

**Introduction**

La réaction de fusion nucléaire est la source d'énergie des étoiles, c'est une source d'énergie potentiellement inépuisable dont les rejets sur l'environnement sont faibles. Le projet ITER a pour objectif de maîtriser cette réaction pour produire de l'énergie, en utilisant comme combustible deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Ce projet international, est en cours de réalisation à Saint-Paul-Lez-Durance, dans le sud de la France. Nous allons ici nous intéresser aux cycles de vies des combustibles de fusion, en comparaison avec ceux de la fission, pour comprendre les réels enjeux autour de la réussite du projet ITER.

**En quoi les combustibles de la fusion pourraient participer à une pérennité dans l'utilisation de l'énergie nucléaire ?**

**Comparaison des principes de fonctionnement : Fission/fusion**

La fission nucléaire consiste à projeter un neutron sur un atome lourd instable. Celui-ci se scinde en 2 atomes plus légers. Cette scission génère un dégagement d'énergie, des rayonnements, et projette 2 ou 3 neutrons capables à leur tour de provoquer d'autres fissions.

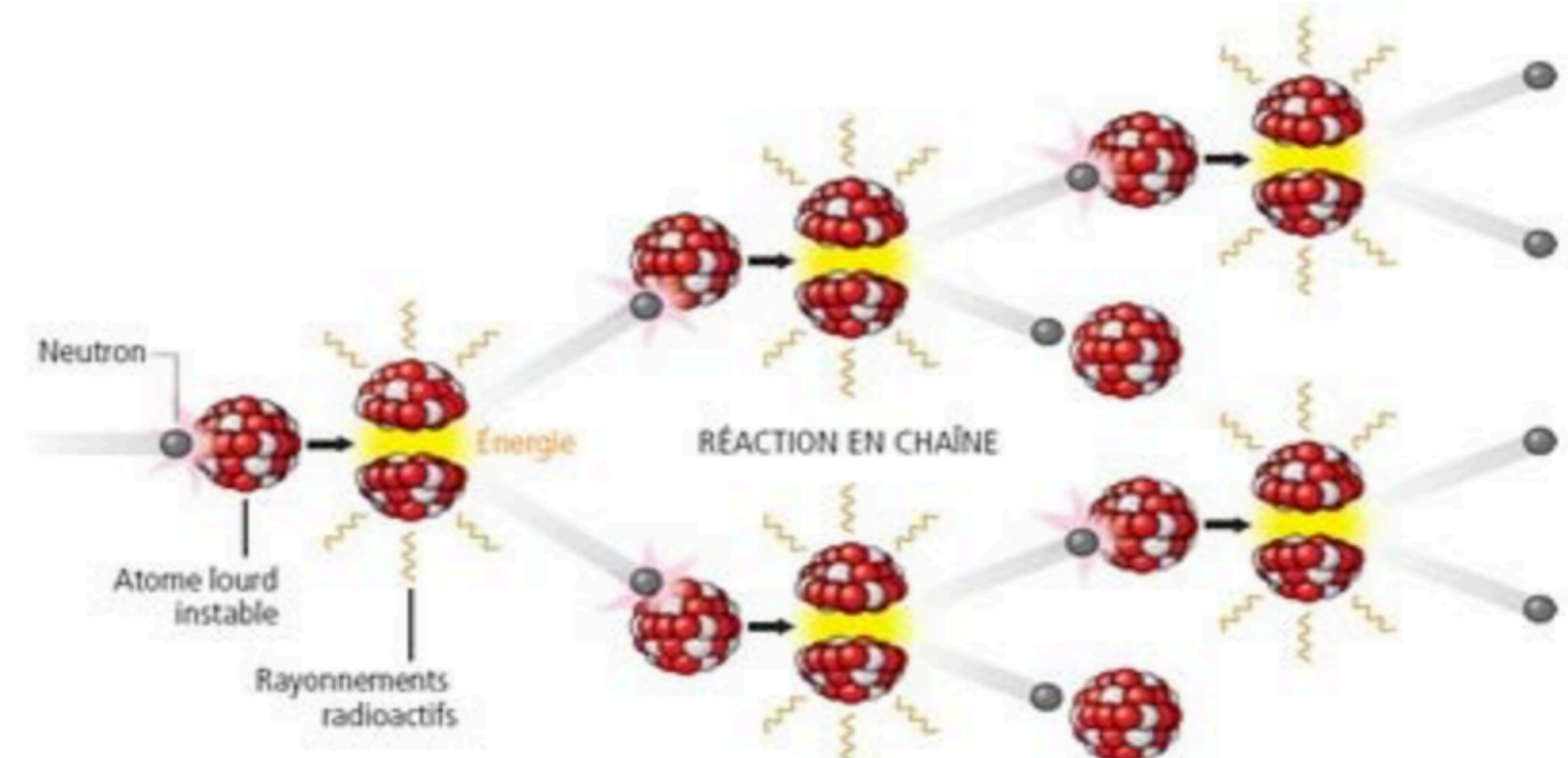


