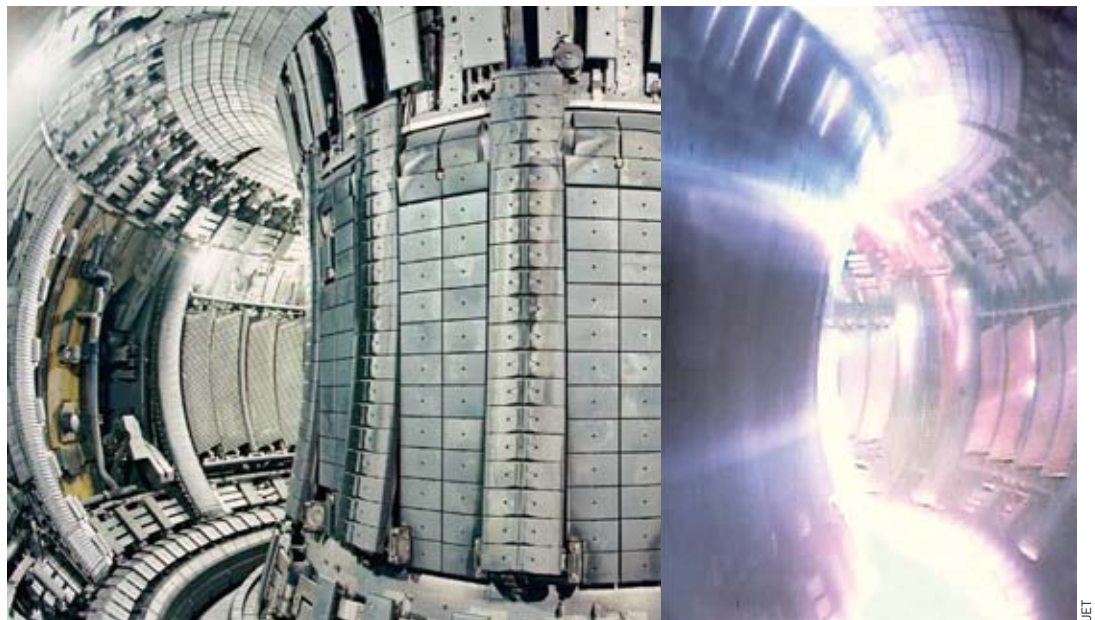


Parmi les nombreux domaines d'étude qui s'imposent aux chercheurs dans leur volonté de maîtriser la fusion thermonucléaire par confinement magnétique, la compréhension de la turbulence est essentielle. Sa physique, extrêmement complexe, contrôle en effet une des caractéristiques fondamentales de cette technique : la qualité du confinement.

# La physique de la turbulence, une des clés de la fusion contrôlée par confinement magnétique

Plasma généré dans le JET, pendant une décharge (à droite). À gauche, une partie de l'enceinte à vide de la même machine, à l'arrêt.



Maîtriser sur Terre l'énergie des étoiles est un projet qui, pour être réaliste, n'en est pas moins très ambitieux sur le plan technologique. Le meilleur exemple en est certainement le projet de tokamak international ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) qui requiert la collaboration de plusieurs grandes puissances internationales sur plusieurs décennies. En plus d'offrir une alternative crédible à long terme au problème de l'approvisionnement en énergie de l'humanité, la fusion contrôlée constitue un creuset fascinant pour la recherche en physique fondamentale, intégrant de multiples facettes de cette science. Les domaines d'étude vont de la physique du solide pour l'étude des composants face au plasma ou le développement de supraconducteurs pour le bobinage, à la physique de l'interaction plasma-paroi où rayonnement et recyclage jouent un rôle clef, en passant par l'interaction des ondes électromagnétiques avec le plasma, la stabilité magnétohydrodynamique de celui-ci et enfin la physique de la turbulence.

La compréhension de cette dernière est essentielle à la réalisation de la fusion, car elle en contrôle une des caractéristiques fondamentales : la qualité du confinement. C'est elle qui est ici choisie comme exemple représentatif des problèmes de physique fondamentale étudiés en fusion. Les thèmes abordés trouvent des résonances bien au-delà de la "communauté fusion", dans des domaines aussi variés que la mécanique des fluides ou l'astrophysique, dont bien sûr la physique du Soleil. Outre les réactions de fusion, ce projet partage également avec notre étoile la physique des plasmas magnétisés, et de fortes analogies existent, par exemple quant aux phénomènes d'éjection brutale de matière et d'énergie.

## Turbulence et transport

La rentabilité économique de la fusion impose au processus d'être quasiment auto-entretenu : l'énergie dégagée par les réactions de fusion (encadré D, *Les réactions de fusion nucléaire*, p. 47) doit non seulement

servir à chauffer l'eau qui fera tourner des turbines, mais aussi à maintenir le plasma à la température de fusion, entre 100 et 200 millions de degrés. Cette dernière contrainte stipule que l'énergie de fusion doit compenser la puissance perdue par le plasma. Elle se traduit par un critère simple sur la densité des ions et le temps de confinement de l'énergie :  $n_i \tau_E > C^{te}$ .  $\tau_E$  est un paramètre macroscopique qui mesure la qualité du confinement : c'est le temps caractéristique de décroissance de l'énergie interne du plasma en l'absence de chauffage. La voie suivie par la fusion contrôlée par confinement magnétique vise à maximiser  $\tau_E$ , et donc à réduire le transport dans la région où se produisent les réactions de fusion. La densité et la constante  $C^{te}$  sont telles que  $\tau_E$  doit être de l'ordre de quelques secondes. À l'inverse, il sera souhaitable de dégrader le confinement du plasma périphérique, afin d'étaler la puissance sortante sur la plus grande surface possible, réduisant ainsi les contraintes thermiques sur les éléments de paroi.

Dans un tokamak, particules et chaleur sont contraintes de se déplacer sur des surfaces virtuelles engendrées par la topologie magnétique. Ces surfaces sont en forme de tores emboîtés (figure 1). La direction parallèle est donnée par les lignes de champ magnétique qui s'enroulent hélicoïdalement autour de ces surfaces. La direction transverse à ces lignes de champ sera par la suite repérée par l'indice "⊥". Si l'on admet que le transport de matière et de chaleur est gouverné par un processus de marche au hasard dans la direction transverse, on peut le représenter par un coefficient de diffusion  $\chi_{\perp}$ , exprimé en  $m^2 s^{-1}$ . Par ce processus aléatoire, la chaleur met un temps  $\tau_E$  pour parcourir la distance caractéristique sur laquelle le plasma doit être confiné. Cette distance correspond au rayon intérieur du tore  $a$  pour les tokamaks, de l'ordre du mètre.  $\tau_E$  est alors donné par :  $\tau_E \approx a^2 / \chi_{\perp}$ . Si le transport transverse de l'énergie dans les tokamaks n'était généré que par les collisions coulombiennes binaires, les machines actuelles auraient d'ores et déjà rempli les conditions nécessaires à la fusion.

