

CHAPITRE 01 GENERALITE SUR LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

1. UTILISATION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

La "fusion" des éléments les plus légers, à l'autre extrémité de la même classification, deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium, qui en "fusionnant" engendrent un élément plus lourd, l'hélium, en dégageant également une grande quantité d'énergie.

Dans les deux réactions nucléaires citées, la matière devient source d'énergie, comme le prévoit l'équation d'Einstein $E = mc^2$ (E l'énergie d'un corps est équivalente à sa masse multipliée par le carré de C la vitesse de la lumière dans le vide soit 300 000 kilomètres par seconde) [3]. Ces deux réactions ont apporté une avancée énergétique très prometteuse et de longue durée.

1.1. L'énergie nucléaire incontrôlée

L'énorme quantité d'énergie libérée par les réactions de fission et de fusion, si elle n'est pas contrôlée, peut être utilisée comme arme de destruction massive. Cette puissance destructrice fut brutalement révélée au grand public par les bombardements atomiques des villes japonaises de Hiroshima et Nagasaki, les 6 et 9 août 1945 [4].

1.1.1. La bombe A

La bombe atomique, ou bombe A, fondée sur le principe de la fission, fut la première arme nucléaire développée. L'explosif est un élément lourd comme l'uranium 235 ou le plutonium 239. Le mécanisme à la base de la bombe atomique est une réaction en chaîne où chaque neutron émis par la fission d'un noyau déclenche la fission d'un autre noyau, ce qui provoque l'émission de nouveaux neutrons qui, à leur tour, vont faire fissionner d'autres noyaux et ainsi de suite. De l'énergie étant libérée à chaque réaction de fission, la réaction en chaîne libère une quantité énorme d'énergie en quelques microsecondes : c'est l'explosion atomique. Pour qu'une réaction en chaîne puisse s'enclencher il faut que la quantité d'explosif soit suffisante pour que chaque neutron émis ait une probabilité importante d'interagir avec un noyau avant de s'échapper. La quantité

minimum d'explosif nécessaire définit la masse critique (52 kg pour l'uranium 235, 10 kg pour le plutonium [5])

1.1.2. Energie dégagée par une bombe A

L'usage est d'exprimer l'énergie d'une bombe atomique en « kilotonnes ». 1 kilotonne équivaut à l'énergie dégagée par l'explosion de 1 000 tonnes de TNT, le trinitrotoluène, un explosif chimique particulièrement puissant. La fission complète de 1 kg de matière correspond à 17 kt. Pour fixer les idées, disons que 1 cm³ de matière fissile est capable de dégager en moins d'une microseconde une énergie équivalente à celle que contiendrait un train de marchandises plein d'explosif chimique[5].

1.1.3 . La bombe H

La bombe à hydrogène, ou bombe H, développée à partir de 1950, est une arme nucléaire qui utilise l'énergie dégagée par la fusion d'éléments légers. Contrairement à la bombe A, son déclenchement ne nécessite pas de masse critique, ce qui la rend plus aisée à transporter. L'explosif : constitué d'un mélange de deutérium, de tritium et de lithium, est porté à très haute température par l'explosion d'une petite bombe A qui joue le rôle de detonateur. Ce chauffage est si rapide que l'inertie des noyaux suffit à les maintenir confinés et les réactions de fusion peuvent alors s'enclencher. Dans ce cas, on parle de bombe à deux étages (fission/fusion). Afin d'augmenter la puissance on peut encore ajouter un autre étage (bombe à trois étages fission/fusion/fission) ou une réaction en chaîne de fission est amorcée par les neutrons dégagés par la fusion[5].

1.2. L'énergie nucléaire contrôlée

Pour utiliser l'énergie nucléaire à des fins civiles, il faut réaliser un réacteur permettant de contrôler les réactions nucléaires. Si de tels réacteurs existent pour la fission, leur réalisation pour la fusion constitue un des grands défis de l'énergie nucléaire de demain.

2. Principe d'un réacteur de fission

Aujourd'hui, les réacteurs nucléaires produisent de la chaleur grâce à la fission de l'uranium ou du plutonium. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité (centrales nucléaires) ou propulser des navires (sous-marins, porte-avions, brise-glaces). Le pilotage d'un réacteur nucléaire repose sur le contrôle de la réaction en chaîne qui s'enclenche lorsque la masse critique de combustible au cœur du réacteur est atteinte. Pour entretenir la réaction en chaîne, on entoure la matière fissile d'un réflecteur de neutrons. Pour éviter l'emballement de la réaction en chaîne, on introduit des barres de matériaux qui absorbent les neutrons, comme le

cadmium ou le gadolinium, dans la matière fissile. Les neutrons produits par la fission sont ralentis grâce à un matériau «modérateur» (eau lourde, graphite). En effet, plus un neutron est lent, plus la probabilité qu'il soit capturé par un noyau du combustible et provoque sa fission est grande. L'énergie cinétique des produits de fission doit être récupérée pour servir à la production d'électricité. Ce rôle est assuré par un fluide transporteur de chaleur (de l'eau sous pression dans la majorité des réacteurs) qui circule autour des barreaux d'uranium.

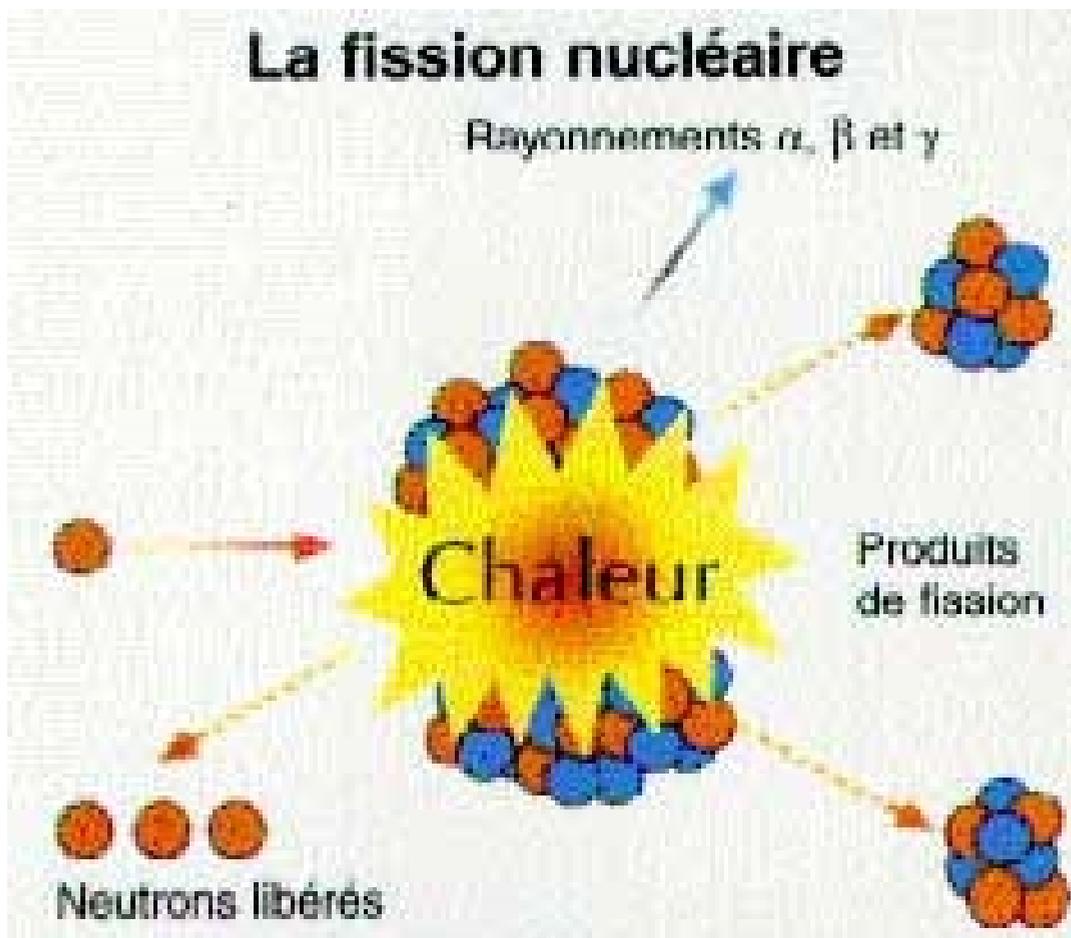
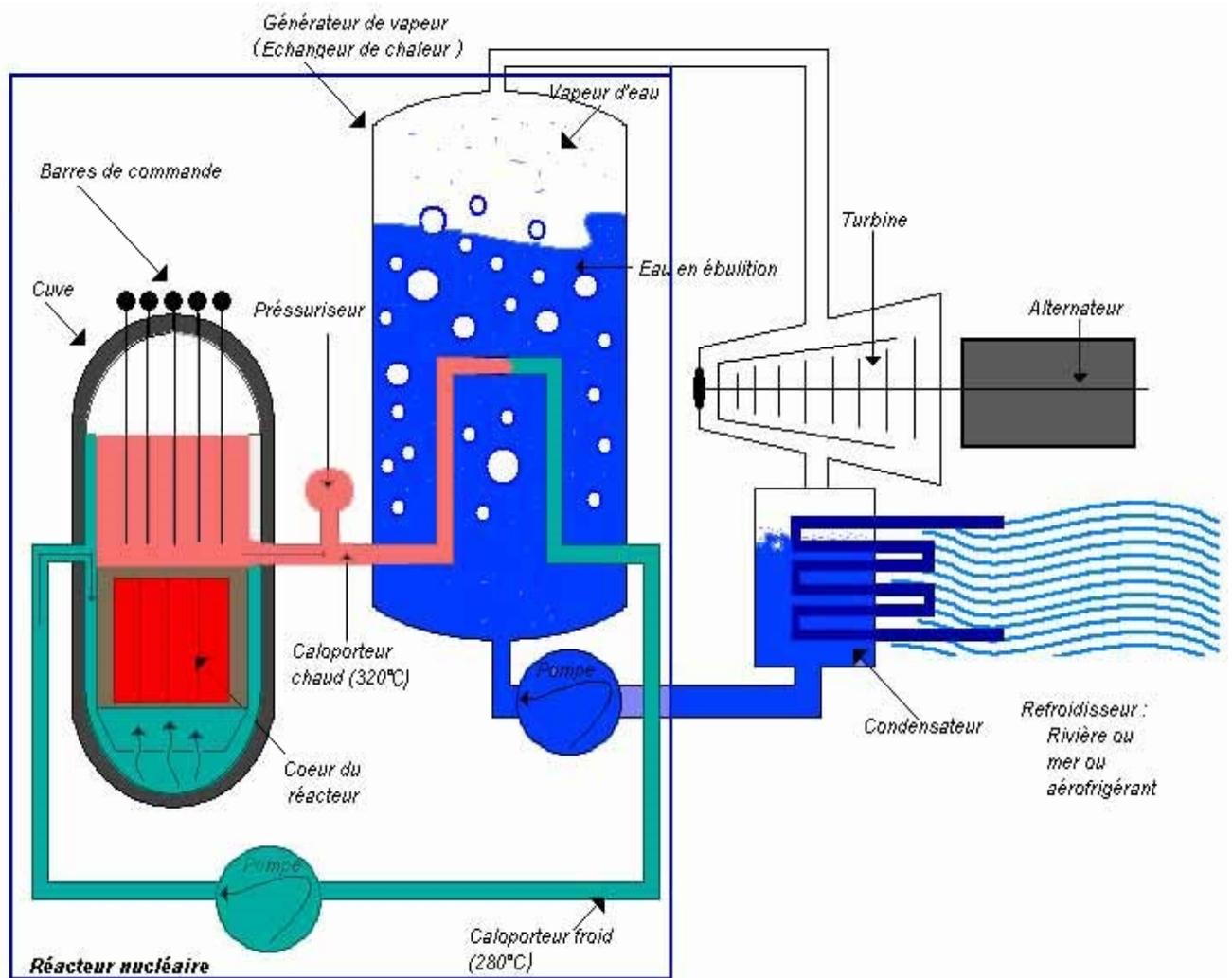


