



Estratto dal sito

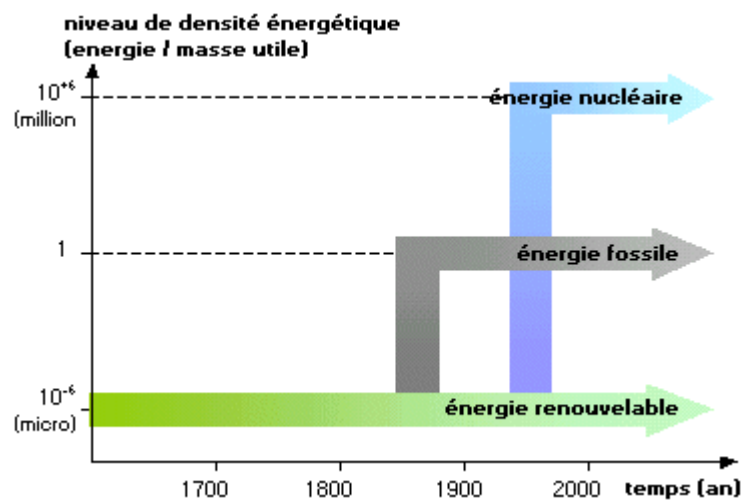
<http://www-drfc.cea.fr/fusion/principes/principes01.htm>

1 - Diversifier les sources d'énergie

Le consommation d'énergie pourrait atteindre, en 2050 , deux à trois fois la consommation actuelle ([les sources d'énergie](#)). L'épuisement des combustibles fossiles et l'adaptation difficile des énergies renouvelables à une production d'énergie centralisée capable de subvenir aux besoins des régions ou des pays à forte densité de population rendent indispensable le développement de nouvelles énergies. Ces nouvelles formes d'énergie devront bien évidemment satisfaire des critères économiques mais aussi prendre en compte des exigences en terme d'environnement, de sûreté de fonctionnement, de disponibilité des ressources. L'énergie de fusion répond à l'ensemble de ces exigences.

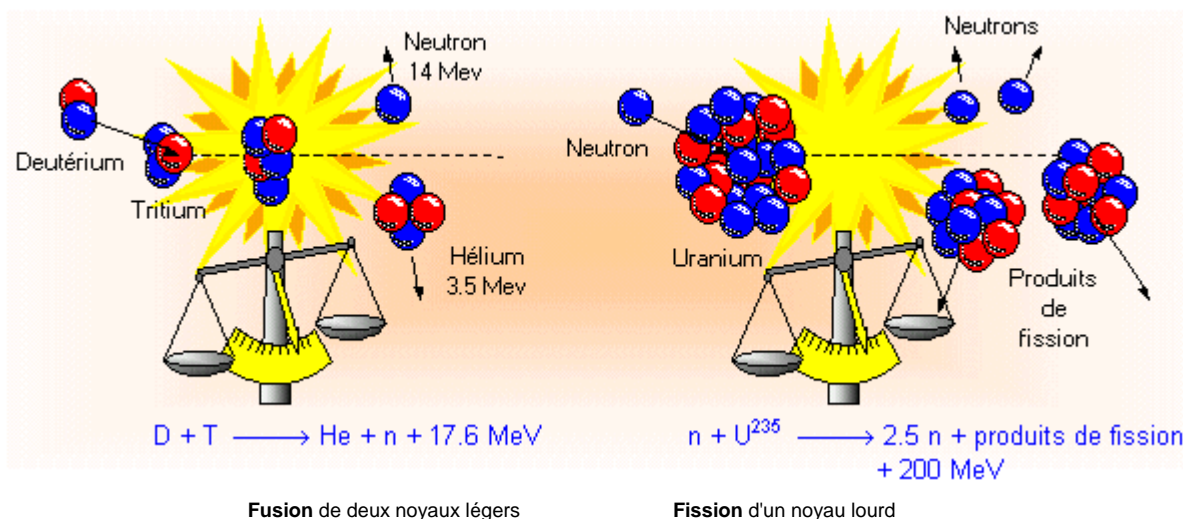
2 - Des renouvelables au nucléaires

L'évolution des besoins énergétiques a conduit à l'utilisation de sources énergétiques pouvant fournir une plus grande quantité d'énergie pour une masse de matière donnée (on parle de densité énergétique). Les réactions chimiques mettent en jeu des phénomènes qui interviennent au niveau des [électrons](#) . Les énergies concernées sont alors un million de fois plus faibles que celles mises en jeu lors des réactions concernant le noyau de l'atome ([réactions nucléaires](#) ).



