

2018

irfm.cea.fr/sciencesenfusion

SCIENCES en FUSION

AVANCÉES SCIENTIFIQUES DES
RECHERCHES EN FUSION PAR
CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

1

Turbulence

●
Initiation à la
turbulence dans
les plasmas
magnétisés

●
Modélisation
multi-échelle
du transport
turbulent

●
Caractérisation
expérimentale
d'une
turbulence
plasma

●
Le calcul haute
performance
pour modéliser la
turbulence

●
Turbulence
d'interface :
quand le soleil
rencontre la boîte

●
Quand la
turbulence
s'auto-organise

●
Une
physique
pluridisciplinaire

SOMMAIRE

#1

INITIATION À LA TURBULENCE DANS LES PLASMAS MAGNÉTISÉS

Xavier Garbet & Peter Beyer
page 4

#2

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DU TRANSPORT TURBULENT

Yanick Sarazin & Yann Camenen
page 8

#3

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE TURBULENCE PLASMA

Laure Vermare & Nicolas Fedorczak
page 12

#4

LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR MODÉLISER LA TURBULENCE

Guillaume Latu & Virginie Grandgirard
page 16

#5

TURBULENCE D'INTERFACE : QUAND LE SOLEIL RENCONTRE LA BOÎTE

Patrick Tamain & Eric Serre
page 21

#6

QUAND LA TURBULENCE S'AUTO-ORGANISE

Guilhem Dif-Pradalier & Philippe Ghendrih
page 25

#7

UNE PHYSIQUE PLURIDISCIPLINAIRE

Yanick Sarazin & Philippe Ghendrih
page 29

NOTIONS UTILES #1

FUSION, PLASMAS ET TOKAMAKS

Yanick Sarazin
page 33

NOTIONS UTILES #2

INSTABILITÉS ET TURBULENCE DANS LES PLASMAS DE TOKAMAKS

Yanick Sarazin & Xavier Garbet
page 34

GLOSSAIRE

Définition des mots en **gras jaune** dans le texte des articles
page 36

EDITORIAL

par Guy Laval

En route vers la fusion.

Les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée ont pour seul objectif la production d'électricité en abondance et dans de meilleures conditions que les technologies existantes. Aujourd'hui, après plus de cinquante années d'efforts, aucune barrière infranchissable n'a été détectée, mais il n'est pas encore possible de définir un calendrier précis jusqu'à la réalisation d'un réacteur industriel. Afin de réduire ces incertitudes, le dispositif expérimental ITER, en cours de construction à Cadarache, fonctionnera dans des conditions physiques et technologiques proches de celles d'un tel réacteur. Ce changement d'échelle par rapport aux expériences existantes est le fruit des résultats accumulés et analysés pendant des décennies avec de nombreuses machines et grâce à une collaboration internationale exceptionnelle.

L'ensemble de ces travaux met en évidence la diversité des disciplines scientifiques impliquées, avec un rôle prépondérant pour la physique des plasmas. Le thème de cette nouvelle revue s'est donc porté sur cette science à juste titre. Ses développements récents se sont révélés riches en surprises originales, mais parfois difficiles à maîtriser. C'est particulièrement vrai pour les plasmas du confinement magnétique, dont la **turbulence** intrinsèque est le sujet du présent numéro.

Comme on le découvrira, les plasmas de la fusion par confinement magnétique sont des milieux très éloignés de l'équilibre thermodynamique. Pour les températures et les densités requises, les temps de relaxation sont beaucoup plus longs que les temps caractéristiques d'évolution des phénomènes collectifs. Ces conditions rappellent celles de l'écoulement d'un fluide classique à grand nombre de Reynolds. Les conséquences sont les mêmes : le milieu devient turbulent. Comme dans les fluides, la théorie a bien du mal à faire des prédictions et il faut souvent se replier sur un empirisme intelligent. Les simulations numériques progressent à grand pas, mais il reste un long chemin à parcourir. Progresser dans la connaissance de la **turbulence** devient un thème de recherche en soi.

La similitude avec la **turbulence** dans les fluides n'est qu'apparente. Les plasmas sont dominés par les interactions électromagnétiques ce qui leur vaut une plus grande richesse dans les modes de propagation

de l'énergie. La dissipation classique par viscosité aux petites échelles, comme les autres mécanismes thermodynamiques, sont beaucoup moins efficaces dans les plasmas que dans les fluides. En revanche, la relaxation par des mécanismes non-dissipatifs, comme l'effet Landau, impose de décrire l'évolution dans un espace à 5 ou 6 dimensions et ouvre un territoire nouveau, mais les limites de la simulation numérique sont vite atteintes. De plus, les mesures sont difficiles dans ces conditions extrêmes.

Il n'en reste pas moins qu'une physique nouvelle est en train de se construire et ses progrès sont attendus pour mieux interpréter les résultats des expériences et aider les concepteurs à optimiser leurs machines ou même à imaginer de nouvelles voies de recherche. L'auto-organisation des plasmas de tokamak et la formation de barrières thermiques en sont des exemples emblématiques. Il reste beaucoup à comprendre dans ces comportements surprenants et leur maîtrise pourrait bien se révéler déterminante pour les programmes avancés d'ITER.

La route vers la fusion est longue et parfois décourageante. Les beaux articles de cette revue, sans rien enjoliver, montrent qu'elle traverse aussi des paysages attrayants, et offre des points de vue spectaculaires, sans cacher les passages délicats. Il faut espérer que cet effort d'information pourra susciter des vocations et, peut-être aussi, faire évoluer les opinions sur ce domaine scientifique.

Gageons donc que la Science et ITER feront partie commune pendant de longues années et qu'ensemble ils permettront d'avancer vers cet objectif de maîtrise des réactions de fusion sur terre. Gageons également que cette nouvelle revue nous tiendra régulièrement en haleine des derniers résultats en la matière.

Guy Laval,

*Membre de l'Académie des sciences,
physicien français,
professeur à l'École polytechnique.*
photo © E.Eymann - Académie des Sciences



INITIATION À LA TURBULENCE DANS LES PLASMAS MAGNÉTISÉS

par **Xavier Garbet & Peter Beyer**

Les plasmas magnétisés sont omniprésents dans certaines étoiles et leur environnement, les jets et les disques galactiques. Ils apparaissent aussi dans les dispositifs visant à produire de l'énergie de fusion par confinement magnétique. Un plasma magnétisé est sujet à des instabilités qui conduisent à un état turbulent. Le transport de particules et chaleur qui en résulte joue un rôle important dans les plasmas de laboratoire et d'astrophysique. La turbulence dans les plasmas magnétisés est un sujet d'étude fascinant combinant théorie, modélisation et mesures en milieu extrême. Le contrôle du transport en est certainement un des aspects les plus intrigants.

#1

#1

INITIATION À LA TURBULENCE DANS LES PLASMAS MAGNÉTISÉS

Qu'est-ce qu'un plasma magnétisé ?

Un **plasma** est un gaz chaud dans lequel l'agitation thermique est suffisante pour séparer les ions de leur cortège électronique. Les particules chargées sont alors mobiles et sensibles au champ électromagnétique via la force de Lorentz. Le comportement d'un plasma change de nature lorsqu'il est plongé dans un champ magnétique intense. Les particules sont alors animées d'un mouvement de giration transversal au champ magnétique local, appelé **mouvement cyclotronique**. Lorsque le **rayon de giration** est inférieur à la taille du système, le plasma est alors confiné par le champ magnétique, et porte le nom de « plasma magnétisé ». Cette propriété de confinement est utilisée par une large classe de dispositifs visant à produire de l'énergie par fusion d'isotopes de l'hydrogène. Le tokamak, qui produit un plasma torique à des températures de 100 millions de degrés, en est un exemple emblématique (cf. **Notions Utiles : «Fusion, Plasmas et Tokamaks»**). Les plasmas magnétisés apparaissent aussi dans de nombreux objets d'intérêt astrophysique. Notre soleil en est un

exemple. Le plasma interstellaire dans notre Voie lactée en est un autre.

Qu'est-ce qu'une turbulence plasma ?

Un plasma inhomogène est sujet à des instabilités, alimentées par les gradients de densité, vitesse et pression. Une instabilité se manifeste par des perturbations du champ électromagnétique exponentiellement croissantes, couplées à des densités de charge et de courant. Les forces électromagnétiques accélèrent le plasma et génèrent des écoulements. Si les instabilités croissent en nombre, le plasma entre dans une phase turbulente caractérisée par des fluctuations sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles [1] (cf. **article #2 «Modélisation multi-échelle du transport turbulent»**). Les écoulements s'organisent en une structure caractéristique de tourbillons transversaux au champ magnétique, et d'un mouvement rapide le long des **lignes**

de champ magnétique (**Figure 1**). Une **turbulence** de plasma magnétisé est donc quasi-bidimensionnelle. Les écoulements atmosphérique ou océanographique [2] sont un autre exemple de turbulence quasi-bidimensionnelle. Leur dynamique présente des similarités avec les plasmas magnétisés. En effet la rotation terrestre est le pendant géodynamique du champ magnétique dans les plasmas, et les cyclones/dépresseions sont les analogues des tourbillons. Une simple carte météo permet ainsi d'imaginer un plasma magnétisé turbulent (cf. **article #7 « Une physique pluridisciplinaire »**).

Quels sont les effets d'une turbulence plasma ?

Une turbulence plasma provoque un transport de particules - elle est déconfinante (**Figure 2**). Cette perte de confinement est formalisée par des **lois constitutives** qui relient les flux aux gradients. Par exemple, la loi de Fourier prédit un flux de chaleur proportionnel au gradient de température via une **conductivité thermique**, symptomatique d'une diffusion. En première approximation, les coefficients de diffusion vont comme le carré de la taille des tourbillons. Une conductivité excessive n'est pas souhaitable dans le cas d'un plasma de fusion, car synonyme d'un confinement de piètre qualité. A contrario une diffusion intense dans la région périphérique du plasma peut être favorable si elle élargit la région d'interface avec la paroi du tokamak, en étalant ce faisant le dépôt de chaleur et en évitant un endommagement. Le transport turbulent permet aussi d'expliquer la **viscosité** anormale observée dans les disques galactiques ou les

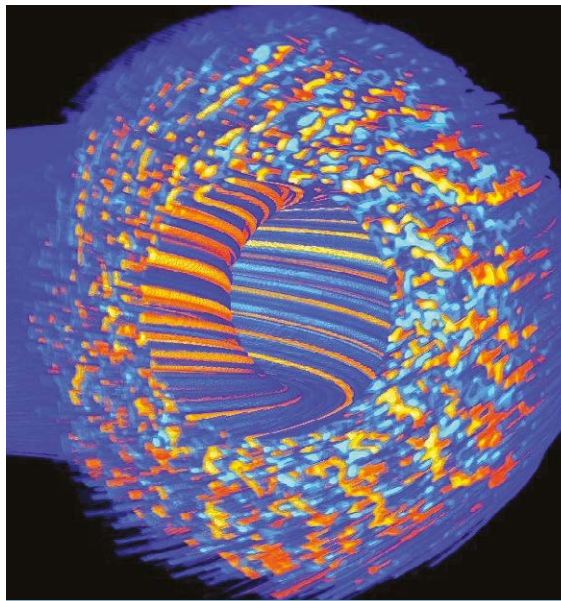


Fig. 1 : Lignes de contour du potentiel électrique dans un plasma de tokamak. Les iso-potentiels représentent en première approximation les lignes de courant de l'écoulement. Les écoulements s'organisent en tourbillons perpendiculairement au champ magnétique (approximativement dans une coupe méridienne du tore), et sont allongés le long du champ magnétique.

effets dynamos responsables du champ magnétique solaire.

Comment le transport turbulent peut-il être contrôlé ?

Une turbulence dans un plasma magnétisé de laboratoire peut-être contrôlée via un ajustement de l'inhomogénéité du champ magnétique ou des écoulements à grande échelle. La raison en est la suivante. Un flot ou un champ cisaillé déforme continuellement les tourbillons, qui finissent par se sectionner sous l'effet de la viscosité. En régime stationnaire, la taille des tourbillons devient plus petite et le transport diminue en vertu du lien entre coefficient de diffusion et carré de la taille des tourbillons (**Figure 2**). Dans les tokamaks, ce processus prend la forme d'une **transition dite L-H** (pour « Low to High confinement »). Cette bifurcation induit une diminution du trans-

port turbulent dans une couche localisée à l'interface avec la paroi (cf. **article #5 « Turbulence d'interface : quand le soleil rencontre la boîte »**). Des barrières de transport peuvent aussi se développer dans les régions les plus internes. Elles sont obtenues en combinant cisaillements du champ magnétique et de la rotation. En général la formation d'une barrière requiert une puissance minimale de chauffage, dont la valeur dépend des caractéristiques du plasma et de sa géométrie. Par ailleurs, les barrières sont sujettes à des relaxations régulières, que l'on cherche à éviter. L'optimisation de ces régimes est un enjeu important pour la réalisation d'un réacteur à fusion.

Comment modéliser une turbulence plasma?

La modélisation d'une turbulence dans un plasma magnétisé requiert des ressources informa-

tiques considérables. Il s'avère qu'une description hydrodynamique est inadéquate lorsque le plasma est chaud et peu dense, les collisions entre particules y étant peu fréquentes. Une faible collisionnalité donne une grande importance aux interactions résonantes entre particules et champs électromagnétiques, appelées **résonances Landau**. Ces résonances rendent nécessaire une description **cinétique** du plasma. Les particules y sont décrites par une fonction de distribution en position/vitesse, soit 6 variables. Dans le cas des plasmas magnétisés, le **mouvement cyclotronique** peut être éliminé, car rapide devant les écoulements turbulents. Cette procédure, dite **gyrocinétique**, réduit la dimensionnalité du problème. Le nombre de points de maillage nécessaire pour décrire la turbulence dans un réacteur de fusion reste cependant de l'ordre de mille milliards. Une simulation

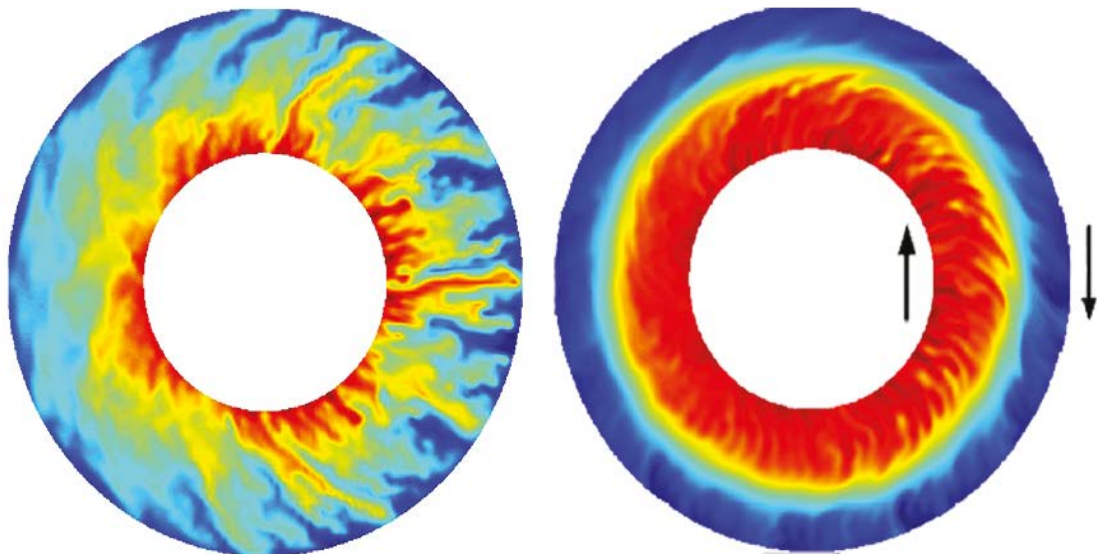


Fig. 2 : Développement d'une barrière de transport via un écoulement cisaillé. A gauche : carte de pression dans un méridien d'un plasma de tokamak. Les régions de forte pression (en rouge) pénètrent dans la zone périphérique basse pression (bleu). Ce processus conduit à une perte de confinement. A droite : même carte en présence d'un écoulement azimutal cisaillé (flèches) : les régions de forte et basse pression sont séparées – le confinement est amélioré. Les régions les plus centrales ne sont pas représentées.

sur un maillage aussi conséquent ne pourra se faire que sur la prochaine génération de calculateurs exascale (10^{18} opérations par seconde), voire sur la suivante (cf. [article #4 « Le calcul haute performance pour modéliser la turbulence »](#)). Une approche alternative est un calcul multi-échelle, qui s'appuie sur des modèles imbriqués décrivant des échelles ou des physiques différentes. Cette approche repose sur une approximation de séparation d'échelle, et/ou une agrégation de modèles physiques décrivant chacun une sous-partie du système.

Quand la turbulence s'auto-organise...

