

# LA FUSION : Physique d'une source d'énergie fondamentale

Ce sont des réactions de fusion qui libèrent l'énergie qui alimente le soleil et les étoiles. Pour produire cette énergie, des plasmas de haute température doivent être confinés suffisamment longtemps. Les résultats de la recherche en physique des plasmas permettent de recréer sur terre les conditions requises pour la fusion thermonucléaire contrôlée. Leur objectif à long terme est l'approvisionnement énergétique, en complément d'autres sources, pour faire face aux besoins futurs. Sur un fond représentant le Soleil et la Terre, la présente affiche explore les différents thèmes concernés par la fusion: ses rapports avec d'autres formes d'énergie, la physique des réactions de fusion, le confinement et le chauffage des plasmas ainsi que l'avancement des recherches en ce domaine.

## Production et transformation de l'énergie

La société moderne repose sur la disponibilité de nombreuses sources d'énergie et sur la conversion de cette énergie en une forme directement utilisable. Dans les centrales, l'énergie est produite sous forme de chaleur par des réactions exothermiques, qu'elles fassent appel à la chimie, à la fission nucléaire ou — dans le futur — à la fusion. Cette énergie thermique est ensuite transformée par des processus obéissant aux lois de la thermodynamique. L'efficacité de cette conversion est limitée par la Seconde Loi de la Thermodynamique: inévitablement, une partie de l'énergie et des réactifs ne peut être récupérée, est relâchée et perdue dans l'environnement. L'énergie générée par kilo de réactif est beaucoup plus importante pour les réactions nucléaires que pour les réactions chimiques, comme indiqué au recto. Dans le scénario le plus vraisemblable pour une future centrale à fusion thermonucléaire de la première génération, la réaction utilisée sera la fusion de deutérium – extrêmement abondant sur terre – avec du tritium. Celui-ci peut être produit dans le réacteur même, à partir de lithium. Le lithium absorbe les neutrons provenant de la réaction D+T et se désintègre en tritium et hélium. Les véritables réactifs seront donc le deutérium et le lithium. Le produit de la réaction est l'hélium.

## Production d'énergie par des réactions de fusion

L'équation  $\Delta E = (m_i - m_f)c^2$  relie l'énergie libérée  $\Delta E$  à la différence de masse entre les réactifs ( $m_i$ ) et les produits de la réaction ( $m_f$ ). L'énergie de liaison d'un noyau est la différence entre la masse du noyau et la somme des masses des nucléons (protons et neutrons) qui le constituent. La forme du graphique donnant l'énergie de liaison par nucléon montre qu'en combinant (en fusionnant) des éléments de faible masse, on obtient un noyau d'énergie de liaison par nucléon plus élevée;

on libère ainsi de l'énergie. Pour les éléments de masse plus élevée (au-delà d'une masse d'environ 62 nucléons), diviser le noyau en éléments de masse plus faible (fission) permet aussi de libérer de l'énergie. Mais comme la pente de la courbe est plus raide dans le cas de la fusion, l'énergie libérée par nucléon est plus importante que pour la fission. Nous montrons schématiquement les caractéristiques de deux processus de fusion importants : le cycle proton-proton, qui est la source primaire d'énergie du soleil, et la réaction D-T qui sera utilisée dans les réacteurs de fusion de première génération. Le taux de réactions de fusion dépend fortement de la température ionique. Pour que l'attraction d'origine nucléaire, très forte mais à courte portée, l'emporte sur la répulsion des noyaux électriquement chargés (tous deux positivement), lesdits noyaux doivent s'approcher à moins de  $10^{-15}$  m. C'est pourquoi les très hautes températures indiquées sur le graphique sont requises. La différence entre les taux de réactions des deux processus envisagés explique aussi pourquoi la réaction D-T est préférée au cycle proton-proton pour les applications terrestres.

## Le plasma, quatrième état de la matière

Les plasmas, ensembles de particules libres chargées électriquement, sont très fréquents dans l'univers, englobant des domaines de densité et de température incroyablement larges. La physique des plasmas est la pierre angulaire de notre connaissance du Soleil et des étoiles, du milieu interstellaire, des galaxies, des éclairages publicitaires au néon, des éclairs et des aurores boréales, ainsi, bien sûr, que des réactions de fusion contrôlée. Les plasmas sont gouvernés par les interactions électriques à longue portée entre leurs ions et électrons et par les champs magnétiques, externes ou créés par des courants électriques internes. La dynamique de tels systèmes est complexe et doit être bien comprise pour permettre le développement de l'énergie de fusion.

