

Dynamo céleste

L'interaction de particules émises par Io avec l'atmosphère jovienne produit une tache qui éclaire le fonctionnement du générateur électrique Io-Jupiter.

En 1979, l'exploration du Système solaire par la sonde *Voyager 1* révélait le volcanisme actif de Io, le satellite galiléen le plus proche de Jupiter. Avec la Terre, c'est le seul exemple d'une activité volcanique. Ce volcanisme est une source de particules chargées qui se déplacent le long des lignes de champ magnétique reliant Jupiter à son satellite, formant ainsi un circuit électrique. La détection récente d'une tache de lumière ultraviolette à la surface de Jupiter précise la nature du circuit électrique qui relie ces astres.

Une bulle magnétique isole de l'extérieur les planètes à champ magnétique. La protection n'est toutefois pas totale : des particules chargées du vent solaire peuvent s'engouffrer vers les pôles en suivant les lignes de champ magnétique. Lorsqu'elles arrivent dans l'atmosphère, ces particules excitent par collision les molécules atmosphériques, lesquelles, en se dés excitant, émettent un rayonnement visible et ultraviolet – les aurores polaires. L'atmosphère, localement chauffée par ces « précipitations », émet aussi un rayonnement infrarouge.

Chaque seconde, Io éjecte dans son atmosphère une tonne de gaz et de poussières. Située à 430 000 kilomètres de Jupiter, Io parcourt son orbite en 42 heures, tandis que Jupiter tourne sur elle-même en une dizaine d'heures, entraînant sa magnétosphère. Le champ magnétique jovien et les particules qu'il transporte balayent à plus de 50 kilomètres par seconde la matière éjectée par Io.

Le rayonnement solaire et les collisions ionisent le gaz émis par Io, dont une partie forme l'ionosphère et l'autre, entraînée par la rotation des lignes de champ magnétique de Jupiter (le long desquelles elles se meuvent), forme un tore de particules chargées (un plasma) qui s'étend à quelques rayons joviens le long de son orbite.

Si Io ne possédait pas d'ionosphère, elle serait neutre et les lignes de champ la traverseraient inchangées. Comme l'ionosphère de Io est conductrice, les lignes de champ ne peuvent y pénétrer et elles se déforment. Une tension magnétique apparaît de la même façon qu'un élastique qu'on essaierait de faire passer à travers une sphère dure se tendrait. Puis comme l'élastique qui, de plus

en plus tendu, glisserait d'un côté ou l'autre de la sphère, la ligne de champ glisse sur l'ionosphère de Io. La ligne de champ se détend et des oscillations, les ondes d'Alfvén, sont ainsi créées. Ces ondes se propagent le long des lignes de champ vers Jupiter à une vitesse qui dépend de la densité en particules du milieu traversé.

Les ondes d'Alfvén ont un champ électrique associé, parallèle aux lignes de champ magnétique. Durant leur trajet jusqu'à Jupiter, le champ électrique accélère les particules du tore de plasma créant un courant. Les particules énergétiques tombent alors sur Jupiter, produisant deux taches symétriques, à 65° de latitude Nord et Sud. La première observation de la tache Sud dans l'ultraviolet nous permet de connaître sa position précise, nécessaire à la détermination de paramètres physiques de la magnétosphère.

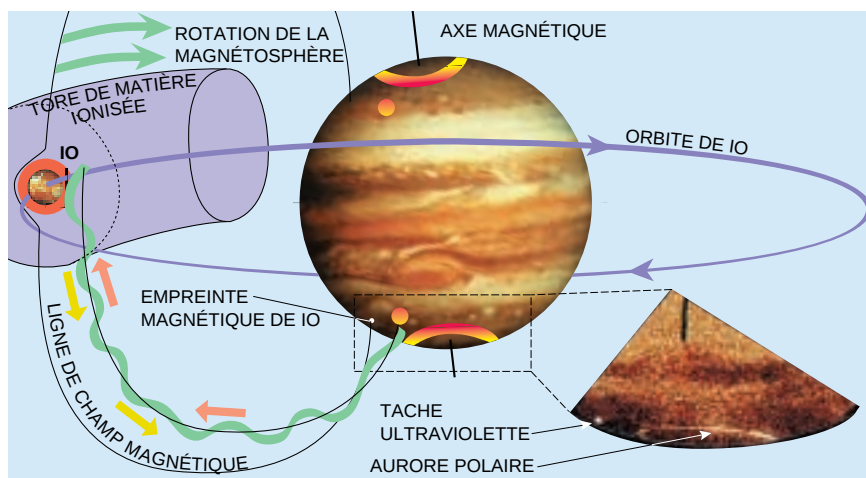
UN PUISSANT GÉNÉRATEUR DE COURANT

Les sondes *Voyager* ont mesuré l'intensité du courant circulant entre Io et Jupiter : un million d'ampères. Comme le mouvement de Io dans le champ magnétique de Jupiter engendre une différence de potentiel supérieure à 500 000 volts, la puissance électrique du générateur électrique Io-Jupiter est de 10^{12} watts (par hémisphère).