La description donnée ici du transport turbulent est éminemment simplifiée. La détermination de lois constitutives du type loi de Fourier s'appuie en effet sur une approximation de séparation d'échelles qui s'avère discutable près des seuils d'instabilités. La turbulence dans un tokamak s'auto-organise via l'émergence d'écoulements de taille intermédiaire, appelés **écoulements zonaux**, et d'évènements intenses et intermittents de transport appelés **avalanches**. Les écoulements zonaux sont analogues aux « courants jets » observés dans les atmosphères planétaires (par exemple Jupiter). Leur impact

favorable est similaire à celui des écoulements cisailés de grande échelle responsables de l'émergence des barrières de transport. Les avalanches possèdent des analogues dans les systèmes dynamiques tels que les tas de sable ou les tremblements de terre. Ces structures sont générées par le fond turbulent, et rétroagissent sur celui-ci et le transport associé. L'auto-organisation est un aspect universel et fascinant des plasmas turbulents (cf. [article #6 « Quand la turbulence s'auto-organise »](#)). Un autre exemple en est la dynamo solaire, c'est à dire la génération d'un champ magnétique par les écoulements turbulents.

Comment diagnostiquer une turbulence en milieu extrême?

Les mesures des **coefficients de transport** tels que la conductivité thermique ne permettent pas de discriminer les modèles théoriques de manière univoque. Lever les ambiguïtés nécessite d'avoir recours à des mesures de fluctuations hautement résolues en temps et espace. Des sondes sont couramment utilisées en laboratoire - les satellites sont leurs analogues dans les plasmas spatiaux. Toutefois, les sondes sont intrusives. Par ailleurs, elles ne peuvent supporter des températures trop

élevées. Comment diagnostiquer un plasma à 100 millions de degrés ? L'utilisation du rayonnement apporte une solution élégante à ce problème. De fait, la spectroscopie et l'imagerie sont des outils privilégiés de mesure des caractéristiques du plasma, mais aussi du champ électromagnétique. Des techniques radar dans la bande de fréquence micro-onde sont également employées dans les tokamaks, tout comme pour sonder l'ionosphère. La spécificité des mesures de turbulence tient au grand nombre de données nécessaires, dont l'analyse constitue un champ d'étude en soi. La décennie passée a vu des progrès spectaculaires dans la comparaison entre mesures et modèles (cf. [article #3 « Caractérisation expérimentale d'une turbulence plasma »](#)). Pour autant, les mystères de la turbulence sont loin d'être élucidés. ■

RÉFÉRENCES

- [1] **P.H. Diamond, S-I. Itoh, K. Itoh**,
"Modern Plasma Physics, vol. 1 Physical Kinetics of Turbulent Plasmas", Cambridge University Press (2010)
- [2] **G.K. Vallis**,
"Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics", Cambridge University Press (2006)
- U. Frisch**,
"Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov", Cambridge University Press (1995)

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DU TRANSPORT TURBULENT

par Yanick Sarazin & Yann Camenen

La modélisation du transport turbulent dans les plasmas de fusion vise à comprendre, prédire et optimiser la qualité du confinement, et in fine les performances. Une hiérarchie de modèles, de ceux premiers principes aux modèles réduits, permet de couvrir les nombreux ordres de grandeur séparant les différentes échelles spatiales et temporelles en jeu.

#2

#2

MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE DU TRANSPORT TURBULENT

Echelles spatio-temporelles de la turbulence plasma

Les fluctuations turbulentes du champ électromagnétique et de la distribution en position/vitesse des particules se développent à des échelles spatiales comparables au **rayon de giration cyclotronique** des particules qui portent l'instabilité, ions ou électrons. Cette propriété distingue les **plasmas** des fluides neutres, où l'échelle minimale est fixée par la dissipation visqueuse. En règle générale, c'est la **turbulence** à l'échelle ionique, de l'ordre du centimètre, qui domine le transport. Exceptions notables : les régimes de confinement amélioré caractérisés par des échelles ioniques amorties. La turbulence à l'échelle électronique, submillimétrique, peut dans ce cas contribuer notablement au transport. La présence du champ magnétique induit une turbulence fortement anisotrope : contrairement aux très courtes longueurs de corrélation transverses, celles parallèles au champ magnétique sont de la taille du tokamak, de plusieurs mètres. Quant à la gamme en fréquence de la turbulence, de même que les taux de croissance des instabilités sous-jacentes, ils s'étendent jusqu'à quelques centaines de kilohertz, bien en-deçà des fréquences cyclotroniques, qui sont de quelques dizaines de mégahertz pour les ions.

De nombreux résultats de simulation et observations expérimentales montrent que l'interaction de ces micro-fluctuations avec des structures de grande taille, jusqu'à l'échelle de la machine, ne peut être ignorée. Cette interaction multi-échelles est l'un des fondements de l'auto-organisation de la turbulence plasma, mais aussi de la turbulence fluide en général. Dans les plasmas chauds, les effets collectifs et les interactions résonantes ondes-particules qui les caractérisent y apportent une richesse supplémentaire. Ainsi, la micro-turbulence plasma interagit avec, et génère, des écoulements à grande échelle analogues entre autres aux jets en turbulence atmosphérique. Elle présente également du transport de type «**avalanches**» qui rappelle les plumes en turbulence Rayleigh-Bénard. Comprendre et quantifier le rôle de ces interactions dans la régulation du transport turbulent est l'un des axes majeurs de la recherche actuelle.

Modèles premiers principes

En parallèle aux mesures expérimentales d'une part, et à l'établissement de lois d'échelle empiriques d'autre part – qui reflètent les propriétés d'invariance du système, modéliser la turbulence et le transport associé est indispensable pour comprendre la nature des processus physiques en jeu et prédire les profils de densité et de température du plasma en fonction des sources (de matière et d'énergie) et puits (recombinaison élec-

tron-ion, puissance rayonnée, ...). Le problème consiste à calculer de façon auto-cohérente la réponse du plasma aux champs électrique et magnétique régis par les équations de Maxwell.

Parce que chaud et peu dense, le plasma de cœur des tokamaks requiert une description **cinétique** où la probabilité de trouver une particule en un point quelconque de l'espace des phases à 6 dimensions (3D en position, 3D en vitesse) est calculée à chaque instant. C'est l'équation de Vlasov. De fait, pour modéliser la turbulence, on peut s'affranchir de la description du **mouvement cyclotronique**, beaucoup plus rapide, tout en conservant ses effets en suivant le cadre général de la théorie adiabatique. C'est l'approche **gyrocinétique** 5D, qui revient à s'intéresser à la trajectoire d'une abeille sans pour autant décrire le battement de ses ailes [1]. Bien que leur fréquence soit faible devant celle de la turbulence, les collisions binaires doivent être prises en compte en complément au calcul du mouvement des par-

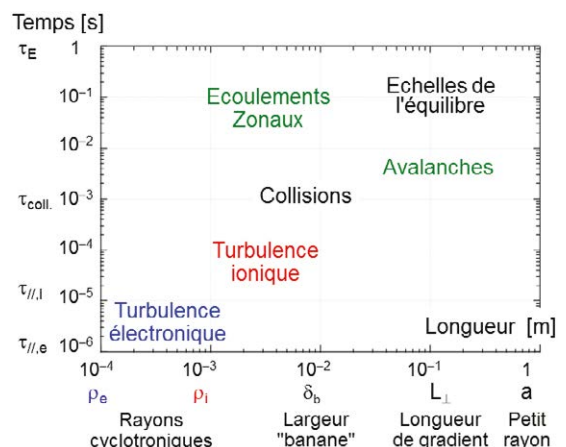


Fig. 1 : Echelles spatiales et temporelles caractéristiques de la turbulence dans les plasmas de fusion par confinement magnétique.

ticules chargées en présence d'un champ électro-magnétique : elles assurent la relaxation vers l'équilibre thermodynamique (théorème H de Boltzmann, 1872) et

l'amortissement par friction des écoulements à grande échelle. Malgré l'augmentation considérable des capacités des **supercalculateurs**, de telles simulations gyrocinétiques ne peuvent encore couvrir de façon auto-cohérente toutes les gammes de fréquences et d'espace de la **figure 1**.

L'approche **fluide**, beaucoup moins coûteuse, lui est souvent préférée quand la géométrie est complexe, que les fluctuations sont de grande amplitude ou que les collisions sont importantes, voire pour ces trois raisons comme à la périphérie du plasma confiné. La **magnéto-hydrodynamique** (MHD) est un sous-ensemble de cette description, particulièrement adaptée à l'étude d'instabilités électromagnétiques haute fréquence. L'approche fluide résout les équations d'évolution des moments de la fonction de distribution des différentes espèces – intégrales en vitesse pondérées par la vitesse, en pratique la densité, la vitesse fluide et les pressions parallèle et transverse. Ces équations d'évolution se déduisent de l'équation de Vlasov (ou gyrocinétique) intégrée sur l'espace des vitesses. Il se trouve que l'on obtient alors une hiérarchie infinie d'équations, chaque moment étant couplé au moment d'ordre supérieur (la densité à la vitesse, la vitesse à la pression, etc.). Une relation de fermeture – formule donnant le dernier moment en fonction des moments d'ordre inférieur – doit être trouvée pour tronquer cette suite.

Des fermetures satisfaisantes existent pour les plasmas collisionnels, dont la fonction de distribution s'écarte peu de l'équilibre Maxwellien fixé par la thermodynamique. En revanche, les tentatives pour proposer des fermetures fluides applicables aux plasmas chauds, peu collisionnels, sont spécifiques et connaissent des succès très dépendants de leur

domaine d'application en astro-physique ou en fusion.

Des approches hybrides se développent également. Elles permettent de conserver une description cinétique pour certaines espèces seulement. La source d'ionisation est ainsi calculée en couplant un code fluide pour le plasma froid périphérique à un code Monte-Carlo calculant la cinétique des particules neutres émises à la paroi. De même, certaines instabilités MHD sont portées par des particules énergétiques, décrites de façon cinétique.

Les enjeux des modèles réduits

Procéder à la réduction d'un modèle pour décrire un phénomène physique met en tension deux objectifs : (i) retrouver les caractéristiques jugées essentielles du modèle d'origine en isolant les briques de compréhension élémentaires responsables de ces caractéristiques, tout en (ii) diminuant si possible le coût numérique ou analytique du modèle initial. Dans la première étape réside un choix opéré par le physicien, qui dépend également de l'objectif visé. Cela passe usuellement par un changement d'échelle de description dit coarse-graining : à partir d'une description fine, oublier progressivement des détails sans pour autant trop perdre en pouvoir explicatif, voire prédictif.

Au-delà de la compréhension des mécanismes physiques en jeu, cette approche est absolument nécessaire pour modéliser le plasma en temps réel en vue de superviser et contrôler la décharge plasma. En effet, une simulation gyrocinétique qui résout des échelles ioniques à la taille de la machine requiert environ 10^{12} points (mille milliards) pour mailler l'espace des phases 5D. Étudier l'évolution sur plusieurs **temps de confinement**, avec un pas de temps limité

à quelques microsecondes par la turbulence, demanderait alors de résoudre de l'ordre de 10^{20} opérations. A supposer que l'on dispose d'un supercalculateur au pétaflop (10^{15} opérations par seconde), cela représente plus d'une journée de temps de calcul aux performances nominales. Cette estimation montre la nécessité de développer des modèles réduits en complément aux simulations premiers principes.

L'approche multi-échelles et l'approximation quasi-linéaire

La première étape consiste à exploiter la séparation d'échelle entre le temps d'évolution des profils de densité et température (~ 1 min) et celui de la turbulence (~ 0.1 ms). Le calcul du transport turbulent n'est alors effectué que ponctuellement, lorsque les profils macroscopiques ont sensiblement évolué. Cela permet de réduire le temps de calcul nécessaire de 3 à 4 ordres de grandeur.

La deuxième étape repose sur une propriété remarquable de la turbulence plasma : en régime non-linéaire, les modes à grande échelle, responsables de l'essentiel du transport, conservent une structure très proche de celle qu'ils ont en régime linéaire (**Figure 2**). Dans ces conditions, il est possible de construire un modèle, dit quasi-linéaire [3], dans lequel le transport turbulent est calculé à partir de la réponse linéaire des modes à grande échelle et d'une règle de saturation, plus ou moins ad hoc, prédisant l'intensité de la turbulence qui résulte de l'interaction non-linéaire avec les modes à petite échelle et les **écoulements zonaux**. Cette problématique de fermeture se retrouve dans le passage de simulations numériques directes («Direct Numerical Simulation») à celles ne résolvant que les grandes échelles («Large Eddy

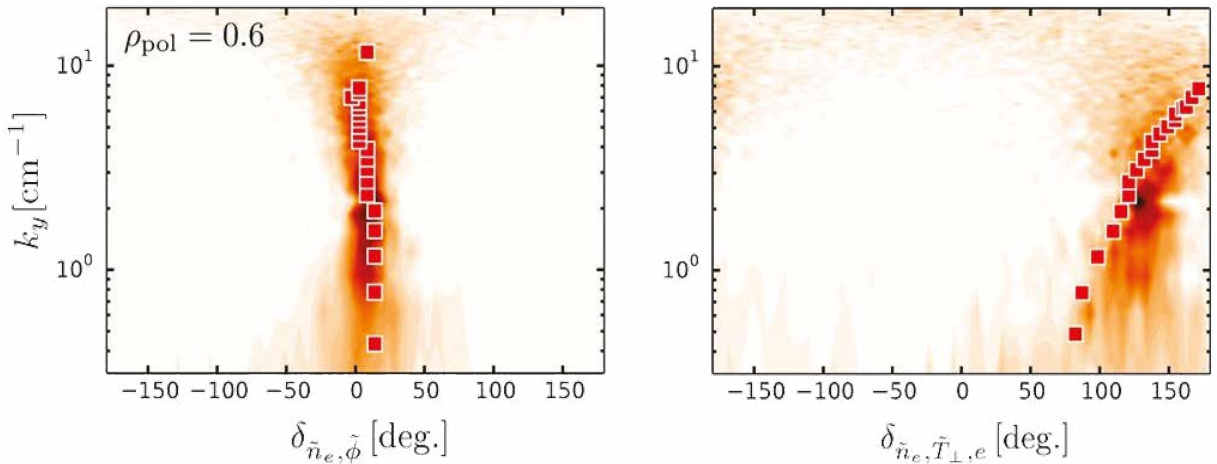


Fig. 2 : Un des fondements de l'approche quasi-linéaire : la différence de phase entre les fluctuations de densité et de potentiel électrique (figure de gauche) ou de température (figure de droite) en régime non-linéaire (niveaux colorés) pour différents vecteurs d'onde reste très proche de celle obtenue en régime linéaire (carrés). Extrait de Banon Navarro Physics of Plasmas (2015) [2]

Simulation») en turbulence fluide. L'approximation quasi-linéaire permet de réduire le temps de calcul de 4 à 5 ordres de grandeur supplémentaires.

Simulation multi-échelles, succès et limitations

L'approche quasi-linéaire couplée à des simulations multi-échelles permet ainsi de modéliser 1s de décharge plasma en seulement 100 heures CPU (temps correspondant à l'utilisation d'un **processeur** mono-cœur) et de reproduire l'évolution des profils observée expérimentalement, comme par exemple l'accumulation des im-

puretés de tungstène au cœur du plasma ainsi que leur rétroaction, via le rayonnement, sur le profil de température. Une perspective enthousiasmante pour encore accélérer les modèles quasi-linéaires et accéder au temps réel consiste à émuler le calcul linéaire par des réseaux de neurones entraînés sur une base de données multidimensionnelle. Cette approche s'inspire d'une démarche similaire en modélisation du climat et a été récemment validée sur une base de données de dimensionnalité réduite pour le transport turbulent.

Au-delà des succès de l'approche multi-échelles, il faut bien enten-

du garder en tête ses limitations intrinsèques. Par exemple, cette approche ne permet pas de décrire les avalanches générées par la turbulence, qui affectent les profils macroscopiques sur des temps bien plus courts que le temps de confinement. Lorsque le transport associé aux avalanches est significatif, il faut revenir à un modèle plus complet, et donc plus coûteux, pour décrire l'évolution des profils. En pratique, cela signifie qu'il est crucial de valider le domaine d'application des modèles réduits par des comparaisons avec les modèles premiers principes et les observations expérimentales. ■

RÉFÉRENCES

- [1] X. Garbet, Y. Idomura, L. Villard and T.H. Watanabe, «Gyrokinetic simulations of turbulent transport», *Nucl. Fusion*, **50** 043002 (2010), Topical Review doi:10.1088/0029-5515/50/4/043002
- [2] A. Bañón Navarro *et al.*, «Gyrokinetic studies of core turbulence features in ASDEX Upgrade H-mode plasmas», *Phys. Plasmas*, **22** 042513 (2015) doi: 10.1063/1.4919022
- [3] P.H. Diamond, S-I. Itoh, K. Itoh, "Modern Plasma Physics, vol. 1 Physical Kinetics of Turbulent Plasmas", Cambridge University Press (2010)

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE TURBULENCE PLASMA

par **Laure Vermare & Nicolas Fedorczak**

Comprendre les liens entre turbulence et confinement dans les plasmas magnétisés nécessite de confronter les modèles théoriques et numériques aux faits expérimentaux. Si l'élaboration de ces modèles est une entreprise complexe, collecter des informations quantitatives sur des processus dynamiques prenant place dans le milieu extrême des plasmas chauds est un autre défi en soi.