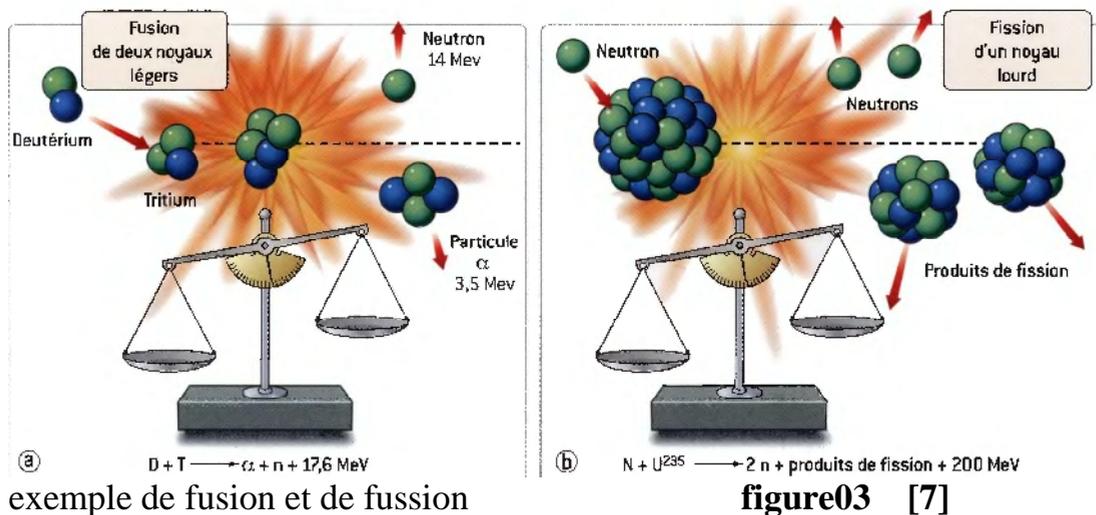
Figure 01 [6]



Réacteur eau sous pression [6]

FIGURE 02

Figure 02 Schéma d'une centrale nucléaire à eau sous pression. La cuve contient le combustible avec les barres de contrôle qui absorbent les neutrons et qui évitent l'emballement de la réaction en chaîne. L'énergie des produits des réactions de fission est récupérée grâce à de l'eau sous pression qui circule autour des barreaux de combustibles et qui constitue le circuit primaire (circuit orange sur la figure 02 se trouvant à l'intérieur de l'enceinte de sécurité du réacteur). Cette eau est à une température moyenne de 300°C. Le circuit secondaire est celui qui passe du générateur de vapeur au condenseur, via les turbines à vapeur. L'énergie mécanique de ces dernières est transformée en électricité par des alternateurs. Un troisième circuit assure le refroidissement du condenseur grâce à de l'eau provenant de la mer ou d'un fleuve.



Un exemple de réaction de fusion (a) de deux noyaux légers: le deutérium (D) et le tritium (T). Le résultat est une particule alpha, un neutron et de l'énergie, sous forme cinétique, de ces deux produits.

Un exemple de réaction de fission (b) d'un noyau lourd, l'uranium 235 bombarde par un neutron. Le résultat est un neutron, la fission d'un noyau lourd. Les produits de fission constituent deux fragments, deux neutrons et de l'énergie sous forme cinétique. Dans les deux cas, la somme des masses des produits des deux réactions est toujours plus petite que la somme des masses des noyaux de départ. Cela signifie que les produits sont plus stables que les réactifs. Le reste est sous forme d'un rayonnement électromagnétique et/ou de neutrons, eux aussi animés d'une certaine énergie cinétique [7]. Ces neutrons iront à leur tour casser d'autres noyaux, amorçant ainsi une réaction en chaîne, à laquelle on peut choisir de laisser libre cours, c'est le principe de la bombe atomique ou que l'on peut décider de contrôler, comme on le fait quotidiennement dans les réacteurs de centrales nucléaires.

3. POUVOIR DE PENETRATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Les moins pénétrants sont les particules alpha qui peuvent être arrêtées par une feuille de papier. Les particules bêta (des électrons) peuvent parcourir quelques mètres dans l'air, mais elles seront facilement arrêtées par une feuille fine d'aluminium. Les rayons X et gamma sont très pénétrants et pour s'en protéger, il est nécessaire de disposer d'un mur de plomb ou de béton. Il faut également du béton ou de l'eau pour arrêter les neutrons. Leur pouvoir de pénétration dépend de leur énergie.

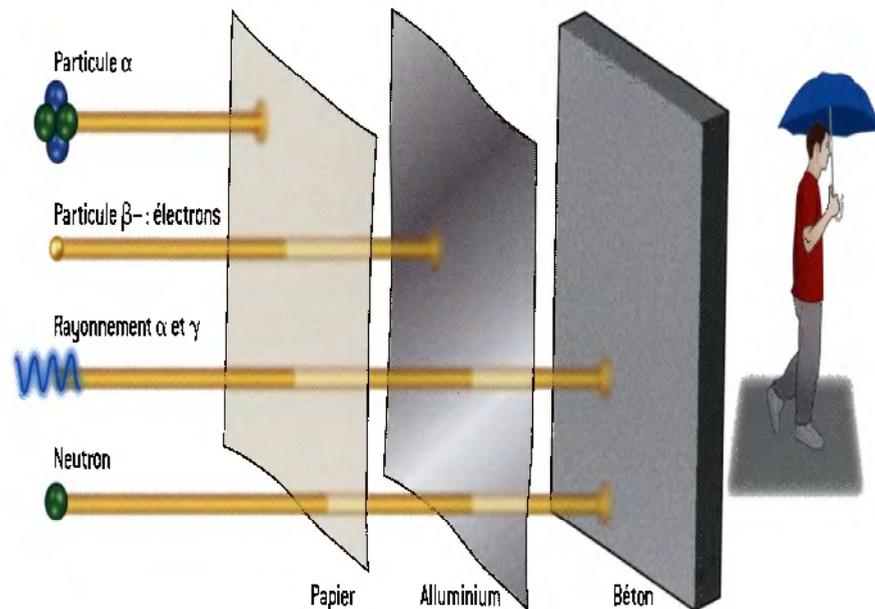


figure04 [8]

4. Pourquoi LA FUSION

Pour mieux comprendre les grands projets concernant la fusion aujourd'hui, il est utile de se tourner vers le passé. Les origines de la recherche sur la fusion thermonucléaire coïncident avec la naissance de la physique stellaire, vers la fin des années 1920. L'astronome britannique Arthur Stanley Eddington suggéra que l'énergie des étoiles devait être d'origine sub-atomique et que « l'homme apprendrait un jour à libérer cette énergie pour l'utiliser à ses propres fins » [9].

En 1934, Rutherford réalisa la toute première réaction de fusion en laboratoire [7] : il s'agissait de la fusion de quelques noyaux de deutérium. On était encore bien loin du nombre colossal de réactions nécessaires pour produire de l'énergie. Et quelques années plus tard, Hans Bethe [9] identifiait la séquence des réactions thermo nucléaires qui se produisent au cœur des étoiles. Dès les années 1940, on avait compris que la fusion était une source d'énergie bien plus « propre » que la fission : la quantité de déchets radioactifs produits est beaucoup plus faible et leur période radioactive est en moyenne beaucoup plus courte. La période radioactive est le temps nécessaire pour que

la moitié des noyaux d'un échantillon se désintègre naturellement. Dans le cas de la fusion, elle est de l'ordre de quelques dizaines d'années, contre des centaines de milliers d'années, voire des millions d'années pour certains déchets issus de la fission ! Un autre avantage, et non des moindres, de la fusion par rapport à toute autre forme de production d'énergie est que les combustibles les noyaux légers sont quasi inépuisables: le deutérium se trouve dans l'eau de mer en quantité suffisante pour un besoin énergétique planétaire de plusieurs millénaires et le tritium peut être extrait facilement du lithium, un métal léger, dont les réserves sur Terre sont suffisantes pour dix mille ans. Le premier brevet de réacteur à fusion fut déposé en Angleterre en 1946[4]. Dans les années 1950, en période de guerre froide, les applications militaires évidentes de la fusion placent l'ensemble des recherches en ce domaine sous le sceau du secret. Américains, Russes, Anglais, rejoints en 1955 par la France, l'Allemagne et le Japon, intensifient leurs recherches sans communiquer entre eux ni publier leurs résultats. L'année 1958 marque un tournant important dans l'histoire de la fusion contrôlée, avec la levée du secret militaire sur les recherches: en septembre, à la conférence Atomes pour la paix de Genève, les différents pays dévoilent les configurations sur lesquelles ils travaillent, à l'époque la fusion magnétique était la seule prise en considération. C'est ici que prend réellement forme le grand rêve de faire de la fusion une source énergétique civile. C'est également ici qu'on prend conscience du fait que maîtriser la fusion ne sera pas facile. Le physicien Teller dit: «Je pense que la fusion peut être réalisée, mais je ne crois pas qu'elle aura au cours de ce siècle (le XX I) une importance concrète»[7]. Dans les années 1970, les recherches sur la fusion deviennent une partie importante de ce qu'on appelle «la Big Science ». Le coût et la complexité des dispositifs sont tels que la coopération internationale devient indispensable pour pouvoir réunir les compétences techniques et financer les projets.

5. TEMPERATURE ET ENERGIE

Molécules, atomes et noyaux ne sont au repos qu'à la température (impossible à atteindre) du zéro absolu, c'est-à-dire à 0 kelvin, qui correspond à 273,15 °C. Lorsque la température n'est pas nulle, ils se déplacent constamment: c'est l'agitation thermique. On peut associer à cette agitation l'énergie cinétique moyenne des particules, c'est-à-dire l'énergie que les particules possèdent du fait de leur mouvement. Cela permet d'exprimer la température en unité d'énergie. Dans le cadre de la fusion thermonucléaire, l'unité parfois utilisée est l'électronvolt (eV) avec le facteur de conversion

$$1 \text{ eV} == 11\,400 \text{ K.}[10]$$

6. Le plasma

Le plasma est un gaz ionisé. Dans le plasma, les électrons ont été arrachés du noyau central. Le plasma est donc une mer d'ions positifs et d'électrons négatifs qui se comporte comme un bon conducteur électrique susceptible d'être affecté par les champs magnétiques. Les électrons se trouvent séparés du noyau à condition que la température du gaz soit suffisamment élevée. Dans le plasma de fusion thermonucléaire, la température peut atteindre 100, 000,000 de degrés centigrades.

Dans un plasma thermique, la grande agitation des ions et des électrons produit de nombreuses collisions entre les particules. Pour que ces collisions soient suffisamment violentes et entraînent une fusion, trois grandeurs interviennent :

1. la température T ;
2. la densité N ;
3. le temps de confinement .

Le critère de Lawson [11] établit que le facteur N doit atteindre un certain seuil pour obtenir le *breakeven* où l'énergie libérée par la fusion est égale à l'énergie dépensée. C'est le seuil à partir duquel la réaction est capable de s'auto-entretenir. Pour la réaction deutérium + tritium, ce seuil est de 10^{14} s/cm³ [10].