La puissance des précipitations de particules, mesurée par la luminosité de la tache ultraviolette, représente la moitié de la puissance totale et permet de déduire l'énergie des particules incidentes : entre 1 et 200 kiloelectronvolts pour les électrons et entre 25 et 500 kiloelectronvolts pour les protons. Pour atteindre ces énergies, les particules qui avaient initialement des énergies de quelques électronvolts ont été efficacement accélérées.

Comme la magnétosphère tourne beaucoup plus vite que Io, les ondes d'Alfvén se forment en avant de la position de Io sur son orbite. C'est pourquoi la tache ultraviolette est décalée par rapport à l'empreinte magnétique de Io. Alors qu'on pensait que cet écart était fixe, nous avons observé qu'il variait entre sept et douze degrés en longitude sur Jupiter. Cela signifie que les conditions de la formation des ondes d'Alfvén, de la propagation de ces ondes et de l'accélération des particules changent. Par exemple, cette variation pourrait s'expliquer par une modulation de la vitesse des ondes d'Alfvén dans le tore de Io, résultant d'une variation de la densité du tore.

Philippe ZARKA et Renée PRANGÉE, Observatoire de Meudon et IAS, Orsay



La magnétosphère de Jupiter tourne quatre fois plus vite que Io sur son orbite. Le volcanisme actif de Io éjecte du gaz qui, ionisé, forme une ionosphère conductrice (en rouge) et un tore de particules le long de son orbite. Les lignes de champ magnétique, qui ne peuvent pénétrer l'ionosphère, se tendent et la contournent. Leur détente produit alors des ondes d'Alfvén (en vert), qui se propagent jusqu'à Jupiter et accélèrent des particules. Ces dernières tombent sur l'atmosphère jovienne formant une tache visible dans l'ultraviolet décalée par rapport à l'empreinte magnétique de Io.

La fontaine d'atomes

L'horloge la plus précise au monde utilise une fontaine d'atomes de césium.

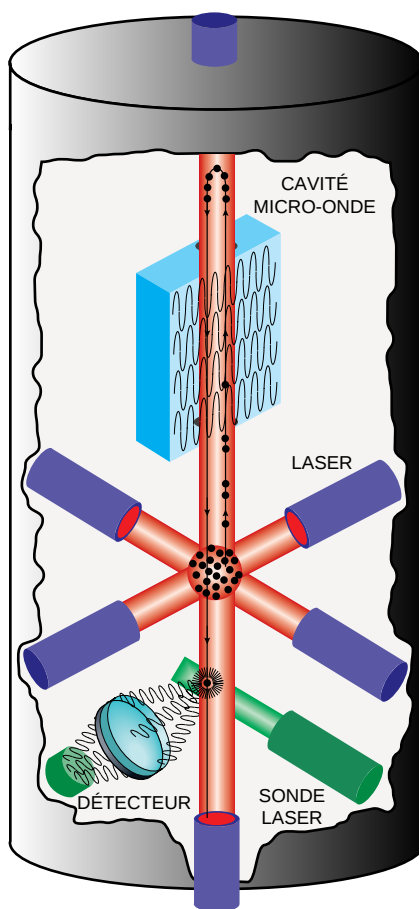
En 3 000 ans d'évolution, on est passé des horloges à eau, ou clepsydres, aux atomes : à l'Observatoire de Paris, André Clairon et ses collègues mesurent le temps en jetant en l'air des atomes de césium refroidis par laser. Leur horloge atomique est trois fois plus précise que les plus précises des horloges du moment : elle dérive de moins de une seconde en dix millions d'années.

Le fonctionnement des horloges atomiques repose sur la quantification de l'énergie des atomes : un atome change d'énergie en absorbant ou en émettant un photon (ou grain de lumière) de fréquence particulière. L'étalon primaire de temps est fondé sur la fréquence de transition entre deux états d'énergies très proches de l'énergie minimale de l'atome de césium : par définition, la seconde est égale à 9 192 631 770 fois la période (l'inverse de la fréquence) de cette transition.