Figure 1: Schéma de la fission nucléaire  
Source: IRSN

La fission nucléaire produit des déchets de différentes activités avec des périodes de vie allant de courte à très longue, cela amène donc un problème important dans la gestion des déchets issus de la fusion nucléaire.

Cette réaction de fission est aujourd'hui beaucoup remise en cause, car elle génère beaucoup de déchets ultimes dont la gestion est très coûteuse et controversée.

La fusion nucléaire consiste à faire fusionner différents atomes pour en former un plus massif. Cette réaction se déroule dans des conditions extrêmes, à 150 millions de degrés, dans des conditions de pression et de champ magnétique très fort.

Lors de la fusion de deux noyaux légers, le noyau créé est dans un état instable, il tente de se stabiliser et pour cela il produit un atome d'hélium stable et éjecte un neutron, libérant une importante quantité d'énergie.

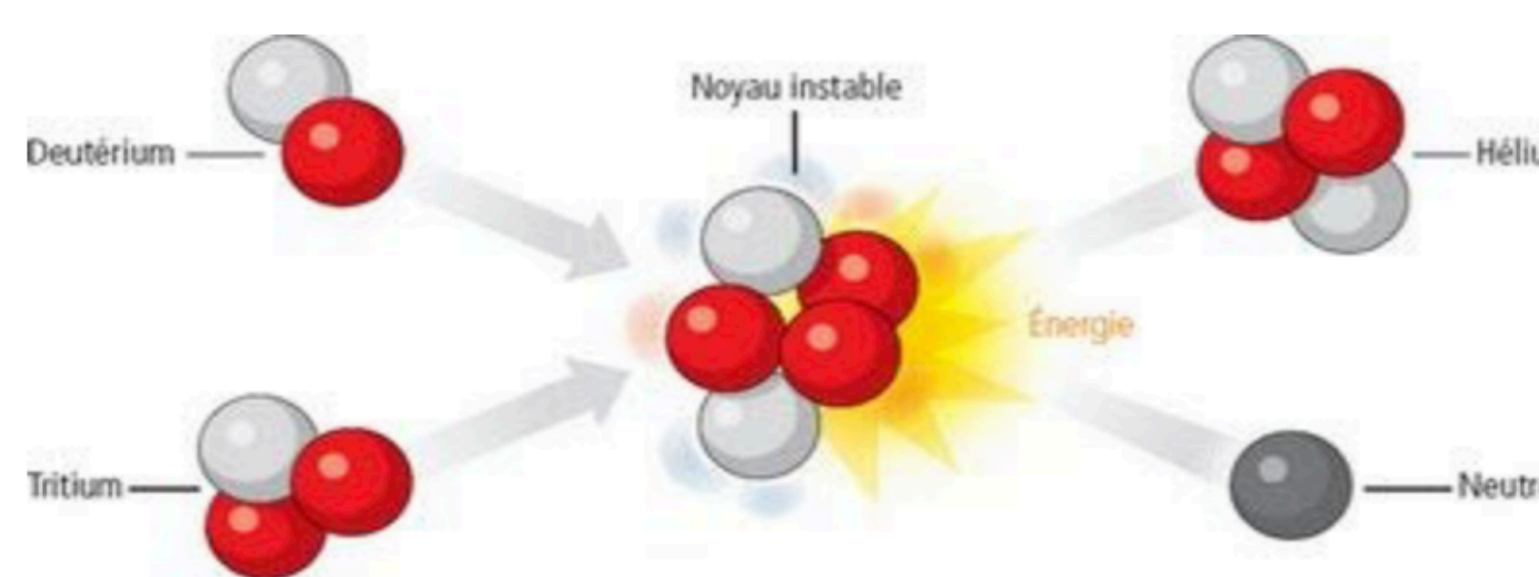


Figure 2: Schéma de la fusion nucléaire  
Source: IRSN

Les déchets produits sont de différentes activités, mais avec des périodes de vie beaucoup plus courtes, et donc beaucoup moins contraignantes à gérer comme déchets.

