétique.....	17
isotope.....	<i>Voir</i> deutérium, tritium
J	
Jacobs Eastman	8
K	
Kantrovitz Arthur.....	8
L	
Lawson	
critère de	<i>Voir</i> critère de Lawson
Lawson J. D.	8
N	
neutrino	5
P	
Perón Juan.....	8
plasma	4
R	
radioactivité	5
réacteur de fusion	
DEMO.....	12
ITER	9, 12
JET.....	8
JT-60U	9
MAST	6
START.....	6
ZETA	8
résistivité	
plasma	7
résonance magnétique nucléaire (R.M.N.)	17
Rutherford Ernst	8
S	
Sakharov Andrei	8
spheromak.....	6
Spitzer Lyman.....	8
stellerateur.....	6
T	
Tamm Igor	8
Teller Edward	8
tokamak.....	8
tokamak sphérique	25
tritium	4