Dans les horloges atomiques classiques, on utilise un jet d'atomes de césium, à une température de 120 degrés, qui se déplacent à des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde. Un aimant dévie les atomes qui sont dans le niveau d'énergie minimale et arrête les autres. Les atomes déviés passent ensuite dans une cavité où sont émises des micro-ondes de fréquence égale à la fréquence de la transition atomique que l'on veut provoquer : certains atomes absorbent un photon, puis sont déviés par un autre aimant et détectés. Un circuit asservit la fréquence des micro-ondes pour maximiser le nombre d'atomes qui changent d'état. On stabilise ainsi la fréquence appliquée dans la cavité micro-onde, qui est alors la fréquence naturelle de transition des atomes. Pour mesurer le temps, on utilise la fréquence des micro-ondes appliquées.

Si, en théorie, la fréquence d'une transition atomique est très stable, en pratique, les perturbations extérieures (champ magnétique, collisions entre atomes, etc.) et le mouvement des atomes décalent les fréquences de transition : la transition se produit pour toute une gamme de fréquence. Afin de stabiliser les horloges, on cherche donc à isoler et à ralentir les atomes.

Dans leur fontaine atomique, A. Clairon et ses collègues ont utilisé les récentes techniques de refroidissement par laser pour ralentir les atomes jusqu'à des vitesses de l'ordre du centimètre par seconde. Les atomes sont ensuite lancés dans la cavité, ce qui permet de diviser par 100 la gamme des fréquences de transitions par rapport aux horloges classiques.



Six lasers piègent et refroidissent des atomes de césium. Toutes les secondes, les faisceaux verticaux lancent un paquet d'atomes qui passe deux fois dans une cavité dans laquelle des micro-ondes portent des atomes à un niveau d'énergie supérieur. Le système de mesure (en vert) détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état en absorbant un photon micro-onde.

TOUJOURS PLUS PRÉCIS

Depuis 1985, on sait ralentir un jet d'atomes en l'éclairant par un laser dont les photons se propagent en sens inverse du jet : lorsque l'énergie d'un photon est égale à l'énergie requise pour faire changer un atome d'état d'énergie, ce photon peut être absorbé, ralentissant l'atome. Afin de compenser le décalage dû au mouvement des particules, on accorde le faisceau laser à une fréquence légèrement inférieure à celle de la transition utilisée, qui pour le césium est nommée D_2 . Située dans l'infrarouge, celle-ci permet l'emploi de lasers communs.

Dans la fontaine atomique, six lasers piègent et refroidissent les atomes à quelques millièmes de kelvin (presque le zéro absolu). Ces atomes sont ensuite lancés vers le haut, par paquets de un million ; puis, on interrompt les lasers verticaux, de sorte que les atomes soient soumis à la seule force de gravitation. Lors de son ascension et de sa descente, le paquet d'atomes traverse une cavité micro-onde accordée à la fréquence de transition atomique. Sous la cavité, on détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état, et un circuit de rétroaction, analogue à celui utilisé dans les horloges atomiques classiques, asservit la fréquence des micro-ondes émises.

Pour mesurer la stabilité de leur nouvelle fontaine, les physiciens ont comparé la fréquence obtenue à celle d'un maser (champ micro-onde auto-entretenu) à hydrogène, horloge atomique très stable à l'échelle de la journée. Après trois heures de comparaison, on a mesuré une stabilité relative de 3×10^{-15} . Afin de poursuivre leurs comparaisons plus longtemps, les physiciens construisent une seconde fontaine atomique. Ils espèrent ainsi mesurer une stabilité relative 50 fois supérieure à celle des horloges classiques.

Peut-on ralentir les atomes plus que cela n'a déjà été fait ? Oui, mais alors, ils tombent, entraînés par la gravité terrestre. Pour ralentir cette chute, on devrait se placer en microgravité, ce qui permettrait de multiplier la stabilité par dix. Les atomes se déplaceraient alors à quelques millimètres par seconde, ce qui correspond à une durée d'interaction dans la cavité de plusieurs secondes. Des atomes ont été récemment refroidis en microgravité, et une fontaine en cours de réalisation devrait voler à la fin 1996.

En outre, on améliorerait encore la stabilité en utilisant des fréquences de transition supérieures, telles qu'on en a trouvé pour l'atome d'argent. Des atomes d'argent refroidis par laser et placés en microgravité seront-ils les étalons temporels de demain ? □



POUR LA
SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

Les impossibles
de
la finance

avec
Christian Walter,
actuaire au
Crédit lyonnais,
enseignant à l'ESSEC.