#3

#3

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE D'UNE TURBULENCE PLASMA

Un milieu contraignant

Au centre d'un **plasma** magnétisé de tokamak, les flux de chaleurs sont environ vingt fois plus importants qu'à la surface du soleil ($\sim \text{GW}/\text{m}^2$). Aucun objet de mesure ne pourrait survivre plus de quelques millisecondes, de sorte que l'information sur ce milieu ne peut provenir que de diagnostics (systèmes de mesure) déportés utilisant le rayonnement électromagnétique. Des diagnostics basés sur l'interaction laser-plasma tels la diffusion Thomson ou l'interférométrie permettent de mesurer les profils et gradients thermodynamiques du milieu aux échelles macroscopiques. Quant aux phénomènes turbulents responsables du transport le long de ces gradients, les échelles spatio-temporelles mises en jeu peuvent être accessibles, entre autres, par des systèmes radars.

Prédilection pour les radars

Dans les plasmas, les ondes électromagnétiques ne peuvent généralement se propager localement que si leur fréquence est supérieure à une fréquence caractéristique déterminée par la densité locale d'électrons. Un train d'ondes émis depuis une antenne - située en périphérie du plasma - se propage en pénétrant le profil de densité jusqu'à une position de coupure où la fréquence caractéristique du milieu égale la fréquence de l'onde. La fraction du train d'onde réfléchi à la position de coupure est collectée et analysée. En faisant varier la fréquence de ces trains d'ondes, la réflectométrie par balayage permet de reconstruire des informations très précises sur le profil macroscopique et l'amplitude des fluctuations de densité. Par ailleurs, l'injection de l'onde avec un angle oblique permet d'obtenir non pas une réflexion directe à la densité de coupure, mais une rétrodiffusion Doppler de l'onde. Ce phénomène reposant sur une résonance entre le motif de l'onde et le motif des fluctuations de densité plasma est une aubaine : le paquet d'onde rétro-diffusé porte des informations non seulement sur l'amplitude du motif de fluctuations, mais aussi sur ses échelles spatiales (longueurs d'onde) et sa vitesse de rotation [1]. En variant l'angle d'incidence et la fréquence de l'onde sonde, les radars Doppler

les plus élaborés permettent d'une part de reconstruire le poids de chaque échelle spatiale dans les fluctuations (spectre en longueur d'onde), et d'autre part de reconstituer des profils de vitesse de rotation. Ces deux volets d'information, spectres et rotation, sont des ingrédients essentiels à la compréhension des systèmes turbulents.

L'approche spectrale

La connaissance des spectres de **turbulence**, autrement dit des échelles dominantes dans les motifs de fluctuation, est un atout incontournable à la validation des modèles de transport turbulent. Par exemple, des instabilités touchant la dynamique des ions générera des fluctuations à des échelles voisines du **rayon de larmor** ionique, et il en ira de même concernant les électrons dont le rayon de larmor est 50 fois plus petit que celui des ions. A ces différences d'échelle des instabilités primaires peuvent

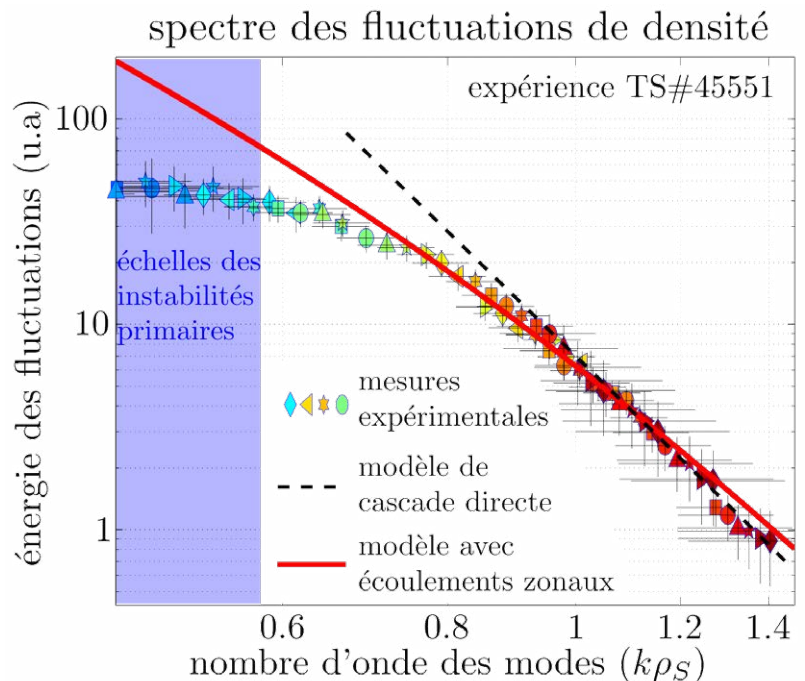


Fig. 1 : Spectre en nombre d'onde des fluctuations de densité mesuré dans le plasma confiné de Tore Supra, en échelles logarithmiques. Les données sont comparées à deux classes de modèles : type Kolmogorov en trait pointillé, et modèle d'interaction entre échelles disparates incluant les écoulements zonaux. Cette classe de modèle décrit les spectres expérimentaux sur un plus large gamme.

s'ajouter des phénomènes d'interférence entre motifs, conduisant à ce que l'on appelle des transferts ou cascade d'énergie le long de certaines gammes d'échelles. La forme des spectres peut ainsi permettre de discriminer les mécanismes de cascade propres à chaque modèle de transport. Une des théories les plus universelles en turbulence, non restreinte aux plasmas, a été mise au point par le physicien russe A. Kolmogorov au milieu du XX^{ème} siècle [2]. En postulant une règle très générique de transfert d'énergie entre échelles voisines depuis une échelle source jusqu'à une échelle de dissipation (par exemple visqueuse), l'énergie des fluctuations doit se répartir le long des échelles selon une loi statistique simple $E(k) \propto k^{-\alpha}$ où k est l'inverse de la longueur d'onde (nombre d'onde) et α un réel positif constant propre à l'observable fluctuante (densité, énergie cinétique, etc.). Si cette forme de spectre est en effet observée dans une grande variété de milieux fluide turbulents, il existe néanmoins des exceptions comme l'illustre la **figure 1**. Dans les plasmas de tokamak les fluctuations de densité ne suivent pas la théorie de Kolmogorov. Ces observations tendent à indiquer que certaines hypothèses sont à remettre en question, comme par exemple l'isotropie des fluctuations (pas de directions privilégiées à petites échelles) ou le modèle même de cascade continue entre échelles voisines. Certains systèmes sont en effet propices à générer des interactions entre échelles disparates, par exemple lorsque des écoulements s'organisent en strates. C'est le cas des atmosphères planétaires comme sur Jupiter où des bandes d'**écoulements (dits zonaux)** coexistent et interagissent avec des vortex (tourbillons) de plus petites échelles (<https://www.missionjuno.swri.edu/>). Une classe de modèles vise à décrire ces interactions entre petites et grandes échelles, dans les plasmas de tokamaks. Comme l'il-

lustre la **figure 1**, ils permettent de se rapprocher des formes de spectres mesurés, suggérant que de tels écoulements zonaux peuvent stratifier le milieu plasma et influencer les propriétés de la turbulence [1].

Des outils pour le plasma de bord

Si les systèmes radars ont démontré leur intérêt incontournable dans l'étude de la turbulence dans la région confinée du plasma, leur application à la région de bord est mise à plus rude épreuve du fait de gradients bien plus raides et de niveaux de fluctuation avoisinant les 100%. Cela dit, les conditions thermodynamiques moins extrêmes dans cette région à l'interface avec la paroi du réacteur favorisent l'utilisation d'autres systèmes de mesure comme les sondes électrostatiques ou des caméras visibles. La présence d'atomes neutres issus de la neutralisation du plasma au contact de la paroi engendre un rayonnement dans le visible dont l'intensité locale est proportionnelle à la densité locale du plasma. A l'instar de la région centrale du plasma où les fortes températures induisent un rayonnement X, les conditions dans la région de bord autorisent ainsi l'utilisation de caméras relativement standards pour visualiser les motifs de turbulence [3]. Il s'agit tout de même d'atteindre des temps de pause aussi courts que quelques microsecondes, et des cadences de quelques centaines de milliers d'images par seconde ! Et il s'agit aussi de s'armer de puissants outils de traitement d'images.

Il ressort de ces observations que les fluctuations au bord du plasma ne prennent pas la forme de motifs réguliers identi-

fiables à des ondes, mais de structures isolées les unes des autres et de fortes amplitudes.

Description corpusculaire

Ces structures intermittentes sont communément appelées filaments de par leur forme allongée dans la direction parallèle au champ magnétique et de taille transverse centimétrique. La **figure 2** illustre une image expérimentale retraitée prise sur une expérience de Tore Supra. Afin d'aider à l'interprétation, une vue synthétique de la caméra d'un groupe de filaments est proposée, le cadre pointillé indiquant le cadre de vue expérimental.

Ces images de caméra, malgré le faible contraste obtenu, apportent une information qualitative unique sur la nature et la distribution spatiale des fluctuations dans la région de bord du plasma. Pour faire le lien avec les mesures spectrales de diffusion Doppler, nous pourrions concevoir ces filaments comme des solitons résultant d'une interférence d'ondes localement constructive, à l'image des vagues

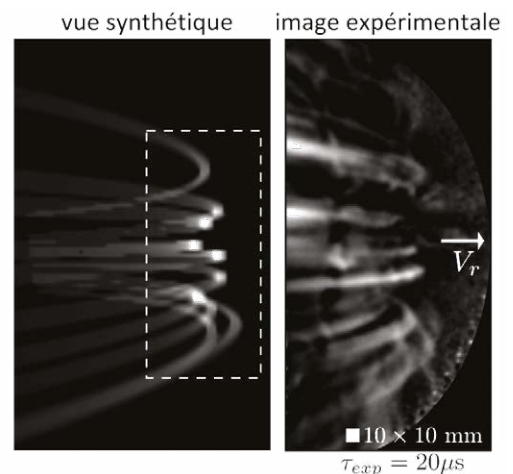


Fig. 2 : Images de caméra visible rapide obtenues dans le tokamak Tore Supra. A gauche, une construction synthétique de l'image de plusieurs filaments, avec en cadre pointillé la zone traitée dans l'expérience. A droite, une image issue d'une séquence prise sur une expérience de Tore Supra, après traitement. Le temps d'exposition est de 20 microsecondes, la résolution spatiale de quelques millimètres. La flèche indique la direction de propagation des filaments, du plasma vers la paroi du réacteur.

scélérates et tsunamis. Mais il est possiblement tout aussi intéressant de les considérer comme des quantas (ou unité indivisible) de transport turbulent, dans le cadre d'une approche duale de la turbulence (onde et corpuscule).

Dans tous les cas, la dynamique de ces filaments est à la base des propriétés du flux de chaleur déposé par le plasma sur les parois du réacteur, et c'est pour cette raison que leur caractérisation et compréhension sont essentielles. Proche de la paroi où la température réduite du plasma autorise l'insertion d'objets, des systèmes de sondes électrostatiques permettent de mesurer précisément les propriétés spatio-temporelles de ces filaments. Entre autres, ces sondes permettent de quantifier leurs tailles, amplitudes, vitesses de propagation et fréquences d'apparition en complément des images fournies par caméra rapide. Les vitesses de propagation radiales sont typiquement de l'ordre du kilomètre par seconde dans les plasmas de bord de tokamak !

Accord avec la théorie ?

Une classe de modèles [4] est attachée à décrire la dynamique de filaments isolés dans les plasmas, afin d'apporter des réponses sur des problématiques touchant aussi bien au confinement du plasma qu'à l'interaction plasma parois (cf. **Notions Utiles : «Fusion, Plasmas et Tokamaks»**). Comme illustré sur la **figure 3**, le modèle retenu permet de reproduire les mesures de vitesse de filament, à un niveau statistique du moins. C'est-à-dire que chaque filament mesuré individuellement n'est pas nécessairement bien décrit par le modèle, mais qu'en moyenne les tendances et les valeurs sont correctement prédites. Les données illustrées sur la **figure 3** regroupent un demi-million de filaments isolés, mesurés sur une vaste gamme de conditions

expérimentale. L'accord statistique trouvé, même avec une dispersion de 60%, suggère que le modèle est globalement valide sur la plage de conditions étudiées. Pour autant, de tels niveaux de dispersions peuvent paraître décourageant lorsqu'il s'agit de s'attaquer à valider des modèles. Cependant, il s'avère que les systèmes turbulents résistent, en général, à une modélisation précise. Et les tokamaks fournissent la difficulté additionnelle d'un environnement très contraignant : les mesures sont généralement bruitées par les perturbations électromagnétiques intenses du plasma et des systèmes de contrôle ; les données sont souvent incomplètes et nécessitent des approximations, etc.

Conclusion

L'étude de la turbulence dans les plasmas tokamaks offre un terrain de recherche unique à la limite des connaissances mais aussi à la limite des capacités de mesure et d'analyse. C'est à travers la confrontation constante des observations

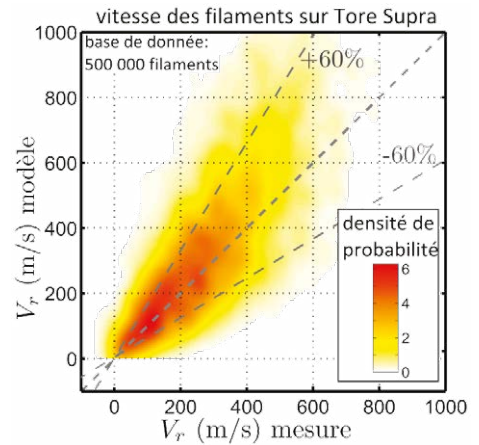


Fig. 3 : Vitesse d'expulsion des filaments mesurés par sonde sur les expériences de Tore Supra, comparée aux prédictions théoriques. La base de données comprend environ un demi-million de filaments isolés : pour une meilleure visibilité, les données sont transformées en densité de probabilité. Une grande proportion des filaments montrent un accord en vitesse d'expulsion entre mesures et modèle de l'ordre de $\pm 60\%$.

et des modèles existants que notre connaissance s'accroît, forçant aussi bien l'élaboration de nouveaux modèles que le développement de nouveaux moyens de mesure. Et les techniques d'analyse ne sont pas en reste : l'interprétation et le traitement des mesures sur ces plasmas d'une extrême sensibilité et complexité est un autre challenge en soi, à la hauteur du big-data et de l'intelligence artificielle ! ■

RÉFÉRENCES

- [1] L.Vermare, et al., "Wavenumber spectrum of micro-turbulence in tokamak plasmas", *Comptes Rendus Physique*, **12**, p. 115-122 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2010.11.003>
- [2] U. Frisch, "Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov", Cambridge University Press (1995)
- [3] S.J. Zweben and R.J. Maqueda and D.P. Stotler and the NSTX Team, "High-speed imaging of edge turbulence in NSTX", *Nucl. Fusion*, **44** (2004) <http://stacks.iop.org/0029-5515/44/i=1/a=016>
- [4] S. Krasheninnikov, D. D'Ippolito and J. Myra, "Recent theoretical progress in understanding coherent structures in edge and SOL turbulence", *J. Plasma Physics*, **74**, 5, p. 679-717 (2008) <https://doi.org/10.1017/S0022377807006940>

LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR MODÉLISER LA TURBULENCE

par **Guillaume Latu & Virginie Grandgirard**

Le calcul haute performance (HPC) fait référence à des systèmes qui, grâce à une combinaison de capacités de traitement et de capacités de stockage exceptionnelles, peuvent résoudre rapidement des problèmes extrêmement complexes. Les technologies liées aux supercalculateurs concernent certains secteurs commerciaux ainsi que des aspects de sécurité nationale. Mais surtout, l'outil HPC est à la pointe de la découverte scientifique dans de nombreux secteurs. En permettant de réaliser des simulations réalistes, le HPC permet d'améliorer notablement la connaissance de la turbulence dans les plasmas de tokamak.

#4

#4

LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE POUR MODÉLISER LA TURBULENCE

Quels horizons pour la simulation ?

La plupart des problèmes concrets ne peuvent pas être décrits par une fonction ou une formule mathématique. Des modèles numériques sont alors utilisés pour améliorer notre compréhension dans de nombreux domaines scientifiques, comme c'est le cas pour les plasmas de tokamak. Les simulations numériques réalisées dans ce domaine permettent ainsi d'observer des instabilités, ainsi que de nombreux autres phénomènes physiques mal compris au sein des tokamaks actuels. Cette approche vient compléter la démarche purement analytique dans la confrontation avec l'expérimentation et l'observation. De plus, les simulations offrent la possibilité d'extrapoler certaines conclusions sur les tokamaks du futur. Les coûts de calcul imposent une limitation dure à la précision des simulations, de sorte que les ressources de calcul doivent être employées aussi efficacement que possible. Depuis plus de trente ans, des actions sont menées à la fois pour réaliser des économies de temps sur ce type de simulations, mais aussi pour diminuer le besoin en ressources de calcul. Une autre activité essentielle et complémentaire consiste à concevoir des applications de plus en plus réalistes, occasionnant généralement un accroissement des coûts calculatoires. Pour pallier cette hausse, les machines paral-

lèles sont à même d'apporter une solution.