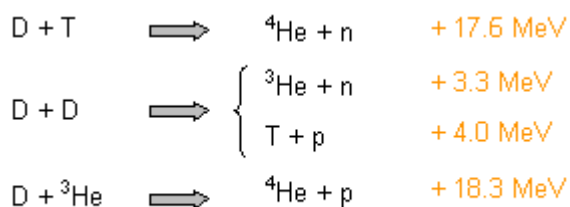
Pour produire de l'énergie, il faut réaliser une transformation dans laquelle, entre l'état initial et l'état final, un peu de la masse des corps en jeu a disparu. Ce défaut de masse se retrouve alors sous forme d'énergie par la formule bien connue $E=mc^2$ où E est l'énergie produite, m la masse disparue et c la vitesse de la lumière. Deux grands types de réactions nucléaires faisant baisser la masse et libérant donc de l'énergie sont possibles :

- A partir de noyaux d'atomes très légers (exemple le deutérium et le tritium) pour construire des atomes plus lourds, c'est la **fusion**.
- A partir du noyau d'un atome suffisamment lourd (par exemple l'atome d'uranium) pour en faire des atomes plus légers, c'est la **fission**.



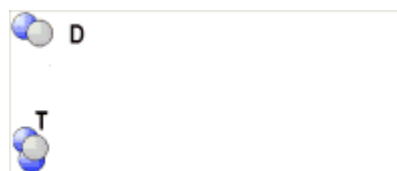
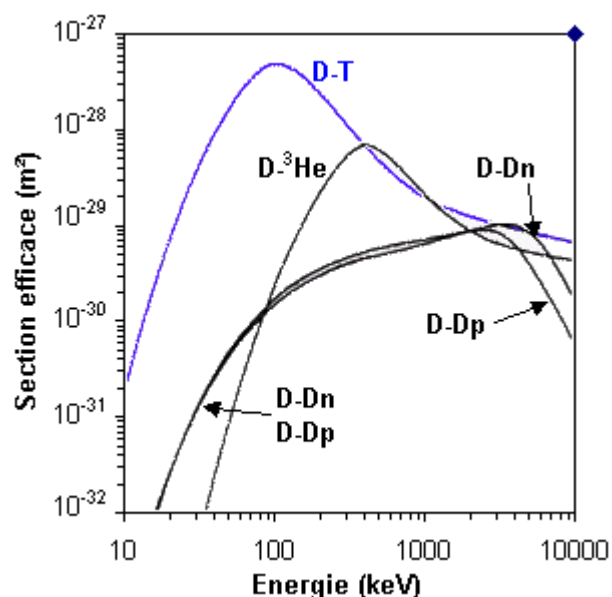
3 - Les réactions de fusion

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut rapprocher suffisamment deux noyaux qui, puisqu'ils sont tous deux chargés positivement, se repoussent. Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière et arriver dans la zone, très proche du noyau, où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter sur la répulsion électrostatique. La probabilité de passage de cette barrière peut être quantifiée par la "section efficace". La variation en fonction de l'énergie d'interaction exprimée [keV](#) des sections efficaces de plusieurs réactions de fusion est indiquée sur la courbe ci-contre.

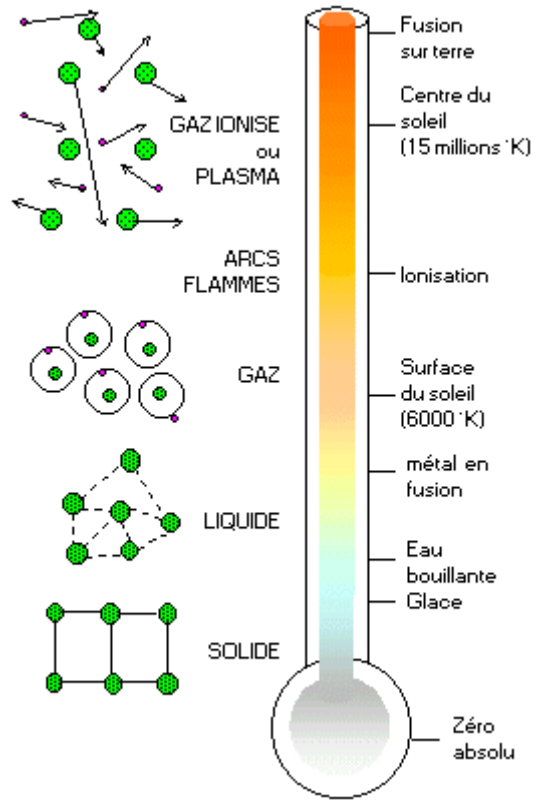


.....

La réaction de fusion la plus accessible est la réaction impliquant le [deutérium](#) et le [tritium](#). C'est sur cette réaction que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée.