L'énergie de liaison des constituants provient de la force forte, l'une des quatre forces fondamentales de l'univers. Or l'investissement énergétique à fournir pour rompre cette liaison est proportionnel au produit des charges électriques des deux noyaux en présence. C'est pourquoi on a choisi le deutérium et le tritium, deux isotopes lourds de l'hydrogène, pour lesquels ce produit vaut 1 [10].

L'énergie minimale à fournir pour obtenir une fusion est de 4 keV (équivalent à une température de 40 millions de degrés), l'énergie libérée est alors de $17,6 \text{ MeV}$ répartie pour 80% dans les neutrons émis et pour 20% dans l'hélium4 produit. Mais l'énergie nécessaire pour atteindre le critère de Lawson et un rendement suffisamment positif se situe vers 10 keV soit **100** millions de degrés. À titre de comparaison, le Soleil possède une température de **15** millions de degrés en son centre [11].

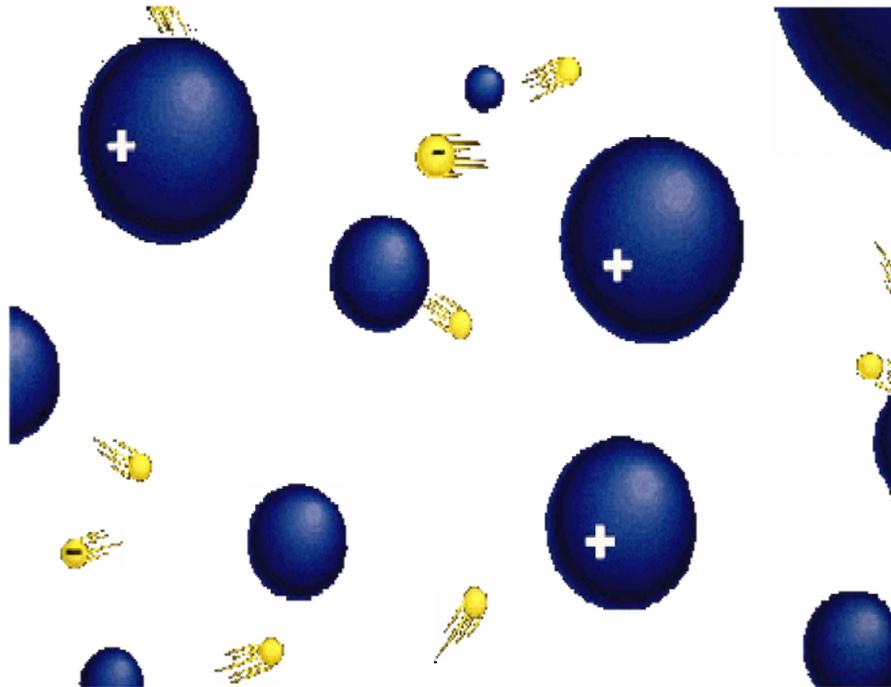


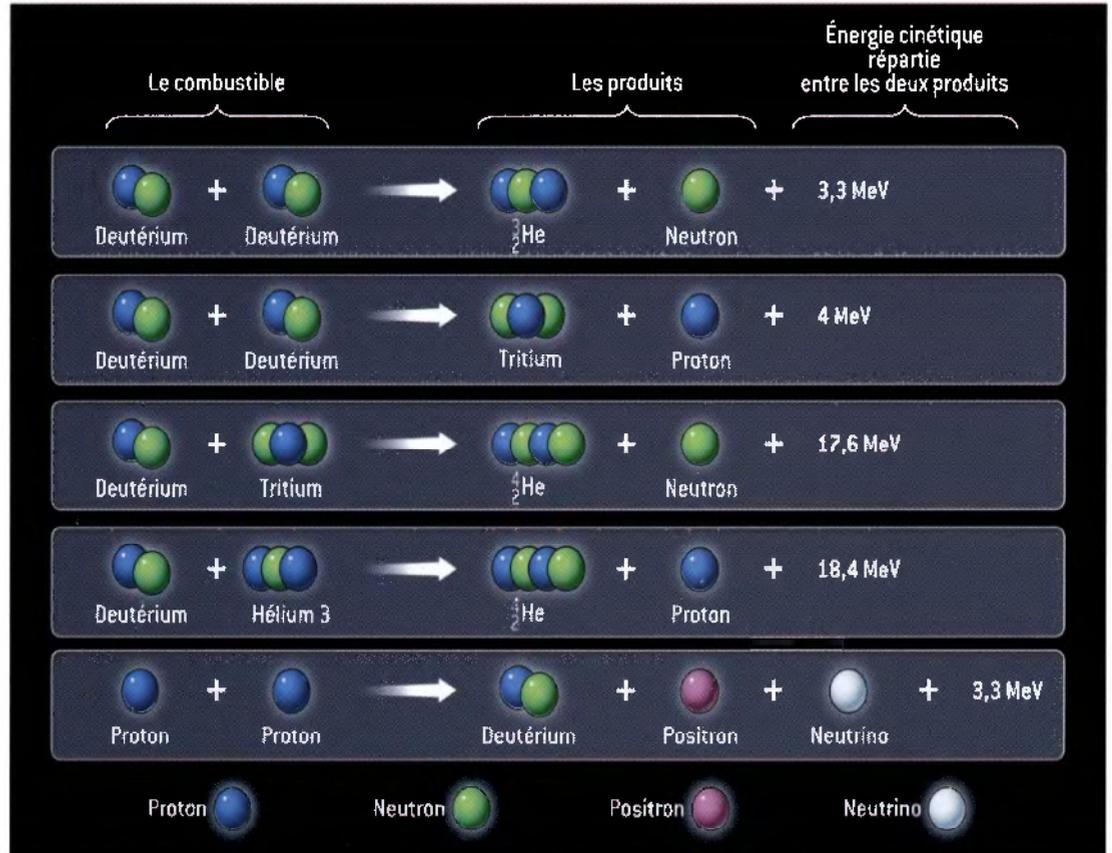
Figure 05 plasmas (ions positifs (bleu), ions négatifs (jaune)). [12]

7. LA REACTION DE FUSION

7.1. Quels noyaux choisir?

Les réactions de fusion qui dégagent le plus d'énergie sont celles qui impliquent les noyaux les plus légers comme par exemple les noyaux d'hydrogène (un proton), de deutérium (un proton et un neutron) et de tritium (un proton et deux neutrons) (Fig. 06). Le but étant de récupérer le plus d'énergie possible, les réactions deutérium-tritium (D-T) et deutérium-hélium 3 semblent d'excellentes candidates a priori. Mais ce n'est pas tout: pour que l'énergie récupérée dépasse l'énergie investie, il faut qu'un grand nombre de réactions se produisent sans pour cela devoir chauffer le combustible de façon prohibitive. Le choix de la réaction que l'on va utiliser repose sur la section efficace de réaction qui mesure, en fonction de la température, la probabilité que deux noyaux franchissent la barrière de répulsion et fusionnent [13]. Comme on peut l'observer sur la figure 06, la réaction D-T a un avantage considérable sur les autres réactions: sa section efficace est la plus importante et elle est maximum pour des températures relativement faibles. Le mariage D-T est très énergétique: 1 gramme de ce mélange produit autant d'énergies qu'environ

10 tonnes de pétrole ou un kilogramme d'uranium [7].



Quelques exemples de réactions de fusion parmi celles qui dégagent le plus d'énergie.

Figure06 [7]

Il faut tout d'abord modifier les atomes en séparant les électrons des noyaux pour créer un plasma. Puis, au sein de ce plasma, la réaction de fusion consiste à réunir un noyau de deutérium D (comportant un neutron et un proton) et de tritium T (comportant deux neutrons et un proton) qui conduit à la production d'un noyau d'hélium 4He (comportant deux neutrons et deux protons) chargé d'une énergie de volt) et libérant un neutron avec une énergie de 14 MeV. La difficulté de la réaction repose sur le fait qu'il faut vaincre la répulsion électrostatique qui s'exerce

entre les noyaux de charge positive et ne permet leur fusion que par collision avec une vitesse suffisante : environ 1000 km/s (kilomètre par seconde) ce qui nécessite un très long parcours dans le plasma [13].

L'objectif visé dans les réacteurs est l'auto-combustion ou "ignition" du mélange D + T qui s'obtient lorsque l'énergie des particules alpha cédées au mélange permet de maintenir sa température d'environ (200 millions de degrés Celsius) sans apport d'énergie extérieure. Ces conditions sont réunies dans le réacteur dit TOKAMAK [14].

Le deutérium, isotope 2H de l'hydrogène, est relativement abondant dans l'eau de mer : 0,0153%. Il est extrait par électrolyse. Il ne s'épuisera donc qu'avec la disparition de l'eau. Le tritium est l'isotope 3H de l'hydrogène. Il est radioactif mais avec une période courte de 12,56 ans. Il est obtenu à partir de réaction de fission sur le lithium [15]

Un autre intérêt de la fusion du DT réside dans le fait que cette réaction nucléaire ne génère aucun élément radioactif à vie longue. Les combustibles de base, lithium et deutérium, ne sont pas radioactifs. Le tritium, élément radioactif avec un temps de vie de 12 ans, serait fabriqué sur place au fur et à mesure des besoins sans en amasser des stocks importants. Seuls des éléments du réacteur deviendront radioactifs par exposition aux neutrons de 14 MeV, mais la radioactivité induite, dans les hypothèses actuelles, aura pratiquement disparu en une ou deux centaines d'années. La quantité de ces déchets peut être réduite en

Choisissant des matériaux dont l'activation reste faible [16]. De plus, la production d'énergie ne s'accompagne d'aucune émission de gaz à effet de serre, point commun avec une centrale nucléaire classique, basée sur la fission des noyaux lourds [7].

7.2. Le carburant

Le carburant utilisé pour la fusion thermonucléaire contrôlée est l'hydrogène et ses deux isotopes, le **deutérium** et le **tritium** (voir figure 7) [13]. L'hydrogène est présent en abondance dans l'eau (H₂O) et est composé d'un noyau de un proton et d'un électron qui l'orbite. Le deutérium est un des isotopes de l'hydrogène dont le noyau contient un neutron en plus du proton avec un électron qui orbite le noyau. Dans l'eau, un atome sur approximativement 6500 est un atome de deutérium. Le tritium est l'autre isotope de l'hydrogène et est caractérisé par un noyau constitué d'un proton et de deux neutrons. Absent à l'état naturel, le tritium peut être généré à partir du lithium, élément abondant dans la croûte terrestre.

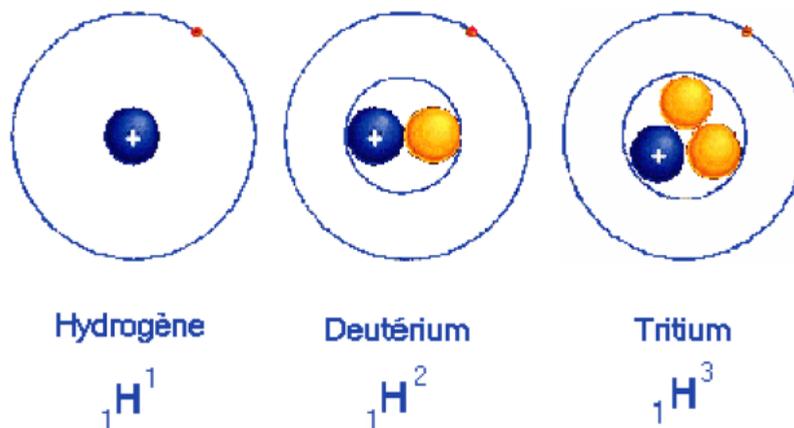


Figure 7 trois isotopes de l'hydrogène [13]

La figure 1 montre les trois isotopes de l'hydrogène. Chaque isotope possède un proton de charge positive (bleu) et un électron négatif (rouge). Ce qui différencie les isotopes entre eux est le nombre de neutron dans le noyau (jaune).