Les deux isotopes choisis pour les essais de production d'énergie par fusion nucléaire sont le deutérium, deux isotopes de l'hydrogène.

**Coûts des combustibles de la fusion et de la fission**

**Combustibles de la Fusion**

**Deutérium**  
Chaque litre d'eau de mer contient 33 mg de deutérium, dont le coût d'extraction par séparation isotopique revient à 4000 euros par kg.

**Tritium**  
Le tritium a un coût d'environ 30000euros le gramme, présent à l'état naturel par séparation isotopique. Le tritium peut cependant être généré dans l'enceinte même du tokamak en tirant parti de l'interaction entre les neutrons et du lithium, en introduisant le lithium dans la chambre à vide, c'est la surgénération du tritium.

On observe une augmentation du coût du combustible de la fission nucléaire, de manière générale, mais aussi en proportion par Mégawatt produit. Cela s'explique par une augmentation du coût de l'extraction des minerais, de plus en plus dur à exploiter et de moins en moins riche en uranium, dû à l'épuisement des ressources naturelles de celui-ci. Cette augmentation est continue, jusqu'à aujourd'hui, il y a donc nécessité à trouver des alternatives.

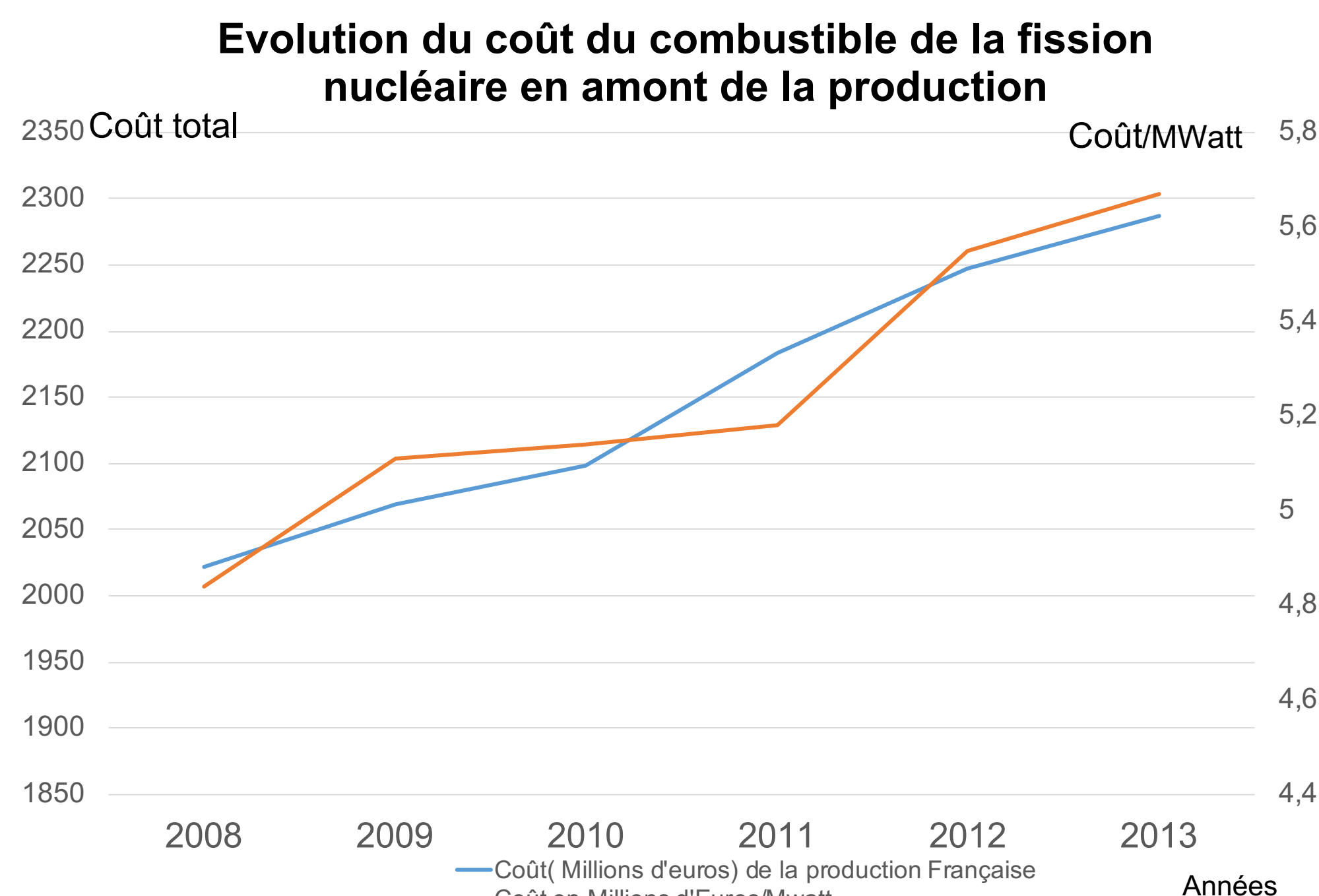


Figure 3. Source données : Cours des comptes, coût de production de l'électricité nucléaire

