

Philippe Leconte
CEA/DEN/DDIN



Éléments sur l'énergie nucléaire

Cours donnés à l'école d'été de physique

Caen, août 2001

1. Rappels sur les propriétés des noyaux atomiques

La matière a une histoire. Toutes les découvertes du siècle dernier sont venues conforter cette affirmation. Tous les noyaux peuvent être produits à partir du noyau d'hydrogène. La radioactivité est la trace soit d'une réorganisation interne du noyau, soit d'une transformation du noyau en un autre noyau. Dans ce dernier cas, on parle de transmutation.

La courbe de masse des noyaux et par suite la courbe donnant l'énergie de liaison moyenne par nucléon des noyaux (voir figure 1) montrent que des noyaux légers peuvent fusionner en donnant des noyaux plus lourds et en libérant de l'énergie. Pour que cela se produise, il faut surmonter leur répulsion électrostatique. C'est ce qui se passe dans les étoiles où la température et la densité sont suffisantes pour entretenir des réactions de fusion qui, à leur tour, assurent le maintien de la température. Ce processus ne peut pas aller au-delà du noyau de fer, car ensuite la fusion est possible, mais elle ne donne pas d'énergie, donc de chaleur. Faute de carburant, l'étoile s'effondre sur elle-même.

Comment les autres noyaux lourds peuvent-ils avoir été créés ? Cela ne peut se produire que dans des situations hors de l'équilibre, si l'étoile explose après son effondrement (supernova). Ce processus s'accompagne de l'émission d'un très grand flux de neutrons qui sont capturés par les noyaux de masse moyenne constituant l'étoile. Dans un temps très court, avalant des neutrons les uns après les autres, les noyaux s'alourdissent de plus en plus jusqu'à former des métaux très lourds comme l'uranium. En cas de fission, des noyaux plus légers et plus denses sont formés, ce qui conduit à une libération d'énergie.

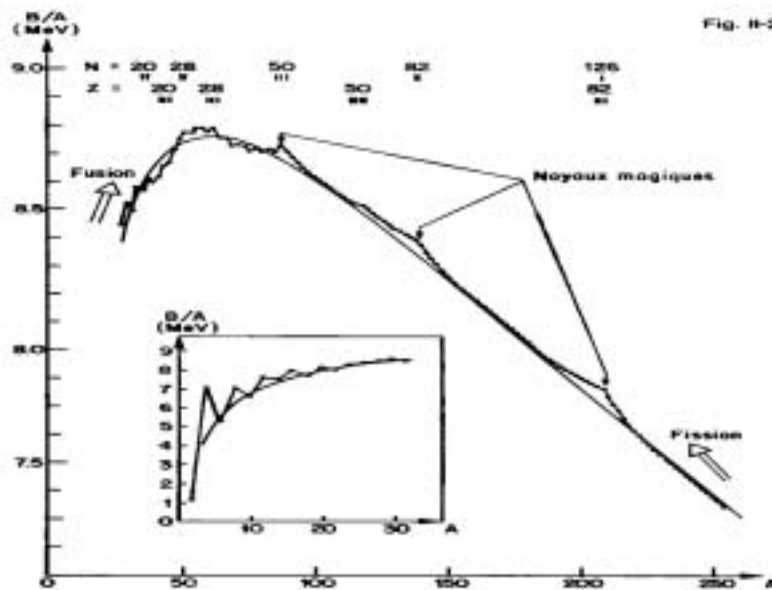


Figure 1 Energie de liaison moyenne par nucléon des noyaux

On a identifié environ 3000 noyaux différents. La plupart sont radioactifs. Les noyaux stables ne sont que quelques centaines. L'Uranium 235, l'Uranium 238 et le Thorium 232 sont les noyaux les plus lourds existant depuis la dernière explosion de supernova précédant la formation du système solaire. Grâce à leur très longue durée de vie (de l'ordre du milliard d'années), ils sont encore présents sur terre.

Seul l'uranium 235 est fissile. Toutefois, deux autres noyaux fissiles peuvent être produits en quantité importante par capture de neutrons sur l'uranium 238, ce qui donne le plutonium 239 ou sur le Thorium 232, ce qui donne l'uranium 233.

C'est à la suite de l'absorption d'un neutron que le noyau d'uranium 235 se divise en deux noyaux de masse intermédiaire. Comme le montre la figure 2, la ligne des noyaux stables est incurvée, les noyaux lourds comportant plus de neutrons que de protons. Il en résulte que les noyaux résultant d'une fission, appelés produits de fission, présenteront un excès de neutrons par rapport aux noyaux stables les plus proches. Ils seront donc pour la plupart radioactifs et tendront à émettre des neutrons pour se rapprocher de la ligne des noyaux stables. En moyenne, pour l'uranium 235, ce sont 2,3 neutrons qui seront émis à chaque fission. Ces neutrons pourront provoquer, à leur tour, une nouvelle fission s'ils sont capturés par un noyau d'uranium 235. C'est la réaction en chaîne. Toute la technique de la production d'énergie nucléaire consiste à mettre au point des arrangements pour provoquer la réaction en chaîne tout en la maîtrisant.

