

Ce sont des réactions de fusion qui fournissent leur énergie au soleil et aux étoiles. Des noyaux légers se combinent, ou fusionnent, pour former des noyaux de masse supérieure. Le processus de fusion transforme une partie (m) de la masse totale en énergie cinétique (E) selon la loi d'Einstein $E=mc^2$. Dans le soleil, une série de réactions de fusion, la chaîne p-p, commence par une réaction entre protons, noyaux de l'hydrogène ordinaire, pour s'achever par la production de particules alpha, noyaux d'hélium. La chaîne p-p fournit la majeure partie de l'énergie solaire, et continuera à le faire pendant des milliards d'années.

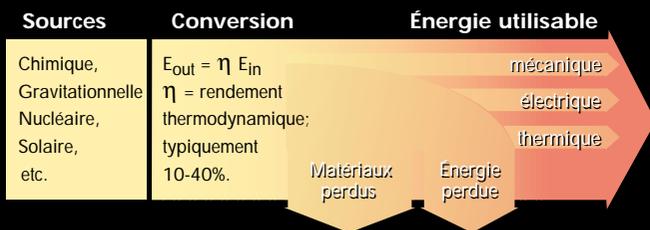
La Fusion

Physique d'une source d'énergie fondamentale

SOURCES ET CONVERSION D'ÉNERGIE

VUE D'ENSEMBLE DES PROCESSUS DE CONVERSION

L'énergie existe sous de nombreuses formes et différents processus permettent de passer de l'une à l'autre. Bien que l'énergie totale soit conservée, la plupart de ces transformations réduisent la part d'énergie utilisable.



Paramètres physiques de réactions exothermiques

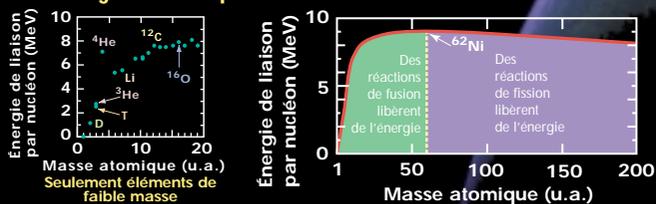
Type de réaction:	chimique	fission	fusion
Exemple	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$1_n + {}^{235}U \Rightarrow {}^{143}Ba + {}^{91}Kr + 2^1_0n$	$D ({}^2H) + T ({}^3H) \Rightarrow 4He + 1n$
Matières premières (de la centrale)	Charbon et Air	UO_2 (3% ${}^{235}U$ + 97% ${}^{238}U$)	Deutérium et Lithium
Température typ. (K)	1000	1000	100 000 000
Énergie dégagée par kg de combustible (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

COMMENT FONCTIONNENT LES RÉACTIONS DE FUSION

PHYSIQUE NUCLÉAIRE DE LA FUSION

La fusion d'éléments de masse faible dégage de l'énergie tout comme la fission d'éléments de masse élevée.

Énergie de liaison par nucléon en fonction de la masse nucléaire



Énergie de la réaction nucléaire: $\Delta E = k (m_i - m_f) c^2$

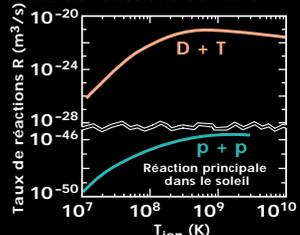
D'après la formule d'Einstein $E = mc^2$, ΔE = énergie libérée par réaction; m_i = masse initiale (totale) des réactifs; m_f = masse totale des produits. Le facteur de conversion k vaut 1 en unités S.I., ou 931,466 MeV/(u.a.) c^2 , si E est exprimé en MeV et m est la masse en unités atomiques (u.a.).

Masses nucléaires

(La masse de l'électron est de 0,000549 u.a.)

Symbole	Particule	Masse (u.a.)
n (1_0n)	Neutron	1,008665
p (1_1H)	Proton	1,007276
D (2_1H)	Deuteron	2,013553
T (3_1H)	Triton	3,015500
3He	Hélium-3	3,014932
α (4_2He)	Hélium-4	4,001506

Taux de réactions de fusion



Nombre de réactions par unités de volume et de temps = $R n_1 n_2$

n_1, n_2 = densités des réactifs (ions/ m^3); R = taux de réactions (m^3/s).

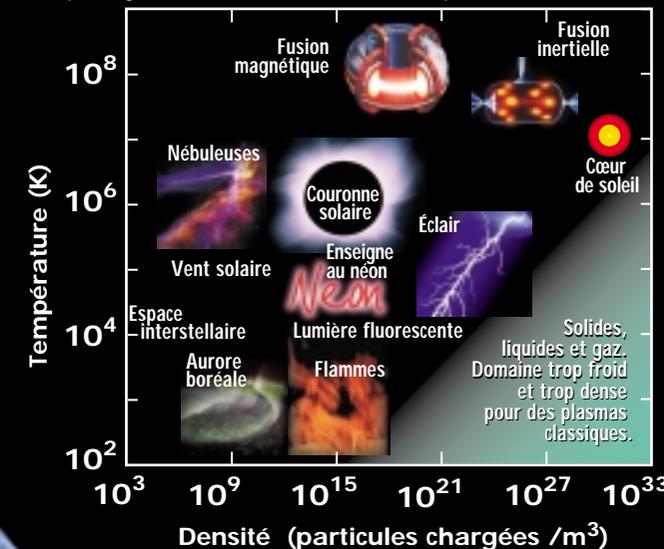
À multiplier par ΔE pour obtenir la densité de puissance libérée.