LE SAMEDI 11 mai 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

π , e^π et $\Gamma(1/4)$

Démonstration d'une conjecture centenaire.

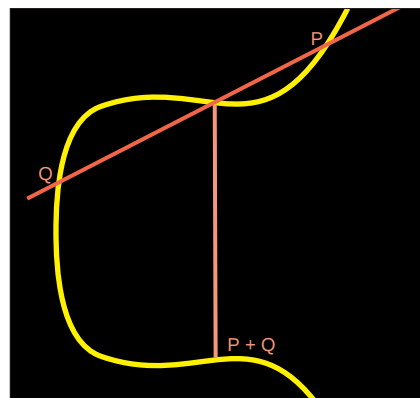
La démonstration du théorème de Fermat, par Andrew Wiles, avait mis en vedette les courbes elliptiques, composées de points dont les coordonnées x et y vérifient des équations de la forme $y^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$. Aujourd'hui des mathématiciens français et russe obtiennent de nouveaux résultats liés à ces courbes et à l'«invariant modulaire» qui leur est associé.

Qu'est-ce que l'invariant modulaire ? Tout commence par le paramétrage des courbes elliptiques : on sait qu'on peut aussi les définir par un seul paramètre, un nombre complexe z (un nombre que l'on associe à un point d'un plan, au lieu de l'associer à un point d'une droite) et par une fonction p dite de Weierstrass. L'abscisse x de tout point de la courbe s'écrit sous la forme $p(z)$, tandis que l'ordonnée correspondante s'écrit sous la forme $p'(z)$, où p' est la fonction dérivée de p .

Ce paramétrage étant fait, les mathématiciens ont défini une sorte d'addition des points de la courbe, en associant un point noté $P + Q$ à deux points P et Q de la courbe : si le point P a pour coordonnées $(p(z), p'(z))$ et si le point Q a pour coordonnées $(p(t), p'(t))$, alors le point $P + Q$ a pour coordonnées $(p(z+t), p'(z+t))$. Géométriquement, le point $P + Q$ s'obtient en traçant la droite qui passe par les points P et Q ; cette droite coupe la courbe elliptique en un troisième point, dont le symétrique par rapport à l'axe des abscisses est la somme $P + Q$.

Peut-on classer les diverses courbes elliptiques ? Les mathématiciens utilisent à cette fin la fonction p et ses périodes. Une fonction d'une variable réelle, comme le sinus, a une période unique, égale en l'occurrence à 2π ; mais les fonctions p sont des fonctions de la variable complexe, et elles ont deux périodes de base. Le nombre $J(q)$ nommé invariant modulaire est défini à partir de leurs périodes ; il indique les ressemblances entre les courbes elliptiques : deux courbes ayant le même invariant modulaire ont des comportements identiques pour la loi d'addition de leurs points.

En 1969, Kurt Mahler, de l'Université de Canberra, avait conjecturé que l'invariant modulaire $J(q)$ est transcendant quand q est algébrique. Un nombre est transcendant s'il n'est pas algébrique, c'est-à-dire s'il n'est racine d'aucune



On définit une addition de points appartenant aux courbes elliptiques. Pour classer de telles courbes selon la façon dont leurs points s'additionnent, on utilise une fonction nommée invariant modulaire.

équation polynomiale à coefficients entiers. S'il n'est pas besoin d'être grand mathématicien pour vérifier que $\sqrt{2}$ est algébrique (puisque'il est racine de l'équation $x^2 = 2$), la démonstration de la transcendance d'un nombre est souvent très difficile : il a fallu attendre 1882 pour savoir que le nombre π est transcendant. La conjecture de Mahler a intéressé de nombreux théoriciens des nombres : en démontrant cette conjecture, on obtient la transcendance d'une famille infinie de nombres.

Avec Katia Barré-Sirieix, Guy Diaz et Georges Philibert, nous avons démontré la conjecture de K. Mahler en février 1995. Notre résultat a fait quelque bruit dans la communauté mathématique, parce qu'il résolvait un problème ancien, mais il a surtout ouvert une voie nouvelle pour l'étude de questions difficiles, et il est à l'origine de résultats spectaculaires : Yuri Nesterenko, de l'Université de Moscou, talonné par Patrice Philippon, de l'Université Paris VI, ont démontré l'indépendance algébrique des nombres π , e^π et $\Gamma(1/4)$, où la fonction Γ d'Euler prolonge la fonction factorielle aux nombres fractionnaires. Cela signifie que, si P est un polynôme de trois variables à coefficients entiers non tous nuls, le nombre $P(\pi, e^\pi, \Gamma(1/4))$ n'est pas nul. L'indépendance algébrique de π et e^π qui découle du travail de Y. Nesterenko et P. Philippon est un résultat dont les mathématiciens rêvaient depuis près d'une centaine d'années !