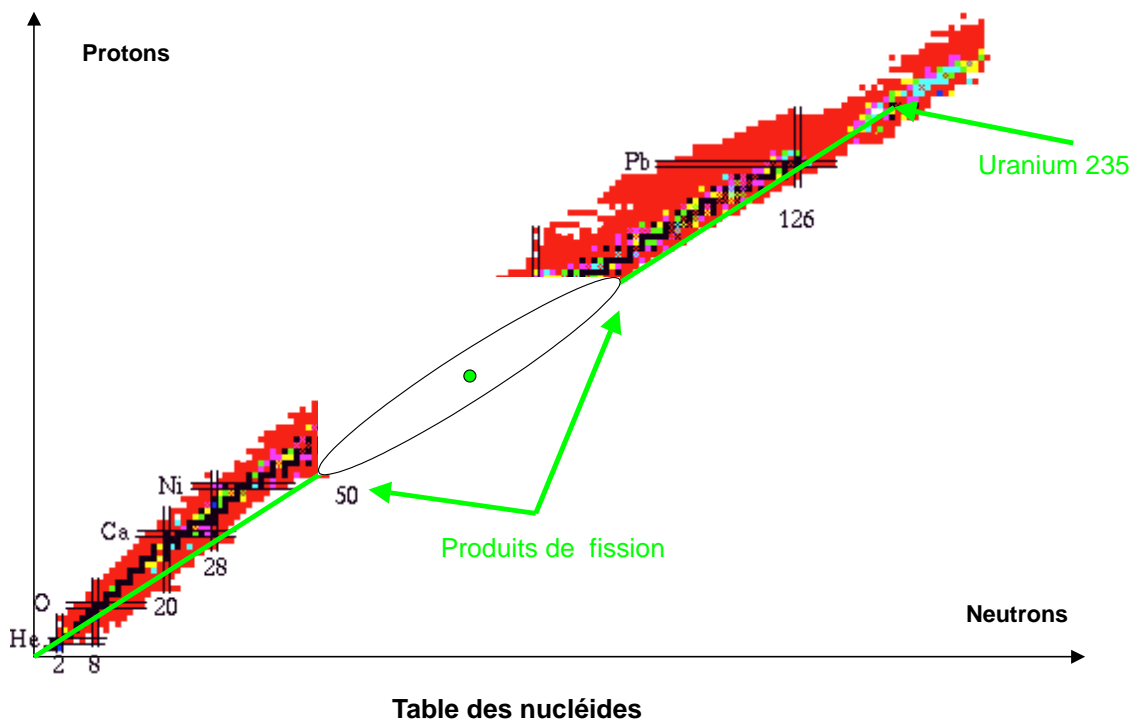


Figure 2. Les produits de fission de l'uranium doivent se partager les 92 protons et les 143 neutrons de l'uranium 235. Ils se retrouvent pour la plupart répartis autour du point milieu (46 protons et 71,5 neutrons). Ils ont trop de neutrons pour être stables et sont donc radioactifs.

2. Les réacteurs nucléaires

Un réacteur nucléaire à neutrons thermiques est un milieu où est libérée l'énergie de fission du noyau de l'atome. Il comprend des noyaux lourds (le combustible) qui fissionnent lorsqu'ils capturent des neutrons, des noyaux légers (le modérateur) qui ralentissent les neutrons par chocs successifs et un fluide (le caloporteur) chargé d'extraire la chaleur dégagée par le freinage des produits de fission, ce qui a lieu très près de la fission elle-même. L'ensemble baigne dans un "gaz" ou flux de neutrons produits par une génération de fissions

et consommés par la suivante. Ils occupent tout le volume du cœur et couvrent une large gamme de vitesses.

Le réacteur est aussi une machine thermique, qui transforme l'énergie cinétique des produits de fission en énergie thermique locale, évacuée par le caloporteur, de nouveau transformée au bout d'une ou deux boucles d'échange thermique en énergie cinétique d'un jet de vapeur entraînant les pales d'une turbine à vapeur, et enfin en énergie électrique dans un alternateur solidaire de l'arbre de la turbine.

C'est encore un assemblage de matériaux qui doivent résister tout à la fois à la température, aux dégâts d'irradiation sous flux neutronique, et à la durée. De ce point de vue, aux éléments de base, combustible et caloporteur, s'ajoutent des matériaux de structure assurant la stabilité mécanique, des matériaux absorbeurs de neutrons pour permettre le pilotage ou contrôler la sûreté du réacteur, des actionneurs pour la télécommande et l'instrumentation de mesure.

Enfin, après quelques années de fonctionnement, le réacteur constitue une source complexe de noyaux radioactifs d'activités et de durées de vie très variables (produits de fission, actinides créés à partir de noyaux de combustible ayant capturé successivement plusieurs neutrons, produits d'activation créés à partir de matériaux de structure soumis à tous les flux d'irradiation). L'inventaire d'un réacteur est de l'ordre de la dizaine de millions de curies (une fraction d'étabecquerel). Le maintien sous contrôle strict et l'absence de dissémination de cette source se fait par disposition de barrières matérielles successives, chacune englobant la précédente. La première barrière est la gaine métallique enserrant le combustible, la deuxième est la cuve contenant le cœur du réacteur, la troisième et dernière est l'enceinte de confinement en béton, qui protège aussi contre les intrusions de l'extérieur. Toutes ces barrières n'existent pas nécessairement sur toutes les filières de réacteurs.

Dans un réacteur idéal, supposé sans fuites de neutrons (réacteur de volume infini, dont le facteur multiplicatif est noté k_{∞}), on peut décomposer la réaction en chaîne en quatre étapes distinctes, au prix de quelques approximations. Chaque étape a pour effet de multiplier le nombre de neutrons par un facteur caractéristique :

- A. Un neutron d'énergie thermique E_{th} (1/40 eV) est absorbé par un noyau fissile du combustible et produit en moyenne η neutrons rapides de 2 MeV.
- B. Ces neutrons rapides, avant de quitter le combustible, induisent dans celui-ci quelques fissions dites rapides, principalement sur ^{238}U qui est fissile à ces énergies et qui est majoritaire dans la composition du combustible. Il y a aussi quelques fissions rapides sur ^{235}U . Le facteur multiplicatif de neutrons par fission rapide est noté ϵ .
- C. La phase de ralentissement des neutrons s'effectue dans le modérateur. Celui-ci n'étant pas spatialement complètement isolé du combustible, il existe une probabilité que les neutrons entre en collision avec les noyaux lourds qui composent ce dernier. Or dans la gamme d'énergie couverte lors du ralentissement, il existe un grand nombre de niveaux d'énergie précis pour lesquels les neutrons peuvent être absorbés et céder toute leur énergie aux noyaux lourds. Ces niveaux d'énergie sont les résonances épithermiques de ces noyaux, aussi appelés "trappes" parce que les neutrons y disparaissent. La probabilité de survie des neutrons à ces trappes de capture sans fission est appelée probabilité "anti-trappe" et est notée p .

- D. Une fois thermalisés, les neutrons diffusent à énergie moyenne constante jusqu'à être absorbés dans le combustible. Le facteur d'utilisation thermique f mesure la probabilité que l'absorption ait bien lieu dans le combustible et non dans le modérateur ou dans d'autres matériaux absorbants.

Les neutrons ainsi thermalisés sont de nouveau disponibles à l'énergie E_{th} pour initier un nouveau cycle par fission. La boucle est alors bouclée, ce qui s'écrit :

$$k_{\infty} = \eta \epsilon p f$$

C'est la " formule des quatre facteurs ".

Dans cette description simple, le pilotage du réacteur se fait en variant le facteur d'utilisation thermique f par introduction contrôlée d'absorbants soit sous forme liquide (bore dans l'eau du modérateur/caloporteur), soit sous forme de barres d'absorbants solides (cadmium p.ex.).