7.3. La production de l'énergie

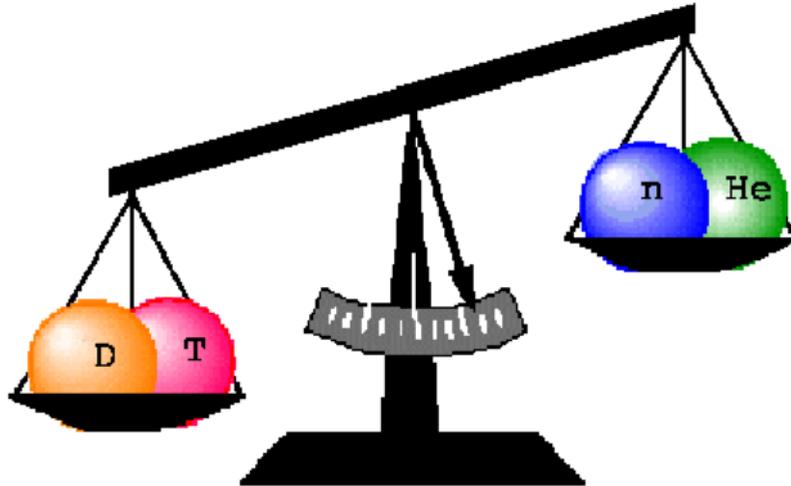


Figure 8 défaut de masse

Durant la réaction de fusion, une faible quantité de matière semble disparaître, approximativement 38 parties par 10,000. Cette matière n'est pas disparue mais s'est en fait transformée en énergie selon la fameuse relation [17]

$$E = mc^2$$

Cette équation dit que l'énergie E libérée lors de la réaction est égale à la masse perdue m multipliée par la vitesse de la lumière au carré. Même une petite quantité de matière peut donner lieu à une quantité considérable d'énergie. Par exemple, si un raisin de 1 gramme était complètement converti en énergie, il en résulterait une énergie équivalente à celle contenue dans 10,000 tonnes de TNT!

CHAPITRE 02

**DES EXEMPLE SUR LES MACHINES DE CONFINEMENT
MAGNETIQUE**

1. L'EVOLUTION DES REACTEURS

L'évolution de la recherche sur les équipements de fusion par confinement magnétique peut se résumer en trois grandes étapes débutant dès le début des années 50[14].

Les problèmes théoriques ont d'abord été identifiés et de nombreuses expériences ont permis d'établir les bases scientifiques du procédé.

Puis les expérimentations se sont développées sur des Tokamak de plus en plus grands et performants, notamment en Europe où est exploité le Joint Européen Torus (JET) qui, avec ses 100 m³ de plasma, reste le plus grand Tokamak du monde. Il faut noter que l'ensemble des programmes européens est coordonné, depuis 1959, par une association EURATOME-CEA.

Enfin, la période récente a débuté par deux événements marquants. Les premières expériences, en 1991, avec le mélange D-T ont été faites sur le JET avec 2 MW (mégawatts) de puissance thermonucléaire pendant deux secondes. Puis, en 1993, le Tokamak Fusion Test Réacteur (TFTR) américain fournit à son tour 6 MW. L'autre fait marquant de la période a été le lancement officiel du projet International Thermonucléaire Expérimental Recto (ITER) en juillet 1992. Les travaux de conception ont été effectués, sur une période de dix ans, par une équipe internationale de chercheurs qui a bénéficié du support de l'ensemble des laboratoires

nationaux des quatre participants au projet : l'Europe, le Japon ainsi qu'à à moindre titre les USA et la Corée du Sud [14], [10]

L'objectif du projet ITER est de maintenir à l'ignition un plasma dégageant une puissance thermonucléaire d'un GW (gigawatt = 1 000 mégawatts) pendant mille secondes. Pour atteindre cet objectif, les recherches se

poursuivent pour mieux cerner la physique fondamentale et améliorer les dispositifs de confinement ainsi que les moyens de contrôle et de mesure.

2. LE TOKAMAK

C'est le réacteur qui offre actuellement les meilleurs résultats. La méthode consiste à confiner la matière sous forme de plasma à très haute température (de l'ordre de 200 millions de degrés Celsius) par un solénoïde torique où est produit un champ magnétique intense, l'anneau de plasma qu'il contient étant lui-même parcouru par un courant toroïdal créant un champ magnétique perpendiculaire à celui du solénoïde. Les lignes de champs résultantes sont ainsi des hélices s'enroulant sur des surfaces toriques [16], [14].



Figure 09 schémas simplifiés d'un tokamak [18]

3. TORE SUPRA

Le projet TORE-SUPRA, lancé dès 1978 alors que le TFTR (USA), le JT 60 (Japon) et le JET (EUROPE) étaient en construction, a été conçu pour étudier les plasmas en régime quasi permanent. Entré en service opérationnel en 1988 au Centre CEA de Cadarache, les résultats obtenus, dès 1992, ont trouvé leur optimum conforme à l'objectif final en décembre 2003 et placent Tore-Supra comme le modèle pour le développement du projet ITER [19].

Les particularités de Tore-Supra :

- Son **aimant supraconducteur** permet un fonctionnement permanent du solénoïde torique et de son cryostat en évitant les pertes thermiques avec une consommation qui reste inférieure au mégawatt [20].
- Le maintien de la **configuration magnétique** consistant à utiliser des ondes électromagnétiques pour entretenir et accroître le courant toroïdal initial, qui décroît quand la température s'élève du fait de l'augmentation de la résistivité du plasma. Les champs électromagnétiques (électriques et magnétiques) des ondes utilisées prennent la relève dans l'entretien et surtout l'accroissement du courant toroïdal et remplace ainsi la force électromotrice du transformateur.
- Le **refroidissement des parois** du tore par une boucle d'eau pressurisée à 200 °C. Le transfert de chaleur est assuré entre le plasma et le circuit de refroidissement par des tuiles de graphite ou de composite de carboneg [19], [20].
- Le "**divertir ergodique**" ("ergodique" est synonyme de chaotique), a fonctionné pendant 10 ans. Ce dispositif visant à éliminer les impuretés indésirables résultant des interactions plasma-paroi en perturbant la

configuration du champ magnétique à l'intérieur de la chambre toroïdale.

• **L'alimentation du plasma** en particules, trois méthodes sont disponibles : l'injection de gaz "classique" ou thermique (la plus couramment utilisée), l'injection de gaz supersonique par impulsion (bouffée de gaz rapide et concentrée) et enfin l'injection de glaçons d'hydrogène (système le plus complexe) à une vitesse de 4,3 km/s (kilomètres par seconde) [20].
...et bien d'autres éléments de recherche permettant d'accroître les performances du réacteur et de tester les développements pour ITER.



Chambre de Tore-Supra **Source CEA figure 10**

Les résultats obtenus par Tore-Supra sont considérables :

- **dès 1992, il a permis de battre un record mondial en maintenant en équilibre Quasi stationnaire, pendant plus d'une minute, un plasma traversé par un Courant d'un million d'ampères grâce à des ondes électromagnétiques d'une Puissance de 3 MW (mégawatts) et d'une fréquence de 3,7 GHz (gigahertz)[19],[13]**
- **en 2002, le précédent record a été dépassé avec des décharges d'une durée de 4 minutes et demi et 750 MJ (Mégajoules) échangés.[17]**

- **le 4 décembre 2003, l'équipe EURATOM/CEA a obtenu des décharges plasma d'une durée de six minutes à plus de trois fois la température du soleil. Cette puissance était extraite, en continu, par le bouclier thermique entourant le plasma et, ainsi, plus de 1 000 Mégajoules de chaleur ont été échangés entre la source de puissance, le plasma et le bouclier thermique [21].**

Ces résultats illustrent également les progrès importants réalisés dans le domaine des hautes technologies telles que les aimants supraconducteurs refroidis à une température proche du zéro absolu, les procédés d'extraction de la chaleur (bouclier thermique) capables de résister, en continu, à un flux de chaleur proche de celui de la surface du soleil ou encore les méthodes de chauffage par ondes des plasmas confinés nécessaires à la réalisation de décharges de longue durée.

Ces recherches contribuent directement au programme ITER et font partie du soutien scientifique et technique dont l'organisation internationale pourrait profiter si le réacteur expérimental était implanté à Cadarache.

CHAPITRE 03 Comment peut on produire de l'énergie avec la fusion

INTRODUCTION

La fusion contrôlée fait l'objet de travaux intenses depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, avec un financement, au niveau des grandes puissances au niveau mondial, de plusieurs centaines de millions d'euros par an. Une exploitation industrielle est envisagée, au plus tôt, dans la seconde moitié du XXI^e siècle. Ce long délai résulte du caractère extrême des conditions physiques à réaliser. Pour s'en faire une idée, il suffit de noter que la fusion d'un noyau de

deutérium (D) et d' un noyau de tritium (T) est la plus facile à mettre en œuvre et cependant elle nécessite de porter les combustibles

À des températures supérieures à 100 millions de degrés.

Aujourd'hui deux méthodes sont envisagées pour domestiquer la fusion : le confinement magnétique et le confinement inertiel [5]. Ni l' une, ni l' autre n' est encore parvenue à produire plus d' énergie qu' il n' en faut injecter pour maintenir les conditions des réactions. ITER qui nous intéresse appartient à la première voie et le LMJ (Laser Mégajoule) à la seconde. Dans les deux cas, les deux dernières décennies ont permis des progrès suffisants pour envisager la réalisation de ces deux expériences, ou des gains en énergie deviennent possibles.

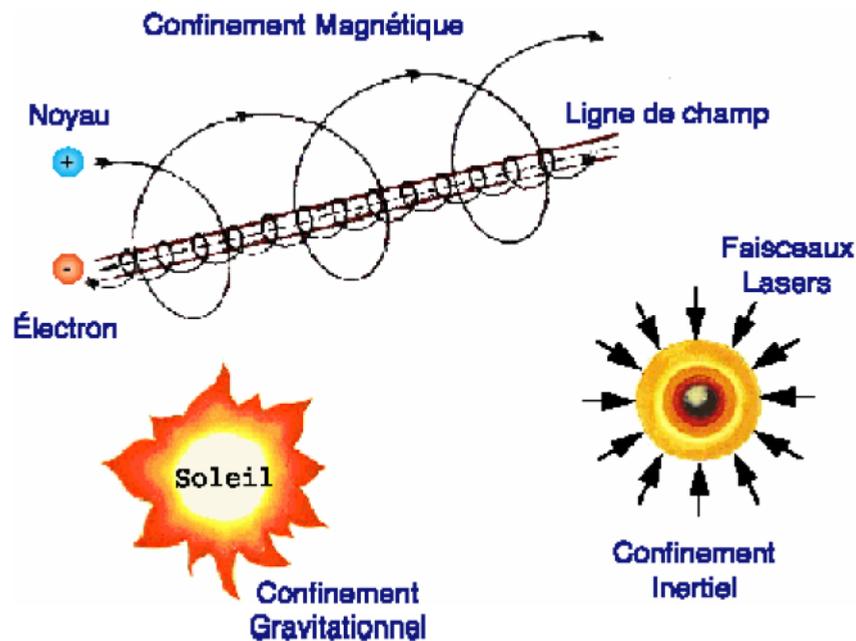


Figure 11 confinements inertiels gravitationnels et magnétiques. [22]

1. Les débuts de la fusion magnétique

La fusion nucléaire peut se produire naturellement dans l'Univers grâce aux énormes masses des étoiles dont la gravité assure le confinement du plasma. Sur Terre, une des possibilités est de remplacer la gravité par des champs magnétiques. On commence à s'intéresser à la fusion magnétique après la Seconde Guerre mondiale. Dans les années 1960, les collaborations internationales se développent et de nouvelles machines pour confiner le plasma voient le jour. En 1946, sir George Paget Thomson et Moses Bachmann [4], de l'université de Londres, déposent le premier brevet de réacteur à fusion. Bien qu'excessivement optimiste, leur projet comportait déjà deux caractéristiques importantes que les projets actuels ont conservées : la génération du plasma par des courants produits par ondes radiofréquences et la forme torique de la chambre à vide où le plasma est confiné.