Supercalculateurs

Comparée à l'exploitation d'une seule unité de calcul, l'informatique parallèle est mieux adaptée pour modéliser des phénomènes complexes. Tout d'abord, utiliser un grand nombre d'unités de calculs permet de raccourcir les temps de traitement. On peut ainsi passer de plusieurs mois de calcul sur un seul processeur à quelques heures sur un **supercalculateur**. Deuxièmement, de nombreux problèmes donnent lieu à un volume de calcul tel qu'il est impossible d'accomplir leur résolution sur un seul ordinateur, en particulier compte tenu de la mémoire accessible limitée. Afin d'utiliser les ordinateurs parallèles, les méthodes mathématiques et les algorithmes qui les mettent en œuvre doivent être conçus avec soin et ingéniosité. Il convient également de suivre les évolutions matérielles des supercalculateurs au fil du temps car chaque année réserve son lot d'innovations. D'une décennie à l'autre, les programmes parallèles

exploitent les processeurs en remaniant les programmes pour optimiser la mémoire cache et le type d'instructions utilisées, concevoir des algorithmes suffisamment clairs et essayer de cibler la portabilité des performances d'une machine à l'autre, rechercher des algorithmes et des schémas numériques conduisant à un plus grand nombre de résultats scientifiques produits par opération arithmétique. Sur ce dernier point, les mathématiques appliquées jouent un rôle primordial en proposant des méthodes innovantes. Par exemple, certains schémas adaptatifs modifient le maillage de calcul en temps et en espace pour capturer localement des processus physiques plus fins. Un second exemple, d'autres schémas sont en précision mixte et mêlent différents niveaux de précision (c.-à-d. le nombre de chiffres significatifs retenus lors des calculs) pour réduire les coûts en temps de calculs. Dans les différentes communautés utilisatrices de supercalculateurs, de nombreux codes parallèles sont développés de manière indépendante. Pour un bon nombre de

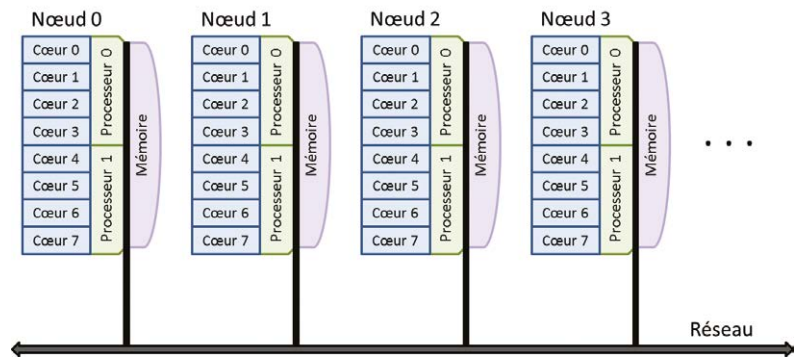


Fig. 1 : Schéma d'une architecture à mémoire distribuée

évoquent donc pour exploiter au mieux toutes les capacités de calcul mis à disposition. Quatre grandes lignes d'action permettent d'améliorer l'utilisation des supercalculateurs : adapter les logiciels à un nombre toujours croissant d'unités de calcul au sein de chaque processeurs, mieux ex-

codes, les avancées méthodologiques en mathématiques appliquées et en informatique parallèle sont mises à profit pour réduire les coûts associés aux simulations.

La programmation parallèle

Le calcul parallèle permet une exécution plus rapide d'un code en permettant l'exécution simultanée de plusieurs tâches sur différentes unités de calcul. Avant de décrire brièvement comment paralléliser un code, passons en revue les éléments qui composent un supercalculateur (Figure 1). Les calculateurs hautes performances sont généralement constitués d'un réseau d'ordinateurs individuels connus sous le nom de **nœuds** fonctionnant ensemble comme une ressource informatique unique. Chaque nœud possède un certain nombre de processeurs ou bien des accélérateurs de calcul (les cartes graphiques constituent de tels accélérateurs). Les processeurs peuvent contenir plusieurs **cœurs**, chacun pouvant exécuter des opérations indépendamment. Les processeurs effectuant des tâches sur le même nœud ont accès à une mémoire partagée, ce qui signifie qu'ils peuvent échanger des informations via des emplacements de mémoire communs. Cependant, la mémoire n'est pas partagée entre les nœuds, de sorte que les opérations qui s'exécutent sur plusieurs nœuds utilisent une programmation dite « à mémoire distribuée ». Afin de gérer correctement les tâches à l'aide de cette architecture à mémoire distribuée, les nœuds doivent avoir un moyen de se transmettre des informations les uns aux autres. Bien souvent, la parallélisation est effectuée en utilisant les paradigmes OpenMP ou MPI. OpenMP parallélise les opérations par « **multithreading** » en exécutant des tâches sur plusieurs cœurs au sein d'un même nœud et en utilisant la mémoire partagée. D'autre part, MPI (pour Message Passing Interface) a la capacité de paralléliser les tâches sur plusieurs nœuds connectés par le réseau, en utilisant la mémoire

distribuée de chaque nœud. Cela a deux implications pratiques ; MPI est nécessaire pour exploiter de nombreux nœuds, mais la communication entre les tâches requiert un travail de programmation difficile. Quant à lui, le paradigme OpenMP requiert une programmation plus facile mais ne permet pas l'accès à la mémoire distribuée. Les deux méthodes de parallélisation ne sont pas mutuellement exclusives ; il est possible d'utiliser OpenMP pour paralléliser les opérations à l'intérieur de chaque nœud et MPI pour communiquer entre nœuds. La combinaison MPI+OpenMP au sein des programmes parallèles est mise en œuvre de façon de plus en plus standard depuis les années 2000. Bien que relativement ardue à implémenter, cette combinaison a de nombreux avantages : une capacité à utiliser efficacement un grand nombre de nœuds grâce à une réduction du nombre de messages MPI et du nombre de processus impliqués dans les communications collectives, une mémoire totale consommée qui peut être abaissée car moins de données sont répliquées dans les processus MPI, une meilleure répartition de la charge de calcul grâce à deux niveaux complémentaires qui peuvent être sollicités. Le modèle de programmation hybride MPI/OpenMP est efficace mais délicat sur les critères de lisibilité du code et facilité d'utilisation. C'est pourquoi, des cours sont proposés au niveau européen (PRACE Training Centres) pour accompagner les utilisateurs des supercalculateurs académiques. De l'aide ponctuelle est aussi proposée par les équipes de support au niveau de chaque centre de calcul.

Mise en œuvre sur de grandes plate-formes

Le code de calcul GYSELA [1] est un code de simulation de la **turbulence** plasma. La turbulence

détermine le transport de chaleur des ions notamment. Le code est adapté aux architectures massivement parallèles et fait l'objet de recherches interdisciplinaires et internationales. Il a été transformé pour bénéficier d'une approche combinée MPI+OpenMP. La modélisation du plasma y est **cinétique**, c'est-à-dire qu'elle traite l'espace des phases, a priori à 6 dimensions sous forme d'advection et diffusion en coordonnées de position et en vitesse, sous l'influence de collisions et en présence d'un champ de vitesse turbulent associé au champ électrique. Ce dernier est déterminé en utilisant les équations de Maxwell. Une séparation d'échelle, cohérente avec l'intensité du champ magnétique présent dans les tokamaks, permet de réduire la dimension de l'espace à 5 dimensions. Cette réduction, cruciale pour la réalisation de simulations numériques avec les puissances de calcul actuellement disponibles, se traduit néanmoins par une plus grande complexité des équations. Le code permet alors de déterminer la fonction de distribution 5D des ions dans le cadre formel appelé **gyrocinétique**. Le code GYSELA a pu utiliser efficacement 450 000 cœurs [1,2], sur l'un des plus gros calculateurs européens (IBM Juqueen, Allemagne). Grâce à la combinaison MPI+OpenMP et de nombreuses optimisations mises en œuvre, les temps d'inactivité forcée des cœurs ainsi que les surcoûts dus à la gestion du parallélisme ont représenté moins de 10% du temps d'exécution, ce qui constitue un excellent rendement. Les derniers développements du code, notamment en remplaçant des zones non-physiques pour imposer des conditions limites par des conditions plus proches de l'expérience, permettent à ce code d'aborder les propriétés globales de confinement dans des conditions suffisamment bonnes

pour permettre une confrontation des simulations avec les résultats expérimentaux. Une illustration est donnée en **figure 2** de structures turbulentes produites dans Gysela. Dans ce code, les progrès ont été formidables ces dernières années ; alors qu'il était impossible d'utiliser plus de quelques dizaines de cœurs pour une simulation il y a 10 ans, il tourne désormais sur des centaines de milliers de cœurs sur les supercalculateurs européens les plus puissants.

Utiliser efficacement les processeurs

Depuis 2004, les préoccupations énergétiques ont limité l'augmen-

tation des fréquences d'horloge chez les fabricants de processeurs et ont conduit à l'ère dite du multi-cœur. Cela se traduit par une augmentation du parallélisme et du nombre de cœurs au sein de chaque nœud de calcul des supercalculateurs. En 2009 on employait typiquement 8 cœurs par nœud, alors qu'on en trouve 48 ou 64 sur les machines actuelles. De plus, la technologie de l'hyperthreading permet à deux threads – deux tâches différentes - d'être actives et de réaliser des calculs sur un même cœur. Un certain nombre de ressources se retrouvent ainsi partagées : bus internes, registres, unités de calculs, mémoires cache.

Cette approche permet de maximiser le nombre d'instructions en calcul flottant qui sont traitées à chaque cycle horloge (et l'approche est beaucoup plus efficace que dans les générations précédentes de processeurs). En effet, il y a deux unités matérielles qui sont à même de réaliser des calculs flottants dans les processeurs INTEL récents. En affectant deux threads à un même cœur, cela permet de proposer deux flux de travaux indépendants qui pourront plus facilement occuper ces unités de calcul. De plus, les unités de calcul sont vectorielles, c'est-à-dire qu'elles sont capables de réaliser des additions, multiplications sur

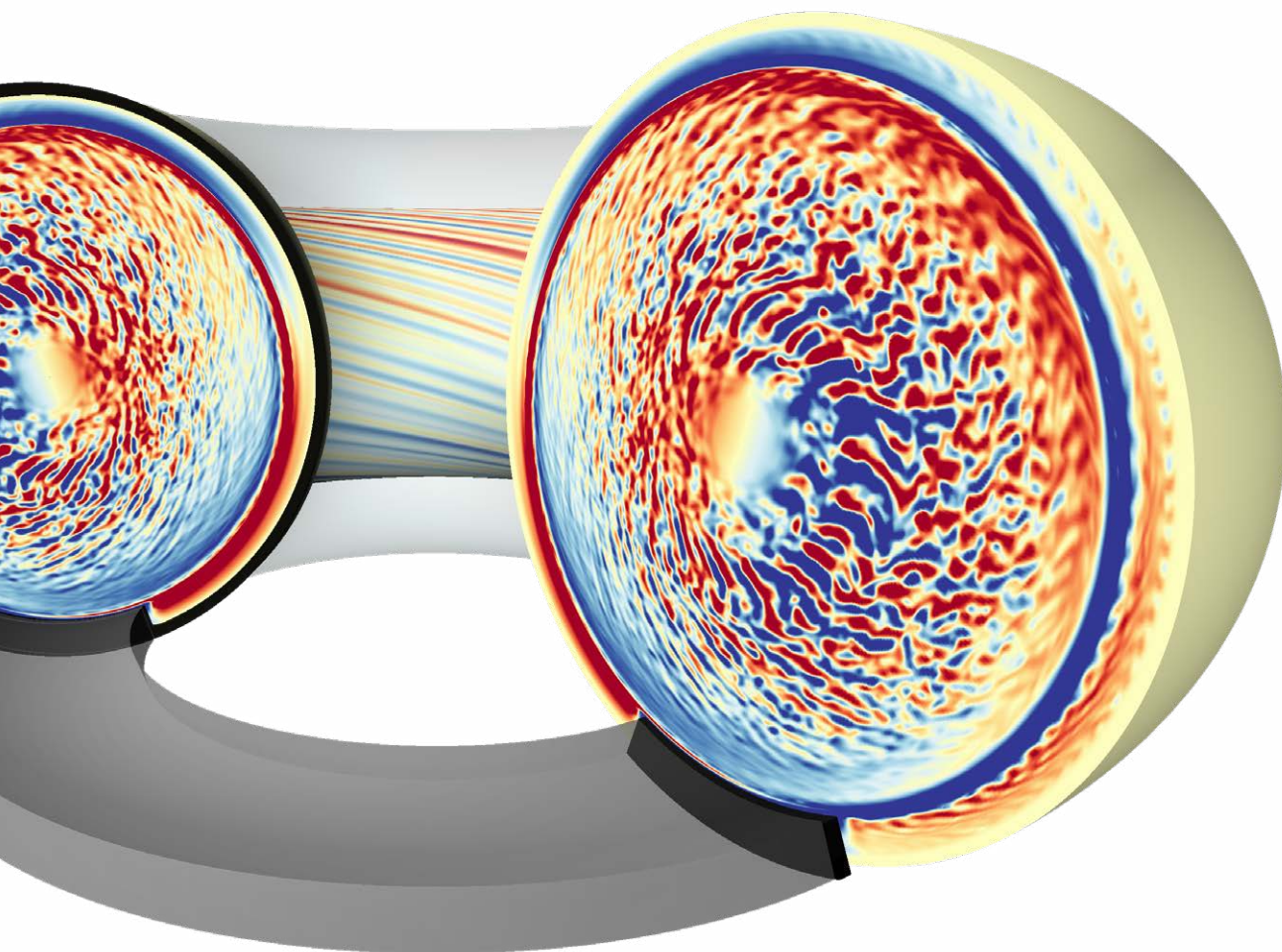


Fig. 2 : Code GYSELA : Carte instantanée des structures turbulentes dans un plasma de tokamak (visualisation du potentiel électrique). Les tourbillons s'étirent le long des lignes de champs.

des petits vecteurs (4 à 16 nombres réels typiquement). Dans GYSELA, comme d'autres codes, cette capacité de traitement sur des petits vecteurs augmente les capacités de calcul de manière significative. Mais elle n'est effective que si le compilateur possède les qualités nécessaires pour transformer le code source en une série d'opérations vectorielles. Les compilateurs d'INTEL récents ont réalisé un net progrès dans le traitement de cette tâche difficile. Cependant, le programmeur doit mettre en forme le code source pour que la transformation par le compilateur soit la plus efficace possible. C'est ainsi que de nombreux codes, dont GYSELA, sont actuellement dans une phase de réécriture afin d'assister le compilateur dans la détection des opérations vectorielles les plus performantes. Cette démarche augmente significativement le débit des opérations de calcul flottant. Par ailleurs, le nombre élevé de cœurs au sein de chaque nœud a conduit à rechercher puis à trouver plus de parallélisme à grain fin en utilisant de plus nombreuses fonctionnalités du paradigme de parallélisation OpenMP. Cette révision de la parallélisation des «nids de boucles» a permis d'occuper les cœurs de calcul avec un meilleur

équilibre de charge. Certaines adaptations de l'utilisation combinés de MPI et OpenMP - afin d'éviter les synchronisations globales - ont également permis de gagner en temps d'exécution. A titre d'exemple, l'hyperthreading combinée à l'équilibrage au niveau OpenMP a permis de réduire les temps d'exécution de GYSELA de plus de 25 % sur les toutes dernières générations de processeurs INTEL [3].

Vers l'exaflop

Le calcul intensif permet de mettre en pratique de nouvelles idées et de prendre de l'avance dans une compétition scientifique qui est internationale. Construire de grands supercalculateurs est une des clés dans cette compétition. Mais un défi crucial est le développement des logiciels spécifiques utilisés sur ces machines. Ces derniers permettent l'exploitation de l'ensemble des potentialités des supercalculateurs. Ainsi, les acteurs industriels et académiques investissent de plus en plus dans des travaux communs afin de réussir à dompter la puissance de ces supercalculateurs. L'effort à accomplir est important pour arriver à la prochaine étape qu'est l'exaflop, c.-à-d. concevoir et exploiter une

machine capable de produire plus d'un milliard de milliard d'opérations par seconde. ■

RÉFÉRENCES

[1] V. Grandgirard et al.,

"A 5D gyrokinetic full-f global semi-Lagrangian code for flux-driven ion turbulence simulations", *Comput. Phys. Commun.*, **207**, p. 35–68 (2016)
<https://hal.inria.fr/DSM-IRFM/cea-01153011v2>

[2] G. Latu et al.,

"Benefits of SMT and of parallel transpose algorithm for the large-scale Gysela application", *Proc. of PASC 2016* (2016)
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/107220/Benefits%20of%20SMT%20and%20of%20Parallel%20Transpose%20Algorithm.pdf>

[3] J. Bigot et al.,

"Scaling Gysela code beyond 32K-cores on Blue Gene/Q", *ESAIM : Proc.*, **43**, p. 117–135 (2013)
<https://www.esaim-proc.org/articles/proc/pdf/2013/05/proc134308.pdf>

TURBULENCE D'INTERFACE : QUAND LE SOLEIL RENCONTRE LA BOÎTE

par **Patrick Tamain & Eric Serre**

On associe souvent dans le grand public le projet de la fusion par confinement magnétique à l'idée de domestiquer le Soleil sur Terre. Cette image poétique et séduisante est indissociable du développement d'un contenant capable de l'accueillir et d'absorber sous forme de chaleur l'énergie générée par la fusion des noyaux atomiques. L'interaction entre le plasma et la paroi est la source d'une phénoménologie complexe et passionnante dont la compréhension est l'une des clés de la maîtrise de la fusion par confinement magnétique.