EQUILIBRE DU REACTEUR INFINI (sans fuite)

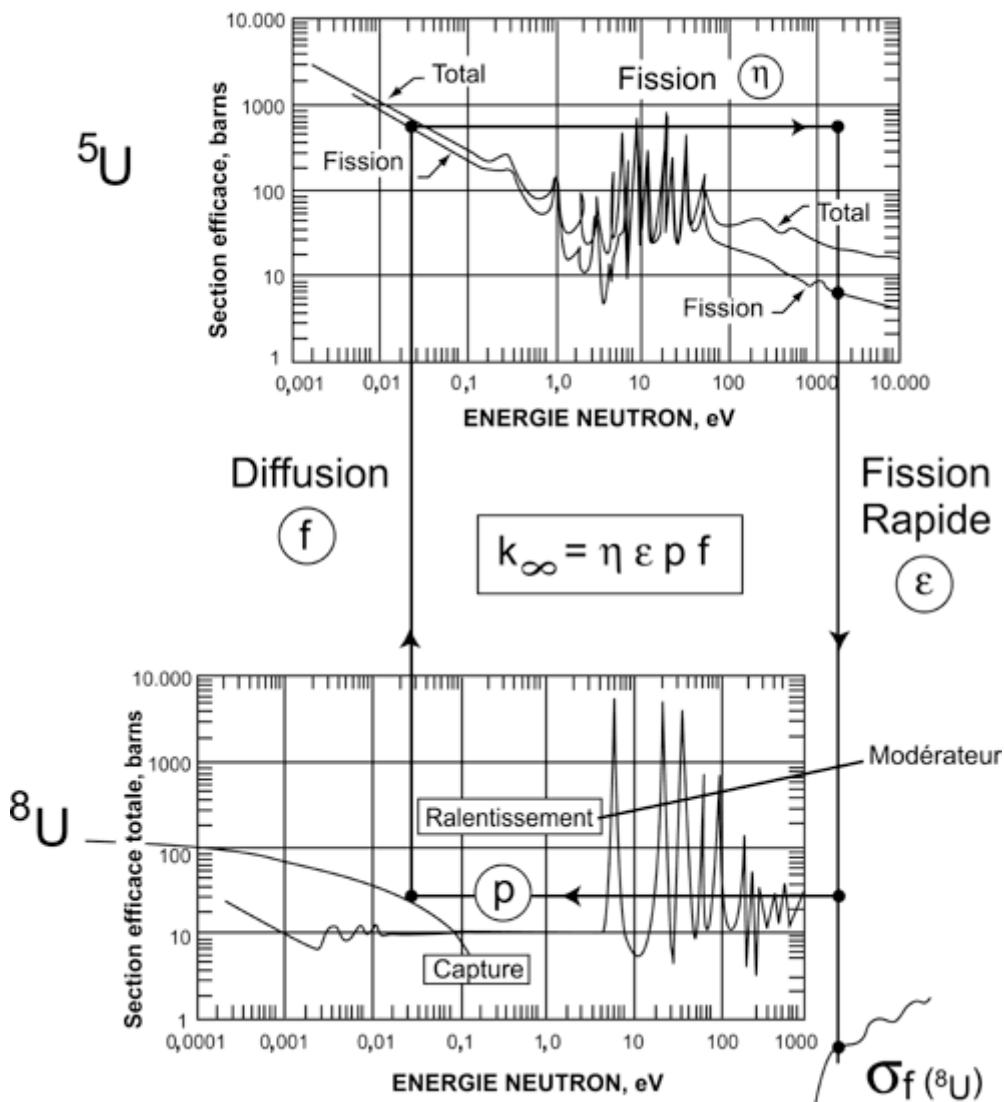


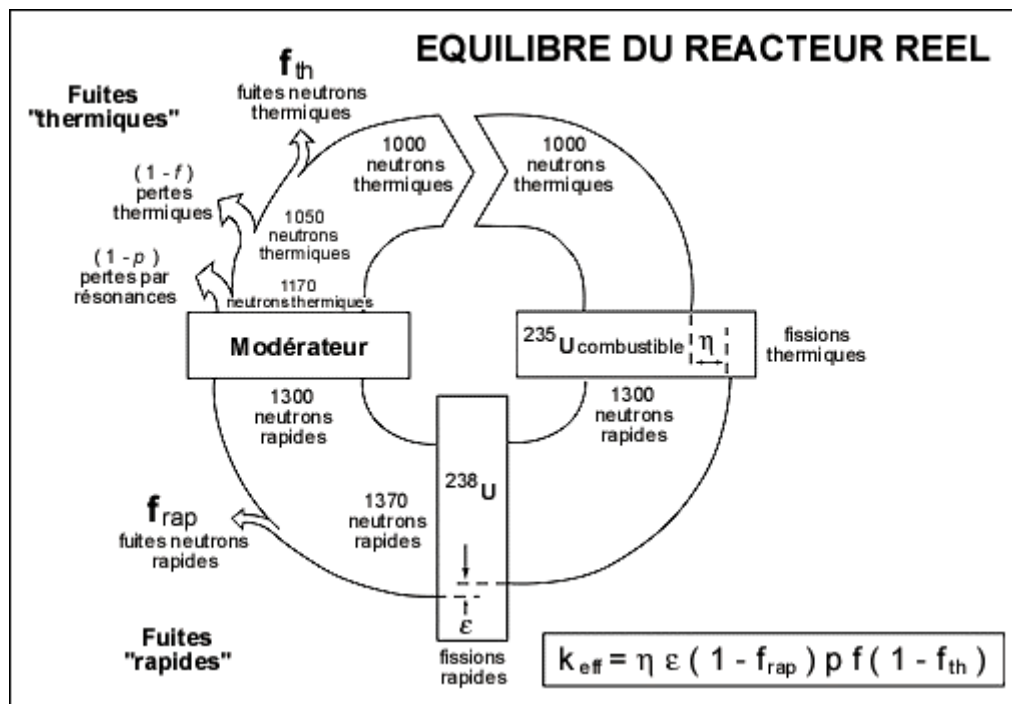
Figure 3 - Equilibre du réacteur infini (sans fuite).