2. Le principe du confinement magnétique

Le plasma est un milieu difficilement maîtrisable. Pour le confiner, il faut utiliser des configurations de champs magnétiques assez complexes. Dans le schéma de la fusion par confinement magnétique, il faut que le plasma reste chaud suffisamment longtemps (au moins quelques secondes). La priorité est alors de protéger le plasma de tout contact avec les parois du réacteur afin d'éviter qu'il se refroidisse. Pour y parvenir, on piège le plasma dans un véritable filet de lignes de champ magnétique entremêlées. Pour mieux comprendre le principe d'un tel filet, considérons d'abord la situation la plus simple d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.

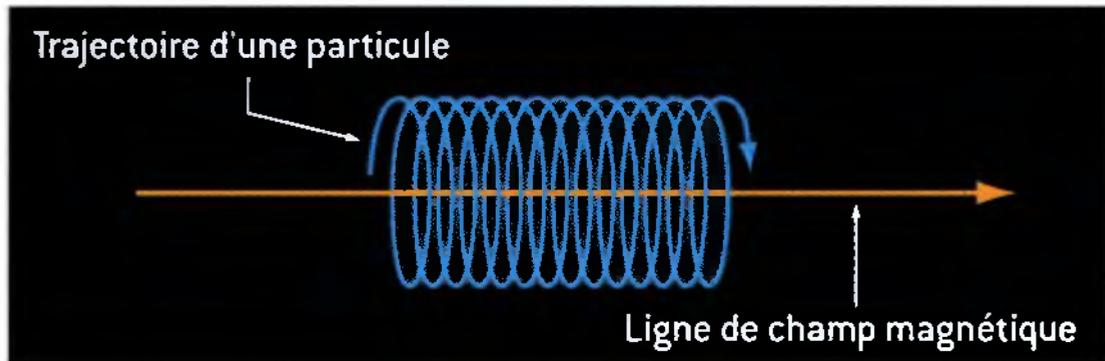
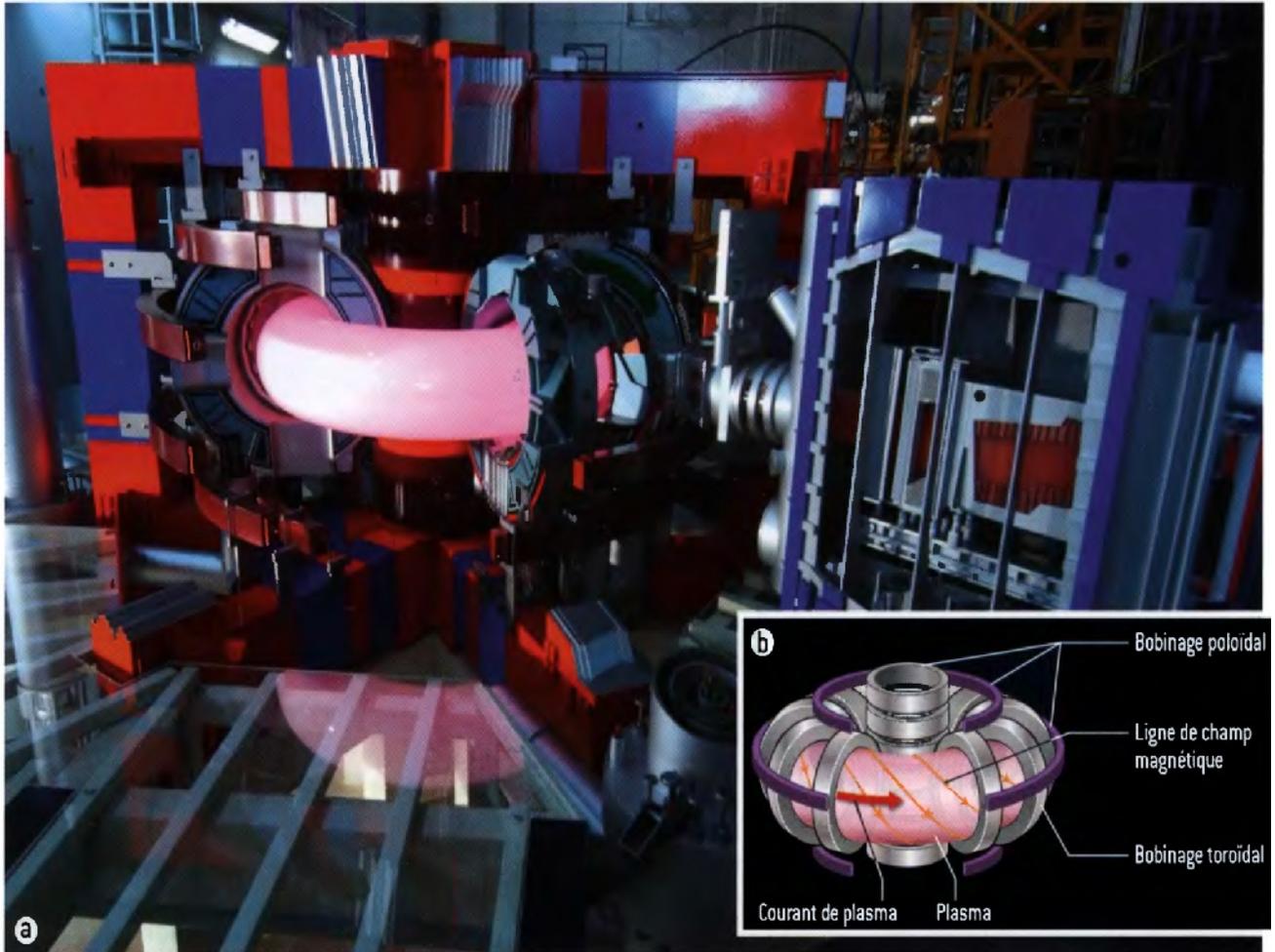


Figure 12 Trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme. [7]

La particule a une trajectoire hélicoïdale autour de la ligne de champ magnétique. Le plasma, constitué d'électrons, d'ions et de noyaux, est ainsi contraint à suivre les lignes de champ magnétique.

Il existe deux possibilités de confinement: soit les lignes de champ magnétique sortent de la région où l'on veut confiner le plasma (configurations ouvertes) soit les lignes de champ y sont entièrement contenues (configurations fermées) [7]. Les premières, qui ont été développées dans les années 1950-1960, présentent des défauts trop importants. Les secondes se révèlent beaucoup plus performantes et sont celles utilisées actuellement [5], [16]. [Comme on le verra dans la suite, parmi toutes les configurations fermées, seule une, bien particulière, s'impose...]



(a) Maquette du tokamak Tore Supra du CEA a Cadarache (b) Schéma d'un tokamak.

Fig13 [7]

(a) Maquette du tokamak Tore Supra du CEA a Cadarache: dans ce type de machine le plasma (ici représente par une lampe a néon rose) est confine par des champs magnétiques générés par des bobines extérieures et par le courant circulant dans le plasma.

(b) Schéma d'un tokamak. Le courant qui génère le champ magnétique poloïdal est produit par un bobinage central, la position et la forme du plasma sont contrôlées par d'autres bobines poloïdales. Le bobinage toroïdal génère la composante toroïdale du champ magnétique.

3. La configuration fermée

La configuration fermée la plus simple est celle où les lignes de champ sont des cercles (Fig. 14.a). Mais, ici, la simplicité cache un piège redoutable: si on essaie de confiner le plasma avec cette configuration, on aura la désagréable surprise de voir se superposer à la trajectoire hélicoïdale des particules une lente dérive transverse verticale (Fig. 14.b), à cause du gradient du champ magnétique (plus élevé vers l'intérieur du tore, Fig. 14.a) et à la force centrifuge due à la courbure. Sous l'effet de cette dérive, le plasma finira par toucher les parois. La solution pour résoudre ce problème est d'ajouter une composante dite poloïdale au champ magnétique [18], c'est-à-dire tournant autour de la direction toroïdale (Fig. 14.a). Les lignes de champs sont alors des hélices s'enroulant autour de surfaces toriques emboîtées, dites « surfaces magnétiques». Le mouvement de dérive étant toujours dirigé dans le même sens (disons vers le haut), il a tendance à éloigner les particules du centre commun des surfaces magnétiques lorsqu'elles sont « en haut» et à les rapprocher du centre lorsqu'elles sont « en bas». En suivant les lignes de champs, chaque particule passe alternativement « en haut» et « en bas» si bien que les deux effets se compensent: l'effet de dérive est dompté et le plasma reste confiné. Dans le but de réaliser cette configuration, deux types de machines ont été imaginés: les **tokamaks** et les *stellarators* (appelés ainsi pour évoquer le but d'y créer des plasmas stellaires). Dans les **stellarators**, les deux champs (toroïdal et poloïdal) sont créés par des bobines extérieures au plasma, ce qui augmente considérablement la complexité du bobinage, mais permettrait un fonctionnement continu de la machine [7]. Dans les tokamaks, seul le champ toroïdal est généré par des bobines extérieures. Le champ poloïdal est créé par un courant toroïdal généré dans le plasma par un champ magnétique augmentant au cours du temps. Comme ce dernier ne peut pas croître indéfiniment, la machine ne fonctionne pas en continu mais en mode pulse. Toutefois, dans un tokamak, la surface magnétique a l'avantage de présenter une symétrie de révolution autour du grand axe central, ce qui simplifie grandement la construction de la machine. La simplicité a tranché jusqu'à présent en faveur du tokamak.