#5

#5

TURBULENCE D'INTERFACE : QUAND LE SOLEIL RENCONTRE LA BOÎTE

La « Scrape-Off Layer », une couche limite à l'interface entre le plasma et la paroi

La solution technologique actuellement envisagée pour les futurs réacteurs à fusion par confinement magnétique s'appelle tokamak. C'est la solution adoptée dans le cadre du projet ITER. Le tokamak est un tore métallique de plusieurs mètres de diamètre conçu pour confiner le **plasma** au moyen d'un champ magnétique très intense généré par de puissants aimants supraconducteurs et par le plasma lui-même via un courant toroïdal induit par induction ou par interaction avec des ondes électromagnétiques.

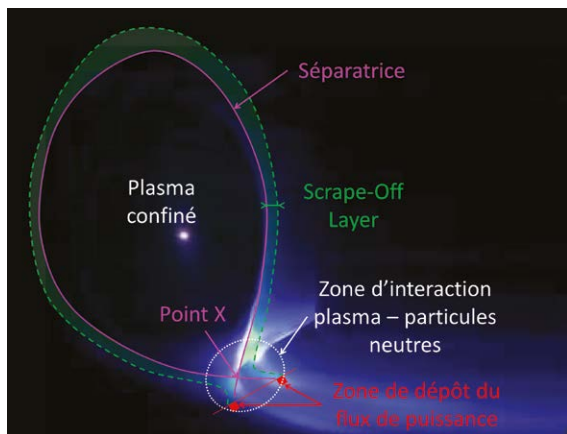


Fig. 1 : Illustration, à partir d'une image en lumière visible d'un plasma dans le tokamak WEST (IRFM, Cadarache, France), de la géométrie du champ magnétique en configuration divertor et du point X. La Scrape-Off Layer est la couche externe surlignée en vert. La zone lumineuse est le volume du plasma en forte interaction avec les particules neutres présentes dans le plasma de bord.

Le champ magnétique forme des surfaces emboîtées de forme torique, appelées **surfaces magnétiques**, autour desquelles les **lignes de champ** s'enroulent hélicoïdalement. Les particules composant le plasma sont ainsi essentiellement libres de se déplacer dans la direction du champ magnétique le long des surfaces magnétiques mais confinées par la force de Lorentz dans la direction perpendiculaire à ces surfaces. Ce confinement n'est cependant pas parfait et divers mécanismes contribuent à l'étalement du plasma à travers les surfaces magnétiques. Au sein de la machine, il existe par conséquent une surface magnétique, appelée séparatrice, au-delà de laquelle l'enroulement hélicoïdal des lignes de champ et le plasma rencontrent un élément de paroi (lignes de champ dites ouvertes), conduisant ainsi à une interaction directe entre le plasma et la paroi.

Cette zone du plasma, usuellement appelée **Scrape-Off Layer** ou **SOL** (Figure 1), se comporte comme une couche limite en hydrodynamique, dont la largeur est essentiellement déterminée par le ratio entre transport parallèle et transverse aux lignes de champ.

Dans la direction parallèle, le transport est fortement gouverné par les sources et pertes liées à l'interaction plasma-paroi ainsi qu'aux interactions atomiques et moléculaires. Dans la direction transverse, les collisions et les écoulements de grande échelle ne sont que très partiellement à l'origine du transport comme l'attestent les écarts de deux

à trois ordres de grandeur observés entre les valeurs mesurées des **coefficients de transport** et les valeurs prédites par la théorie basée sur ces mécanismes. En réalité, le plasma étant un milieu fondamentalement hors-équilibre thermodynamique, c'est le transport turbulent, lié entre autres aux fluctuations du potentiel électrique, de la densité ou de la température, qui joue un rôle prépondérant. Cette **turbulence** d'interface entre lignes de champ fermées et lignes de champs ouvertes, entre centre et bord de la machine, est au cœur de deux des principaux enjeux de la recherche sur la fusion par confinement magnétique.

Evacuer la puissance produite sans endommager la paroi

Parmi les questions ouvertes à traiter pour ITER, le contrôle du flux de chaleur sur la paroi du tokamak est un problème critique dans la réalisation d'un plasma thermonucléaire. Un rapide bilan d'énergie pour ITER conduit à une puissance produite par les réactions de fusion de l'ordre de 500MW, dont 400MW portés par les neutrons, qui sortent quasi-instantanément du plasma en interagissant très peu avec la paroi métallique et sont collectés par le système de récupération d'énergie principal du réacteur, et 50MW rayonnés qui viendraient se déposer de manière quasi-uniforme sur l'ensemble de la surface de la paroi. L'enjeu est lié aux 50 MW restants, canalisés dans les premiers millimètres de la SOL, qui viendraient se déposer sur 1 à 2m² de surface d'une partie dédiée [1] du tokamak appelée divertor. En l'absence de contrôle, le flux thermique résultant d'environ 50MW/m² serait du même ordre que celui observé à la surface du Soleil et environ 2.5 plus élevé

que la capacité des matériaux les plus résistants actuellement.

On est donc face à un enjeu crucial pour le fonctionnement de la machine. Le transport transverse aux lignes de champ essentiellement gouverné par la turbulence d'interface est un paramètre clé de ce problème, car il détermine la surface sur laquelle se distribue la puissance sortant du plasma. Si diverses méthodes sont envisagées et testées pour réduire le flux de puissance atteignant la paroi, la compréhension des mécanismes associés à la turbulence d'interface reste essentielle afin d'optimiser la conception et le fonctionnement du tokamak.

Confiner pour optimiser le rendement : le « mode H », un mystère vieux de 35 ans

La compréhension de la turbulence dans la partie périphérique du plasma est également au cœur d'un des principaux défis scientifiques de la théorie des plasmas magnétisés. Paradoxalement, alors que les réactions de fusion prennent place dans la zone chaude et dense au centre du plasma, la couche limite périphérique autour de la séparatrice est essentielle au confinement et donc aux performances de la machine. Il a en effet été découvert en 1982, et depuis confirmé sur l'ensemble des tokamaks de grande taille, l'existence d'un régime de fonctionnement dans lequel le plasma bifurque spontanément vers un confinement amélioré au-delà d'une puissance de chauffage seuil : c'est la **transition L-H**. Ce régime, qualifié de « mode H » (comme « High confinement »), conduit à un accroissement significatif du taux de réactions dans la partie centrale du plasma [2]. C'est donc logiquement le régime de fonctionnement envisagé pour ITER et les futurs réacteurs.

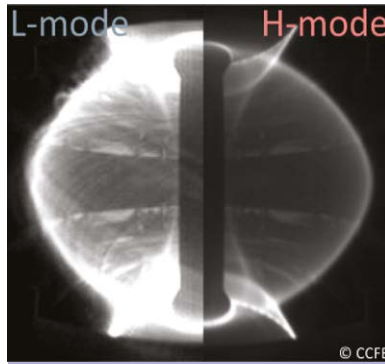


Fig. 2 : Images en caméra visible du tokamak MAST (CCFE, Culham, Royaume-Uni) illustrant le contraste entre les fluctuations turbulentes du plasma bien visibles avant la transition vers le mode H (gauche) et leur quasi-absence une fois le mode H atteint au-delà d'un seuil sur la puissance de chauffage du plasma [3]

Empiriquement, le mode H se caractérise par un raidissement local des profils transverses de densité et de température à proximité de la séparatrice, soulignant ainsi le rôle spécifique de la couche limite périphérique du plasma dans cette phénoménologie. Une autre caractéristique clé est l'observation systématique d'une réduction drastique du niveau de fluctuations du plasma (densité, potentiel...) dans cette zone, indiquant que le mode H est dû à une suppression locale et spontanée de la turbulence et du transport associé (Figure 2). Il s'agit donc d'un phénomène d'auto-organisation du transport turbulent en réponse à la puissance injectée dans le plasma.

Côté théorie cependant, le mode H échappe depuis sa découverte à la modélisation. Un consensus scientifique fort, associé à des modèles réduits, existe sur le rôle clé des écoulements laminaires et plus spécifiquement leur cisaillement qui étire les vortex turbulents jusqu'à leur dissipation, à l'image de ce qui peut être observé en turbulence atmosphérique. Le paysage se complique quand on sait que ces écoulements cisailés sont en partie générés par la turbulence elle-même via les

interactions non-linéaires entre échelles. Par ailleurs, dans le bord du plasma, de multiples processus physiques peuvent se conjuguer pour lui donner naissance. Aucun code numérique premier principe, c'est-à-dire n'intégrant aucun paramètre de contrôle ad-hoc du comportement de la turbulence ou des écoulements, n'a cependant encore été en mesure de retrouver l'existence de la bifurcation spontanée vers le mode H.

Une physique et des géométries complexes

La physique en jeu dans le bord du plasma est significativement différente de celle dans le plasma central pour plusieurs raisons.

D'abord, le plasma périphérique, relativement froid par rapport au cœur, est plus fortement collisionnel ce qui rapproche cette turbulence d'une turbulence fluide, avec des spectres en lois de puissance des fluctuations de densité et de potentiel. Par ailleurs, le bord du plasma se caractérise par de forts gradients amplifiant les mécanismes d'instabilité générant la turbulence. La présence de la paroi solide au-delà de la séparatrice est également un point fondamental. Son interaction avec le plasma impose des conditions aux limites ayant un impact direct sur la stabilité du plasma vis-à-vis de la turbulence. Cette question est encore aujourd'hui un domaine actif de recherche car les simulations comme la théorie montrent une grande sensibilité de la turbulence à la description précise de ces conditions aux limites.

Une autre particularité du plasma de bord tient à la géométrie. Le champ magnétique confinant a , dans le plasma de bord, une topologie très particulière : la géométrie divertor, spécifiquement utilisée pour la gestion des contraintes de l'interaction plas-

ma-paroi. Les surfaces de flux ne sont alors plus de simples tores emboîtés mais peuvent présenter un ou des points dits « X » au niveau de la séparatrice (Figure 1). Les recherches récentes montrent que cette topologie particulière et la forme précise des surfaces de flux ont un impact important sur la phénoménologie du transport turbulent dans la zone périphérique.

Notons enfin que l'interaction du plasma et de la paroi conduit à la génération d'un flux important de particules neutres, isotopes de l'hydrogène ou espèces plus lourdes, qui pénètrent dans le plasma car n'étant pas sensibles au champ magnétique. L'interaction du plasma avec ce nuage de particules conduit à une grande variété de réactions de chimie et de physique atomique. Elle ajoute une composante non linéaire à la physique en jeu en créant des sources et des puits de matière et d'énergie extrêmement localisés, à l'image des écoulements réactifs en combustion. La dynamique de ces particules neutres ne dépend pas du champ magnétique mais dépend de la géométrie précise de la paroi du tokamak, ajoutant une complexité géométrique supplémentaire au problème.

Le rôle clé de la simulation numérique

L'importance des enjeux précédents pour l'intégrité et la performance du réacteur ainsi que la difficulté à obtenir des mesures exhaustives donnent un rôle clé à la simulation numérique et poussent au développement d'outils de modélisation avancés aussi bien d'un point de vue physique que numérique.

Cette modélisation numérique demande la mise en œuvre de moyens de calcul extrêmement puissants car mettant en jeu des phénomènes multi-physiques, liés

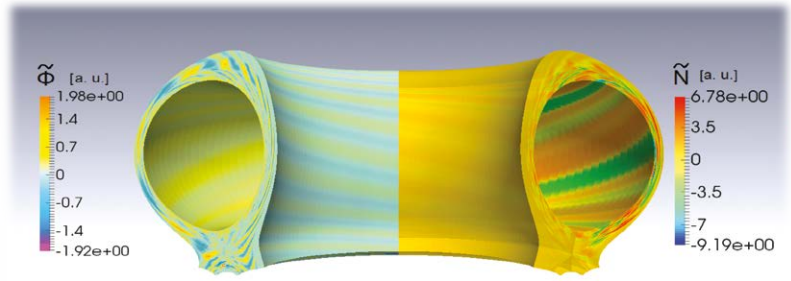


Fig. 3 : Simulation numérique obtenue avec le code fluide TOKAM3X montrant les fluctuations de densité (droite) et de potentiel électrostatique (gauche) responsables du transport turbulent.

à la turbulence plasma et aux interactions atomiques et moléculaires. Cela conduit à la discrétisation d'une large gamme d'échelles spatiales et temporelles variant du millimètre (rayon de Larmor) à quelques centaines de mètres (longueur des lignes de champ magnétique), de la microseconde à la seconde, ainsi qu'à celle d'équations d'évolution pour un grand nombre d'espèces (ions, électrons, atomes neutres, molécules...). Le traitement de la topologie du champ magnétique, avec la présence d'un ou de plusieurs points X, et la discrétisation d'éléments de parois de forme réaliste nécessitent ainsi la mise en œuvre de maillages non structurés ou l'utilisation de techniques innovantes comme la méthode de frontière immergée. Ceci implique une recherche en étroite collaboration avec les mathématiques appliquées

et la mécanique des fluides numérique.

Pour la couche limite externe du plasma, la modélisation fluide basée sur des équations 3D premier principe (Figure 3) ou 2D moyennées reste le standard dans la communauté internationale pour modéliser des géométries et gammes de paramètres de contrôle réalistes par rapport à l'expérience. A ces modèles fluides doivent néanmoins se coupler des modèles cinétiques, afin de prendre en compte la physique se développant dans la très proche proximité de la paroi (gaine électrostatique), ou des effets de transport non-locaux générés par la présence de barrières de transport. ■

RÉFÉRENCES

- [1] A. Loarte *et al.*, "Progress in ITER Physics basis, Chapter 4: Power and particle control", *Nucl. Fusion*, **47**, S203 (2007)
- [2] F. Wagner, "A quarter-century of H-mode studies", *Plasma Phys. Control. Fusion*, **49**, B1 (2007)
- [3] N. Ben Ayed *et al.*, "Inter-ELM filaments and turbulent transport in the Mega-Amp Spherical Tokamak", *Plasma Phys. Control. Fusion*, **51**, 035016 (2009)

QUAND LA TURBULENCE S'AUTO-ORGANISE

par **Guilhem Dif-Pradalier & Philippe Ghendrih**

Turbulence est chaos, en temps et espace, mais chaos n'est pas seulement désordre. Que ce soit dans des atmosphères planétaires, des océans ou au cœur d'une machine créée par l'homme, le tokamak, celle-ci présente de surprenantes similitudes, associées à un ordre dynamique qu'elle génère spontanément.

#6

#6

QUAND LA TURBULENCE S'AUTO-ORGANISE

Omniprésente turbulence

De perception courante par la pluralité de ses manifestations, source tant de questionnement fondamentaux qu'objet d'études pratiques, concept multiforme, la **turbulence** est de ces concepts que partagent les systèmes non-linéaires complexes, hors équilibre et adaptatifs. Les **plasmas** chauds de fusion magnétique, exemple paradigmatique de système fortement hors équilibre, n'y font pas exception : la turbulence y est ubiquitaire.

Cette ubiquité découle du principe même de fusion magnétique: un mélange confinant d'isotopes de l'hydrogène, propre à générer des réactions de fusion requiert par construction l'existence de forts gradients spatiaux en son sein. Typiquement, deux à trois ordres de grandeur de différence sont nécessaires entre une partie centrale confinée, chaude ($\sim 10^8$ Kelvin) et relativement dense (cependant mille fois moins dense que l'air) et une périphérie plus froide et raréfiée. Ces forts gradients (ou inhomogénéités d'espace) de température, de densité, de vitesse ou de courant, intrinsèques aux plasmas de fusion sont une mesure de l'énergie libre du système, ou en d'autres termes une estimation du travail utile susceptible d'être fourni par le système. La turbulence y prend sa source ; elle est donc une conséquence directe de l'état hors

d'équilibre thermodynamique du plasma.

Une question fondamentale, commune aux systèmes hors équilibre, non-linéaires et à grand nombre de degrés de liberté réside en la compréhension des phénomènes dits de transport, c'est à dire en la compréhension de la dynamique de redistribution de cette énergie libre au sein du système. La turbulence est une modalité de cette réorganisation. Elle joue un rôle particulier d'amplificateur de l'efficacité des échanges induits par les collisions entre particules du plasma.