Les températures (qui mesurent l'énergie d'interaction) requises pour la fusion thermonucléaire dépassent la centaine de millions de degrés ! A de telles températures, les électrons se sont détachés complètement du noyau ; on dit que l'atome s'ionise et l'on entre alors, dans le quatrième état de la matière, l'état de **plasma**. Le plasma existe dans l'univers sous des formes très diverses et avec des caractéristiques très variables. Ainsi les températures vont d'un à dix mille **électronvolts** et les densités s'étagent plus encore, allant de quelques particules par m³ dans les gaz interstellaires, jusqu'à 10³⁰ particules par m³ au centre de certaines étoiles. Les plasmas constituent la forme la plus répandue de la matière dans l'univers.



4 - Des étoiles à la Terre

La fusion est la source d'énergie du soleil et des autres étoiles. Une étoile commence à briller quand la matière en son coeur atteint, sous l'effet des forces de gravitation, des densités et des températures suffisantes pour déclencher des réactions thermonucléaires libérant de l'énergie. La tendance du plasma à se disperser, donc à se refroidir, est contrebalancée par la force gravitationnelle.

Sur terre, le confinement gravitationnel est impossible. Deux voies sont étudiées pour reproduire ces réactions :

- porter à très haute pression et à haute température un petit volume de matière pendant un temps extrêmement court, on parle alors de **confinement inertiel**. On cherche ainsi à obtenir le plus grand nombre possible de réactions de fusion avant que le plasma ne se disperse.
- piéger et maintenir à très haute température un plasma. Ce plasma est confiné dans une boîte immatérielle de forme torique créée par des champs magnétiques, on parle alors de **confinement magnétique**.

La FUSION par FAISCEAUX (Fusion Inertielle) :

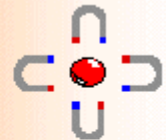
- compression d'une cible millimétrique
- volume faible
- densité forte : 10⁶ fois la densité de l'air
- temps caractéristiques : 10⁻¹¹ s
- température élevée (100 millions de °K)



Les BOITES MAGNETIQUES :

On s'arrange pour que les particules restent confinées.

- volume important (1000 m³)
- densité faible : 10⁻⁵ fois la densité de l'air
- temps caractéristiques : 10 s
- température élevée (100 millions de °K)



5 - Confinement et boîtes magnétiques

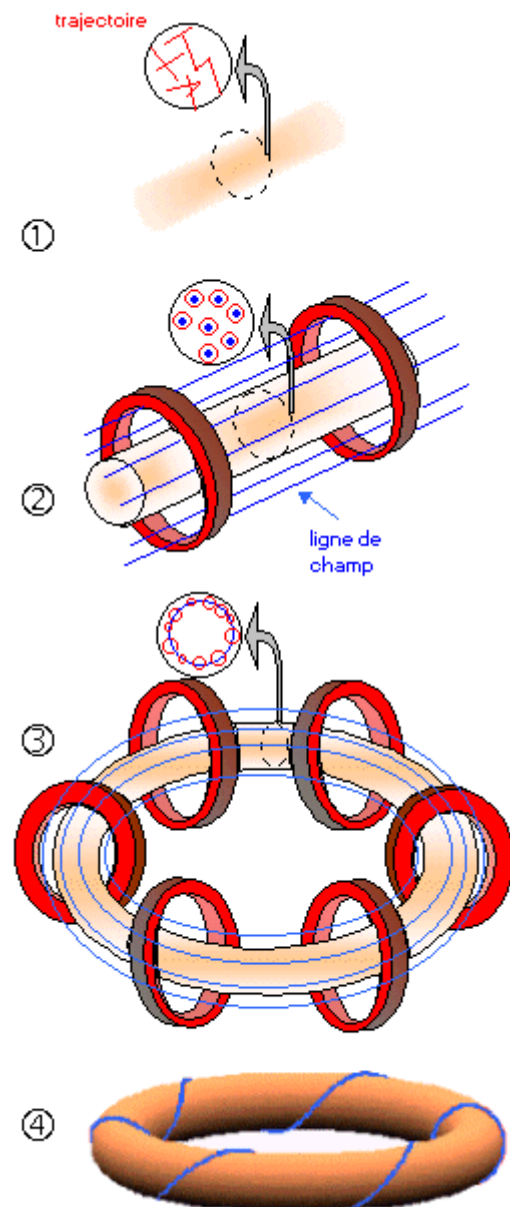
Pour que le combustible, à l'état de plasma, puisse produire suffisamment de réactions thermonucléaires, il faut le maintenir dans un volume limité et l'éloigner de toute paroi matérielle afin de maintenir sa température élevée : c'est le confinement.