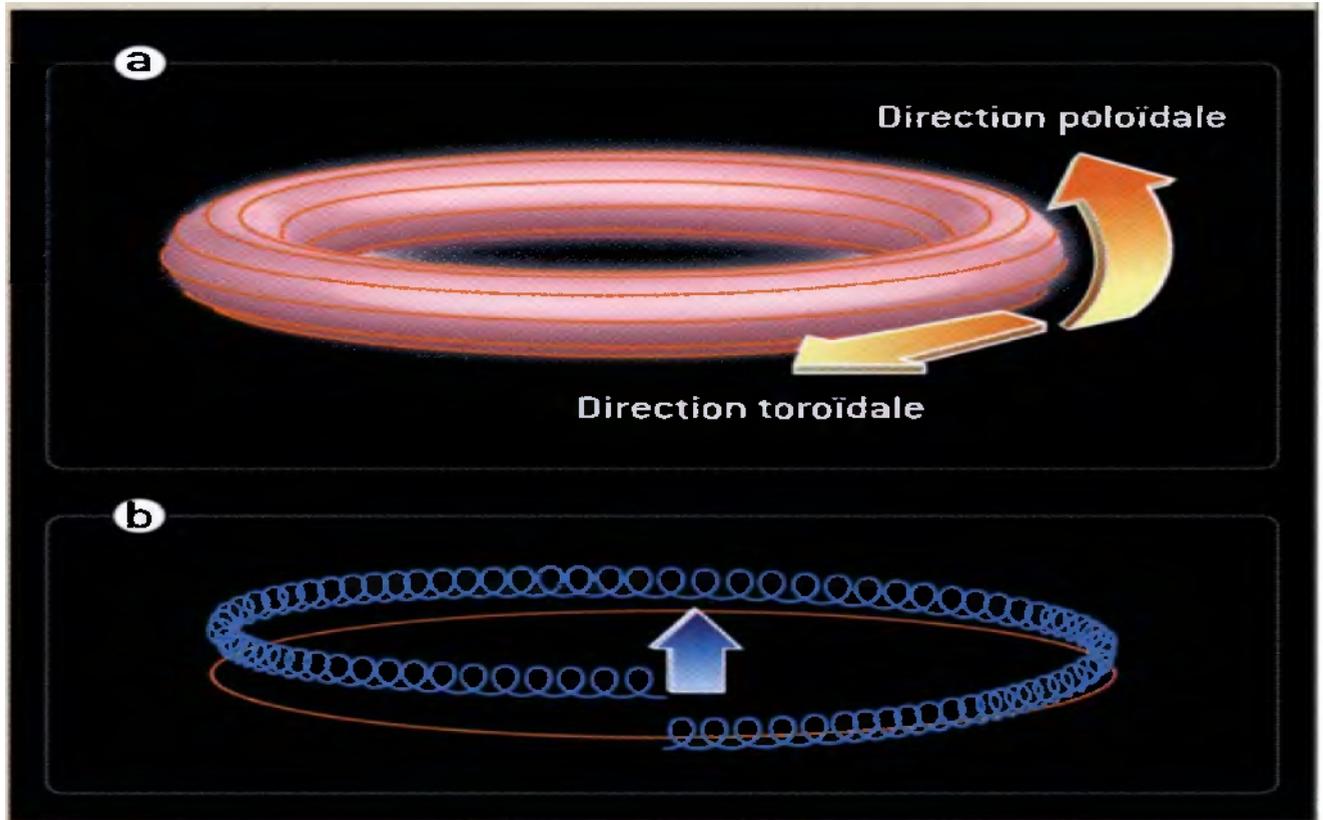


Figure14 Configuration fermée avec un champ toroïdal [7]

4. Le chauffage du plasma

l'étape consiste en l'obtention des températures nécessaires a

L'allumage des réactions de fusion. Le défi est de taille. Il faut créer un plasma dix fois plus chaud que le cœur du Soleil! La température à atteindre est de 100-150 millions de kelvins (contre «seulement» 15 millions de degrés pour le cœur de notre étoile) [5]. [13]. Ce pari fou a pu être relevé grâce a l'utilisation simultanée de différentes méthodes de chauffage. Il existe trois méthodes différentes de chauffage du plasma.

4.1. Chauffage par le courant

Dans un tokamak, une des composantes du champ magnétique assurant le confinement est produite par un courant électrique circulant le long de l'anneau de plasma. Or, le plasma n'est pas un milieu supraconducteur: la résistance qu'il oppose à la circulation du courant génère de la chaleur qui le chauffe, de la même façon que de l'eau dans une bouilloire électrique. Ce type de chauffage, appelé chauffage ohmique (du nom de l'unité de mesure de la résistance électrique, l'ohm), permet d'amener la température du plasma jusqu'à une vingtaine de millions de degrés. Il est impossible de chauffer davantage par cette méthode car la résistance du plasma diminue quand sa température augmente. Plus le plasma est chaud, moins il s'oppose à la circulation du courant électrique en son sein et donc moins le chauffage ohmique est efficace. Aux alentours de vingt millions de degrés, la chaleur produite est négligeable et d'autres techniques complémentaires de chauffage doivent alors prendre le relais [7], [22].

4.2. Chauffage par injection de particules neutres

Une autre méthode de chauffage, développée à partir des années 1970, consiste à injecter au cœur du plasma des faisceaux d'atomes de deutérium et de tritium neutres et très rapides. Il est nécessaire d'utiliser des atomes neutres car des ions (charges) ne pourraient pas franchir le champ magnétique confinant le plasma. La difficulté est qu'on ne sait pas accélérer des particules neutres. En effet, tous les accélérateurs de particules utilisent la force électromagnétique qui n'agit que sur les particules chargées. Il faut donc concevoir un dispositif capable de transformer les atomes neutres en ions, puis de les accélérer et enfin de les ré-neutraliser avant de les injecter dans le plasma. L'injecteur de particules est donc constitué de trois parties

(Fig. 15): la source d'ions, l'accélérateur et le « neutraliseur ». Les atomes sortant de l'injecteur pénètrent en profondeur à l'intérieur du plasma. Ils y sont rapidement ionisés et ralentis par collisions avec les particules du plasma à qui ils transfèrent leur énergie, ce qui produit de la chaleur. Cette méthode, associée au chauffage ohmique, a fait ses preuves sur des machines relativement petites dont le plasma est de l'ordre de 100 m^3 , comme le JET anglais, ou elle a permis d'atteindre la température de trois cents millions de degrés. Malheureusement, l'extrapolation à des plasmas dépassant la centaine de mètres cube, comme dans la future installation ITER (réacteur de fusion), est problématique. Pour obtenir des performances comparables, il faudrait multiplier par dix l'énergie des atomes injectés, ce qui rendrait très difficile leur neutralisation dans l'injecteur. On envisage donc d'ajouter une troisième méthode de chauffage aux deux précédentes: le chauffage par des ondes.

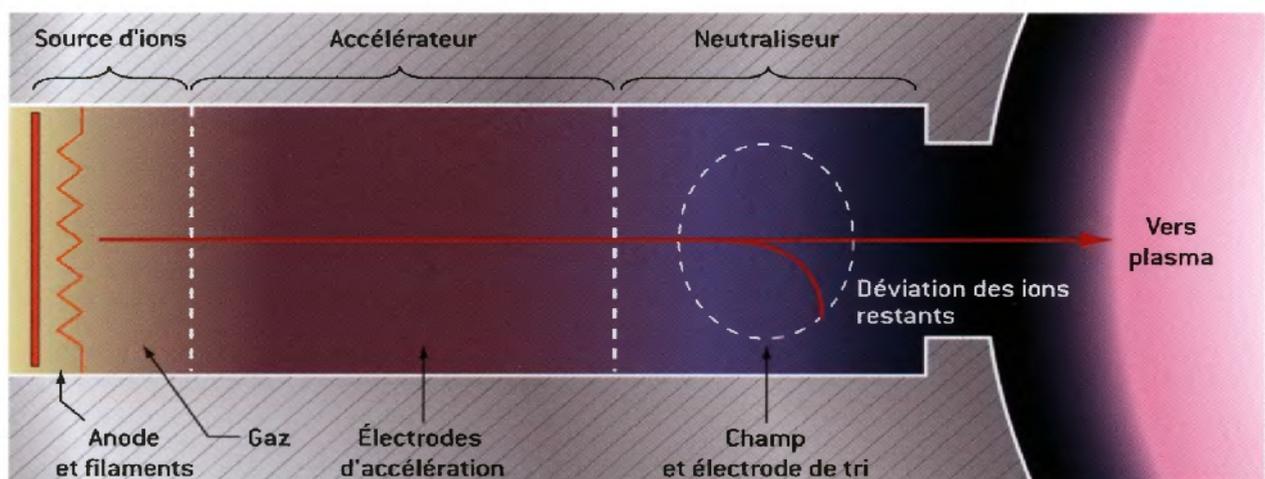


Fig. 15 Schéma d'un injecteur de particules:[22]

4.3 Chauffage par des ondes

Le principe du chauffage par des ondes est fondé sur l'absorption par le plasma de puissantes ondes électromagnétiques que l'on envoie en son sein. Le processus de chauffage est tout à fait similaire à celui d'un four à micro-ondes, les ondes étant créées par des antennes situées au niveau des parois. Pour avoir un chauffage efficace, il faut que la fréquence des ondes coïncide avec certaines fréquences caractéristiques de la dynamique du plasma. Le réacteur ITER, qui sera construit à Cadarache, utilisera les trois méthodes de chauffage décrites ici.

5. Bilan énergétique et facteur d'amplification

Le facteur d'amplification est le rapport entre la puissance produite par les réactions de fusion et la puissance de chauffage injectée dans le plasma. Le bilan énergétique est équilibré lorsque le facteur d'amplification est égal à 1 (c'est le break-even). Il est positif lorsqu'il est supérieur à 1 (c'est l'allumage) [5]. Il faut faire attention à ne pas confondre le facteur d'amplification avec le rendement global de l'installation.

CAPITRE 04 Le réacteur ITER

1. La naissance d'ITER

Pour dépasser les performances des années 1990 du JET, du JT-60 japonais et du TFTR américain et atteindre l'allumage, il fallait une machine encore plus grande, un véritable «réacteur expérimental». On entre alors de plein pied dans ce que l'on appelle la «Big Science». Le début de ce projet ambitieux remonte à 1985, lorsque Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev se rencontrent pour la première fois à Genève. Dans les rapports officiels, un paragraphe « Fusion Research» apparaît. [4]. Les deux hommes soulignent l'importance de «l'utilisation de la fusion thermonucléaire

contrôlée à des fins politiques» et prêchent «*le développement d'une coopération internationale la plus large possible pour maîtriser cette source d'énergie au profit de toute l'humanité*» [4], [7]. Ces propos sont souvent considérés comme marquant la naissance du projet «*International Thermonuclear Reactor*» (ITER, Fig. 16), Les partenaires engagés dans ce projet sont, à l'époque, la Communauté européenne, l'URSS, les Etats-Unis et le Japon. Une équipe scientifique internationale prend en charge immédiatement la définition détaillée du projet et remet un rapport préliminaire en 1991. L'année suivante a lieu la signature historique d'un accord définissant le partage de la propriété intellectuelle et de la réalisation dans les six ans à venir des études détaillées de la future machine. Les objectifs sont alors ambitieux: la tenue du feu thermonucléaire pendant 1000 secondes, un volume de plasma de 1000 m³, visant une puissance de 1,5 gigawatt, une machine pesant 7 fois la Tour Eiffel... Le budget pulvérise ce qui avait été initialement prévu. Très soucieux des possibles réactions, tant chez les politiques que dans l'opinion, les dirigeants du projet ITER redimensionnent le projet pour réduire les coûts à un niveau plus acceptable [23].