La figure 3 illustre le cycle complet que doivent parcourir les neutrons dans un réacteur à uranium et neutrons thermiques pour boucler la réaction en chaîne avec $k=1$. Elle est constituée de la superposition des courbes de section efficace de capture et de fission des deux isotopes ^{235}U et ^{238}U . Le trajet A ci-dessus correspond à la disparition par absorption d'un neutron à l'énergie E_{th} et à l'apparition par production après fission de η neutrons rapides. Le trajet B, à énergie élevée, illustre la possibilité de fissions rapides dans ^{238}U et ^{235}U , d'où le facteur ϵ . Le trajet C est celui des neutrons se ralentissant par chocs successifs sur le modérateur, avec un risque $(1-p)$ d'être capturés par les résonances épithermiques de ^{238}U . Le trajet D, à énergie constante E_{th} , est la phase de diffusion, avec une probabilité f que l'absorption soit fissile, c'est à dire qu'elle soit initiatrice d'un nouveau trajet A, et que la boucle (ABCD) soit ainsi effectivement bouclée.

Dans cette présentation, le passage du réacteur infini au réacteur réel se fait en introduisant les probabilités de fuite de neutrons rapides (notée f_{rapide}) et de fuite de neutrons thermiques (notée $f_{thermique}$), remplaçant le facteur de multiplication "infini" par le facteur de multiplication "effectif" :

$$k_{eff} = \eta \epsilon (1 - f_{rapide}) \cdot p \cdot f \cdot (1 - f_{thermique})$$

Un réacteur réel est construit pour fonctionner avec $k_{eff} = 1$; on doit donc avoir $k_m > 1$, pour compenser les fuites de neutrons hors du volume fini du réacteur.



La figure 4 illustre graphiquement les valeurs typiques des bilans de neutrons aux différentes étapes de la boucle de réaction pour un réacteur à neutrons thermiques.

3. Les contre-réactions neutroniques

Trois phénomènes jouent un rôle essentiel pour la stabilité d'un réacteurs. C'est d'abord la manière dont se comporte la réaction en chaîne en cas de disparition du modérateur par suite d'une ébullition locale. Elle se mesure par un coefficient à appliquer à la réactivité en cas d'ébullition : **le coefficient de vide**. Le régime de fonctionnement est choisi de façon à ce que les neutrons soient toujours légèrement sous-modérés de sorte qu'une diminution de

modération se traduise toujours par une diminution de la probabilité de fission. Le coefficient de vide doit toujours être négatif. Ce n'était pas le cas du réacteur de Tchernobyl dans la configuration où il se trouvait avant son explosion. Si les concepteurs de ce réacteur en avaient exclu la possibilité, l'explosion n'aurait pas eu lieu.

Le second phénomène s'appelle l'**effet Doppler**. Quand la température du combustible s'élève localement, le mouvement des atomes d'uranium 238 s'accélère. Pour les neutrons, cela se présente comme un élargissement des bandes de résonance, ce qui entraîne une augmentation de leur probabilité de capture et donc une diminution instantanée et locale de la réactivité. Ce phénomène dû à la présence de l'uranium 238 est un important facteur de stabilité des réacteurs. C'est pour conserver cet effet que l'on limite le taux de plutonium dans le combustible MOX à un niveau relativement bas.

Enfin, un autre phénomène joue un rôle primordial dans la possibilité de contrôler la réaction en chaîne. C'est l'émission de neutrons retardés. Certains produits de fission n'émettent des neutrons qu'après un temps de l'ordre de la seconde à la suite d'une réaction β (transformation d'un neutron en proton et émission d'un électron). Le bilan complet d'une génération de neutrons n'atteint donc la valeur 1 d'équilibre qu'après ce délai (sans ce phénomène, les temps d'émission de neutrons après une fission sont de l'ordre de la microseconde). Grâce à ce retard, la réaction en chaîne ne peut pas s'emballer rapidement, ce qui laisse le temps aux systèmes mécaniques d'asservissement et de sécurité de jouer leur rôle. L'uranium 235 produit un nombre confortable de neutrons retardés (0,65%). Le plutonium en est plus avare, ce qui rend plus difficile à concevoir un réacteur fonctionnant avec du plutonium.

4. La sûreté des réacteurs nucléaires

La sûreté d'un réacteur doit respecter six consignes essentielles :

- 1) Les produits radiotoxiques doivent rester confiner et ne pas pouvoir être dispersés dans l'environnement, même dans les situations accidentelles.

Le principe appliqué est celui de la défense en profondeur en assurant le maintien de plusieurs barrières successives : trois en général.

- 2) Les personnels travaillant au fonctionnement et à l'entretien doivent être protégés contre les rayonnements.

Les protections les plus utilisées sont le béton, l'eau (piscines), le plomb. On fait également appel autant que possible à des interventions télécommandées à l'aide de robots pour certaines opérations de maintenance.

- 3) Le niveau de réactivité (coefficient k) doit toujours rester sous contrôle.

Des procédures interdisent de placer le réacteur en situation surcritique. En cas d'excursion de réactivité, des automatismes rapides font chuter des barres de sécurité ou injectent de l'acide borique dans l'eau de refroidissement, ce qui arrête la réaction en chaîne.

- 4) La conception du réacteur doit prévoir des contre-réactions neutroniques.

En cas de sursaut de puissance, il faut s'assurer que l'on dispose bien d'un coefficient de vide négatif, d'un bon contrôle de la réactivité par effet Doppler et que l'on aura le temps de réagir grâce à un nombre suffisant de neutrons retardés dans le bilan neutronique. Ces éléments de sécurité agissent localement et sont

fondés sur des phénomènes physiques fondamentaux. Ils sont donc intrinsèquement sûrs.

- 5) La capacité d'extraction de la puissance doit être maintenue en permanence.

En plus des circuits principaux, il existe des circuits de refroidissement de secours et des systèmes de maintien de la puissance électrique nécessaire pour le fonctionnement des pompes.

- 6) Une fois le réacteur à l'arrêt, la puissance résiduelle émise par la radioactivité des produits de fission doit toujours pouvoir être évacuée.

La perte de refroidissement du réacteur à l'arrêt est l'un des accidents les plus graves qui puisse se produire, car elle peut mener à la fusion du cœur. En effet, les produits de fission émettent encore après l'arrêt de la réaction en chaîne par chute des barres de sécurité, une puissance résiduelle d'environ 6 à 7% de la puissance nominale. Pour un réacteur de 900 MW électrique, cela représente quelque chose comme 200 MW qu'il faut absolument évacuer. Cette puissance décroît ensuite lentement : 1% au bout d'une heure, soit 30 MW et 0,15% après un mois, soit 4,5 MW, ...