Dans un plasma à l'état libre, la trajectoire des particules est aléatoire (image 1 ci-contre) et les particules vont s'échapper.

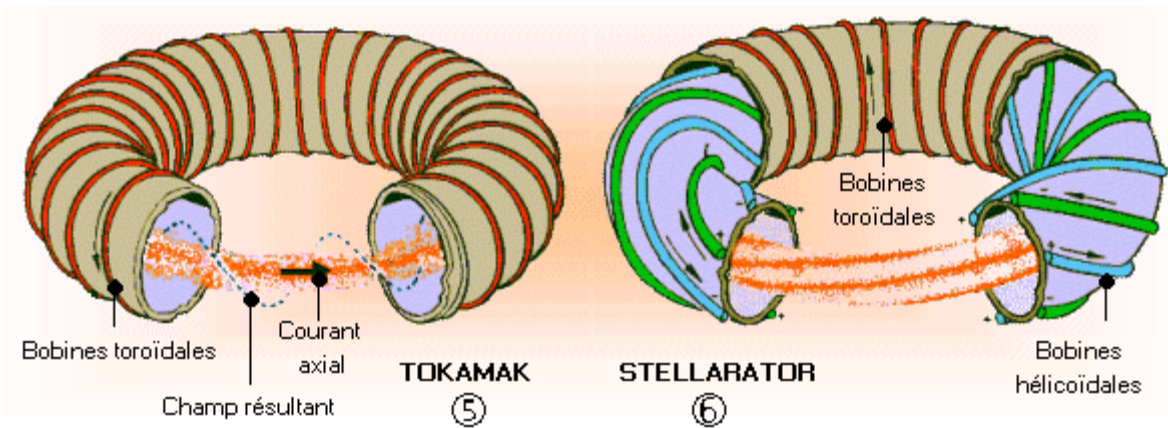
Comme le plasma est formé de particules chargées, les champs magnétiques peuvent interagir sur celles-ci. Si ce même plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne (image 2), les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales.

Afin d'éviter les pertes aux extrémités, on referme la boîte magnétique en créant un tore (image 3). Le champ magnétique ainsi créé par une série d'aimants entourant le plasma s'appelle le champ magnétique toroïdal. Les aimants générant ce champ sont les aimants toroïdaux.

On montre que ce confinement n'est pas tout à fait suffisant et que pour minimiser encore les fuites de particules, les lignes de champ doivent être hélicoïdales (image 4). Ceci est réalisé en ajoutant au champ toroïdal un autre champ magnétique qui lui est perpendiculaire (le champ poloïdal). La méthode utilisée pour produire ces lignes hélicoïdales a donné naissance à deux types de machines :