**Comparaison du rendement énergétique des combustibles de la fusion et de la fission**

La quantité d'énergie produite par un réacteur de fusion industriel, tels qu'ils pourront voir le jour dans la seconde moitié de ce siècle, sera équivalente à celle produite par un réacteur de fission entre 1 et 1.7 gigawatts. Le coût moyen par kilowatt d'électricité devrait aussi être du même ordre : légèrement plus élevé au début, la technologie étant nouvelle, puis décroissant par la suite dans la mesure où les économies d'échelle feront baisser les prix.

De très faibles quantités de deutérium et de tritium suffisent à alimenter la réaction de fusion (à l'intérieur de la chambre à vide la quantité de combustible dans le plasma ne dépasse jamais quelques grammes).

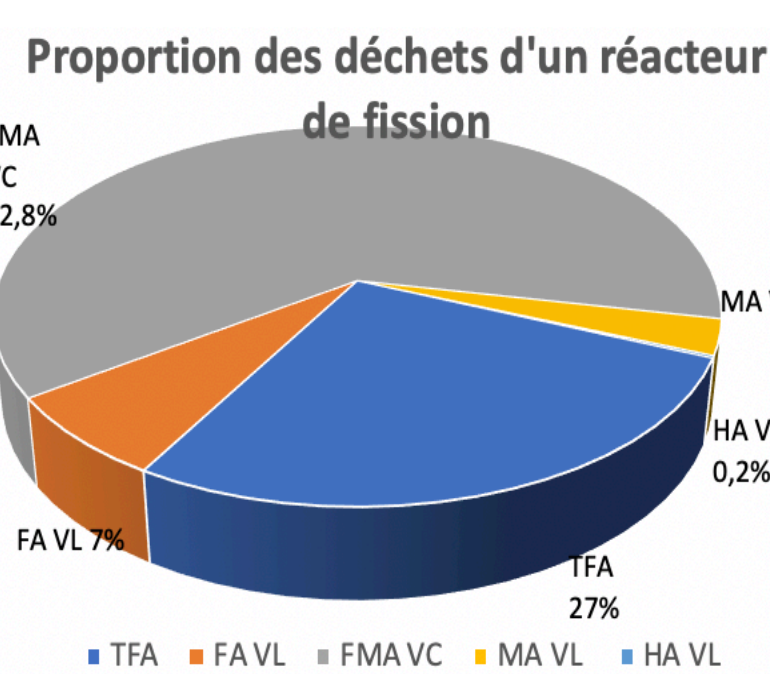
Le tritium, combustible bien plus difficile à obtenir que le deutérium sera généré dans la chambre à vide du TOKAMAK, par bombardement du lithium, ou 1 tonne de lithium permettra de produire 41,7 kg de tritium, grâce à la surgénération.

Combustible, source d'énergie	1 gramme de charbon	1 gramme d'uranium enrichi à 4%	1 gramme de combustible de fusion nucléaire
Energie dégagée pour 1 g de combustible	2,4*10 <sup>4</sup> Joules	2,8*10 <sup>9</sup> Joules	1,5*10 <sup>10</sup> Joules

Figure 4. Source données: ITER

La fusion nucléaire a donc bien un rendement énergétique plus important que la fission nucléaire, cependant celle-ci nécessite une réussite de la réaction de surgénération du tritium dans la chambre à vide, pour sa viabilité économique.