5. Le cycle du combustible

L'uranium est réparti assez largement dans le monde. Il existe cependant des mines extrêmement concentrées en uranium, en particulier au Canada et en Australie. Le prix de l'uranium est actuellement bas à cause des importantes capacités de production et du ralentissement des prévisions d'extension du parc électronucléaire mondial. L'uranium naturel contient 99,3% d'uranium 238 fertile mais non fissile et seulement 0,7% d'uranium 235 fissile. L'utilisation d'eau légère pour le refroidissement des réacteurs entraîne une perte de neutrons due à leur capture par l'hydrogène. Pour atteindre la criticité, il faut un enrichissement du combustible en uranium 235, jusqu'à un niveau de 3 à 5%. Les procédés employés pour réaliser cet enrichissement sont essentiellement la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation. Dans les deux cas, l'uranium est mis sous forme d'hexafluorure d'uranium qui est gazeux aux températures d'utilisation. Dans le procédé de diffusion gazeuse, le gaz UF_6 est poussé un très grand nombre de fois à travers des cartouches en céramique poreuse. La plus légère des molécules passe un peu plus vite à travers les pores, ce qui donne un léger taux d'enrichissement. Dans le procédé d'ultracentrifugation, le gaz est entraîné en rotation dans des bols cylindriques tournant à très grande vitesse, ce qui concentre les molécules les plus lourdes vers la périphérie. Les deux procédés sont appliqués. Le premier est très coûteux en énergie, tandis que le second a fait des progrès récemment du fait de la mise au point de matériaux composites pour les bols. L'usine Georges Besse à Pierrelatte en France fonctionne selon le principe de la diffusion gazeuse. Un autre procédé a été étudié, mais n'a pas encore atteint le niveau de faisabilité industrielle. Il s'agit d'un procédé de séparation par ionisation sélective des atomes d'uranium 235 par illumination laser (SILVA).

Après enrichissement, l'uranium est amené à l'état d'oxyde sous forme de poudre qui est pressée, frittée et rectifiée pour former des pastilles calibrées. Ces pastilles sont introduites dans des tubes d'alliage au zirconium de 10mm de diamètre et de 4 m de long formant la gaine du combustible et donc la première barrière de confinement. Les tubes sont assemblés en fagots carrés de 250 dans un arrangement de 17x17. Les espaces libres sont réservés aux systèmes de contrôle.

Après avoir séjourné dans un réacteur pendant une période de 3 à 4 années, chaque assemblage contenant 500 kg d'uranium a fourni une énergie équivalente à la combustion de 40 000 tonnes de pétrole. Il contient encore 95% d'uranium dont 1% d'uranium 235, 1% de plutonium, environ 4% de produits de fission et enfin 0,1% d'actinides mineurs. L'uranium et le plutonium sont des matières énergétiques valorisables. Le reste constitue des déchets.

La politique française consiste à cisailer les assemblages et à en dissoudre le contenu dans de l'acide nitrique concentré et bouillant. L'uranium et le plutonium sont récupérés par un procédé chimique très efficace (PUREX). La solution nitrique ne contenant plus que les produits de fission et les actinides mineurs est ensuite calcinée. Les gaz sont traités et les résidus de calcination sont mélangés à de la fritte de verre, fondus dans un four et coulés dans des récipients en acier inoxydable. Ces déchets sont ensuite entreposés dans des silos refroidis en permanence.

6. Les différentes filières de réacteurs

La plupart des réacteurs existants dans le monde ont un refroidissement assuré par de l'eau normale, dite « légère », par opposition à l'eau lourde composée d'oxygène et de deutérium : un isotope lourd de l'hydrogène.

Le Canada a développé une filière fonctionnant à l'eau lourde et à l'uranium naturel, la filière CANDU, qu'il a exportée dans plusieurs pays.

La France et le Royaume-Uni ont développé une filière avec un modérateur graphite et un caloporteur au gaz carbonique. La France l'a abandonnée au début des années 70, tandis que le Royaume-Uni en a poursuivi l'exploitation jusqu'à aujourd'hui (filière Magnox)

Plusieurs pays ont développé des réacteurs à neutrons rapides où le refroidissement est assuré par un métal liquide peu modérateur. La France, la Russie et le Japon ont de tels réacteurs en fonctionnement. Ces réacteurs sont conçus pour assurer efficacement la transmutation de l'uranium 238 en plutonium et la combustion du plutonium, ce qui multiplie par 50 le facteur d'utilisation de l'uranium extrait de la mine. Ainsi, les réserves d'uranium appauvri constituées à la suite du processus d'enrichissement pour alimenter pendant quarante ans un réacteur refroidi à l'eau légère représentent un potentiel de fonctionnement de plusieurs milliers d'années à la même puissance d'un réacteur à neutrons rapides.

Enfin, deux types de réacteurs ont fonctionné à l'état de prototypes pendant plusieurs années. Ce sont les réacteurs à haute température refroidis à l'hélium et des réacteurs à sels fondus. Il est fort possible que l'un de ces deux concepts s'impose sur le long terme.

La figure 5 indique les principales filières utilisées dans le monde

Type de réacteur	Elément fissile	Elément fertile	Energie des neutrons	Caloporteur	Modérateur	Gigawatts élec installés
Eau légère Sous pression	^{235}U	^{238}U	thermiques	H_2O	H_2O	195
Eau légère bouillante	^{235}U	^{238}U	thermiques	H_2O	H_2O	80
Eau lourde	^{235}U	^{238}U	thermiques	D_2O	D_2O	19
Graphite-gaz- $\text{U}_{\text{naturel}}$	^{235}U	^{238}U	thermiques	CO_2	graphite	13
Haute température	^{235}U ^{233}U	^{238}U ^{232}Th	thermiques	hélium	graphite	0
Neutrons Rapides	^{239}Pu	^{238}U	rapides	sodium	néant	2,4
Sel fondu	tous	tous	therm. ou rap.	Sel fondu	graphite	0

Figure 5 – Les filières utilisées dans le monde ou ayant été testées. Ce sont les réacteurs refroidis à l'eau légère qui dominent largement le marché.