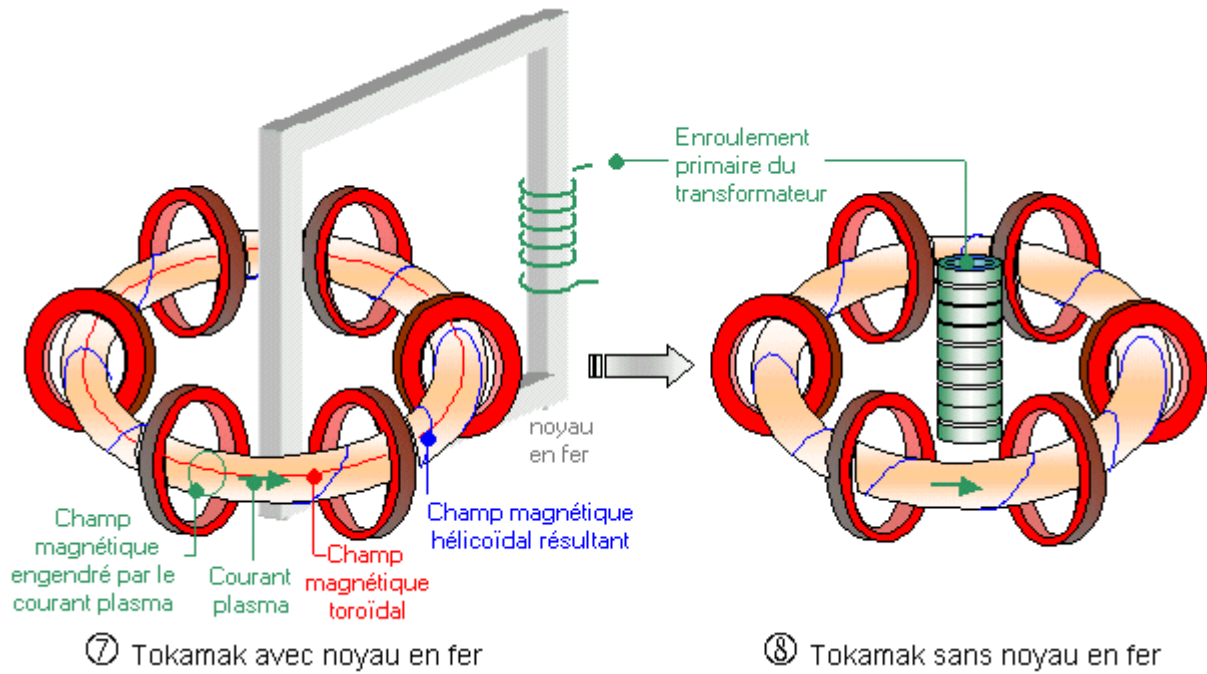


- Dans un « **tokamak** », un ensemble de bobines produit un champ magnétique dans la direction du tore, auquel vient s'ajouter le champ magnétique créé par un courant intense axial circulant dans le plasma lui-même. Les deux champs génèrent la structure hélicoïdale des lignes de champ (image 5). Cette configuration a fait des progrès considérables depuis son invention dans les années 1960 par des chercheurs russes. C'est actuellement la voie de recherche la plus étudiée (un exemple de tokamak : [Tore Supra](#))
- Dans un « **stellarator** », la configuration magnétique repose entièrement sur des courants circulant dans des bobines en hélice (image 6).



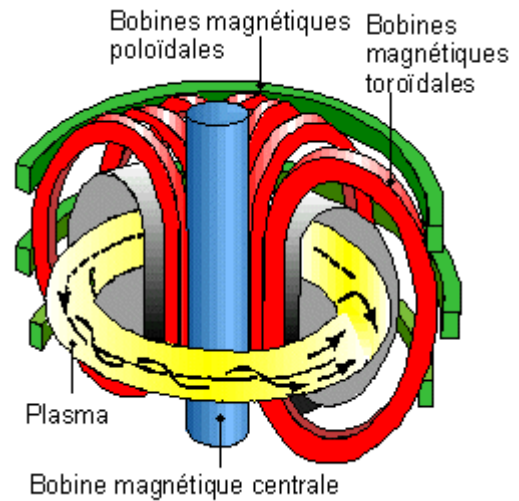
6 - La création du courant plasma

Le moyen de base pour produire ce courant consiste à le générer par induction. On place un bobinage constitué de couches horizontales au milieu de la configuration (le bobinage est placé dans le " trou " du tore). Avec ce bobinage et à condition d'y faire varier le courant, on engendre par induction, le courant du plasma exactement comme dans un transformateur électrique (image 7). Ce type de fonctionnement peut s'effectuer sans noyau de fer (image 8).



7 - La stabilisation du plasma

L'équilibre du plasma, sa position, sa forme et le contrôle du courant sont assurés par un ensemble d'aimants horizontaux appelés bobines poloïdales (image ci-contre).




8 - Le chauffage du plasma

Quelle que soit la façon dont on a créé le plasma à l'intérieur d'une structure de confinement, il n'a jamais d'emblée la température requise pour les réactions de fusion. Trois méthodes sont possibles pour chauffer un plasma :

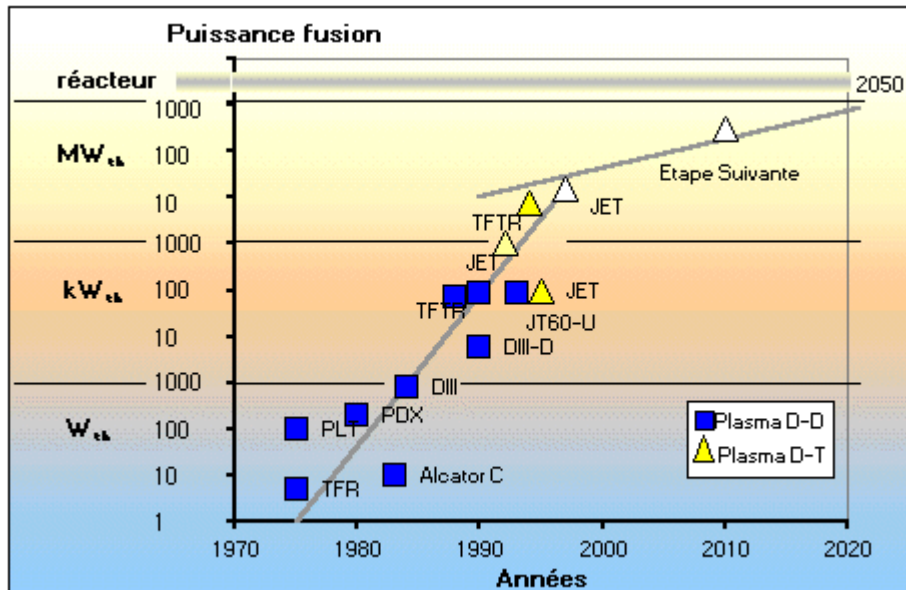
- le courant qui circule dans le plasma sert également à chauffer le plasma par *effet Joule*. Ce dernier reste efficace jusqu'à une température de l'ordre de 10 millions de degrés. Au delà, la résistivité du plasma devient trop faible et l'efficacité de cette méthode décroît. Dans un [Stellarator](#), il n'y a pas de courant central et donc pas de **chauffage ohmique**.
- le chauffage par **injection de neutres** consiste à créer et accélérer un faisceau d'ions, en dehors de la machine de confinement. Ce faisceau est ensuite neutralisé avant de pénétrer dans le plasma où les particules sont ionisées et confinées par le champ magnétique. Les collisions redistribuent l'énergie et la température du plasma augmente.
- le plasma peut absorber l'énergie d'ondes électromagnétiques aux fréquences caractéristiques du milieu. Ce chauffage **par ondes électromagnétiques** est transmis au plasma par des antennes qui tapissent une partie de l'enceinte de confinement. Le choix de la fréquence permet de définir l'espèce de particules (ions ou électrons) qui sera chauffée et la région où se fera l'absorption de l'onde et donc le chauffage.