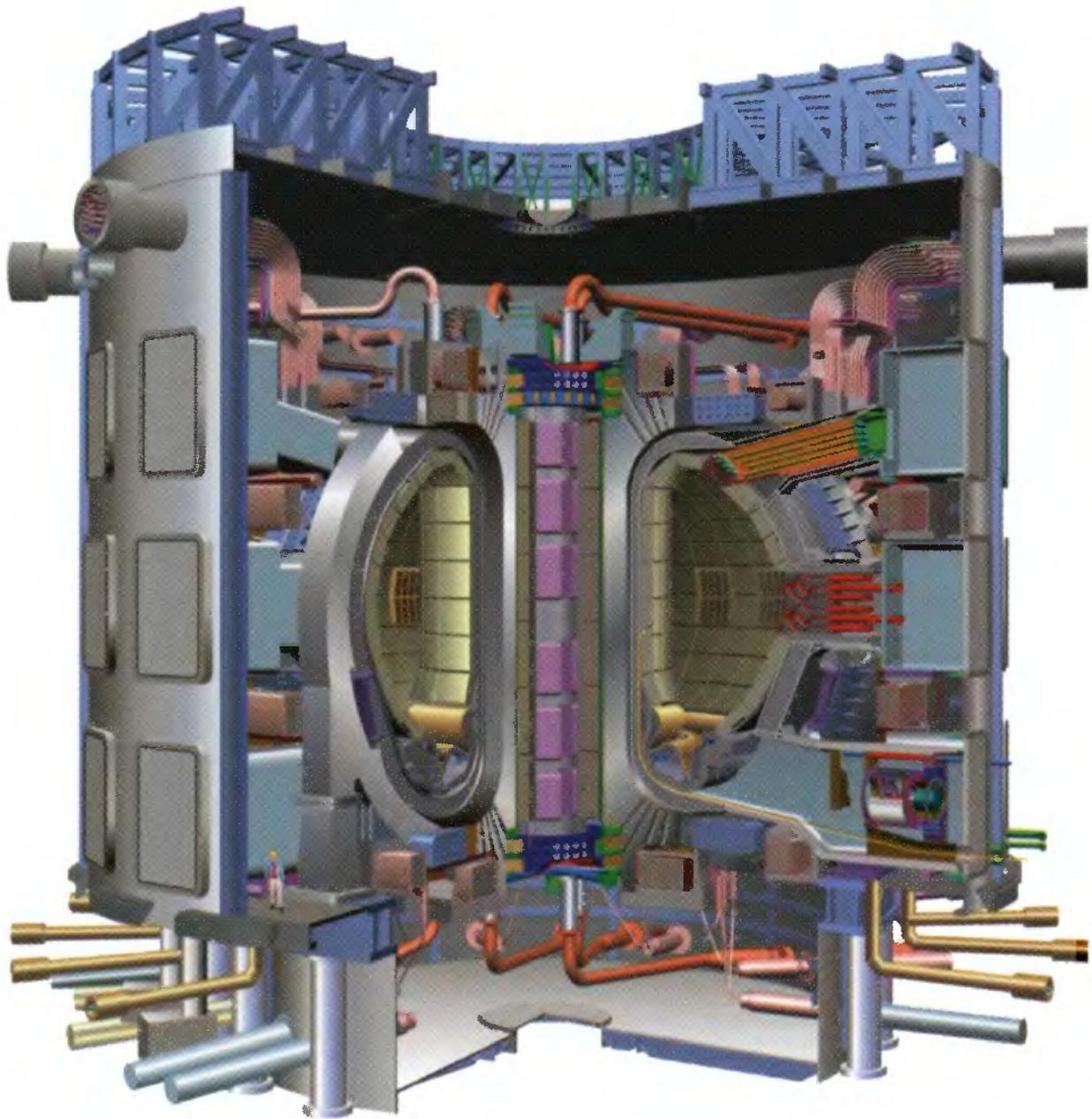


fig16 Schéma du réacteur expérimental ITER [23].

Le cryostat qui entoure l'ensemble du dispositif (en gris) mesure 24 m de haute Un homme est représenté pour comparaison en bas à gauche.

2. Comment fonctionnera ITER?

Les concepteurs d'ITER ont comme objectifs principaux d'atteindre et de maîtriser l'ignition, de tester la technologie nécessaire pour y parvenir et d'étudier le fonctionnement d'un réacteur dans le régime de chauffage par les particules alpha. ITER ne produira pas d'électricité, mais uniquement de la chaleur. Le but est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la fusion thermonucléaire contrôlée. ITER sera donc une grande installation de recherche et de développement technologique qui rassemblera 400 chercheurs, et 600 ingénieurs, techniciens et administratifs. Au terme d'une vingtaine d'années d'exploitation, un prototype de réacteur à fusion produisant de l'électricité lui succédera. Le premier objectif est de libérer une puissance de 500 MW pendant 400 secondes en ne consommant que 50 MW. Rappelons que le record actuel (2007), détenu par le JET, est de 16 MW libérés pendant 1 seconde pour autant de MW consommés. Dans le cas d'un réacteur économiquement viable, le bilan énergétique devra être 5 fois supérieures à celui d'ITER. Le deuxième objectif vise à libérer une puissance de 250 MW pendant 1000 secondes (plus de 16 minutes) en ne consommant toujours que 50 MW. Rappelons que le record de la plus longue durée de confinement, détenu par le tokamak Tore Supra, est de 6 minutes [7].

La machine sera un tokamak. Les parois de la chambre à vide seront recouvertes de modules pour ralentir et capturer les neutrons très énergétiques de 14 MeV. Le combustible sous forme gazeuse sera introduit et chauffé par les méthodes présentées plus haut. La grande nouveauté d'ITER, par rapport au JET, est l'utilisation de bobines supraconductrices pour générer les champs magnétiques. Le grand cylindre gris (Fig. 17) qui

contient l'ensemble du dispositif (bobines, chambre a vide, etc.) est le cryostat, c'est-a -dire une enceinte hermétique sous vide de 28 m de diamètre et haute de 24 m. Cette enceinte assure l'isolation entre les composantes froides, comme les bobines supraconductrices, et les composantes chaudes comme la chambre, les modules et le divertor qui purifie le plasma et évacue une partie de la chaleur engendrée par le système (voir encadre ci-dessous). Le divertor récupère les particules alpha refroidies par collisions résultant des réactions (appelées la cendre du plasma) et également les combustibles imbrulés (le deutérium et le tritium résiduels). Grâce à un séparateur isotopique, le combustible est réinjecte dans le système. Toutes les bobines en alliage de niobium sont refroidies par circulation d'hélium supercritique a - 268°C, grâce a des pompes cryogéniques. Les modules qui tapissent la paroi sont les plus vulnérables car ils sont en première ligne face au plasma très chaud (le flux de chaleur qui provient du rayonnement du plasma génère une densité de puissance de 20 MW/m², de l'ordre de grandeur de celle a laquelle on se trouverait expose près de la surface du Soleil). D'autre part, ils ne doivent pas être Trop épais (pas plus d'un centimètre) pour laisser passer les neutrons sans pertes d'énergie car ce sont eux qui doivent produire la chaleur.

La première paroi subira une érosion due à l'impact d'atomes neutres rapides ainsi qu'une évaporation superficielle. Le plasma ne supportant pas la présence d'impuretés lourdes, la première couche sera en béryllium (A = 9) dépose sur un substrat de cuivre, monte sur un support D'aciers inoxydables refroidis par eau. Le choix de ces aciers est crucial: il faut limiter au maximum les risques d'activation dus à l'impact des neutrons

énergétiques. Un centre d'étude de matériaux, baptisé International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF),

Sera développé spécialement dans le but de résoudre de tels problèmes.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le tritium n'existe qu'en petites quantités dans la nature. Il doit donc être produit artificiellement par bombardement neutronique du lithium. Des éléments de couverture tritigènes (c'est-à-dire produisant du tritium), faits de céramique ou d'un alliage métallique de lithium, seront également testés sur ITER en vue du futur réacteur [7].

Le courant circulant dans le plasma devrait atteindre 15 méga-ampères pour un champ magnétique principal produit par les bobines toroïdales de 5,3 Tesla, 50 000 fois supérieur au champ magnétique terrestre [23].

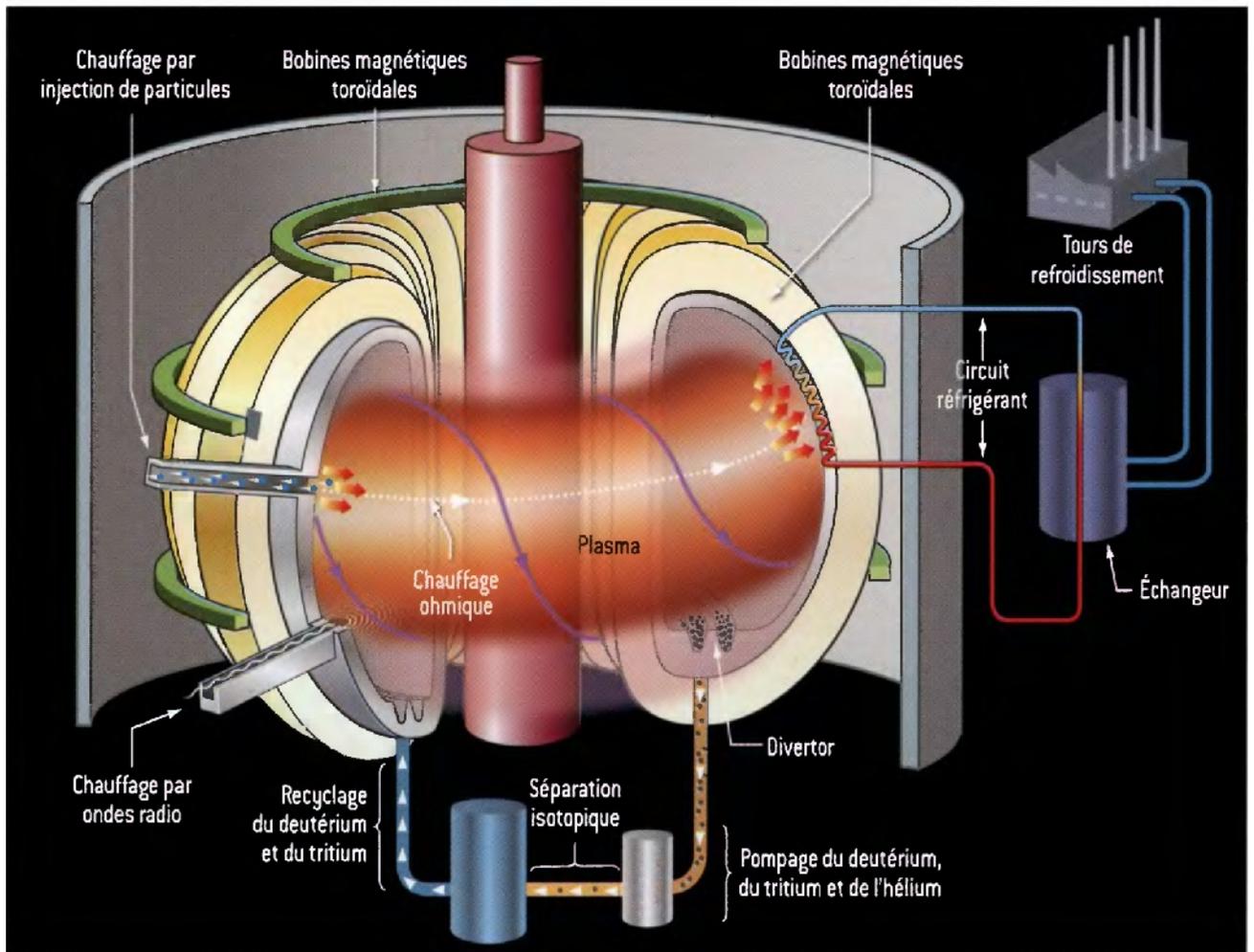


Fig17 Schéma de principe d'ITER [7].

3. L'« aspirateur » des impuretés

Les impuretés, néfastes au bon confinement du plasma, sont produites à l'intérieur du plasma (les particules alpha froides résultant des réactions de fusion et ralenties par les collisions) et pour une grande part au niveau des parois. Le matériau idéal pour celles-ci, qui permettrait de réduire la quantité d'impuretés à un niveau acceptable, est encore à

découvrir. Pour contourner le problème, on utilise un véritable aspirateur: le « *divertor* » [18]. Ce dispositif permet de guider les écoulements de plasma qui se sont chargés d'impuretés au voisinage des parois vers la partie basse de la machine. Là, le plasma pollué devient un gaz froid neutre qui est ensuite pompé vers l'extérieur.