Pour réaliser la fusion sur terre, il faut amener les atomes à de très hautes températures, de plus de 10 millions de degrés. A ces températures, les atomes sont ionisés et forment un plasma. Une production nette d'énergie est réalisée lorsque le plasma est confiné assez longtemps pour qu'un nombre suffisant de réactions de fusion se produisent. S'il devient possible de construire des réacteurs de fusion, il s'agira d'une source d'énergie pratiquement inépuisable, vu l'abondance des combustibles, comme le deutérium. Des progrès substantiels ont été réalisés dans cette voie.

LE PLASMA QUATRIÈME ÉTAT DE LA MATIÈRE

CARACTÉRISTIQUES DE PLASMAS REPRÉSENTATIFS

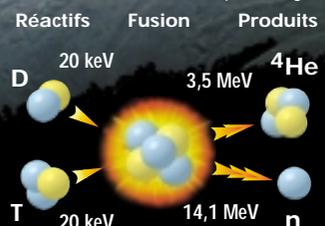
Les plasmas sont constitués de particules chargées, électrons et ions, qui se meuvent librement. Ils se forment à très haute température, quand les électrons sont séparés des atomes auxquels ils étaient attachés. Les plasmas sont très répandus dans l'univers: ce sont eux qui forment les étoiles. Les plasmas portent parfois la dénomination de "Quatrième état de la matière" en raison de leurs propriétés physiques distinctes de celles des solides, liquides et gaz. Ils couvrent des domaines de densités et températures extrêmement étendus.



DEUX RÉACTIONS DE FUSION IMPORTANTES

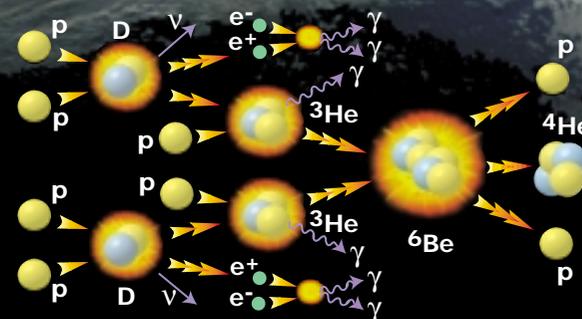


Pour les réacteurs de fusion de la première génération



1 eV = 1,6022 x 10⁻¹⁹ J. L'énergie cinétique moyenne des particules de 1 eV correspond à une température de 11 600 K.

"p-p": LE CYCLE DU SOLEIL



OBTENTION DES CONDITIONS DE FUSION

CHAUFFAGE ET CONFINEMENT DU PLASMA

Confinement:

Pour libérer une énergie considérable, la fusion requiert des plasmas à haute température, confinés suffisamment longtemps à haute densité.

Éventail de valeurs typiques:

Mécanismes de chauffage:

- Compression
- Énergie des produits de fusion

Gravité



Plasmas de formation des étoiles

Dimensions: 10¹⁹ m
Temps de vie du plasma: 10¹⁵-10¹⁸ s

Champs magnétiques



Tokamak

Dimensions: 10 m
Temps de vie du plasma: 10⁻² - 10⁶ s

Inertie



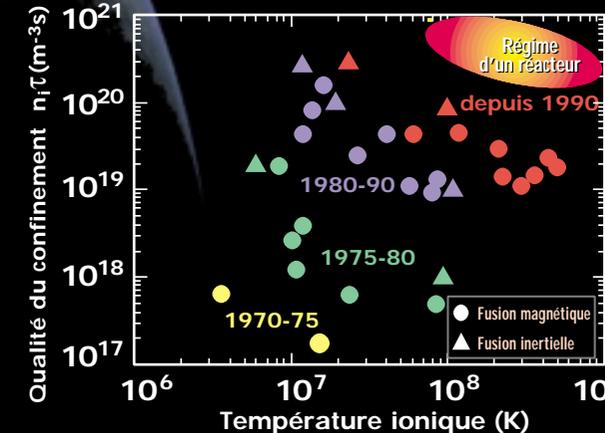
Fusion par faisceaux lasers

Dimensions: 10⁻¹ m
Temps de vie du plasma: 10⁻⁹ - 10⁻⁷ s

RÉALISATION DES CONDITIONS DE FUSION

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DE LA RECHERCHE SUR LA FUSION

Aussi bien dans la voie de la fusion inertielle que dans celle du confinement magnétique, les efforts se sont concentrés sur la compréhension des mécanismes de confinement et de chauffage. Les progrès de ces recherches se voient dans l'augmentation constante des valeurs atteintes pour la température T_i des ions, pour sa densité ionique n_i et pour le temps de confinement de l'énergie τ . De futurs réacteurs de fusion devraient produire une puissance d'environ 1 GW, avec des plasmas de $n_i \tau = 2 \times 10^{20} m^{-3} s$ à la température ionique de $T_i = 120$ millions K.



Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by Forschungszentrum Jülich / TEC

Le CPEP est une organisation sans but lucratif d'enseignants, de physiciens et d'éducateurs, avec une participation importante du milieu étudiant. Les dons privés et de sociétés, ainsi que l'aide des laboratoires nationaux ont contribué à ce projet de façon importante et restent cruciaux pour ses progrès futurs. La présente affiche est l'œuvre du CPEP, avec le soutien et la participation des organismes suivants: le journal *Physics of Plasmas* de l'AIP, la Division of Plasma Physics de l'APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, the University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, the U.S. Department of Energy et le Trilateral Euregio Cluster. Sources des illustrations: NASA, the National Solar Observatory, Steve Alberset et les organismes mentionnés ci-dessus.