À ces températures élevées, le libre parcours moyen des particules est en effet de l'ordre de quelques kilomètres. La conduction associée aux collisions, très faible ( $\chi_{\perp, coll} < 10^{-1} m^2 s^{-1}$ ), conduirait alors à des temps de confinement de plusieurs dizaines de secondes. Les valeurs de  $\tau_E$  mesurées expérimentalement sont bien inférieures, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes sur les plus grosses machines existantes. L'essentiel du transport est assuré par la turbulence, excitée par les gradients transverse au champ magnétique de confinement. L'amplitude mesurée des fluctuations de diverses grandeurs (densité, température, etc.) est en effet en accord avec le niveau de transport observé, à savoir  $\chi_{\perp} \approx 1-10 m^2 s^{-1}$ .

Restent cependant plusieurs questions ouvertes : quelles sont l'origine et les caractéristiques de la turbulence et du transport associé ? Existe-t-il des moyens d'en contrôler l'amplitude et la dynamique ?

### De la théorie des instabilités...

Les fluctuations turbulentes observées dans les machines à fusion naissent d'instabilités qui saturent non-linéairement. Le comportement d'une bille au fond d'une bouteille fournit une bonne image de la

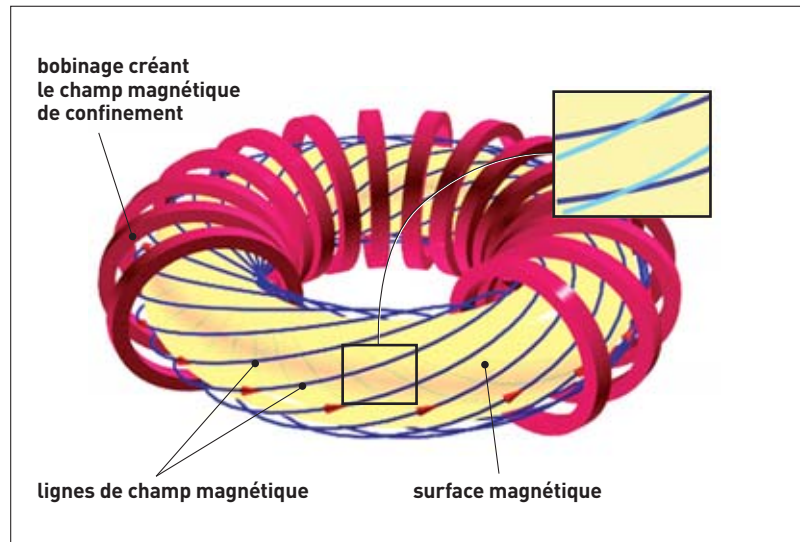


Figure 1. Schéma de la topologie magnétique d'un tokamak. Particules et chaleur sont libres de se mouvoir le long des lignes de champ. Les collisions et la turbulence génèrent du transport transverse aux surfaces magnétiques. La vue de détail montre que les lignes de champ de deux surfaces magnétiques différentes ont des taux d'enroulement différents.

situation (figure 2c) : posée rigoureusement au centre, la bille sera en équilibre, mais la moindre perturbation d'amplitude même très faible suffira à lui faire dévaler la pente pour se rapprocher des parois. C'est l'instabilité linéaire. Lorsque le déplacement de la bille devient suffisamment grand (régime non-linéaire), ce dernier est alors limité par les parois de la bouteille : c'est la saturation non-linéaire.

La majorité des instabilités excitées dans les plasmas de tokamaks sont des instabilités d'échange. Le mécanisme vient de ce que, dans les tokamaks, échanger un tube de flux<sup>(1)</sup> de basse pression et un tube de flux de haute pression dégage de l'énergie : ce processus est donc instable, du fait de la propension de tout système physique à rechercher un état de minimum d'énergie. Dans sa version très simplifiée, cette instabilité est analogue à l'instabilité Rayleigh-Bénard en fluide, du nom des deux physiciens qui ont étudié expérimentalement et mis en équation le phénomène<sup>(2)</sup>.

(1) Tube de flux : volume microscopique virtuel, de forme tubulaire, qui entoure une ligne de champ magnétique.

(2) C'est également ce type d'instabilité, appelée alors Rayleigh-Taylor, qui perturbe la compression isotrope des billes de combustible en fusion inertielle.

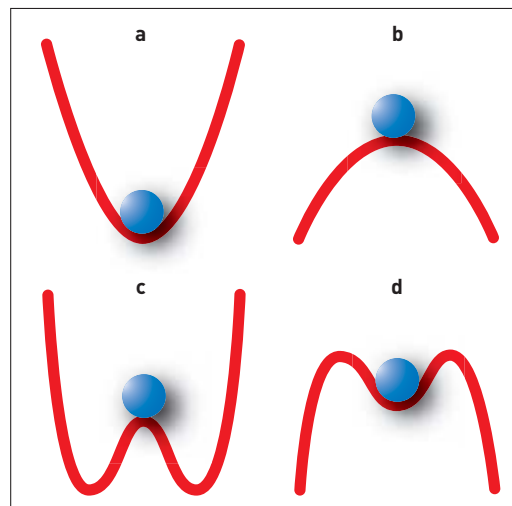
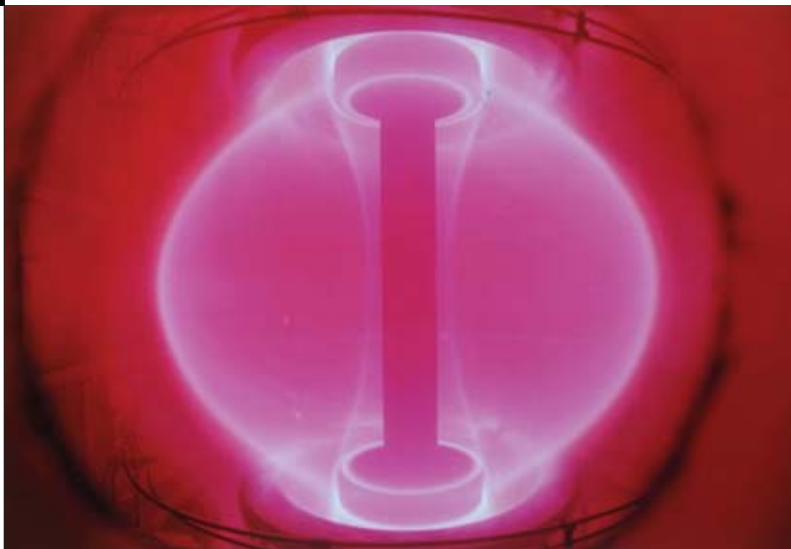
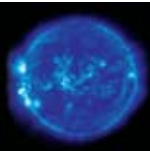


Figure 2. Schéma de différents régimes de stabilité : (a) stable linéairement (L) et non linéairement (NL), (b) instable L et NL, (c) instable L, stable NL, (d) stable L, instable NL.



UVAEA

Les plasmas de fusion ont été étudiés dans toutes sortes de configurations, notamment sphérique, ici dans la machine britannique Start, à Culham.

Considérons un fluide chauffé par le bas. Au fond du récipient, le liquide est plus chaud et donc plus léger que celui en surface. Il aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède, à la condition cependant que cette force parvienne à vaincre les forces visqueuses qui s'opposent à tout mouvement. S'établissent alors des rouleaux ou *cellules de convection*, qui assurent un transport de la chaleur beaucoup plus efficace que la conduction collisionnelle.