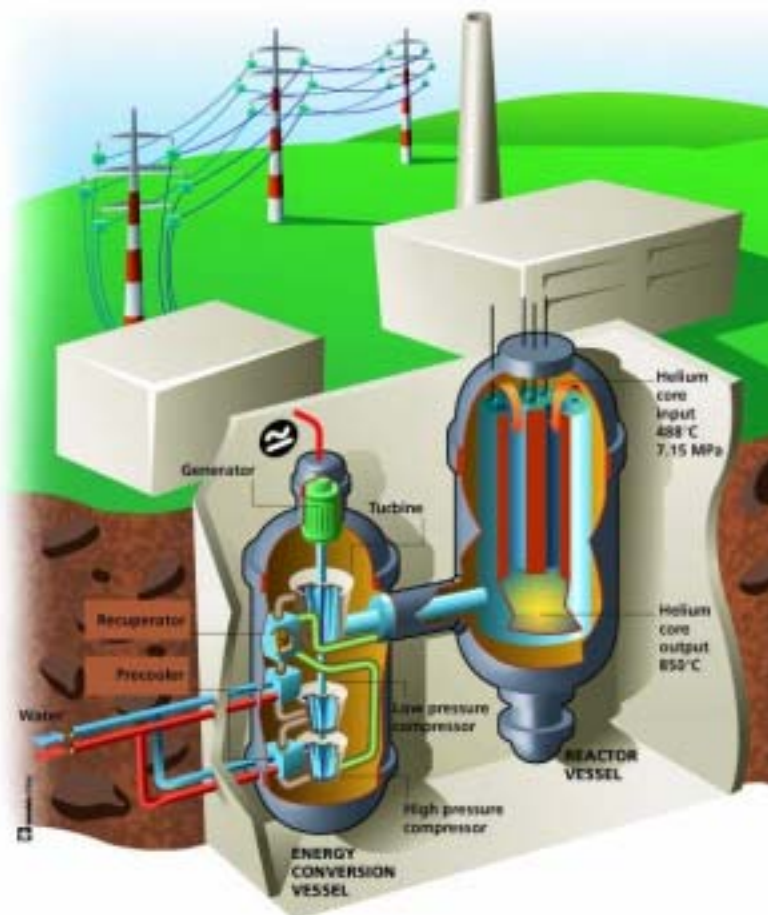


Figure 6 – Schéma de principe d'un réacteur à haute température refroidi à l'hélium en cycle direct. Ce projet étudié conjointement par Général Atomic (USA), Framatome (France) et Minatom (Russie), vise à brûler le plutonium militaire.

7. La fusion thermonucléaire

La consommation annuelle d'énergie dans le monde est de l'ordre de $400 \cdot 10^{18}$ Joules soit en moyenne 80 GJ par personne, et ce chiffre ne peut guère évoluer qu'à la hausse. Pour fixer les idées, si 5 milliards d'habitants vivaient en consommant autant d'énergie qu'un européen, ce chiffre devrait doubler. A l'échelle de un ou deux siècles, ce paysage va sans doute considérablement évoluer à cause de la raréfaction du pétrole et du gaz et de considérations sur l'impact des gaz à effet de serre sur le climat. Si l'on essaie d'avoir une vue à long terme et que l'on étudie quelles sources d'énergie sont compatibles avec un maintien sur quelques millénaires d'une consommation du niveau de l'actuel, on ne peut guère envisager que quatre scénarios :

- les énergies renouvelables, à condition d'y consacrer de grandes surfaces, la puissance produite variant entre 1 (barrages) et 200 W/m^2 (solaire, éolien). Pour produire les 80 GJ/an du " terrien moyen " il faut entre 12 et 2500 m^2 .

- la fission à condition qu'elle consomme des noyaux fertiles abondants comme l'uranium 238 ou le thorium 232 (d'où la nécessité de neutrons rapides)

- la fusion thermonucléaire deutérium-tritium qui, comme on le verra plus tard, consomme principalement du lithium.

- les hybrides fusion-fission, qui permettraient de brûler des noyaux fertiles abondants tout en minimisant les déchets radioactifs à long terme.

C'est dans cette optique à long terme que sont développées les recherches sur les réacteurs à neutrons rapides et sur la fusion. Cette dernière source d'énergie, qui est la source d'énergie des étoiles présente des avantages significatifs :

- 1) Ressources abondantes : dans le cas de la fusion deutérium tritium, comme on le verra plus tard, on consomme du deutérium (33 grammes par tonne d'eau de mer) et du lithium (ressources mondiales très importantes). Pour produire 80 gigajoule avec un rendement de 30% (toujours pour le " terrien moyen "), il faut 1.1 mg de lithium et 0.32mg de deutérium. Les perspectives se comptent en milliers d'années. Il existe d'autres schémas plus avancés comme la fusion deutérium - deutérium ou mieux encore les réactions deutérium-hélium3 et lithium-proton qui peuvent être qualifiées d'inépuisables sur la durée de vie du système solaire ; les deux dernières réactions ont en outre l'avantage de ne produire que très peu de neutrons, ce qui diminue l'activation des structures.

- 2) La fusion ne produit pas de gaz à effet de serre

- 3) La fusion présente un potentiel important d'acceptabilité

- la radiotoxicité générée par la fusion ne provient que de l'activation des structures du réacteur. Elle est plus faible que celle produite par la fission, et surtout, si on optimise les structures, les isotopes produits ont des durées de vies à l'échelle de la décennie, ce qui évite l'impression d'irréversibilité produite par les isotopes multicentennaires.

- elle présente des avantages intrinsèques du point de vue de la sûreté (il n'y a pas de réaction en chaîne, peu de combustible disponible - le plasma pèse quelques mg). Dans les schémas de réacteurs actuels, on vise une installation telle que même en cas d'accident majeur (perte de confinement de la machine et du bâtiment) aucune évacuation du public ne soit nécessaire.

- il n'y a pas de risque de détournement de matières fissiles, les matériaux fertiles ne rentrant pas dans le cycle du combustible. D'autre part, ce qui tient lieu de " cycle du combustible " (transformation de lithium en tritium) est intégré à la machine, et il n'y

a donc pratiquement pas de transport de combustible en dehors du site.

- le tritium mérite une mention séparée. L'inventaire dans un réacteur sera de l'ordre de quelques kilogrammes (la plupart dans le cycle du combustible). Cet isotope présente des avantages certains (durée de vie de 12,6 ans, radiotoxicité faible). Il est cependant extrêmement mobile (diffusion, saut d'une molécule à l'autre en s'échangeant avec des hydrogènes).