4. Comparaison des principales caractéristiques techniques d'ITER avec ses prédécesseurs. [23]

	TORE SUPRA (Cadarache)	JET (Culham, GB)	ITER (Cadarache)
Puissance libérée par les réactions de fusion	-	16 MW	500 MW
Volume du plasma	30 m ³	100 m ³	840 m ³
Grand rayon du plasma	2,4 m	3 m	6,2 m
Petit rayon du plasma	0,72 m	1,25 m	2 m
Hauteur du plasma	1,4 m	4,2 m	6,8 m

Conclusion générale

Le but de ce mémoire consiste en une étude bibliographique sur la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique.

De ce travail, nous pouvons retenir que la collaboration internationale a permis de démontrer la faisabilité des hypothèses théoriques sur la fusion thermonucléaire contrôlée magnétiquement, mais il reste à accomplir de très importantes avancées scientifiques et techniques pour atteindre la mise en exploitation industrielle d'un premier réacteur et en démontrer l'intérêt économique. C'est probablement l'un des plus grands espoirs de l'humanité, celui d'une énergie propre, abondante et disponible pour tous que représente le projet **Iter** pour la maîtrise de la fusion thermonucléaire. **Iter** devait démarrer en 2020. Avant de le réaliser, les recherches tant fondamentales que technologiques qui devront être développées nécessiteront des moyens humains et financiers considérables. Ceci ne peut se concevoir que dans le cadre d'une coopération internationale de longue haleine. C'est en tout cas ce qui était à l'esprit des pays signataires de l'accord de 2006 entre l'Union européenne, le Japon, les Etats-Unis, la Corée du Sud, l'Inde, la Russie et la Chine.

On peut aussi retenir que la fusion offre des avantages considérables :

- utilisation d'un combustible inépuisable à l'échelle humaine car provenant de l'air et de l'eau de notre planète,
- absence de déchets liés au combustible,
- faible radioactivité à vie courte des structures,
- grande sécurité intrinsèque due aux deux caractéristiques précédentes,
- risques accidentels ou provoqués limités aux seuls sites du réacteur, d'où sa grande facilité d'implantation à proximité des lieux de consommation.

En conclusion, ce mémoire m'a permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine de la fusion thermonucléaire et ses nombreux avantages.

Introduction générale

La demande énergétique globale ne cesse de croître année après année suivant l'expansion de la population mondiale et sa dépendance énergétique. Bien qu'il soit difficile d'établir des prédictions fiables, il est convenu que la demande énergétique mondiale devrait doubler ou tripler d'ici l'an 2050. Cependant, l'alimentation mondiale en énergie est désormais soumise à certaines restrictions environnementales déjà établies, ou à venir. Le développement de nouvelles sources d'énergie devient de plus en plus urgent considérant les différentes inquiétudes liées aux émissions de CO₂ provenant de l'utilisation des combustibles fossiles. Il est évident que la diversité énergétique est une option qui doit rester dans la mire des différents dirigeants mondiaux. Il s'agit de la meilleure solution pour s'assurer que la demande énergétique mondiale soit satisfaite sans impliquer des coûts exorbitants. Le développement de la fusion thermonucléaire représente une des solutions envisageables, voir essentielles pour la diversification des sources énergétiques futures.

Il suffit d'effectuer un survol des possibilités de remplacement des combustibles fossiles pour remarquer que la fusion représente une nécessité. Effectivement, même si l'énergie solaire et éolienne sont pratiques dans des situations particulières, elles ne sont pas assez fiables ni puissantes pour supporter une demande énergétique soutenue, de l'ordre de puissance de l'industrie actuelle. Par exemple, il faudrait recouvrir environ 5% de la surface urbanisée actuelle de la planète pour produire à partir de cellules photovoltaïques [1] une quantité équivalente d'énergie à celle déjà obtenue à partir des combustibles fossiles. Les développements hydroélectriques quant à eux sont limités à quelques régions,

Étant donné les restrictions environnementales et territoriales. L'utilisation de la biomasse est aussi restreinte par des inquiétudes écologiques et sociales, liées à

déforestation. La fission nucléaire compte déjà pour le sixième de la production d'électricité mondiale. Il faudrait quadrupler la quantité de réacteurs déjà présents afin de fournir autant d'électricité qu'à partir des combustibles fossiles. Le problème majeur au niveau de la fission nucléaire réside dans l'insécurité des populations vis-à-vis cette technique, ce qui pourrait limiter son expansion. Dans le cas des combustibles fossiles, si une déréglementation survenait quant aux émissions des gaz à effet de serre, les réserves ne pourraient tout de même pas subvenir aux besoins énergétiques mondiaux grandissants. Il est prévu que la quantité de combustibles fossiles disponibles sur la planète suffirait seulement à combler les besoins énergétiques sur une période d'environ 100 ans au rythme de consommation actuel [1].

Le potentiel de la fusion représente donc une option attrayante parmi les différentes sources énumérées ci-haut puisqu'elle est plus propre, pratiquement infinie et puissante. En effet, la source principale d'énergie utilisée dans le procédé de fusion nucléaire est le deutérium et le lithium, qui peuvent être extraits des eaux marines et en quantité suffisante pour des millions, voire des milliards d'années [2], et ce quelle que soit la partie du globe sur laquelle on se trouve. La fusion possède des avantages significatifs comparativement à la fission puisqu'elle est visiblement moins toxique du point de vue radioactivité, le produit de réaction (hélium) étant ni radioactif ni nocif (bien que pour certaines réactions une part non négligeable de tritium peut être produite) et qu'elle n'est pas reliée au développement d'armes nucléaires. Si on la compare aux sources renouvelables, elle ne produit pas de dioxyde de carbone et a peu d'impacts écologiques. Les coûts reliés à la fusion résident donc majoritairement dans la construction des installations, ce qui est le cas pour la majorité des sources d'énergie. Cependant, puisque la fusion n'est pas une réaction de chaîne, la quantité de combustible entreposée dans la région de

réaction est très petite. Ceci permet des simplifications significatives dans le design du point de vue de la sécurité comparativement à la fission, et l'entreposage des déchets se voudrait aussi moins coûteux.

Mais malheureusement, lorsqu'on évoque « le nucléaire », on est souvent confronté à une grande confusion due au fait qu'on regroupe sous un même vocable les phénomènes physiques très différents que sont la fission et la fusion. Il s'agit en fait de deux réactions bien distinctes. Les problèmes du nucléaire d'aujourd'hui, c'est-à-dire de la fission, sont bien connus: déchets radioactifs, sûreté, risque de prolifération... Le nucléaire de demain pourrait bien profiter des avantages inhérents à la fusion: une énergie propre, sûr et sans déchets.

A travers plusieurs étapes historiques le développement de la physique nucléaire, de l'intuition de l'atome à la maîtrise des plasmas, en passant par la découverte du noyau.

Donc le but de ce mémoire est de faire une étude bibliographique sur la fusion thermonucléaire et voir quels sont les avantages de l'utilisation de cette énergie non polluante.

Chapitre 01

*Généralités sur la fusion
thermonucléaire contrôlée*

*Chapitre 02
Des exemples sur les machines
de confinement magnétique*

Chapitre 03
Comment peut on produire de
l'énergie avec la fusion

Chapitre 04
Le réacteur iter

Conclusion

Références bibliographiques

- [1] www.efda.org
- [2] www.itercad.org
- [3] W. Haefele et al. "Fusion and **Fast** Breeder Reactors", RR-77-8, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria(1977); R. Keith Evans, "Lithium Reserves and Resources", *Energy*, 3, 379-385 (1978)]
- [4] L'énergie bleue - Broché (2007) de Guy Laval
- [5] La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale la production d' énergie RAPPORT SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE No 26
Animateur : Guy Laval
- [6] www.energethique.com
- [7] la fusion nucléaire un espoir pour une énergie propre et inépuisable
Alessandra Benuzzi-Mounaix
BELIN · POUR LA SCIENCE [8]
[http// :www.nucleaire-info.com/](http://www.nucleaire-info.com/)
- [9] « La Fusion Nucléaire », par Joseph Weisse, Collection Que Sais-je n° 3659
- [10] [http// :www.euronuclear.org](http://www.euronuclear.org)
- [11] E.E. Bloom, "Structural materials for fusion reactors". *Nucl Fusion*, 33, 1879-1896 (1990)
- [12]<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/>
- [13] Guy L., « Fusion nucléaire de la recherche fondamentale à la production de l'énergie ? » n° 26, 94, **2007**.
- [14] Tokamak Plasma : A Complex Physical System, Bristol : Institute of Physics Publishing, cop. **1992**
- [15] R.W. Conn et al. « Economic, safety and environmental prospects of fusion reactors », *Nucl. Fusion*, **30** (1990) 1919
- [16] La fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique, Collection CEA, série scientifique, Masson, **1987**.
- [17] La fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique, Collection CEA, série scientifique, Masson, **1987**.
- [18] [http//www.cea.com](http://www.cea.com)

[19] Review of the DOE Plan for U.S. Fusion Community Participation in the ITER Program, the national academies press, Washington, D.C.2009. WWW.NAP.EDU.

[20] J. Raeder et al. « Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP), European Commission, Report EURFUBRU XIII-217/95 (June 1995); S. Baraschi, C. Berke, F. Fuster Jaume, et al., Fusion Programme Evaluation 1996 », Report EUR 17521, Commission Européenne, Bruxelles, décembre 1996

[21] La fusion nucléaire De Joseph Weiss Presses universitaires de France 2003 Collection : Que sais-je (3659)

[22] <http://www.cnrs.fr>

[23] <http://iter.org>

Table des matières

Introduction général01
-----------------------------	----------------

Chapitre 01 Généralité sur la fusion thermonucléaire contrôlée

1. utilisation de l'énergie nucléaire (contrôlée et non contrôlée)	04
1.1. l'énergie nucléaire incontrôlée	04
1.1.1. la bombe a	04
1.1.2. énergie dégagée par une bombe a	05
1.1.3. la bombe h	05
1.2. l'énergie nucléaire contrôlée	06
2. principe d'un réacteur de fission	06
3. pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants	10
4. pour quoi la fusion	10
5. température et énergie	12
6. le plasma	12
7. la réaction de fusion	15
7.1. quels noyaux choisir?	15
7.2. le carburant	18
7.3. la production de l'énergie	19

Chapitre 02 des exemples sur les machines de confinement magnétique

1. l'évolution des réacteurs	20
------------------------------	----

2. le tokamak	21
3. tore supra	23
Chapitre 03 comment peut on produire de l'énergie avec la fusion	
Introduction	
.....	
.....26	
1. les débuts de la fusion magnétique	27
2. le principe du confinement magnétique	28
3. la configuration fermée	30
4. le chauffage du plasma	31
4.1. chauffage par courant	32
4.2. chauffage par injection de particules neutres	32
4.3. chauffage par des ondes	34
5. bilan énergétique et facteur d'amplification	34
Chapitre 04 le réacteur iter	
1. la naissance d'iter	35
2. comment fonctionnera iter?	37
3. l'« aspirateur» des impuretés	40
4. comparaison des principales caractéristiques techniques d'iter avec ses prédécesseurs.	40
Conclusion général	41

Remerciements

Ce travail a été effectué à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, sous la direction de Monsieur LEMERINI MUSTAPHA Maître de Conférences à L'Université de Tlemcen. Qu'il veuille bien trouver ici mes vifs et sincères remerciements ainsi que ma respectueuse gratitude pour les conseils qu'il m'a prodigué tout au long de la préparation de ce mémoire.

Mr B.LIANI, Professeur à L'Université de Tlemcen, a bien voulu s'intéresser à mes travaux et m'a fait l'honneur de présider le jury. Je le prie de bien vouloir accepter mes très sincères remerciements.

Mes remerciements vont aussi à Mr A.MERAD qui a bien voulu examiner ce travail son oublier le respectueux jury.