Apparaissent ici deux ingrédients majeurs de l'instabilité : elle repose sur l'existence d'un gradient de température colinéaire à la gravité, et elle présente un seuil en gradient en deçà duquel le transport de la chaleur n'est pas turbulent.

Ces deux caractéristiques se retrouvent dans les tokamaks, à la différence près que la gravité joue un rôle tout à fait négligeable dans le plasma magnétisé : la force de pesanteur s'exerçant sur les ions est typiquement  $10^{14}$  fois plus faible que la force de Lorentz due au champ magnétique  $B$ . C'est la topologie magnétique, et plus exactement la courbure des lignes de champ et la décroissance du champ  $B$  de l'axe de symétrie du tore vers l'extérieur, qui joue ici un rôle analogue à la gravité dans l'instabilité Rayleigh-Bénard.

Le gradient de température est quant à lui inhérent au problème : le plasma de cœur avoisine les 100 millions de degrés, tandis que la température tombe à quelques centaines de degrés sur les parois de l'enceinte, à environ un mètre de là. Dans la majorité des cas, ce gradient dépasse le seuil d'instabilité et donne naissance à un transport turbulent. Les cellules de convection ou *vortex* sont ici les iso-potentielles du potentiel électrique. Elles délimitent les couloirs d'*advection* de la matière et de la chaleur, de la même manière que les régions de basse et de haute pression gouvernent la force et la direction du vent en météorologie. Les vortex se développent sur une échelle spatiale typique de quelques rayons cyclotroniques<sup>(3)</sup> dans la direction radiale, soit quelques millimètres pour les ions. On conçoit que le temps de confinement sera d'autant plus grand que cette distance restera petite par rapport à l'échelle de la machine, d'où l'intérêt de développer des tokamaks de grande taille. Ils évoluent en outre sur des fréquences caractéristiques allant du kilohertz à quelques centaines de kHz.

Cette analogie avec Rayleigh-Bénard montre que la turbulence dans les plasmas de tokamak entretient un

lien étroit avec celle des fluides non magnétisés. Cela permet entre autres à la communauté fusion de bénéficier des avancées d'une science déjà ancienne, l'instabilité Rayleigh-Bénard ayant été très étudiée à partir des années 80 en tant que paradigme de la transition vers la turbulence développée selon un schéma analogue à la transition vers le chaos. Mais les plasmas sont également plus complexes que les fluides classiques, ce qui leur confère une richesse supplémentaire.

## Le "dialogue" électrons-ions

Les plasmas de fusion sont majoritairement constitués de deux sortes de particules : les **électrons** et les ions de **deutérium** et de **tritium**, dont le rapport des masses équivaut à celui entre une balle de ping-pong et un poids de 10 à 15 kg. Leur faible inertie rend les électrons très mobiles. Ces deux espèces explorent alors des régions de l'espace temporel et spatial relativement disjointes : les échelles spatiales des turbulences associées aux ions et aux électrons sont typiquement dans le rapport de la racine carrée des masses (environ 60), tandis que les fréquences  $\gamma$  sont inversement proportionnelles. Pour autant, électrons et ions continuent de "se parler" : étant chargés électriquement, ils sont en effet tous deux sensibles au même champ électromagnétique. Aux échelles considérées, les deux espèces assurent entre autres la neutralité électrique du plasma.

## Le couplage particules-champ

Ce couplage particules-champ est d'ailleurs le fondement de tous les phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés. Le processus est non linéaire : les fluctuations de densité et de vitesse des particules plasma génèrent des fluctuations de charge et de courant. Ces dernières contrôlent la structure et l'évolution des champs électrique et magnétique *via* les équations de Maxwell. À leur tour, ces champs fluctuants rétroagissent sur les particules dont ils gouvernent la dynamique. Précisons tout de même que les fluctuations du champ  $B$  restent de plusieurs ordres de grandeurs plus faibles que le champ magnétique servant au confinement du plasma.

Cette *interaction entre ondes et particules est résonnante* : elle est maximale lorsque la vitesse de phase de l'onde est proche de celle des particules. Ce mécanisme, connu sous le nom d'*effet Landau*<sup>(4)</sup>, joue un rôle fondamental en physique des plasmas<sup>(5)</sup>. C'est en transférant de manière résonnante leur énergie aux particules plasma que les ondes, excitées linéairement par le mécanisme de type Rayleigh-Bénard décrit précédemment, parviennent à un régime de saturation non-linéaire. Dans les tokamaks, ces résonances sont en outre localisées

(3) Une particule de charge  $e$  et de masse  $m$  immergée dans un champ magnétique  $B$  a un mouvement de giration autour d'une ligne de champ, dit mouvement cyclotronique, dont le rayon est  $r_c = mv_{\perp}/eB$ ,  $v_{\perp}$  étant sa vitesse transverse au champ  $B$ .

(4) Ce physicien soviétique (1908-1968), surtout connu pour ses travaux sur les transitions de phase (diamagnétisme et antiferromagnétisme, phénomènes de **superfluidité** et de supraconductivité), a reçu le prix Nobel en 1962. Son ouvrage sur l'amortissement des ondes électroniques dans un plasma (effet Landau, 1946) a contribué à l'élaboration de la théorie des plasmas.

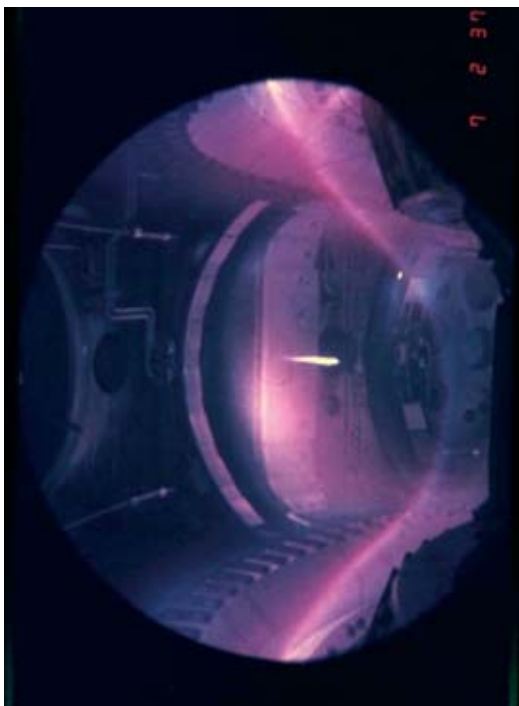
(5) Pour une compréhension physique détaillée de ce mécanisme, on pourra en particulier se référer à *Microscopic Dynamics of Plasmas and Chaos*, de Y. Elkens et D. F. Escande (Bristol Institute of Physics Publishing, 2003).



autour de surfaces particulières, appelées *surfaces de résonance*, dont la position est gouvernée par la topologie magnétique. Nous verrons par la suite que cette propriété importante peut être mise à profit pour optimiser le transport.