La fascination exercée par la turbulence résulte d'une tension entre des évolutions en apparence chaotiques et singulières et la répétition de motifs relativement stables et identifiables. Lors, comprendre le phénomène de transport turbulent, c'est tenter d'appréhender ces motifs stables comme une propriété émergente traduisant un comportement d'ensemble robuste.

L'étude de la turbulence présente donc deux pans intimement liés: l'un fondamental, visant à comprendre les formes dynamiques prises par la turbulence (manifestations du comportement ordonné d'ensemble) et à tenter de mettre à jour les lois, si possible universelles, qui sous-tendent son organisation ; l'autre d'intérêt pratique a pour ambition de paramétrer et de quantifier le transport résultant à des fins d'application.

Petites fluctuations, grandes conséquences

Les plasmas de fusion peuvent être vus comme des fluides réactifs, composés de charges et donc sensibles aux champs électromagnétiques. Il apparaît indispensable de considérer l'évolution de celles-ci en fonction de leur position et de leur vitesse, en utilisant alors une

description statistique basée sur des fonctions de distribution.

Cette fonction de distribution, ou plus intuitivement le détail du mouvement des particules, tout à la fois dépend des fluctuations du champ électromagnétique et les génère. Deux cas de figure peuvent se présenter : soit le plasma est en « équilibre dynamique » au sens où il n'existe pas de force nette qui accélérerait une partie du plasma sur des échelles de temps et d'espace grandes devant les échelles de fluctuation des champs, soit ce n'est pas le cas et une petite fluctuation pourra être amplifiée, conduisant au développement d'une instabilité.

Dans un plasma magnétisé les instabilités sont multiformes et généralement distinguées par la source « d'énergie libre » alimentant la croissance de formes spatiales, ou modes du système. La source d'énergie libre peut être dans l'interaction avec les frontières du système, dans les forces thermodynamiques dues à un gradient du champ de pression ou lorsque deux ondes se couplent à la fréquence caractéristique d'une classe spécifique de particules. En pratique, plusieurs instabilités peuvent coexister, couplant les différentes échelles du problème. De plus, les effets du développement de la turbulence et de son niveau de saturation sont globaux et s'étendent sur un continuum d'échelles, depuis des échelles submillimétriques rapides jusqu'à celles du système dans son ensemble, macroscopiques en espace ($\sim 1\text{m}$) et sur des durées relativement longues ($> 1\text{s}$).

Une représentation mentale communément évoquée pour comprendre un processus turbulent se base sur le concept d'auto-similarité. Dans cette représentation, les plus grandes structures turbulentes tirent leur énergie des sources d'énergie libre du sys-

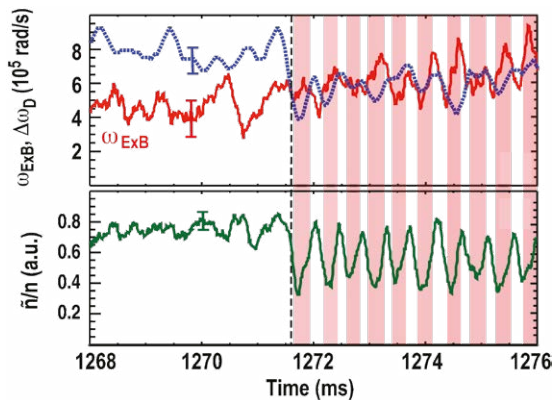


Fig. 1 D'après [1] : turbulence \bar{n}/n et écoulement zonal ω_{ExB} sont expérimentalement anti-corrélés, illustrant une auto-régulation de type prédateur-proie.

tème et à leur tour génèrent en «cascade» des vortex plus petits à des échelles différentes, chaque échelle étant statistiquement similaire à la précédente et tirant d'elle la source d'énergie qui nourrira la suivante. Et ce jusqu'à l'échelle de dissipation. La présence d'ondes dans le plasma complexifie cette représentation, et conduit dès lors que leur propagation n'est pas isotrope, à une augmentation de l'activité de mélange lors de leur déferlement, ainsi qu'à la génération ou au renforcement d'écoulements à grande échelle participant de la régulation de la turbulence. Des brisures de symétrie apparaissent spontanément. Les différentes échelles ne sont plus nécessairement auto-similaires et la cascade d'énergie peut devenir «non-locale», couplant des échelles disparates.

Un objectif majeur est dès lors la compréhension des phénomènes d'auto-régulation du système {turbulence + ondes} et donc l'appréhension des boucles de rétroaction qui s'y déroulent.

Un ordre cyclique au milieu du désordre

La boucle de rétroaction de type «prédateur-proie» est un exemple générique d'auto-organisation dans les systèmes complexes. Dans les plasmas, elle

intervient comme mécanisme de saturation voire de stabilisation du transport turbulent. Introduisons une structure essentielle, l'**écoulement zonal**. Celle-ci est générique et parfois appelée de noms différents en des contextes différents, le plus commun étant certainement celui de «courant-jet» (ou «Jet Stream») des atmosphères planétaires. Ces écoulements se retrouvent dans des milieux aussi différents que les bandes colorées de l'atmosphère de Jupiter, qu'au sein de nos océans ou que les plasmas de fusion. L'écoulement zonal est lié aux corrélations de fluctuations de vitesse et, point central, se développe spontanément dès lors que l'état turbulent n'est pas statistiquement isotrope –une condition aisée à remplir. Ceci peut en effet être initié par une inhomogénéité du système (eg. via l'interaction avec les conditions aux limites ou par un gradient spatial) ou arriver par brisure de symétrie spontanée, la transition ressemblant alors à une bifurcation. Ces écoulements sont particulièrement étudiés car, cisailés, ils régulent les structures turbulentes. Un premier résultat clé étant qu'un système turbulent génère spontanément sa propre régulation. L'écoulement zonal (l'analogue du prédateur biologique –en rouge dans la **figure 1** ci-dessus, issue de données expérimentales) en effet croît par redistribution à son profit de l'énergie libre des fluctuations turbulentes (les proies –en vert ci-dessus) et décroît si l'énergie libre turbulente décroît. Un cycle auto-entretenu et dynamique se joue donc [1] dans un système à grand nombre de degrés de liberté entre instabilités,

turbulence, ondes et écoulements, ayant pour moteur thermodynamique la redistribution de l'énergie libre du système.

Des avalanches et des escaliers

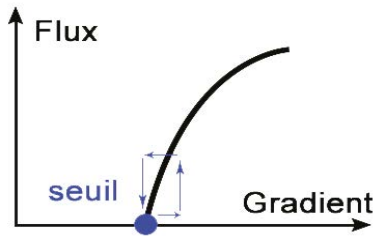
Si les écoulements zonaux sont bénéfiques au confinement car ils ne conduisent pas à un transport net à travers les **surfaces magnétiques**, ce n'est pas le cas de toutes les structures ordonnées que la turbulence peut générer. Ainsi les **avalanches**, délétères pour le confinement, sont un exemple paradigmatique du comportement opposé car pouvant transporter énergie, matière ou quantité de mouvement à travers les surfaces magnétiques. Celles-ci résultent d'une synchronisation de perturbations, ou en d'autres termes sont les manifestations d'une propagation corrélée de perturbations à la manière d'un domino qui, tombant, entraîne ses voisins.

Une même turbulence peut donc générer des structures qui à la fois la régulent et à la fois la propagent. Ces propriétés, a priori antinomiques, peuvent être réconciliées en invoquant l'émergence spontanée d'une sur-structure secondaire, dite en marches d'escalier (staircase en anglais), organisant l'espace de sorte à accommoder la tendance naturelle du système {turbulence + ondes} à développer écoulements zonaux et avalanches. Cette structure spontanée, prédite par le calcul (**Figure 2**, haut) puis observée expérimentalement (bas) dans le tokamak Tore-Supra du CEA Cadarache, résulte d'une auto-organisation de ces tendances contraires et résout dynamiquement dans ce cas le problème complexe de sélection des formes prises par la turbulence [2]. Remarquablement, des structures semblables en marches d'escalier sont également observées dans les atmosphères planétaires ou nos

océans terrestres, y participant de la circulation générale et influençant le climat.

Raideur et dynamique multi-échelles

Par essence, les instabilités sont des phénomènes à seuil. Le concept de **raideur** traduit la propension d'un système à demeurer au voisinage de son seuil, comme schématisé ci-dessous.



Nombre d'observations du transport turbulent dans les plasmas, tant théoriques qu'expérimentales suggèrent que le système turbulent présente une raideur importante. Un tel système peut alors explorer largement son espace de configurations possibles tout en demeurant en moyenne dans un voisinage du seuil. A l'instar d'une bifurcation, la réponse en terme de flux transporté peut ainsi être importante lors d'une modification même mineure des forces thermodynamiques (gradients) qui le génèrent, traduisant pour de tels systèmes raides un caractère intermittent marqué. La difficulté prédictive inhérente à cette raideur est cependant contrebalancée par la compréhension grandissante des processus d'auto-organisation au voisinage du seuil, comme évoqué plus haut, ou prenant en compte le traitement de plusieurs échelles dynamiques du système, simultanément. De récents travaux dans ce dernier sens ont par exemple pu mettre en évidence des synergies entre échelles d'instabilités disparates. Le transport induit excédant significativement la somme des transports résultant

de chaque instabilité considérée séparément [3].

Conclusion

A l'encontre de l'étymologie commune du mot, turbulence n'est pas seulement désordre. Multiforme, dynamique, chaotique par de nombreux aspects, la turbulence génère également ses propres boucles de rétroaction, conduisant à l'émergence de structures cohérentes et à une forme de résilience de son comportement statistique au voisinage du seuil. La prédiction fine du transport dans un plasma passera par l'appréhension des comportements collectifs en son sein, par la mise en lumière des liens entre intermittence et motifs stables, et plus généralement par la compréhension de son auto-organisation spatiale et temporelle.

C'est un moment de recherche particulièrement intéressant que l'actuel car bien qu'anciennes, ces questions ont pu récemment être renouvelées de par l'émergence du calcul massivement parallèle, seul permettant de sonder les intrications non linéaires des processus turbulents. C'est au prix de la continuation d'une interaction forte entre physique mathématique, informatique et ingénierie, entre théorie analytique, calcul parallèle et mesures expérimentales qu'une prédiction des propriétés de la turbulence pourra être envisagée, ouvrant la voie à la possibilité de son contrôle, via notamment le concept de barrières de transport. Et au delà des aspects évoqués, participera activement au progrès de notre compréhension des systèmes physiques complexes auto-organisés, en somme à une large classe de phénomènes importants de notre vie quotidienne, depuis

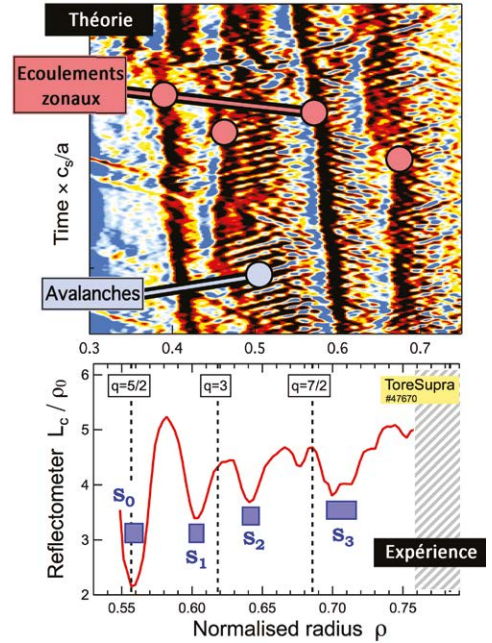


Fig. 2 D'après [2] : une organisation à grande échelle, en «staircase» (ou marches d'escalier) réconcilie avalanches et écoulements zonaux et organise durablement les propriétés de transport.

l'organisation d'écoulements planétaires influençant climat et météorologie, à la fluidification du trafic routier en passant par des questions de transition de phases ou de performances aéro- ou hydro-dynamiques. ■

RÉFÉRENCES

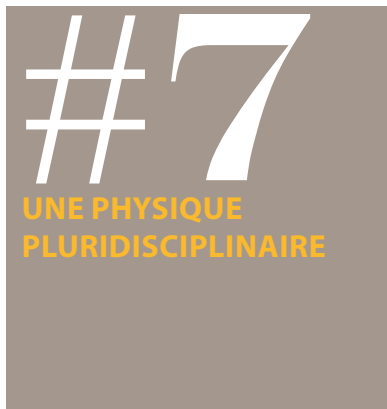
- [1] L. Schmitz *et al.*, "Role of Zonal Flow Predator-Prey Oscillations in Triggering the Transition to H-Mode Confinement", *Phys. Rev. Lett.*, **108** 155002 (2012)
- [2] G. Dif-Pradalier *et al.*, "Finding the Elusive $E \times B$ Staircase in Magnetized Plasmas", *Phys. Rev. Lett.*, **114** 085004 (2015)
- [3] S. Maeyama *et al.*, "Cross-Scale Interactions between Electron and Ion Scale Turbulence in a Tokamak Plasma", *Phys. Rev. Lett.*, **114** 255002 (2015)

UNE PHYSIQUE PLURIDISCIPLINAIRE

par Philippe Ghendrih & Yanick Sarazin

L'auto-organisation de la turbulence mise en évidence dans les plasmas de fusion fait écho aux nombreuses observations expérimentales dans les fluides en général. Ces communautés partagent de longue date leurs analyses et méthodes sur ces thématiques complexes.

#7



Interdisciplinarité et Festival de Théorie

L'étude des **plasmas** de fusion par confinement magnétique se nourrit de l'interaction réciproque et fructueuse avec la physique des plasmas spatiaux et solaire, la mécanique des fluides dont celle des océans et des atmosphères planétaires, et la physique non-linéaire de manière générale. Le Festival de Théorie, colloque international de quatre semaines organisé par le CEA Cadarache et AMU tous les 2 ans depuis 2001 à Aix-en-Provence [1], est un lieu privilégié pour ces échanges. Si leurs objets d'étude sont distincts, ces disciplines n'en partagent pas moins des problématiques communes. Elles s'enrichissent mutuellement des regards croisés et des approches complémentaires développées dans les autres communautés. Le cheminement des idées échangées au Festival a atteint suffisamment de maturité pour permettre de tirer parti des efforts investis. Trois thèmes illustrent particulièrement ces réussites : l'interaction grandes-petites échelles conduisant à l'auto-organisation de la **turbulence** via les «**écoulements zonaux**» ou à «l'effet dynamo», les propriétés d'invariance ou de similitude et les lois d'échelle associées, et enfin la mise en œuvre de la technique de frontières immergées appelée également méthode de pénalisation dans les simulations numériques.

Auto-organisation de la turbulence et écoulement zonaux

Les écoulements zonaux sont des écoulements cisailés à grande échelle générés par la turbulence, qui se manifestent notamment au travers de bandes azimutales symétriques dans l'atmosphère de Jupiter [2], ou de jet-streams dans l'atmosphère terrestre. Dans les tokamaks, ils se caractérisent par une rotation constante de la micro-turbulence sur une **surface magnétique**, mais différente d'une surface à l'autre (**Figure 1**). Dans tous ces cas, l'un des mécanismes clés pour expliquer leur génération est l'interaction non-linéaire des fluctuations à petite échelle. Les processus à l'œuvre dans ce transfert d'énergie entre échelles sont l'objet d'une recherche active, mais ils n'ont pas encore révélé tous leurs secrets. Que ce soit dans les atmosphères

force de Lorentz dans les plasmas magnétisés des tokamaks. La forte analogie a permis d'importer en fusion les résultats d'une riche littérature fluide sur le sujet. En jouant le rôle d'inhibiteurs de transport turbulent, ces écoulements sont vus comme les veines et artères du système climatique terrestre : à l'instar des vaisseaux sanguins, ils sont les canaux privilégiés de la redistribution d'énergie thermique à la surface du globe, que ce soit dans les océans ou dans l'atmosphère. Les sources d'énergie principales sont l'ensoleillement et la rotation terrestre. Dans les plasmas de fusion, ces écoulements contribuent efficacement à la saturation de la turbulence en cisillant les cellules de convection. Des travaux récents, numériques et expérimentaux, ont montré leur propension à se structurer spatialement de manière quasi-régulière, générant des micro-barrières de transport ou «staircases», par analogie avec

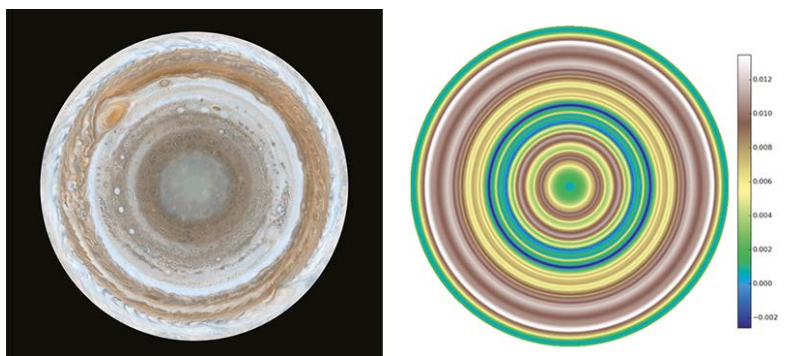


Fig. 1 : **(gauche)** Vue polaire des bandes zonales dans l'atmosphère de Jupiter (Image Credit: NASA/JPL/Space Science Institute). **(droite)** Visualisation d'écoulements zonaux dans un plasma de tokamak : l'échelle de couleur est proportionnelle à la vitesse de rotation normalisée à la vitesse thermique [simulation GYSELA, (2018)].

planétaires ou les tokamaks, les propriétés intrinsèques des ondes sous-jacentes semblent jouer un rôle déterminant, en permettant le renforcement de telles structures à grande échelle, leur conférant ainsi une grande stabilité. De fait, aux ondes de Rossby qui naissent dans les atmosphères stratifiées en rotation – où la force de Coriolis ne peut être négligée – répondent les ondes de dérive soumises à la

les courants macroscopiques nés de la circulation thermohaline (chaleur et salinité) dans les océans (cf. **article #6 «Quand la turbulence s'auto-organise»**).