## Les conditions requises pour la fusion contrôlée

Des améliorations dans les techniques de chauffage et de confinement des plasmas sont encore nécessaires pour faire de la fusion contrôlée une source d'énergie utilisable. Dans le cas du plasma D-T, qui doit atteindre des températures de l'ordre de  $10^8$  K, les deux méthodes de confinement les plus prometteuses sont la voie magnétique et la voie inertielle. Le Tokamak est un dispositif toroïdal comprenant une chambre à vide torique (en forme d'anneau) dans laquelle le plasma est confiné par l'action conjointe d'un champ magnétique externe et du courant circulant dans le plasma. C'est un exemple de la première technique: le confinement magnétique.

Dans la voie inertielle, une minuscule bille de verre, quicontient le mélange D-T, est comprimée par des faisceaux d'ions ou de lasers très intenses pour obtenir des densités et températures extrêmement élevées; on obtient ainsi suffisamment de réactions de fusion pendant le temps très court durant lequel cette bille en implosion reste confinée sous l'effet de sa propre inertie.

Pour atteindre la fusion contrôlée, un plasma à haute température doit être confiné à haute densité pendant

un temps suffisamment long. Ce critère est exprimé en termes de qualité du confinement : le produit de la densité du plasma et du temps de confinement de l'énergie. Les expériences les plus avancées ont déjà produit des plasmas dans lesquels la densité, la température ou le temps de confinement de l'énergie approchaient, voire dépassaient, les valeurs requises pour obtenir des réactions de fusion auto-entretenues, mais les valeurs attendues pour ces trois paramètres n'ont pas encore été atteintes simultanément.

---

## Renseignements complémentaires, informations récentes, et matériel éducatif sur Internet (World Wide Web)

**Fusion Education Project Home Page:** <http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>  
**CPEP Home Page:** <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>  
**CPEP Product Information:** [http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep\\_how\\_to\\_order.html](http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html)

### TEC-Homepages

FZJ/IPP: <http://www.fz-juelich.de/ipp/>  
ERM-KMS Bruxelles: <http://fusion.rma.ac.be/>  
FOM Rijnhuizen: <http://www.rijnh.nl/>

### CRPP Homepage

<http://www.epfl.ch/crpp/> ou <http://crppwww.epfl.ch/>

Ces pages renvoient également à différentes institutions et organismes actifs dans le domaine de la recherche sur la fusion contrôlée.

Le “**Contemporary Physics Education Project**” (CPEP) est une association sans but lucratif de physiciens et d'enseignants. Son matériel éducatif met en lumière les connaissances scientifiques actuelles, en soulignant les découvertes importantes des trente dernières années. Le CPEP sponsorise également de nombreux ateliers pour les professeurs. D'autres renseignements peuvent être obtenus par courrier électronique (e-mail) à l'adresse suivante: [pdg@lbl.gov](mailto:pdg@lbl.gov) ou par internet à l'adresse ci-dessus. L'offre du CPEP s'étend en permanence. Le matériel peut être commandé auprès de **Science Kit**, 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150 USA, Téléphone +1-800-828-7777, Télécopie +1-716-874-9572.

Le “**Centre de Recherches en Physique des Plasmas**” (CRPP) est le pilier de l'Association Euratom-Confédération Suisse. Ses activités portent sur la recherche en plasma de fusion, expérimentale et théorique, sur le campus de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, et sur la technologie de la fusion (développement et test des matériaux à basse activation et de supraconducteurs), sur le site du Paul Scherrer Institut (PSI) à Villigen. Les objectifs expérimentaux du tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable) du CRPP visent à optimiser les scénarios de production et de contrôle de plasmas fortement allongés: étude des propriétés de confinement de ces plasmas en régime ohmique et avec un chauffage additionnel (ECRH). Pour de plus amples informations: Secrétariat CRPP-EPFL, PPB, CH 1015 Lausanne, Tél: +41-21-693 34 87/82; Fax +41-21-693 51 76.

Le “**Trilateral Euregio Cluster**” (TEC) est une association d'institutions de recherche nationales de Belgique, des Pays-Bas et de République Fédérale Allemande: le Laboratoire de Physique des Plasmas-Laboratorium voor Plasmafysica de l'École Royale Militaire-Koninklijke Militaire School (ERM-KMS) à Bruxelles; le FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen à Nieuwegein; et l'Institut für Plasmaphysik du centre de recherches de Jülich. Des exemplaires supplémentaires du présent poster (en français, néerlandais, allemand, italien, espagnol ou portugais) peuvent s'obtenir auprès de l'**Institut für Plasmaphysik**, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Télécopie +49-2461-615452.