### ... aux simulations numériques

Plusieurs stratégies physiques s'offrent au chercheur pour étudier la turbulence. L'approche fluide consiste à étudier la dynamique temporelle de grandeurs macroscopiques, appelées moments, telles que la densité, la température ou le moment cinétique, couplées aux équations de Maxwell: c'est le cadre générique de la magnéto-hydrodynamique. L'espace des phases se réduit ici à l'espace physique à trois dimensions (3D). Cette approche souffre cependant de deux faiblesses majeures. D'abord, le nombre de ces moments est infini. Toute troncature s'accompagne alors d'une *hypothèse de fermeture*, dont il est difficile de garantir la validité dans le régime non linéaire. Ensuite, elle ne permet pas le traitement rigoureux des résonances Landau, pour lesquelles la connaissance de la distribution en vitesse des particules est nécessaire. C'est l'approche gyrocinétique, plus complète, qui permet de traiter ces questions. La *fonction de distribution* des différentes espèces est alors calculée dans un espace des phases à cinq dimensions. Les deux dimensions supplémentaires sont les vitesses transverse et parallèle aux lignes de champ magnétique. Cette fonction donne le nombre de particules appartenant à un élément de volume infinitésimal de l'espace des phases. Bien que satisfaisante du point de vue physique, cette approche offre cependant l'inconvénient d'être très gourmande en ressources numériques (temps de calcul et mémoire). Le recours au **calcul massivement parallèle** sur des super-calculateurs est, dans ce cas, nécessaire.



Étude de l'injection de "boulettes" de combustible au sein d'un plasma toroïdal dans la machine ASDEX à Garching (Allemagne).

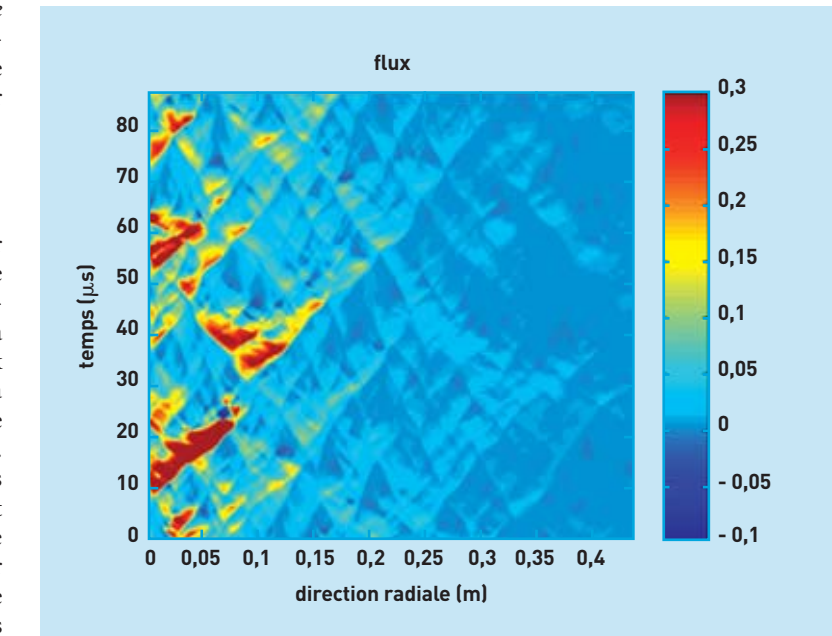


Figure 3. Carte du flux turbulent de particules issu d'une simulation fluide 2D, en fonction du temps et de la direction du confinement. Le système est excité par une source de particules localisée en  $x = 0$ . Un flux positif est dirigé vers l'extérieur du tore; l'amplitude croît du bleu au rouge. Les bouffées intermittentes se caractérisent par des traînées obliques sur le graphe. Le rayon cyclotronique mesure ici environ 0,34 mm.

Les turbulences électronique et ionique couvrent un domaine en fréquence et longueur d'onde très vaste, si bien que les moyens numériques actuels ne permettent pas leur traitement simultané<sup>(6)</sup>. En pratique, chaque étude se concentre alors sur l'une des deux espèces.

Une fois le choix effectué entre ces différentes options, les simulations numériques sont un outil puissant pour étudier la complexité du régime non linéaire qui caractérise la turbulence. Des modèles 1D à 5D, électrostatiques ou électromagnétiques, et intégrant la complexité des plasmas à des niveaux divers, ont entre autres permis de comprendre le mécanisme des instabilités dominantes dans les tokamaks, et de retrouver certains résultats expérimentaux fondamentaux: l'ordre de grandeur de l'amplitude des fluctuations (typiquement inférieures au pour cent) et du niveau de transport de la chaleur,  $\chi_{\perp} \approx 1-10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Mais ces études ont également mis en évidence que, loin d'être homogène et régulier, le transport turbulent pouvait être dominé par des bouffées intermittentes se propageant quasi balistiquement sur de grandes échelles spatiales, très au-delà de quelques rayons cyclotroniques (figure 3). Un gros effort est actuellement consacré à la compréhension de ce phénomène. Ces analyses ont profondément modifié notre vision du transport turbulent, jusque-là essentiellement décrit par un processus diffusif. Une partie des travaux présents vise d'ailleurs à proposer des modèles de transport réduits, c'est-à-dire à une dimension spatiale, mieux représentatifs de la dynamique du transport turbulent qu'un coefficient de diffusion effectif  $\chi_{\perp}$ .

(6) Par exemple, couvrir les échelles spatiales allant du rayon cyclotronique électronique au rayon du plasma requerrait pour une simulation 3D une mémoire de l'ordre de la dizaine de téraoctets ( $1 \text{ To} = 10^{12}$  octets), à la limite des capacités des plus gros calculateurs disponibles actuellement.

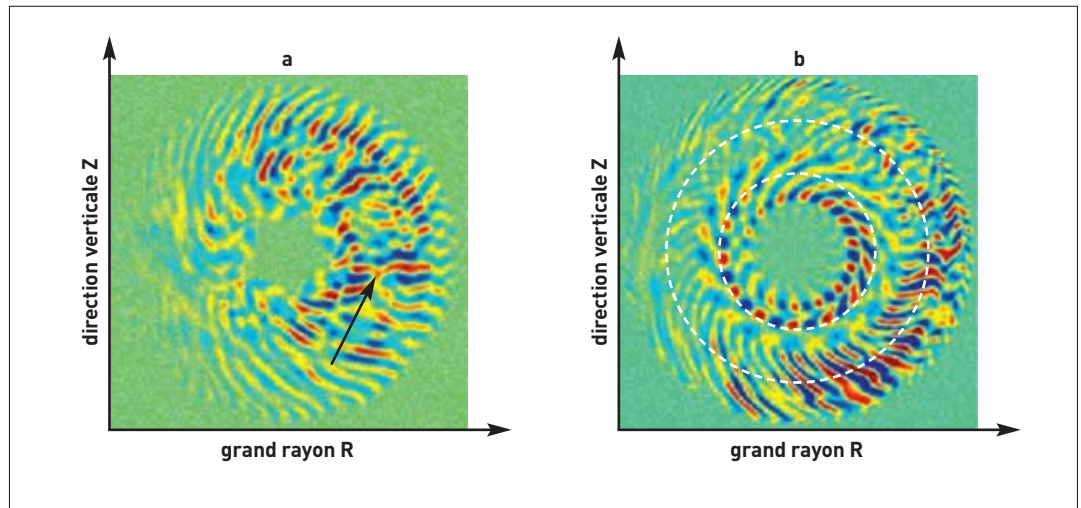
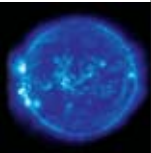


Figure 4. Carte instantanée du potentiel électrique selon un plan vertical du tore, provenant de simulations fluides 3D d'une turbulence ionique : (a) cas standard, où la flèche montre une large structure ; (b) cas où une vitesse cisailée est imposée dans l'anneau repéré par les traits pointillés. Cette région correspond également à un minimum de  $q$ .