Elle présente aussi des inconvénients :

- 1) La complexité. Dans l'état actuel des connaissances, un réacteur à fusion est plus complexe qu'un réacteur à fission et à plus forte raison qu'une centrale thermique. Cette complexité tient à deux raisons :
 - le milieu réactif est un plasma dont la production et le maintien nécessite une machinerie lourde : aimants, chauffages pour la fusion magnétique, laser ou faisceau d'ions pour la fusion inertielle
 - tout se passe comme si réacteur et cycle du combustible étaient imbriqués, le tritium étant produit et consommé sur place.
- 2) Un effet de seuil (volume pour le confinement magnétique, énergie à déposer pour faire implorer une cible en confinement inertiel) qui fait qu'il semble difficile, sauf percée conceptuelle importante, d'envisager de petites unités de production. Les puissances seuils dépassent le gigawatt thermique.

Les recherches sur la domestication de l'énergie de fusion se sont développées réellement à partir des années cinquante. Les progrès ont été considérables, mais les caractéristiques de la fusion font que ces recherches sont très spécifiques et ressemblent à un programme qui aurait été mis en place au début du vingtième siècle si on avait voulu développer le Concorde ou l'Airbus, sans passer par l'Eole d'Ader ou l'Avion de Blériot. Tout d'abord l'effet de taille empêche de réaliser un développement progressif, c'est à dire de prouver la faisabilité du réacteur électrogène pour un faible coût et de développer une filière tout en exploitant un parc de réacteurs déjà rentables : la physique impose (dans l'état actuel des connaissances) que le premier réacteur électrogène ait une puissance supérieure au gigawatt thermique. D'autre part, une grande partie des dispositifs à réaliser pour le réacteur à fusion (aimants, première paroi, chauffages du plasma) a peu d'usage en dehors de la fusion. Malgré ces handicaps, le développement a été considérable, en grande partie parce que ces recherches ont bénéficié d'une collaboration internationale forte qui ne s'est pas interrompue entre l'Est et l'Ouest même au plus fort de la guerre froide.

Principe de la fusion

La réaction de fusion la plus facile à réaliser est la fusion deutérium – tritium :



Cette réaction ne se produit que si la vitesse des noyaux est suffisante pour vaincre la répulsion électrostatique des deux noyaux de charge positive (énergie cinétique de quelques centaines de keV). En fait, un phénomène appelé *effet tunnel* permet que la réaction se produise à des taux acceptables même pour des énergies cinétique dans la gamme 10-20 keV : les sections efficaces sont du même ordre de grandeur que la surface du noyau (10^{-30} m^2).

Une conséquence est qu'il est exclu de travailler à partir d'atomes neutres, par exemple en envoyant un faisceau de deutons sur une cible de tritium, les collisions inélastiques ion - électron étant alors infiniment plus probables que les réactions de fusion (c'est la surface de l'atome qui compte soit plutôt 10^{-20} m^2). De même la faible section efficace de fusion interdit les collisions entre faisceaux d'ions. On arrive ainsi au schéma suivant : les atomes sont complètement ionisés, c'est à dire que le milieu réactionnel est un plasma chaud mélange de deutérium (concentration n_D), de tritium (concentration n_T), et d'électrons (concentration n_e). L'optimum est pour des concentrations égales de deutérium et de tritium. La quasi-neutralité impose : $n_D = n_T = n_e/2$. La température doit être telle que les collisions entre ions suffisent à déclencher les réactions.

En ce qui concerne les matières premières, le deutérium est facilement obtenu à partir de l'eau. Par contre le tritium est un isotope de l'hydrogène à vie courte (12,6 ans), ce qui fait qu'il n'existe pas à l'état naturel (hormis celui qui est fabriqué par les rayons cosmiques qui cassent les noyaux d'azote de l'air).

On réalise qu'un réacteur à fusion ne peut être viable que si les deux conditions suivantes sont remplies :

- il produit plus d'énergie qu'il n'en faut pour maintenir le plasma
- on trouve un moyen de produire le tritium nécessaire

Deux routes existent :

- la voie par confinement magnétique, où l'on maintient par un champ magnétique des plasmas chauds. On vise des plasmas de 10^{20} particules par mètre cube (250 000 fois moins que dans l'air ambiant) à 150 millions de degrés soit une pression de 0.2 MPa. Le temps de confinement de l'énergie est de quelques secondes. La puissance fusion est de l'ordre de quelques mégawatts par mètre cube. Compte tenu de la valeur de la section efficace et de la densité il faut à un ion deutérium environ 50 secondes pour subir une réaction de fusion pendant lesquelles il parcourt environ 50000 km.
- la voie par confinement inertiel. On comprime un plasma de quelques milligrammes à des densités de l'ordre de 10 tonnes par mètre cube ($6 \cdot 10^{30} \text{ m}^{-3}$), les réaction de fusion les portant à des températures de 150 millions de degrés, soit une pression de 10^{16} Pascal. Il n'y a pas de confinement, la cible explosant à la vitesse des ions en moins d'une nanoseconde. Pour comparer avec la fusion magnétique, le libre parcours moyen d'un ion pour une réaction de fusion est inférieur au millimètre. L'énergie de fusion dégagée par l'explosion d'une cible est de quelques centaines de MJ.

Comparons ces conditions à celles qui règnent à l'intérieur du soleil : la masse du soleil est de $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ et son rayon 696000 km, la puissance fusion est de $4 \cdot 10^{26}$ watts, puissance qui est rayonnée par la surface avec un flux de 70 MW m^{-2} ; celle ci provient principalement d'une sphère intérieure de 200 000 km de rayon, la température moyenne y est de 5 millions de degrés, la densité de 10^5 kg m^{-3} et le temps de confinement est de l'ordre de 3 millions d'années. Malgré ces chiffres impressionnants, la puissance de fusion reste (heureusement) modeste, 8 MW m^{-3} . En effet, le soleil brûle de l'hydrogène en suivant le cycle de Bethe qui

est catalysé par le carbone, ce qui est bien plus difficile que la réaction deutérium - tritium.

Cas particulier de la fusion hybride

Il existe une variante de la fusion telle qu'elle a été décrite ci dessus. L'idée de base est de modifier la couverture en y adjoignant des éléments fertiles ou fissiles sous la forme d'un assemblage sous critique. Les avantages en sont :

- augmentation du rendement : la couverture est un multiplicateur d'énergie car aux 17,6 MeV d'énergie de fusion, il faut ajouter l'énergie produite en moyenne par un neutron qui pénètre dans la couverture
- de simplifier le bilan neutronique, des neutrons supplémentaires étant produits par les réactions de fission dans la couverture.