**Rendement énergétique 4 à 5 fois plus important pour la que pour la fission**



**Fission**

La production d'une faible partie de déchets à activité moyenne et haute entraîne une gestion beaucoup plus complexe et coûteuse. C'est dans ces déchets qu'est concentrée la majorité de la radioactivité.

Figure 5 Source données: ANDRA

**Déchets des combustibles**

- Coût de traitement des déchets**
- Stocker 1m3 de FA VL : 2400euros
- Stocker 1m3 de TFA : 260euros
- Stocker 1m3 de MA VL : 45000euros
- Stocker 1m3 de HA VL : 80000euros (estimation)

**Fusion**

La réaction de fusion, quant à elle, produit une grande majorité de déchets de très faible et faible activité, ainsi qu'une petite partie de déchet de moyenne activité à vie longue, et des déchets tritiés.

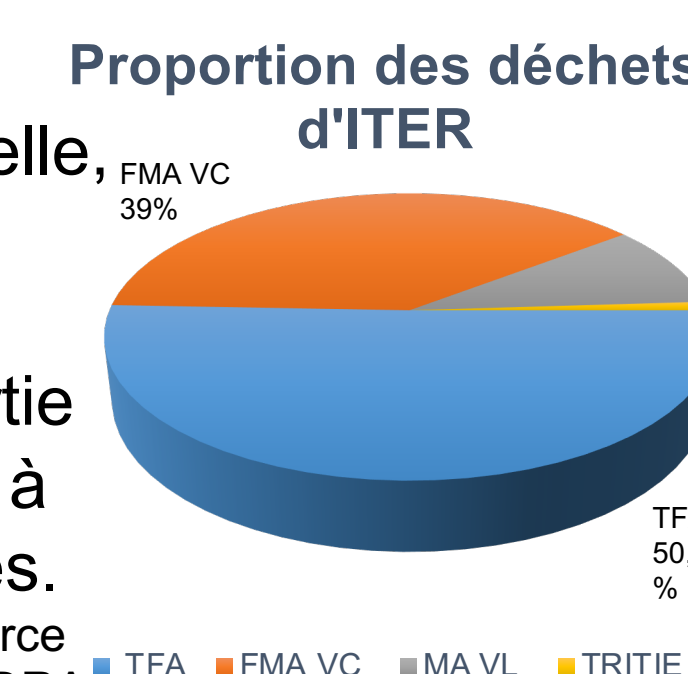


Figure 6. Source données: ANDRA

**Conclusion:** Le projet ITER est un projet très ambitieux, dont la réussite permettrait au monde de demain une source d'énergie durable et respectueuse de l'environnement. Les premiers essais sont prévus pour 2025, cette nouvelle source d'énergie permettrait de réduire la production de déchets radioactifs de hautes activités dont le traitement est une réelle contrainte, comme les déchets de la fission. De plus son rendement énergétique est bien plus important qu'avec la fission et les disponibilités en combustibles de cette réaction sont de plusieurs centaines de milliers d'années.

Cependant la fusion est un réel défi technologique, sûrement un des plus importants du 21<sup>ème</sup> siècle face aux besoins énergétiques grandissants ainsi qu'aux problématiques environnementales. Ce défi technologique permettrait aussi d'apporter au nucléaire un visage nouveau, où le risque d'accident serait fortement réduit. La fusion pourrait donc permettre à l'énergie électrique issue du nucléaire d'avoir l'image d'une énergie propre, que nous devons apprendre à maîtriser.

**Bibliographie:** -R.Daustray, L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel du changement climatique, Rapport à l'académie des Sciences, TEC/DOC, Lavoisier, décembre 2001.

-S.Rosanvallon, B.C.NA, M.Benchikhoun, J.Elbez Uzan, O.Gastaldi, N. Taylor, L. Rodriguez Article history: Fusion Engineering and Design ITER waste Management

-E.Wigner, A.Weinberg, The Physical Theory of Neutron CHAIN Reactors

-A.Pietropaolo, F.Andreoli, M.Angelone, et al The Fracasti neutron generator: a multipurpose facility for physics and engineering

-A. Masi, et al Internecional Conference on accelerator and Large experimental Control Systems, vol 49

-ITER/Cours des comptes de production de l'électricité nucléaire/IRSN