Dans un réacteur de fusion thermonucléaire à confinement magnétique, la température du plasma pourrait être amenée au niveau adéquat par une combinaison des méthodes ci-dessus. Lorsque les réactions de fusion sont en nombre important, l'énergie portée par les noyaux d'hélium reste confinée dans le plasma et contribue à son chauffage. Si cette contribution devient égale à l'énergie perdue par le plasma, alors les méthodes de chauffage ci-dessus ne sont plus nécessaires. Le plasma thermonucléaire est alors autoentretenu : on dit qu'il est en **ignition**. Si l'on définit le facteur d'amplification comme étant le rapport entre la puissance totale générée par le plasma et la puissance de chauffage injectée dans le plasma, alors ce facteur d'amplification est infini si le plasma est autoentretenu. Lorsque ce facteur est égal à l'unité, le plasma fournit autant d'énergie qu'on lui en injecte. Cette dernière condition s'appelle le "**break even**". Le tokamak européen [JET](#)  a réalisé des plasmas proches du "break even".

9 - Les grands résultats

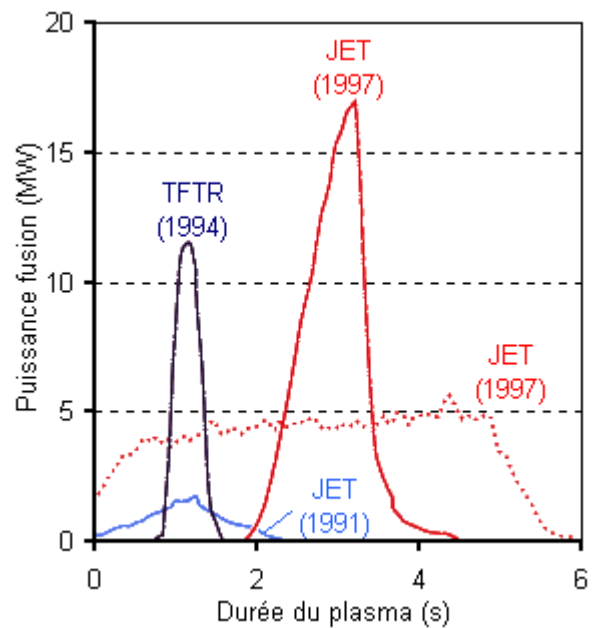
Depuis l'avènement des tokamaks vers 1970, la puissance de fusion des plasmas générés par les diverses installations de par le monde a été multipliée par 10 000 millions. De nombreux et importants résultats ont été obtenus dans tous les domaines, que cela soit au niveau de la physique ou des technologies utilisées.