### Vers un contrôle de la turbulence

#### Les barrières de transport

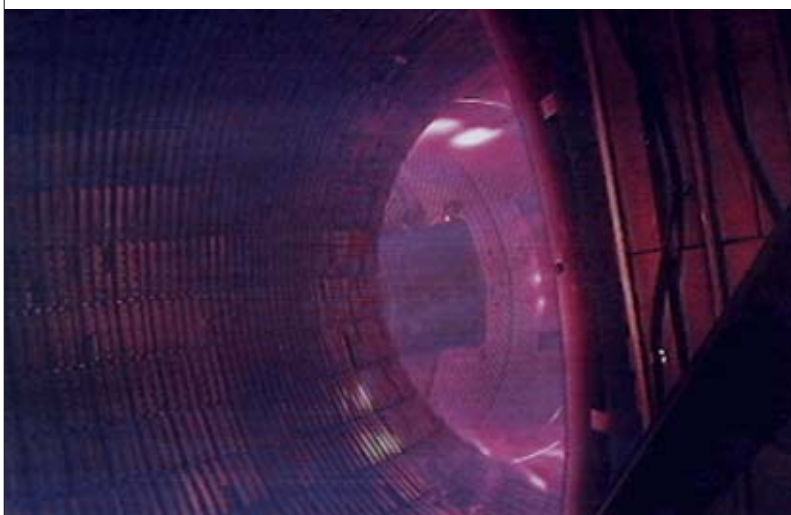
Un des objectifs des études menées sur la turbulence est de trouver des régimes pour lesquels le transport est réduit. Dans le cas où cette transition est localisée spatialement, elle donne naissance à de forts gradients de température et de vitesse ; on parle alors de "barrière de transport". De tels régimes ont été initialement obtenus expérimentalement, et reproduits sur de nombreuses machines. Ils servent même de scénarios de référence pour les plasmas d'ITER. D'un point de vue théorique, plusieurs mécanismes sont invoqués pour expliquer cette transition :

- cisailier le champ de vitesse s'avère très efficace. Le plasma est entraîné dans un mouvement de rotation non uniforme dans une des directions périodiques du tore. Cette inhomogénéité de la vitesse de rotation a pour effet de déchirer les cellules de convection, réduisant ainsi le transport. Le même résultat peut d'ailleurs être obtenu en cisillant fortement le champ magnétique macroscopique, ce qui change le

taux d'enroulement des lignes de champ (figure 1). Des travaux récents ont montré que la turbulence elle-même pouvait générer son propre flot cisailé, qui contribue de manière efficace à sa saturation. Ces écoulements à grande échelle, dits zonaux, sont similaires à ceux observés en turbulence atmosphérique ; ils sont particulièrement visibles sur la planète Jupiter ;

- modifier légèrement la topologie magnétique permet de contrôler la position des surfaces de résonance, autour desquelles on rappelle que se concentre la turbulence. Il est en particulier possible d'optimiser la topologie de manière à éloigner ces surfaces de résonance les unes des autres. Dans ce cas, le système peut accéder à un régime où le chaos hamiltonien<sup>(7)</sup> et, donc, le transport turbulent, restent faibles.

Ces mécanismes, souvent complémentaires, ont été confirmés par des simulations numériques (figure 4), et sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Ils ont permis d'expliquer certaines des transitions spontanées du plasma vers des régimes à confinement amélioré, et de proposer des scénarios de réduction du transport. Une troisième voie explorée actuellement s'appuie sur la théorie du chaos. Le principe consiste à appliquer une boucle de rétroaction sur la turbulence : par de petites perturbations bien choisies de l'hamiltonien du système, la forme et la position dans l'espace des phases des tores de KAM<sup>(8)</sup> où des domaines de piégeage peuvent être modifiés astucieusement pour diminuer le transport. Cette technique ne sera cependant utilisable que s'il est montré qu'un contrôle spatialement localisé reste efficace.



Le tokamak Tore Supra, exploité à Cadarache (France) par l'association Euratom-CEA, outil privilégié pour l'étude des décharges de longue durée.

Euratom/CEA

(7) La mécanique classique montre qu'il est en principe possible de décrire le comportement de tout système sans dissipation à l'aide d'une fonction  $H$ , le hamiltonien, dépendant des coordonnées d'espace et de moment généralisées des  $n$  particules constituant le système, ainsi qu'éventuellement du temps. Cette fonction  $H$  est souvent reliée à l'énergie totale du système. En particulier, tout système dont l'hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps évolue à énergie constante.

(8) Du nom de leurs découvreurs (Kolmogorov, Arnold et Moser), ces "tores" définissent le volume occupé dans l'espace des phases par les trajectoires intégrables d'un système dont l'hamiltonien d'équilibre est soumis à des perturbations de faible amplitude.



## Phénomènes de relaxation brutale

Si les barrières de transport peuvent être générées de diverses manières dans les tokamaks, il apparaît cependant qu'elles ne sont pas toujours pérennes. En particulier, celles qui se développent spontanément aux bords du plasma, sous certaines conditions, sont sujettes à des phénomènes de relaxation brutale. De manière quasi-périodique, elles sont transitoirement détruites et laissent alors s'échapper des flux de particules et de chaleur très importants : quelque 10% du contenu énergétique total du plasma peuvent ainsi être perdus en l'espace de quelques centaines de microsecondes. Ces phénomènes sont bien sûr dommageables pour l'énergie confinée qui s'en trouve réduite, mais également du fait des contraintes très fortes qu'ils font peser sur les éléments de paroi chargés d'évacuer la puissance. Certaines simulations de turbulence présentent un comportement analogue (figure 5), et plusieurs modèles ont été proposés pour reproduire ces relaxations.

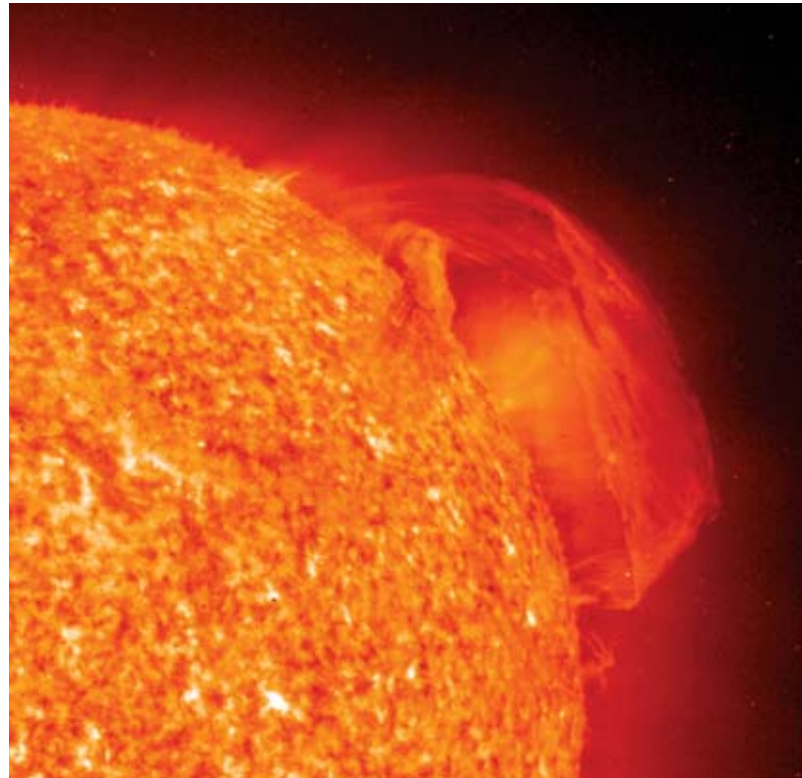
## Une forte analogie avec les éruptions solaires