Ces écoulements cisailés peuvent même conduire à l'établissement de barrières de transport robustes, c'est-à-dire faiblement poreuses. Tout indique en effet qu'ils sont les principaux architectes de la bifurcation spontanée vers le régime

à fort confinement dit «mode H» (pour High confinement), découvert sur le tokamak allemand ASDEX en 1982. Cette **transition L-H** à seuil en puissance de chauffage est le scénario de référence qui permettra à ITER d'atteindre ses plus hautes performances. Elle conduit à doubler le contenu énergétique du plasma, par l'établissement d'un piédestal en pression à la périphérie du plasma confiné. La tachocline, cette couche limite à l'interface entre la zone radiative et l'enveloppe convective externe du Soleil, est un autre exemple emblématique de barrières de transport. Dans ce cas, les écoulements zonaux sont en outre supposés jouer un rôle dans le(s) mécanisme(s) de dynamo solaire. Certains scénarios de dynamo, dite turbulente, s'appuient d'ailleurs sur un mécanisme analogue à la génération des écoulements zonaux : le transfert d'énergie (cinétique en l'occurrence) à petites échelles vers des grandes échelles, celles ici du champ magnétique macroscopique. Les approches de type champ-moyen ont permis des avancées majeures dans la compréhension de ces deux phénomènes.

Il est intéressant de remarquer que l'intermittence qui peut naître de l'interaction de type proie-prédateur entre turbulence (proie) et écoulements zonaux (prédateur) a récemment été invoquée comme possible mécanisme générique de transition vers la turbulence, en particulier dans le cas d'un écoulement forcé dans un tuyau, cette expérience de référence réalisée par le physicien britannique O. Reynolds en 1883.

Principe de similitude et lois d'échelle

Le principe de similitude est une approche très puissante et efficace pour étudier les phénomènes physiques [3]. Il combine l'analyse

des équations modèles et des informations expérimentales, notamment les symétries. Il permet entre autres d'établir, au travers de lois d'échelle, les dépendances paramétriques de phénomènes dont les mécanismes sous-jacents peuvent être par ailleurs d'une très grande complexité. Un exemple historique marquant remonte à la seconde guerre mondiale. En 1941, le physicien britannique G. Taylor publiait sa réponse, en termes de loi d'échelle, à une question brûlante en ces temps de course à l'arme atomique : quel effet mécanique peut-on attendre d'une explosion nucléaire ? Ses calculs lui permirent en 1950 de déterminer la puissance des premières explosions nucléaires américaines, à partir de la simple donnée de l'évolution temporelle du rayon du front de détonation, imprudemment publiée par le département d'état américain.

Dans les machines à fusion par confinement magnétique, les lois d'échelle sont en particulier utilisées pour déterminer la dépendance paramétrique du **temps de confinement de l'énergie**. Les performances fusion croissent non-linéairement avec ce temps, qui quantifie les capacités d'isolation thermique de la configuration magnétique. Les propriétés d'invariance des équations qui régissent la dynamique du plasma de cœur, typiquement l'équation de Vlasov et les équations de Maxwell, permettent d'identifier un nombre réduit de paramètres adimensionnels indépendants. Les principaux sont le **rayon de larmor** ionique normalisé (ρ^*) à la taille de la machine, la collisionnalité (ν^*) ou rapport de la fréquence de collision à une fréquence de transit, et le rapport (β) de la pression cinétique à la pression magnétique. Ils jouent un rôle analogue aux nombres de Reynolds (ou de Reynolds magnétique en **magnéto-hydrodynamique**) ou de Prandtl

en turbulence fluide. Les mesures réalisées sur les différentes machines de par le monde permettent alors, par une régression, d'identifier la loi d'échelle dont dépend le temps de confinement en fonction de ces paramètres. On peut en retenir trois éléments. Tout d'abord le poids prépondérant de ρ^* : la grande taille d'ITER résulte de fait de l'augmentation non-linéaire constatée du temps de confinement aux faibles valeurs de ρ^* .

Ensuite la dispersion des données expérimentales, d'environ 15%, qui se répercute sur la prédiction des performances d'ITER, dont la valeur de ρ^* est inférieure aux machines actuelles.

Enfin l'utilisation de données expérimentales volumiques, du fait de la complexité des mesures, là où des profils donneraient une information plus précise. Ce dernier point n'est certainement pas étranger à la dispersion observée. Ils militent en tout cas tous deux pour une approche complémentaire par la simulation numérique.

La largeur de la couche limite des plasmas d'ITER, la **SOL pour Scrape-Off Layer**, peut également être estimée dans ce cadre. Cette épaisseur détermine l'intensité du flux d'énergie vers les composants de paroi en contact avec le plasma. En tant que longueur, elle doit être proportionnelle à une longueur caractéristique du plasma. Les éléments empiriques montrent que la géométrie du plasma n'influe pas. En utilisant d'autres propriétés des modèles, et pour autant que le rôle des particules neutres soit négligeable, cette largeur doit varier comme le rayon de larmor.

En utilisant un autre résultat empirique, on constate que cette longueur doit être multipliée par un nombre sans dimension qui caractérise la structure hélicoïdale du champ magnétique. Sur la base de cette analyse simple et du prin-

cipe de similitude, la prédiction pour ITER conduit à une très faible largeur de SOL, et in fine à de forts flux de puissance par unité de surface sur les parois. La recherche de scénarios innovants vise à lever les contraintes opérationnelles qui en résultent.

Pénalisation et frontières immergées

Le comportement des écoulements des fluides neutres dépend de manière cruciale de la géométrie des objets situés dans ces écoulements. Pour simuler des cas extraordinairement complexes, comme les écoulements au voisinage d'une abeille pendant son vol, une technique dite de pénalisation a été développée. Elle consiste à modifier les équations du fluide dans un masque qui représente la frontière immergée de l'élément non fluide, les ailes dans l'exemple de l'abeille. Cette technique a été importée avec succès dans les plasmas de fusion, et enrichie pour rendre compte des propriétés singulières de l'interaction d'un plasma avec les solides. Cette technique de simulation numérique permet d'étudier avec précision l'interaction plasma-paroi (Figure 2) sur des problématiques clés comme l'élévation de température de la surface des

composants face au plasma, ou la répartition en volume des particules neutres qui pénètrent et interagissent avec le plasma. Ces aspects sont cruciaux pour concevoir les scénarios de contrôle de

l'interaction plasma-paroi, et estimer leur impact éventuel sur la performance en terme de puissance fusion. ■

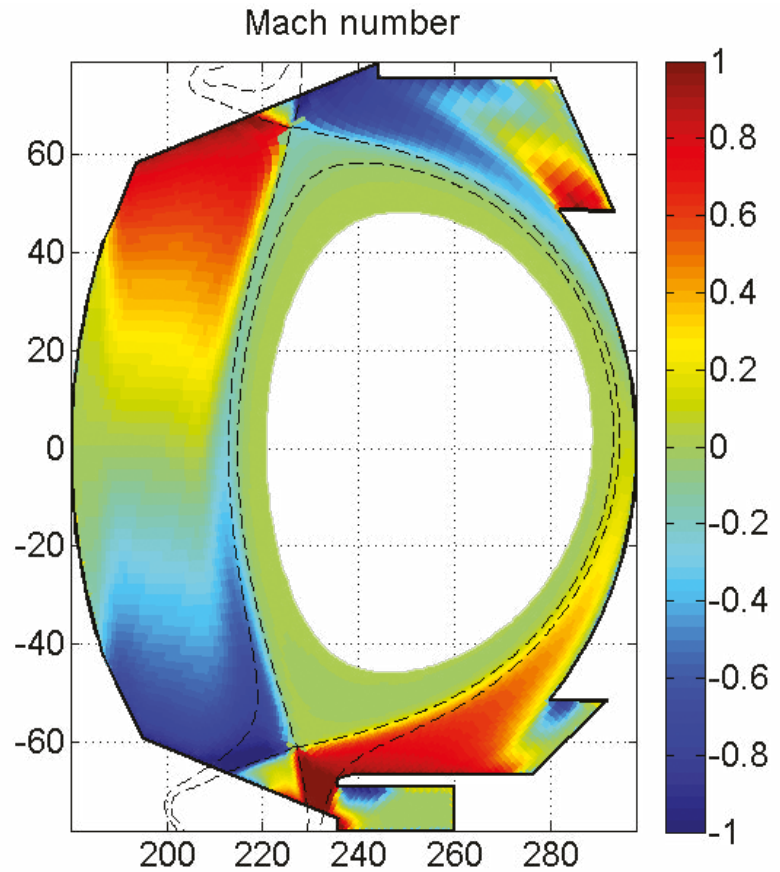


Fig. 2 : Calcul des écoulements parallèles dans la SOL du plasma de WEST [simulation SOLEDGE2D, (2018)]

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Sarazin,
«Physique des plasmas - 9e Festival de Théorie à Aix-en-Provence», *Reflets Phys.*, **56**, p. 40-41 (2018) ;
<https://doi.org/10.1051/refdp/201856040>
<http://www.festival-theorie.org/>
- [2] S. Cabanes, M. Le Bars, B. Favier,
«Au cœur des bandes de Jupiter», *Pour La Science*, n°480 (2017)
- [3] G.I. Barenblatt,
«Scaling», Cambridge University Press (2003)

NOTIONS UTILES #1

FUSION, PLASMAS ET TOKAMAKS

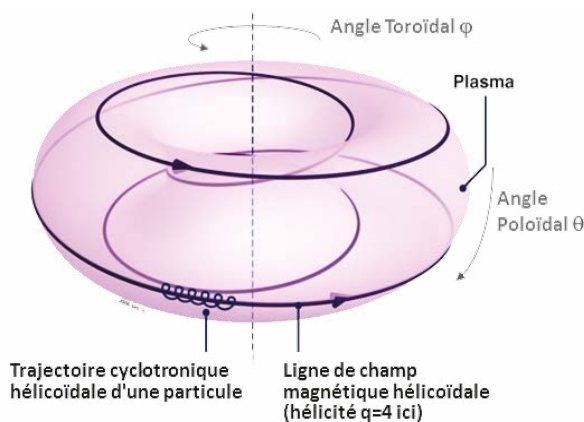
par Yanick Sarazin

Les recherches sur la fusion visent à produire de l'énergie à partir de réactions de fusion de noyaux atomiques légers, du deutérium et tritium en l'occurrence, isotopes de l'hydrogène. La production d'énergie vient de ce que le noyau d'hélium et le neutron ainsi produits sont plus légers que le combustible deutérium-tritium. Le différentiel de masse m est converti en énergie cinétique E selon la célèbre formule d'Einstein $E=mc^2$, c étant la vitesse de la lumière. Pour parvenir à vaincre la répulsion coulombienne et fusionner, les noyaux doivent être portés à des températures très élevées. Ce «gaz» où les électrons sont alors dissociés des noyaux prend le nom de plasma; il est sensible aux champs électrique et magnétique. La fusion par confinement magnétique utilise des champs magnétiques intenses, de quelques Teslas, pour confiner ce plasma dans un volume fini, en minimisant son interaction avec les parois.

Dans un tokamak, sous l'effet combiné de bobines poloidales (supraconductrices, comme dans WEST, ITER par exemple, non représentées dans la figure ci-dessous) et du courant toroïdal circulant dans le plasma, les **lignes de champ** magnétique sont des hélices qui s'enroulent autour de **surfaces magnétiques** emboîtées en forme de tore. La «séparatrice» est le nom donné à la dernière surface magnétique fermée, au-delà de laquelle les suivantes interceptent des éléments de paroi. Cette région

périphérique du plasma est appelée «**Scrape-Off Layer**» (**SOL**). Elle est le siège des interactions plasma-paroi.

En première approximation, les particules ont une trajectoire hélicoïdale autour des lignes de champ, dont le pas est inversement proportionnel à l'intensité du champ magnétique (voir Figure) : c'est le **mouvement cyclotronique** ou de Larmor. Le confinement est ainsi assuré dans la direction transverse aux surfaces magnétiques. Dans le cœur des plasmas d'ITER, les ions deutérium atteindront facilement une vitesse de l'ordre de mille kilomètres par seconde, et un **rayon de Larmor** de quelques millimètres. La vitesse des électrons est soixante fois (racine carrée du rapport des masses) plus grande, leur rayon de larmor soixante fois moindre. Si la température est de l'ordre de 10 à 20 kilo-électron-Volt (1 keV \sim 11.10⁶°C) au cœur du plasma, elle tombe à une centaine d'eV à la séparatrice, et quelques eV dans la SOL lointaine. ■



Vue schématique d'un plasma de tokamak.

RÉFÉRENCES

Sur la fusion par confinement magnétique :

J. Jacquiot,

«ITER et les recherches sur la fusion par confinement magnétique», *Reflets Phys.*, N°32, p. 19-25 (2013)

Généralités :

<http://irfm.cea.fr> → fusion

Le projet ITER:

<http://www.iter.org/>

Sur la géodynamique atmosphérique :

G. Rivière, P. Arbogast,

«Tempêtes hivernales des latitudes tempérées» *Reflets Phys.* N°57, p. 4-9 (2018)

Sur les plasmas interstellaires :

http://www.bu.edu/csp/files/2014/08/Zweibel_BU_2014-v2.pdf

NOTIONS UTILES #2

INSTABILITÉS ET TURBULENCE DANS LES PLASMAS DE TOKAMAKS

par Yanick Sarazin & Xavier Garbet

La **turbulence** observée dans les machines à fusion résulte d'instabilités qui saturent non-linéairement. La majorité des instabilités excitées dans les **plasmas** de tokamaks sont des instabilités d'interchange. Le mécanisme vient de ce que, dans les tokamaks, échanger un tube de flux (1) 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 (2). Considérons un fluide chauffé par le bas. Parce que plus chaud, le liquide du bas est plus léger que celui en surface, froid et lourd. Il est soumis à deux forces antagonistes: la poussée d'Archimède dirigée vers le haut, et les forces visqueuses qui s'opposent à tout mouvement. Au-delà d'un seuil dépendant notamment de la différence de températures entre haut et bas, la poussée d'Archimède est suffisante pour établir des rouleaux ou cellules de convection, qui assurent un transport de la chaleur beaucoup plus efficace que la conduction collisionnelle. On voit là apparaître deux caractéristiques importantes de l'instabilité : (i) l'existence d'un gradient

de température colinéaire à la gravité, et (ii) un seuil d'instabilité.

Une situation analogue existe dans les tokamaks: la topologie magnétique – plus exactement l'inhomogénéité du champ magnétique – génère en effet une gravité effective horizontale, associée entre autres à la force centrifuge. 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 quelques mètres de là. Dans la majorité des cas, ce gradient dépasse le seuil d'instabilité. Certaines fluctuations peuvent alors croître en amplitude (Figure 1), générant par la suite turbulence et transport par couplage non-linéaire.

Cette analogie avec Rayleigh-Bénard montre que la turbulence dans les plasmas de tokamak entretient un lien étroit avec celle des fluides non magnétisés. Mais les plasmas sont également plus complexes que les fluides classiques, ce qui leur confère une richesse supplémentaire :

- 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

une grosse boule de bowling. La faible inertie des électrons les rend 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 ω 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 également la neutralité électrique du plasma.