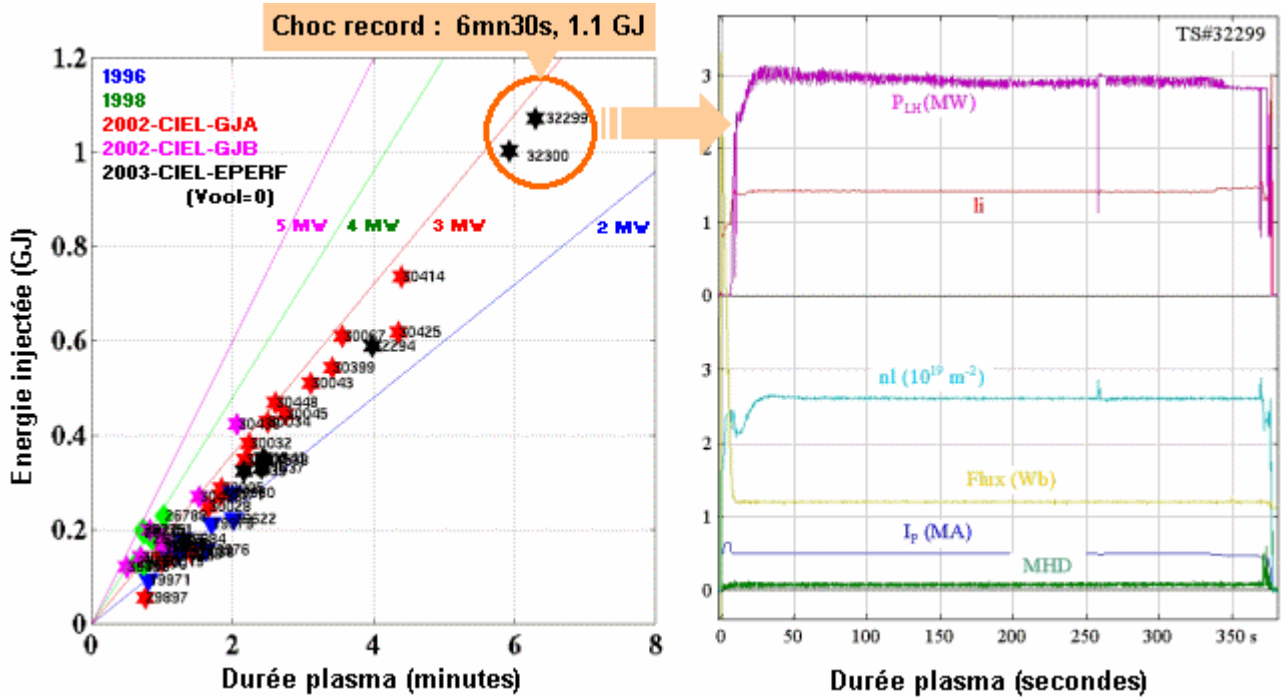
Progression de la puissance fusion au cours du temps

Si l'on ne devait retenir que deux grands résultats, ce serait :

- les plasmas de forte puissance réalisés en 1997 dans l'installation européenne [JET](#) 🇪🇺



- les plasmas d'une durée de 6 minutes et 30 secondes réalisés dans [Tore Supra](#) en décembre 2003.



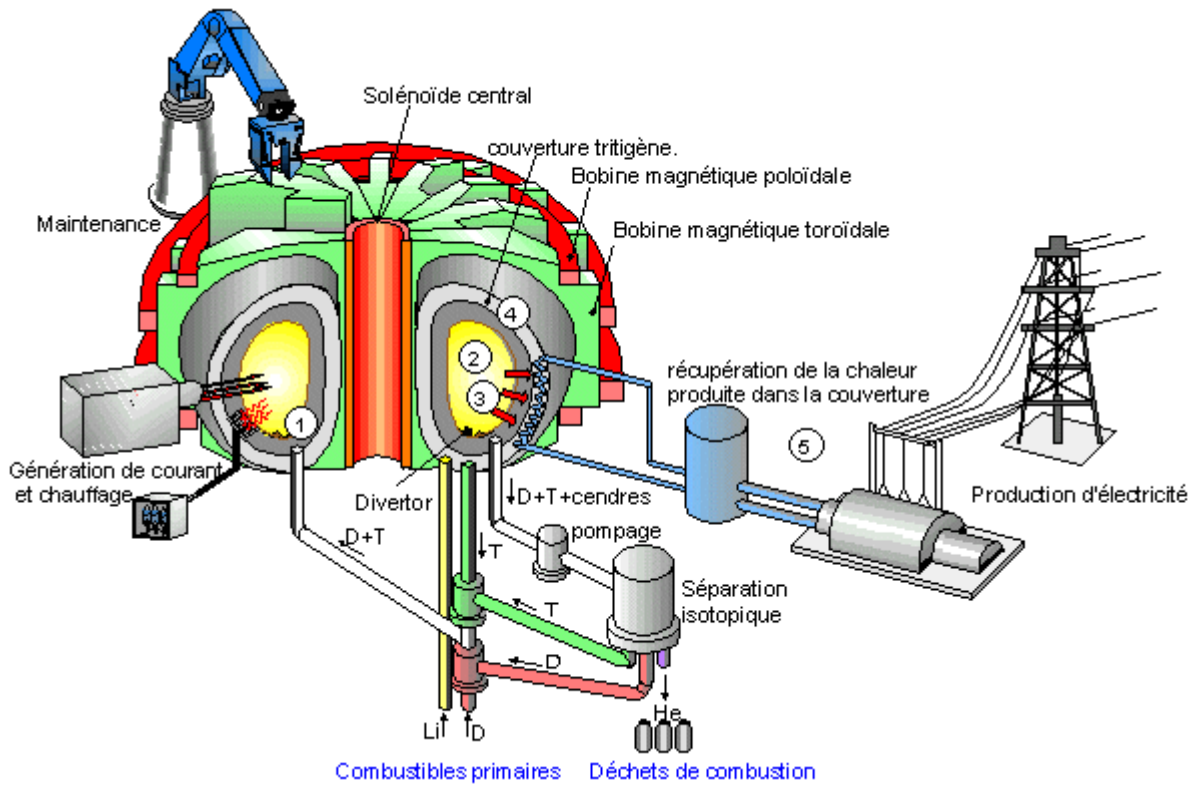
Pour obtenir un plasma performant, celui-ci doit satisfaire à des critères de densité (il doit y avoir un nombre suffisant de noyaux) et de température (ces noyaux doivent être à des températures de plusieurs millions de degrés). Il faut aussi que l'énergie portée par les noyaux d'hélium reste confinée dans le plasma suffisamment longtemps. La durée pendant laquelle l'énergie reste confinée dans le plasma est appelée "temps de confinement de l'énergie" et elle varie avec le carré du [grand rayon](#) du plasma. Cette effet de taille est une des caractéristiques (intrinsèques) des installations de fusion : les plasmas performants sont obtenus dans des installations de grande taille.