Le confinement magnétique et la filière tokamak

Une particule chargée dans un champ magnétique a un mouvement essentiellement parallèle aux lignes de champs plus une dérive lorsque le champ est inhomogène ou courbé. Le but est de trouver des configurations magnétiques garantissant que les trajectoires des particules restent confinées sur des milliers de kilomètres. De nombreuses configurations ont été étudiées dès les années 1950 et actuellement les meilleurs résultats sont donnés par la configuration tokamak inventée par les Soviétiques. Le champ magnétique a deux composantes :

- le champ toroïdal qui est celui d'un solénoïde torique. Dans la plupart des expériences, il a une valeur d'environ de 4 teslas.
- le champ poloidal qui est crée par un courant qui circule dans le plasma. Dans les expériences récentes ce courant se mesure en Mégaampères. Ce courant est généré dans le plasma par effet transformateur : des bobines externes font varier le flux magnétique dans le trou central, ce qui induit un courant dans le plasma qui joue le rôle de secondaire. Ce courant sert aussi à chauffer le plasma et c'est ainsi qu'on atteint facilement des températures de l'ordre de dix millions de degrés. Des bobines extérieures contribuent également au champ poloidal pour assurer l'équilibre de cette boucle de courant qui a tendance à l'expansion.

La prochaine étape du programme de recherche sur la fusion

La stratégie européenne dans le domaine de la fusion s'articule autour de deux étapes :

- une machine visant à démontrer la faisabilité physique de la production de fusion.
- une autre machine plus proche d'un réacteur permettant d'intégrer toutes les technologies du réacteur.

En 1988, un accord quadripartite (USA, Russie, Japon, Europe) a été conclu pour concevoir une machine destinée à atteindre l'ignition : ITER. Après plusieurs étapes on est arrivé en 1998 au dessin d'un tokamak contenant environ 1500 mètres cubes de plasmas. Le contexte ayant changé, les quatre partenaires font preuve d'un enthousiasme réduit pour un tel projet (36 GF) n'ayant des retombées qu'à long terme et les USA vont jusqu'à se retirer. L'accord ITER est prolongé à trois jusqu'en 2001 avec comme objectif une réduction du projet tout en conservant une ambition suffisante pour que la stratégie en deux étapes ait toujours un sens. C'est ainsi qu'est en train de naître ITER FEAT machine de coût moitié dont l'objectif n'est plus que d'atteindre le fonctionnement en fusion permanente, mais un domaine de paramètre suffisant pour que les réactions de fusion dominent le fonctionnement.

Le tableau ci-dessous en donne quelques caractéristiques ainsi que celle du JET, l'une des plus grosses machines en fonctionnement.

	ITER FEAT	JET
Grand rayon du tore	8.1 m	6,2 m
Petit rayon (plan équatorial)	2.8 m	2 m
Courant	21 MA	15 MA
Champ magnétique	5,7 T	5,3 T
Q	10	0,4

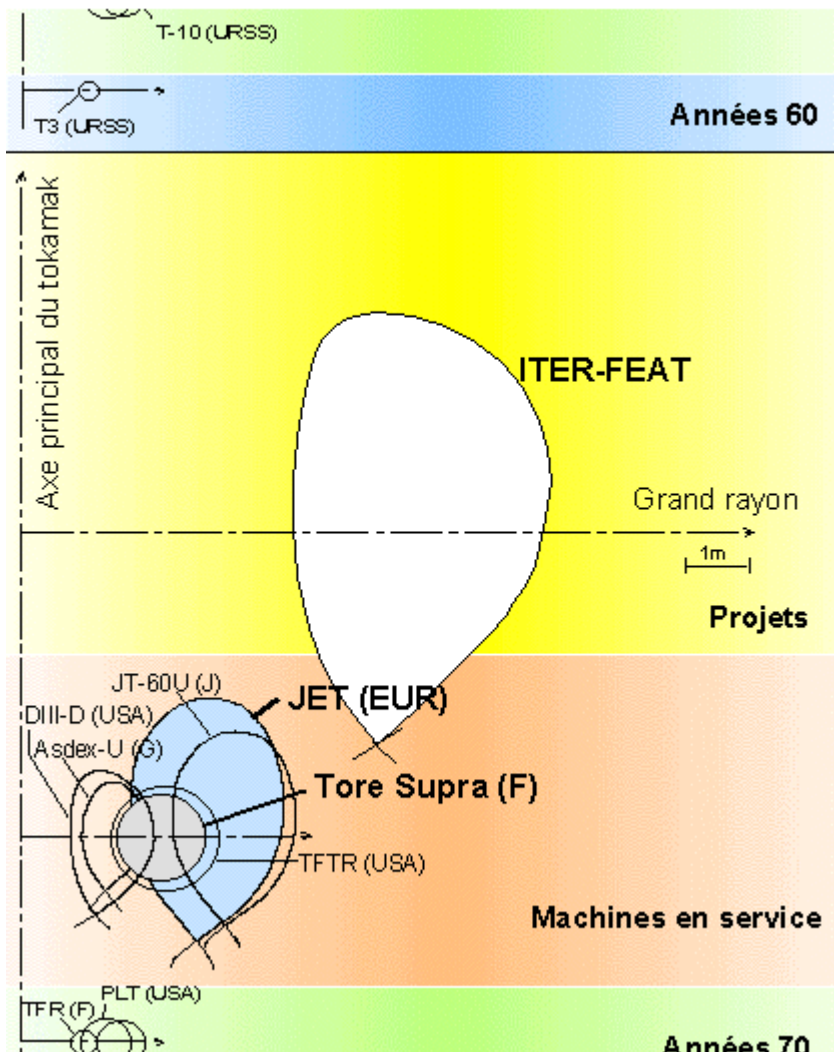


Figure 7 – Le projet ITER-FEAT comparé aux autres machines déjà réalisées.

Il y a actuellement trois candidats envisagés pour accueillir le projet ITER. Le Japon, le

Canada et l'Union européenne. Dans le cas où ce serait l'Europe qui serait retenue, le projet pourrait être installé en France, sur le centre du CEA à Cadarache.

--o0o--

Remerciements : l'auteur remercie ses collègues du CESEN (cercle d'étude sur l'énergie nucléaire) de l'avoir autorisé à reproduire des parties importantes de notre ouvrage commun : *ÉLECTRONUCLÉAIRE, une présentation par des physiciens.*

Cet ouvrage est en cours de réimpression (Éditions EDP sciences)