- 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 du 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. A leur tour, ces champs fluctuants rétroagissent sur les particules dont ils gouvernent la dynamique. Précisons tout de même que les fluctuations du champ magnétique sont de plusieurs ordres de grandeurs inférieures

au 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 de l'ordre de la vitesse des particules. Ce mécanisme, dont l'amortissement Landau (3) est l'une des manifestations, joue un rôle fondamental en physique des plasmas. 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 autour de surfaces particulières, appelées surfaces de résonance, dont la position est gouvernée par la topologie magnétique. ■

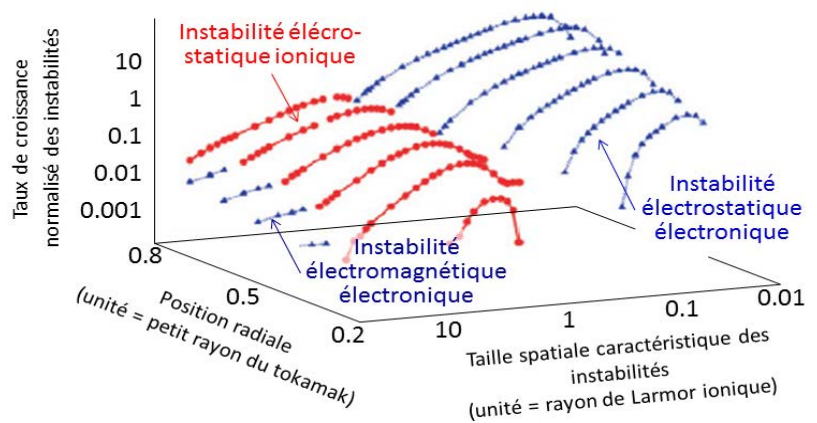


Fig. 1 : Exemple d'instabilités susceptibles de se développer dans des plasmas du tokamak ASDEX [1]

NOTES

- (1) Volume microscopique virtuel, de forme tubulaire, qui entoure une ligne de champ magnétique.
- (2) En fusion inertielle, c'est une instabilité analogue, appelée Rayleigh-Taylor, qui perturbe la compression isotropique des billes de combustible.
- (3) Physicien soviétique (1908-1968) surtout connu pour ses travaux sur les transitions de phase, Lev Landau a reçu le prix Nobel en 1962. Son ouvrage sur l'amortissement des ondes électroniques dans un plasma (amortissement Landau, 1946) a contribué à l'élaboration de la théorie des plasmas. Plus récemment, cet amortissement a été retrouvé dans un cadre rigoureux élargi par le mathématicien français Cédric Villani, qui a reçu la médaille Fields en 2010, notamment pour ces travaux.

RÉFÉRENCES

- [1] F. Jenko et al,
«Global and local gyrokinetic simulations of high-performance discharges in views of ITER» , *Nuclear Fusion*, **53** (2013) 073003

GLOSSAIRE

Avalanches : évènements de transport perpendiculaire au champ magnétique de confinement (plus précisément aux surfaces magnétiques). Leur dynamique s'apparente à celle de leurs homologues en matière granulaire (tas de sable), ou de systèmes dynamiques ayant des propriétés statistiques voisines.

Coefficients de transport : coefficients reliant les flux de particules, moment et chaleur aux gradients de densité, vitesse et température (cf. lois constitutives). S'apparentent à des coefficients de diffusion dans le cas d'une dynamique de type mouvement Brownien.

Cinétique (approche, description) : description des particules chargées du plasma en termes de fonctions de distribution, qui mesurent la probabilité de trouver une particule dans un petit volume de l'espace des phases, centré autour d'une position et d'une vitesse données.

Conductivité thermique : coefficient de proportionnalité entre flux de chaleur et gradient de température (loi de Fourier). On lui préfère parfois la diffusivité thermique (conductivité normalisée à la densité), comptée en mètres carrés par seconde, et apparentée à un coefficient de diffusion.

Cœur (de calcul) : unité de calcul miniaturisée. Elle est capable d'effectuer des opérations arithmétiques et logiques.

Écoulement zonal : écoulement moyen (constant sur une surface magnétique dans les tokamaks) azimutal (poloidal dans un tokamak) dépendant du temps. Communément rencontré dans les tokamaks (et stellarators), et les atmosphères planétaires (« jet streams »).

Fluide (approche, description) : l'évolution de chaque espèce du plasma (électrons et espèces ioniques) est modélisée par les équations de conservation régissant les différents « moments fluides », qui sont des quantités dynamiques évoluant dans l'espace à 3 dimensions. Les premiers de ces moments sont la densité, la vitesse fluide, et les températures parallèle et transverse au champ magnétique.

Gyrocinétique (approche, description) : modèle cinétique du plasma où le mouvement cyclotronique des particules est extrait des équations pour ne décrire que la dynamique la plus lente. Permet de réduire la dimensionnalité du problème.

Ligne de champ : courbe tangente au champ magnétique en tout point.

Lois constitutives : relations reliant les flux de particules, moment et chaleur aux gradients de densité, vitesse et température. Les plus connues sont les lois de Fick (flux de particule proportionnel au gradient de densité) et de Fourier (flux de chaleur proportionnel au gradient de température).

Magnéto-HydroDynamique (ou MHD) : description fluide du plasma dans laquelle l'ensemble des espèces sont représentées par un même fluide, dont les propriétés mélangent les caractéristiques des ions et des électrons. Les champs électrique et magnétique sont quant à eux régis par les équations de Maxwell.

Mouvement cyclotronique : mouvement d'une particule chargée en présence d'un champ magnétique. Si le champ magnétique est uniforme, cette trajectoire est une hélice dont le rayon est appelé rayon de Larmor (ou rayon de giration cyclotronique). Si le champ magnétique est faiblement inhomogène (rayon de Larmor petit devant l'échelle de variation du champ), la trajectoire reste voisine d'une hélice. Toutefois le centre du cercle de giration (centre-guide) dérive transversalement au champ magnétique.

Multithreading : type de modèle d'exécution qui permet à plusieurs travaux (threads) d'exister dans le contexte d'un processus de sorte qu'ils s'exécutent indépendamment mais partagent les ressources liées au processus (par exemple un espace en mémoire vive). Un thread maintient une liste d'informations privées pour son exécution propre. Ce type d'approche est bien adapté pour l'architecture de processeurs dite multi-cœurs.

Nœud : en informatique, un nœud désigne un objet référencé sur un réseau. Sur un supercalculateur, les nœuds de calcul disposent de la connectique et de la couche logicielle nécessaires pour mettre leurs ressources à disposition d'autres nœuds. Un nœud intègre typiquement un ou plusieurs processeurs.

Processeur : depuis l'apparition il y a quelques années des processeurs multi-cœurs, le vocabulaire a évolué. De nos jours, processeur désigne le circuit imprimé qui héberge un certain nombre de cœurs.

Plasma : gaz chaud et ionisé. Les plasmas sont souvent considérés comme le 4^{ème} état de la matière (des états solides, gazeux et liquides).

Raideur : caractérise la résistance d'un plasma à s'écarter d'un équilibre thermodynamique. En pratique la raideur se matérialise par la difficulté à augmenter les gradients de densité et température au-delà des valeurs qui correspondent au seuil d'instabilité.

Rayon de Larmor ou rayon de giration cyclotronique : taille transverse au champ magnétique de la trajectoire d'une particule chargée (voir Mouvement cyclotronique).

Résonances Landau : résonances onde/particules du plasma. Jouent un rôle important dans les processus d'échange d'énergie entre champ électromagnétique et particules du plasma.

SOL (pour Scrape-Off Layer) : couche limite à l'interface entre le plasma et la paroi d'un tokamak. Elle correspond à la région où les lignes de champ interceptent les éléments de paroi.

Supercalculateur : ordinateur possédant des ressources et des performances de calcul supérieures à celles d'un ordinateur ordinaire. Ses performances sont typiquement mesurées en opérations en virgule flottante par seconde (FLOPS).

Surface magnétique : surface sur laquelle s'enroule une ligne de champ hélicoïdale dans un tokamak (ou un stellarator), lorsque son taux d'enroulement est irrational. Les surfaces magnétiques sont des tores, qui s'emboîtent autour d'un axe magnétique (voir encart).

Temps de confinement de l'énergie : temps caractéristique que met la chaleur emmagasinée dans un système pour quitter ce dernier. Dans les plasmas de fusion par confinement magnétique, ce temps mesure le pouvoir isolant des surfaces magnétiques. Il décroît quand le transport turbulent augmente.

Transition L-H : transition entre deux régimes de confinement dans un tokamak (ou un stellarator). Le régime H (pour « High confinement », par opposition à « L » pour « Low confinement ») se caractérise par un gradient élevé de pression dans la région d'interface entre plasma et paroi (« piédestal »).

Turbulence : état désordonné d'un fluide ou d'un plasma. En général associé à l'existence d'une dynamique chaotique de tourbillons en hydrodynamique, mais peut aussi incorporer des ondes en plasma magnétisé (ou dans les atmosphères planétaires).

Viscosité : phénomène de résistance à l'écoulement. La viscosité d'un fluide ou d'un plasma est mesurée quantitativement par un coefficient de viscosité cinématique, compté en mètres carrés par seconde. Il s'apparente à un coefficient de diffusion pour la quantité de mouvement.

CONTRIBUTEURS

#1



Xavier Garbet
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#1



Peter Beyer
AIX-MARSEILLE UNIV.,
CNRS, PIIM UMR 7345,
MARSEILLE, FRANCE

#2



Yanick Sarazin
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#7

#2



Yann Camenen
AIX-MARSEILLE UNIV.,
CNRS, PIIM UMR 7345,
MARSEILLE, FRANCE

#3



Laure Vermare
LPP, CNRS, ECOLE POLYTECHNIQUE, UPMC
UNIV PARIS 06, UNIV. PARIS-SUD,
UNIV. PARIS-SACLAY, SORBONNE UNIVERSITES,
PALAISEAU, FRANCE.

#3



Nicolas Fedorczak
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#4



Guillaume Latu
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#4



Virginie Grangirard
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#5



Patrick Tamain
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#5



Eric Serre
AIX-MARSEILLE UNIV.,
CNRS, CENTRALE MARSEILLE, M2P2,
MARSEILLE, FRANCE

#6



Guilhem Dif-Pradalier
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

#6



#7

Philippe Ghendrih
CEA, IRFM,
F-13108 SAINT-PAUL-LEZ-DURANCE, FRANCE

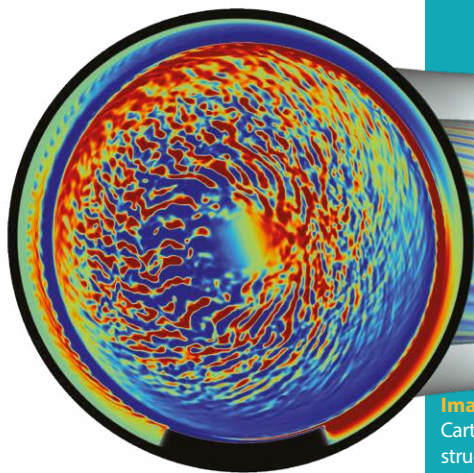
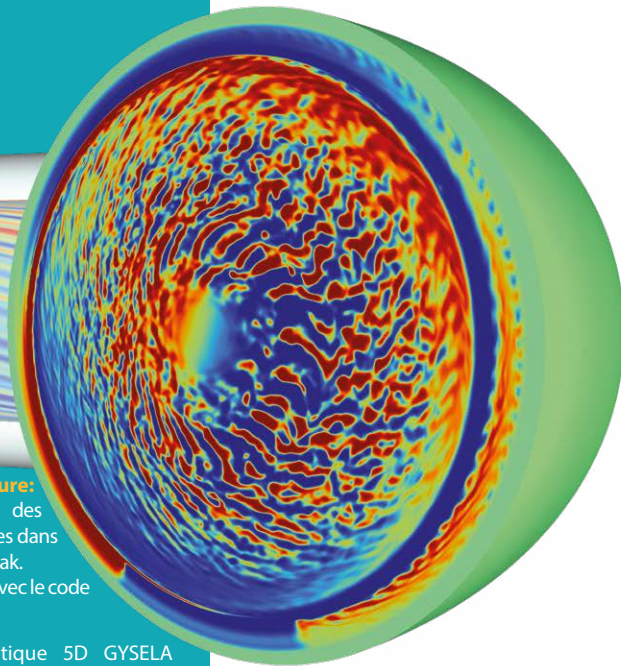


Image de couverture:

Carte instantanée des structures turbulentes dans un plasma de tokamak. Simulation réalisée avec le code GYSELA.



Le code gyrocinétique 5D GYSELA (pour «GYrokinetic SEmi-LAgrangian») est développé au CEA en lien étroit avec l'INRIA, les Universités de Bordeaux et Strasbourg et l'institut Max-Planck en Allemagne. Il repose sur un schéma numérique original combinant les avantages des méthodes eulérienne et lagrangienne. Il vise à comprendre, prédire et si possible contrôler la turbulence et le transport dans les plasmas de tokamak. En outre, l'efficacité de sa parallélisation massive lui vaut d'être régulièrement utilisé pour tester et mesurer les performances des plus gros supercalculateurs européens académiques - réseau PRACE en Europe et réseau GENCI en France.



RETROUVEZ LA
VERSION AUGMENTÉE
SUR LE SITE

irfm.cea.fr/sciencesenfusion

Éditeur : Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique
CEA-Cadarache, bâtiment 513 - 13108 St Paul lez Durance Cedex - FR

Directeur de la publication : Alain Bécoulet

Coordinateur scientifique : Xavier Garbet

Comité de rédaction : Michel Chatelier, Sylvie Gibert, Yanick Sarazin

Comité éditorial : Alain Bécoulet, Jérôme Bucalossi, Michel Chatelier, Xavier Garbet, Sylvie Gibert, Gerardo Giruzzi, André Grosman, Frédéric Imbeaux, Yannick Marandet

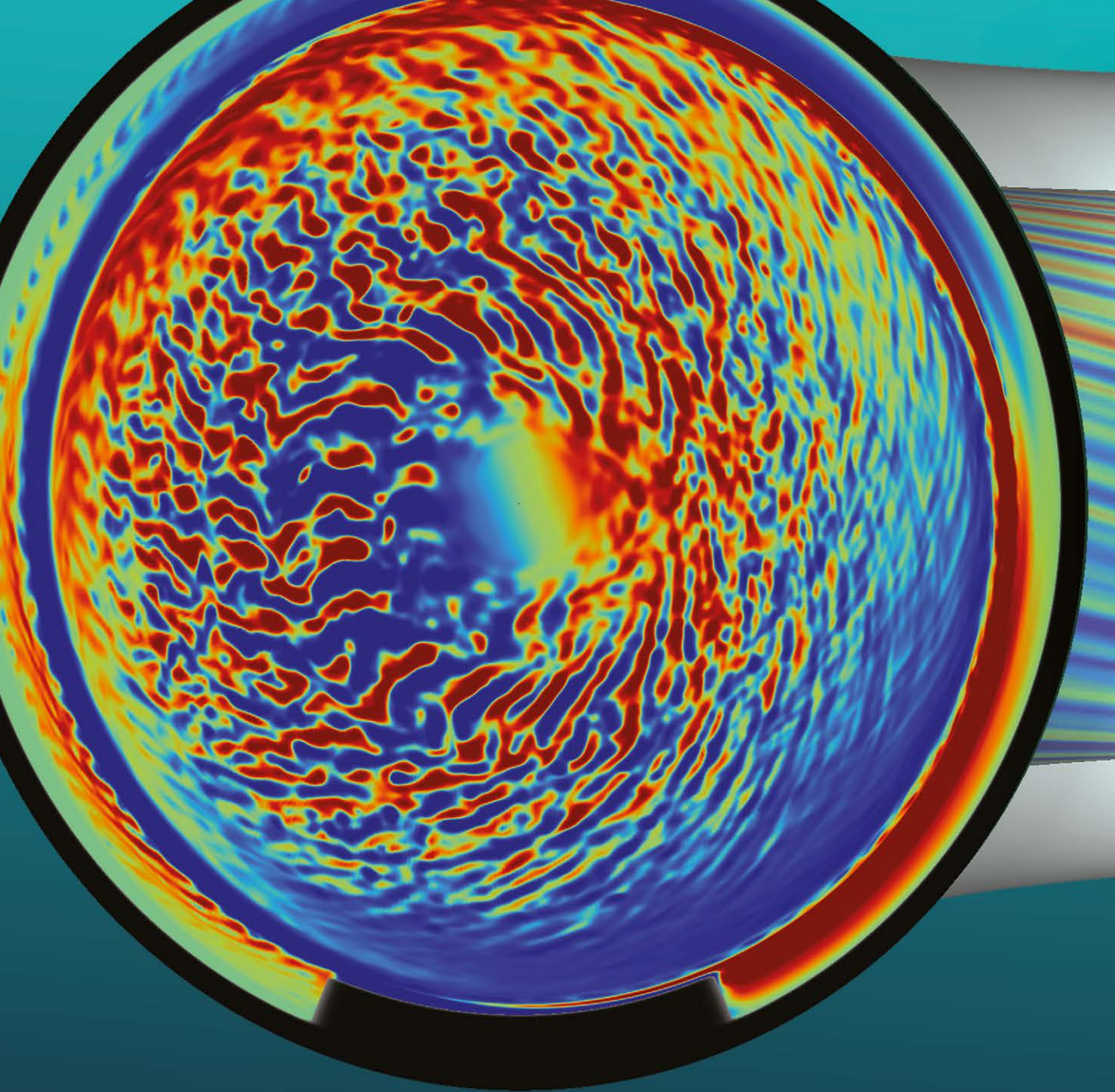
Diffusion : Véronique Poli - Abonnement gratuit sur simple demande à sciencesenfusion@cea.fr

Réalisation : Christophe Roux

ISSN : 2646-5825

Impression : Imprimerie Nouvelle - Aix en Provence





irfm.cea.fr



www.fr-fcm.fr