Ces événements entretiennent en outre une forte analogie avec les **éruptions solaires** (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). Les plus violentes d'entre elles naissent de protubérances, gigantesques arches où un champ magnétique intense maintient le plasma au-dessus de la surface du Soleil. Elles sont caractérisées par l'éjection d'un plasma chaud et l'émission de **rayons X** durs, bouffées qui emportent dans l'espace jusqu'à 1% de la puissance totale rayonnée par le Soleil. Le premier point d'analogie vient de ce que, selon de récentes théories, les éruptions solaires pourraient trouver leur origine dans une région équivalente à une barrière de transport solaire : la **tachocline**. Cette fine couche, à l'interface entre la **zone radiative** et celle plus externe de convection, est en effet caractérisée par de forts cisaillements de vitesse. C'est là que prendraient naissance, par un effet dynamo<sup>(9)</sup>, le champ magnétique solaire. Le second élément de concordance pourrait être la nature même de l'instabilité à l'origine de ces relaxations brutales : dans les deux cas, tokamaks et Soleil, les conditions sont réunies pour faire de l'instabilité d'échange le candidat désigné. D'autres phénomènes astrophysiques sont également similaires, comme par exemple les sous-orages magnétiques. Dans tous les cas, la compréhension théorique du mécanisme détaillé conduisant à ces relaxations reste encore une gageure pour la communauté scientifique. Ces analogies laissent entrevoir une possible universalité de ces processus de relaxation au sein des barrières de transport.

## Le temps d'ITER

La physique des plasmas de fusion est une science riche, complexe, et qui partage beaucoup de points communs avec de nombreuses disciplines, dont entre autres la turbulence dans les fluides non magnétisés,

(9) Les fortes variations de la vitesse du fluide au travers de cette interface seraient susceptibles de tordre les lignes de force du champ magnétique fluctuant, conduisant au final à une augmentation d'amplitude et d'échelle spatiale de ce champ. L'effet dynamo désigne ce mécanisme de conversion d'une partie de l'énergie cinétique du fluide en énergie magnétique.



SOHO-EIT Consortium (ESA/NASA)

Gigantesque protubérance solaire, observée dans l'ultraviolet extrême le 26 août 1997 par le satellite SOHO. Sa température est d'environ 85 000 °C, et son extension spatiale de l'ordre de 350 000 km.

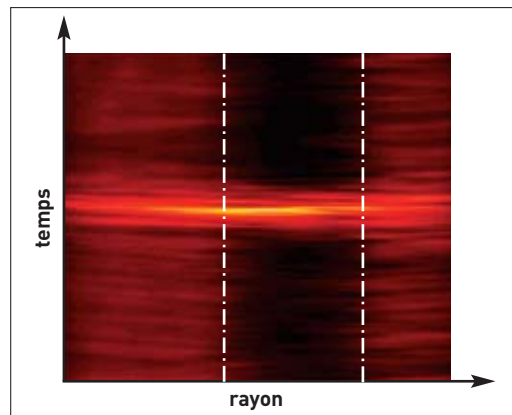


Figure 5. Carte du flux turbulent de chaleur issu d'une simulation fluide 3D, en fonction du temps et de la direction du confinement. Une source de chaleur est imposée au bord gauche. Le flux, dirigé vers l'extérieur du tore, est d'amplitude croissante du noir au jaune. La barrière de transport, visible dans la région centrale entre les traits pointillés, est transitoirement détruite par une relaxation brutale.

la théorie du chaos et l'astrophysique. Elle s'enrichit de cette communauté de pensée, et participe aux avancées dans tous ces domaines. Les études théoriques ont permis de nombreux progrès, tant du point de vue de la compréhension des résultats expérimentaux que de l'optimisation des scénarios utilisés. Cette physique est en ce sens complémentaire de l'approche d'ingénieur qui s'appuie sur des lois d'échelles pour prédire le niveau de transport, et donc le temps de confinement  $\tau_E$ , dans une machine comme ITER. Elle permet d'étudier l'éventuelle apparition de nouveaux phénomènes dans l'intervalle qui nous sépare des prochaines machines, et de veiller ainsi à l'adéquation entre les objectifs assignés à ITER et les scénarios expérimentaux envisagés.

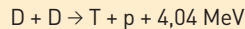
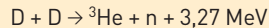
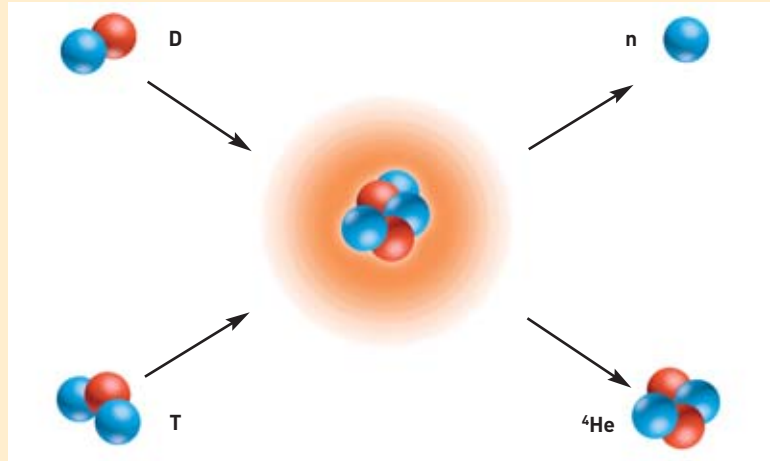
> Yanick Sarazin

Direction des sciences de la matière  
Association Euratom-CEA  
CEA centre de Cadarache

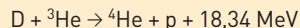
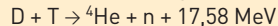
# D Les réactions de fusion nucléaire

Pour obtenir la **fusion** de deux **noyaux** atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive. Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou **barrière coulombienne**. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'**isotope**  ${}^4\text{He}$  de l'hélium, qui possède quatre **nucléons** (deux **protons** p et deux **neutrons** n).

Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'**hélium** (He) ou de **tritium** (T), et d'autre part un **nucléon**, quatre sont *a priori* particulièrement intéressantes\*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du **deutérium** (D); l'isotope de l'**hydrogène** le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.

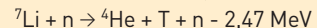
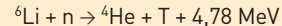


Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques :



La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la **section efficace** la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 MeV et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la **fusion à confinement inertiel** que

pour la **fusion à confinement magnétique**. La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le **lithium** et... les neutrons de la réaction D-T.