François GRAMAIN
Université de Saint-Étienne

La végétation par satellite

On étudie les échanges de carbone de la biosphère continentale en suivant les variations de couverture végétale du Globe.

Depuis 1750 environ, l'humanité rejette une quantité croissante de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. Une partie du gaz libéré est fixée par les océans ou par les plantes et les sols, mais le reste s'accumule dans l'atmosphère, augmentant l'effet de serre et contribuant au réchauffement de la planète. Cette accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sera-t-elle ralentie ou amplifiée par la végétation dans les prochaines décennies ? Pour étudier cette question, notre équipe s'est associée à celle de Gérard Dedieu, du Centre d'études spatiales de la biosphère, à Toulouse : ensemble, nous avons utilisé des capteurs embarqués à bord de satellites pour déterminer la production de matière organique par l'ensemble de la végétation mondiale, puis les échanges de dioxyde de carbone entre la végétation et l'atmosphère.

Les plantes fabriquent de la matière organique par photosynthèse en fixant le dioxyde de carbone de l'atmosphère, grâce à l'énergie solaire. Une partie de la biomasse formée est consommée par les herbivores, qui nourrissent eux-

mêmes des carnivores. Puis, lorsque les plantes et les animaux meurent, leur matière organique est décomposée en éléments minéraux assimilables par les plantes. Pendant la saison de croissance, la photosynthèse l'emporte sur la respiration des végétaux et des animaux, et les écosystèmes accumulent du carbone, qu'ils extraient de l'atmosphère. C'est l'inverse pendant la mauvaise saison.

Sur les continents, la photosynthèse n'a lieu que si des feuilles vertes absorbent le rayonnement solaire. Nous avons eu recours aux observations par satellite pour distinguer les feuilles vertes du sol nu : les feuilles, en effet, réfléchissent très peu le rouge (absorbé par la chlorophylle) et beaucoup le proche infrarouge (à cause des interfaces air-eau dans les feuilles) ; en revanche, les sols et les roches réfléchissent à peine plus le proche infrarouge que le rouge. On a donc construit des indices de végétation permettant, à partir de mesures par satellites, de calculer la fraction de sol occupée par de la végétation, puis le rayonnement solaire absorbé par cette dernière.

Le problème est un peu compliqué par l'atmosphère : d'une part, on doit

éliminer les zones couvertes de nuages, ce qui est un phénomène fréquent en zone équatoriale ; d'autre part, le contenu de l'air en vapeur d'eau et en aérosols modifie le spectre du rayonnement reçu par le satellite et impose des corrections atmosphériques.

Malgré ces difficultés, nous avons établi des cartes mensuelles du rayonnement solaire absorbé par la végétation, avec une résolution spatiale de un degré de latitude et de longitude. Nous avons ensuite calculé la photosynthèse qui, en première approximation, est égale au produit du rayonnement absorbé par une efficacité de conversion biologique. Cette efficacité a été prise identique pour tous les types de végétation sur la base de données expérimentales. Nous avons ensuite calculé la respiration des plantes, qui dépend de la température et de la quantité de biomasse qui respire, et nous avons finalement obtenu la production de biomasse sur l'ensemble des continents (voir la figure).

ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

Revenons à la question initiale : comment évolue cette production végétale ? Chez la plupart des plantes, une augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone accroît la photosynthèse et la production de biomasse. On s'attend donc à ce que la végétation modère l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en stockant un excédent de carbone dans la biomasse et dans la matière organique des sols ; toutefois l'effet observé fluctue beaucoup selon la température annuelle moyenne, la pluviométrie, etc. Notre suivi, année par année, du couvert végétal est en cours de corrélation avec les mesures globales de la concentra-

tion atmosphérique en dioxyde de carbone. Il restera à préciser si l'accroissement de production végétale est durable, ce qui est étudié dans de nombreux laboratoires dont le nôtre et celui de L. Kergoat, au CESBIO de Toulouse, qui simulent l'état de la couverture végétale à partir des seules données du climat et de la composition atmosphérique.

Bernard SAUGIER

et Anne RUMY
Laboratoire
d'écophysiologie
végétale, (URA
1492) Orsay