Les critères ci-dessus (densité, température, temps de confinement) ont été obtenus de façon non simultanée dans les installations expérimentales actuelles. La communauté des chercheurs et ingénieurs impliqués dans les études sur la fusion contrôlée magnétique est maintenant prête à effectuer un pas supplémentaire : démontrer la maîtrise de la combustion entretenue d'un plasma deutérium-tritium sur des temps longs. Ce sera l'étape suivante et le principal objectif de la prochaine machine expérimentale internationale ([ITER](#)).

10 - Des expérimentations au réacteur

Depuis longtemps la communauté Fusion a cherché à définir ce que pourrait être le réacteur du futur. On dispose donc d'études, régulièrement remises à jour, qui fixent les contours et parfois les détails de ce que pourrait être un réacteur de fusion. En plus de ces études prospectives, il faut citer les études d'ingénierie détaillée du projet [ITER](#) qui tout en n'étant pas totalement représentatives ont tout de même défini avec précision la majeure partie des grands composants d'un réacteur. Le schéma de principe du réacteur électrogène est indiqué ci-dessous.

Le mélange combustible deutérium-tritium est injecté (1) dans une chambre où, grâce à un système de confinement il passe à l'état de plasma et brûle (2). Ce faisant, le réacteur produit des cendres (les atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de particules rapides ou de rayonnement (3). L'énergie produite sous forme de particules chargées et de rayonnement, s'absorbe dans un composant particulier, la "première paroi" qui, comme son nom l'indique, est le premier élément matériel rencontré au-delà du plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la [couverture tritigène](#) (4) : élément au-delà de la première paroi, mais néanmoins à l'intérieur de la chambre à vide. La chambre à vide elle-même est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont bien évidemment refroidies par un système d'extraction de la chaleur. La chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble classique turbine et alternateur producteur d'électricité (5).



Si l'on exclut tous les composants chargés de la production d'énergie (couverture tritigène par exemple), un réacteur sera assez proche de ce que pourrait être une installation expérimentale de prochaine génération de type [ITER](#). Cette prochaine installation validera la faisabilité de la production d'énergie via la fusion thermonucléaire non seulement au niveau de la physique mais aussi au niveau de la majeure partie des grands composants d'un réacteur (bobines magnétiques supraconductrices de grande taille par exemple). Les performances en terme de confinement plasma demandées à un réacteur électrogènes ne sont que 4 à 5 fois supérieures aux performances nominales du projet [ITER](#). On peut raisonnablement estimer que les premiers kW électriques produits par un prototype de réacteur à fusion thermonucléaire puissent voir le jour à l'horizon 2050 soit environ cent ans après le début des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée. Cent ans d'écart entre la découverte du concept et l'utilisation finale ne sont pas si inhabituels que cela: la découverte du principe des cellules solaires date de 1839 (A. Becquerel) et la découverte du principe de la pile à combustible date de 1839 (W.R. Grove).