Les combustibles primaires, c'est-à-dire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

\*Ces réactions sont dites *thermonucléaires* parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir. Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

# A Toute la lumière sur le Soleil

Plus gros objet du système solaire, le Soleil représente environ 99,8% de sa masse totale. Composé initialement de plus de 70% d'**hydrogène** et plus de 25% d'**hélium**, le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud tournant sur elle-même.

La **structure interne du Soleil** est divisée en quatre régions (figure). Le **cœur**, où les conditions de température et de densité sont extrêmes, est le siège de nombreuses réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée se retrouvera sous la forme de **lumière visible** au niveau de la surface.

Dans la **zone radiative**, qui s'étend du cœur à 0,71 rayon solaire, l'énergie est transportée vers la surface du Soleil par l'interaction **photons-matière** (transport radiatif). Les photons sont absorbés et réémis des millions de fois dans de multiples collisions avec les **atomes** rencontrés qui sont très **ionisés**. Il faut plus d'un million d'années pour que les photons atteignent la **tachocline**, fine couche de transition entre la zone radiative et la zone convective et qui joue un rôle essentiel dans le **champ magnétique** solaire.

Dans la **zone convective**, du fait de la diminution de température, le milieu formé d'atomes partiellement ionisés et d'atomes neutres est plus opaque. La progression des photons devient difficile. De plus, la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface. Ces forts gradients de température et de densité engendrent des mouvements **convectifs** qui sont observables à la surface comme des **granules** (leur durée de vie se chiffre en minutes) ou des **supergranules** dont les dimensions sont respectivement de l'ordre de 1 000 km et 35 000 km.

L'**atmosphère solaire** comporte quatre régions (figure). La surface, ou **photosphère**, épaisse de seulement 400 km et dont la température est proche de 5 800 K, présente donc un aspect granuleux et des zones plus ou moins sombres. Des zones obscures ou **taches solaires**, qui sont isolées ou en groupe, sont à une température de 3 800 K. Elles apparaissent noires du fait de leur différence de température avec les régions avoi-

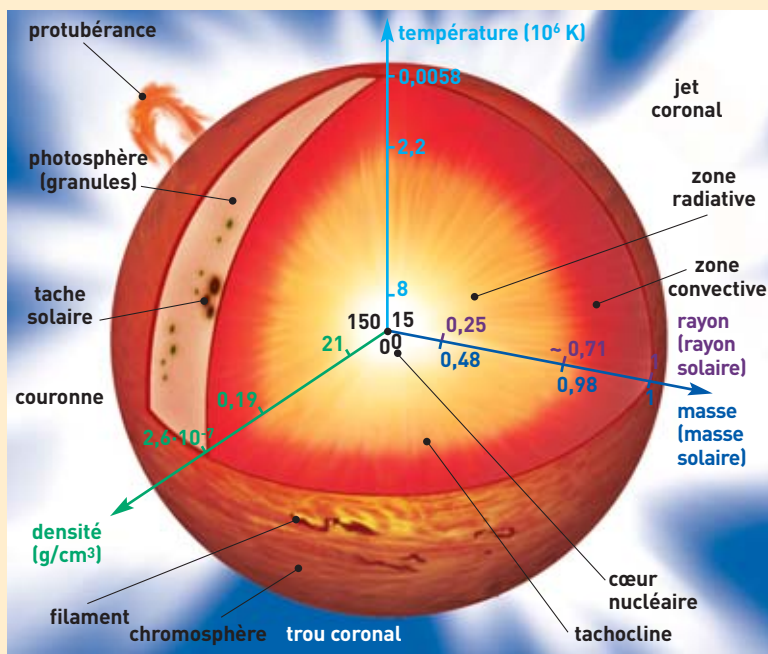


Figure.

sinantes. Elles sont soumises à un **cycle** de 11 ans et sont associées à des régions dont le champ magnétique est beaucoup plus intense (quelques milliers de gauss) que sur l'ensemble du Soleil (1 gauss). Ces taches peuvent atteindre un diamètre de 50 000 km. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs mois. Des zones plus claires et plus chaudes ou **facules**, parfois isolées mais généralement situées autour d'un groupe de taches, sont également observées.

Au-delà de la photosphère, s'étendant sur des milliers de kilomètres, se trouve la **chromosphère**, dont la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint 20 000 K. Dans cette zone se trouvent les **plages**, régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires, les **protubérances** ou **filaments** (lorsqu'elles sont vues sur le **disque** solaire), structures magnétiques plus denses et plus froides (10 000 K) que leur environnement, et les **spicules**, petits jets de matière à vie courte (5 à 10 minutes) se dirigeant vers la couronne à une vitesse de près de 20 km/s.

Entre la chromosphère et la couronne se situe la **région de transition**, couche mince et irrégulière dans laquelle la température augmente brutalement.

La **couronne**, peu riche en gaz, s'étend sur des millions de kilomètres et est caractérisée par une température de plus de 1 500 000 K et une densité faible. Elle comporte de nombreuses structures magnétiques ou associées à des structures magnétiques telles que les **boucles coronales**, les **trous coronaux**, les **points brillants**... Dans cette région en perpétuelle évolution apparaissent les protubérances ou filaments, sous la forme de grands **panaches** de gaz chauds, provenant de la chromosphère. L'activité solaire n'est pas constante. Régulièrement, avec une intensité cyclique, des **éruptions** violentes se produisent dans les **régions actives**. Il s'agit de brusques libérations de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire. Ces **éjections de masse coronale** (CME) atteignent parfois 100 000 km de haut et 200 000 km de long. Suivant la direction d'éjection, les particules de haute énergie émises peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, appelé **vent solaire**. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième de sa masse par an.

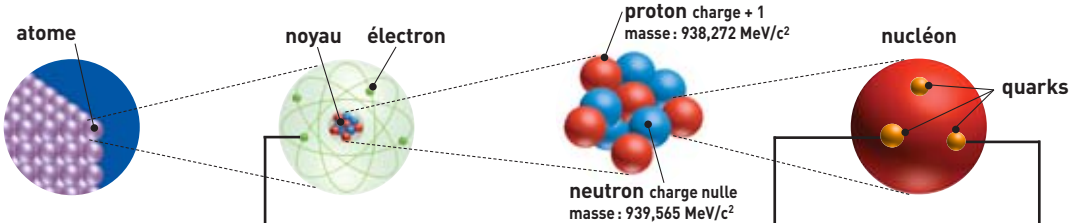


# C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/

charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (**électron**  $e^-$ , **muon**  $\mu$ , **tau**  $\tau$ ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne




	leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
<b>Fermions</b> La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	<b>première famille</b> <b>électron</b> responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino électronique</b> sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	<b>bas</b> sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c <sup>2</sup>	<b>haut</b> sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c <sup>2</sup>
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	<b>deuxième famille</b> <b>muon</b> un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino muonique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>étrange</b> un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c <sup>2</sup>	<b>charmé</b> un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c <sup>2</sup>
	<b>troisième famille</b> <b>tau</b> encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino tauique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>beauté</b> encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c <sup>2</sup>	<b>top</b> le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c <sup>2</sup>
<b>Bosons vecteurs</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	<b>photon</b> grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	<b>gluon</b> porteur de la force forte entre quarks	<b>W<sup>±</sup>, Z<sup>0</sup></b> porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
<b>Boson de Higgs ?</b>	 responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau. Constituants élémentaires.

sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur<sup>(1)</sup>...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

**boson**, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W<sup>+</sup>**, **W<sup>-</sup>** et **Z<sup>0</sup>** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte. Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique. Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W<sup>+</sup>** et **W<sup>-</sup>**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z<sup>0</sup>**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c<sup>2</sup> pour **W<sup>±</sup>** et 91 180 MeV/c<sup>2</sup> pour **Z<sup>0</sup>**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10<sup>-18</sup> m. Les bosons **W<sup>±</sup>** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z<sup>0</sup>** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z<sup>0</sup>**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z<sup>0</sup>** avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10<sup>-15</sup> m. Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé. La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup>	à la base de la <b>fusion thermonucléaire</b> dans le Soleil, elle assure sa longévité. La <b>radioactivité</b> β <sup>-</sup> et β <sup>+</sup> et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.

# B Des spectres qui en disent long

Les différents rayonnements se distribuent le long du **spectre électromagnétique** en fonction de leurs longueurs d'onde, des plus courtes et des plus énergétiques (**rayonnement gamma**) aux plus longues (les ondes radio), en passant par la lumière visible. Le spectre de ce dernier domaine, par exemple, est obtenu en faisant passer la lumière par un prisme qui la décompose en ses différentes composantes, du rouge au violet (figure a). Un arc-en-ciel donne aussi un spectre de la lumière visible émanant du Soleil, par réfraction et réflexion dans et sur des gouttes d'eau.

Ce même principe s'applique à l'ensemble des **rayonnements électromagnétiques** en utilisant des **spectrographes**, qui analysent la répartition spectrale de l'énergie de ces rayonnements et des **spectromètres** qui enregistrent les spectres élément par élément à l'aide de détecteurs photoélectriques et mesurent l'intensité des rayonnements en fonction de leur **longueur d'onde**.

En astrophysique, la **spectroscopie** consiste à étudier les corps à distance à partir des rayonnements qu'ils émettent ou des transformations que font subir à ces derniers d'autres corps situés sur leur trajet. Les spectres font apparaître, entre de larges bandes continues (dont chacune porte le nom de continuum spectral), des raies correspondant chacune à une longueur d'onde particulière et, finalement, à l'énergie d'un atome ou d'une molécule du corps observé. Ces **raies spec-**

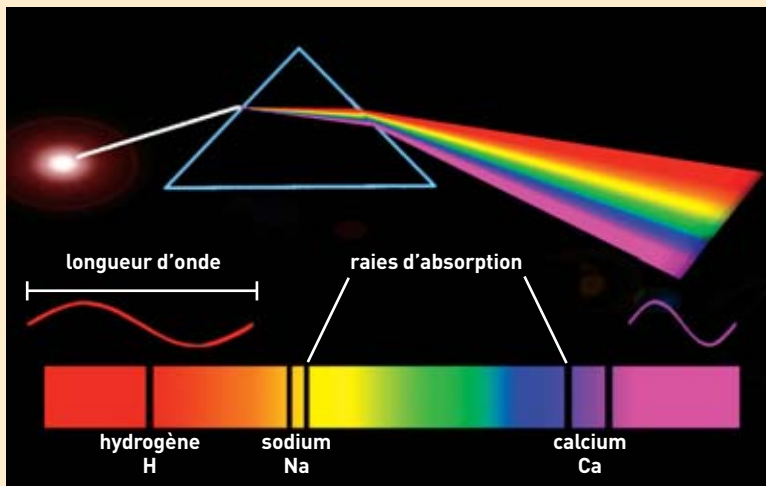


Figure a.

**trales** sont de deux types, les raies d'émission et les raies d'absorption. Les **raies d'émission**, claires, correspondent à des rayonnements émis directement par un corps porté à très haute température. Le **spectre d'émission** permet donc de détecter la présence d'atomes ou de molécules dans l'objet émetteur.

Les **raies d'absorption**, sombres, correspondent également à une longueur d'onde précise, mais en vertu du processus par lequel l'intensité d'un rayonnement décroît quand il traverse un milieu matériel auquel il transfère tout ou partie de son énergie. C'est ainsi que l'on peut analyser la composition d'une source chaude radiative comme le Soleil à partir de l'absorption par son atmosphère d'une partie des rayonne-

ments électromagnétiques qu'il émet (**spectre d'absorption**).

Ce n'est pas tout : l'analyse du décalage spectral permet d'évaluer le mouvement relatif du corps émetteur, grâce à l'**effet Doppler-Fizeau**<sup>(1)</sup>, selon le même principe qui rend de plus en plus aigu le bruit d'un véhicule qui s'approche d'un observateur et de plus en plus grave celui de l'engin qui s'en éloigne. La variation apparente de **fréquence** (d'autant plus élevée que la longueur d'onde est plus courte) est ainsi proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source.

Pour une source lumineuse, cet effet indique que les raies du spectre de cette source sont décalées vers le bleu (**blueshift**), autrement dit des longueurs d'onde plus courtes, quand elle s'approche ou vers le rouge (**redshift**) pour des longueurs d'onde plus longues quand elle s'éloigne (figure b).

L'effet Doppler est notamment utilisé en astrophysique pour connaître la vitesse radiale des étoiles ou des galaxies car leur mouvement, selon la perspective, provoque un déplacement des raies émises par rapport à leur valeur nominale ou aux mêmes raies émises par une source terrestre.

Enfin, la division de raies spectrales en réponse à un champ magnétique (**effet Zeeman**) est utilisée pour mesurer la puissance des champs magnétiques d'objets astronomiques, en particulier du Soleil.

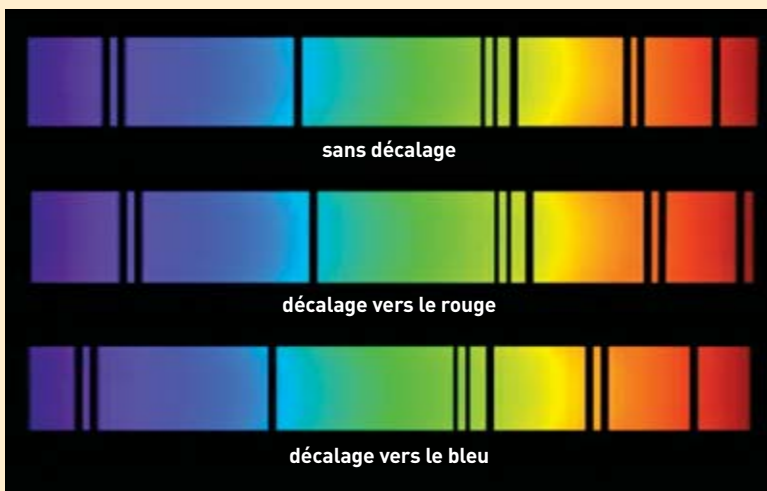


Figure b.

(1) Découvert par le physicien autrichien Christian Doppler pour les ondes sonores, cet effet a été étendu à l'optique par le Français Hippolyte Fizeau.