

Courir sur l'eau

Un lézard sur coussins d'air.

La foi est-elle indispensable pour marcher sur les eaux? Pas pour le basilic (*Basiliscus basiliscus*), petit lézard Sud-américain : il court sur l'eau en s'appuyant sur des coussins d'air qui se forment sous ses pattes.

Jim Glasheen et Thomas McMahon, de l'Université Harvard, ont capturé des basilics au Costa Rica et les ont ramenés aux États-Unis, afin de filmer leur course à la surface d'un aquarium. Les images ainsi enregistrées ont permis l'analyse des mouvements effectués par les animaux pour se maintenir en surface.

Chaque pas se décompose en trois étapes. D'abord, la patte frappe l'eau. Ensuite, elle s'enfonce un peu sous la surface, en s'appuyant sur une poche d'air qu'elle maintient sous elle, comme un verre retourné que l'on plonge dans l'eau. Enfin, le lézard relève sa patte avant que la poche d'air ne disparaisse.

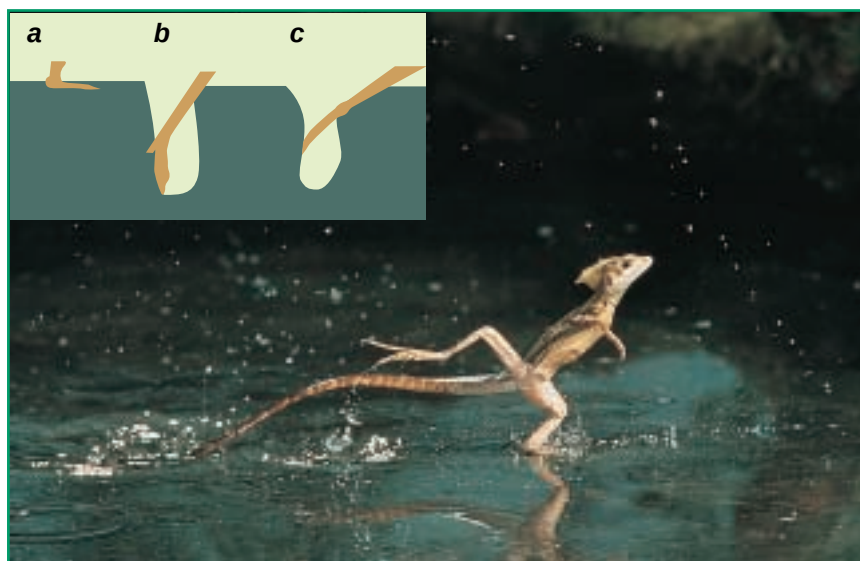
Au cours des deux premières étapes, des forces verticales dirigées vers le haut s'exercent sur la patte du lézard. Lorsque la patte frappe l'eau, elle est repoussée par une force réactive égale à celle qu'elle exerce. Lorsqu'elle s'enfonce, la poussée d'Archimède tend à la faire remon-

ter. La bulle d'air qui se forme autour d'elle et qui s'enfonce aussi dans l'eau augmente la masse d'eau déplacée : la poussée d'Archimède est plus grande que celle qui s'exercerait sur la patte seule. Enfin, le lézard relève sa patte avant qu'elle ne soit entièrement au contact de l'eau : les frottements visqueux sont ainsi réduits et l'animal n'a pas d'effort à fournir pour s'arracher à l'eau.

Les biologistes ont fabriqué, en aluminium, une réplique fidèle d'une patte de lézard. Ils en ont mesuré les caractéristiques hydrodynamiques en lui faisant frapper l'eau à différentes vitesses. Ils en ont déduit les valeurs des forces exercées par l'eau, à chaque étape du mouvement, qui dépendent surtout des vitesses auxquelles la patte du lézard frappe l'eau et s'y enfonce.

Les calculs montrent que le battement et l'enfoncement des pattes dans l'eau suffisent à compenser le poids du basilic, d'environ 90 grammes. En outre, pour les basilics de taille moyenne, qui font un pas tous les six dixièmes de seconde, c'est lors de l'enfoncement dans l'eau que la poussée vers le haut est la plus grande. De 77 à 87 pour cent de la quantité de mouvement nécessaire pour empêcher l'animal de couler sont fournis à ce moment.

En courant de la sorte, un homme pourrait-il se maintenir à la surface de l'eau par ses propres moyens? Les pieds d'un athlète de 80 kilogrammes qui ferait une foulée en 0,26 seconde devraient s'enfoncer dans l'eau à plus de 100 kilomètres à l'heure. La puissance requise pour un tel exercice est 15 fois supérieure à celle d'un sprinter de haut niveau. La prière serait-elle plus efficace?



Le basilic, un lézard Sud-américain, court à la surface de l'eau. Ses pas se décomposent en trois phases (en haut). La patte (en marron) frappe d'abord l'eau (a). Puis elle s'enfonce sous l'eau en s'appuyant sur une poche d'air (b). Enfin, la patte est relevée avant que la poche d'air ne disparaisse (c). L'animal est maintenu hors de l'eau principalement grâce aux forces de réaction qui s'exercent lors de la deuxième phase.

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 désexcitant, 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.

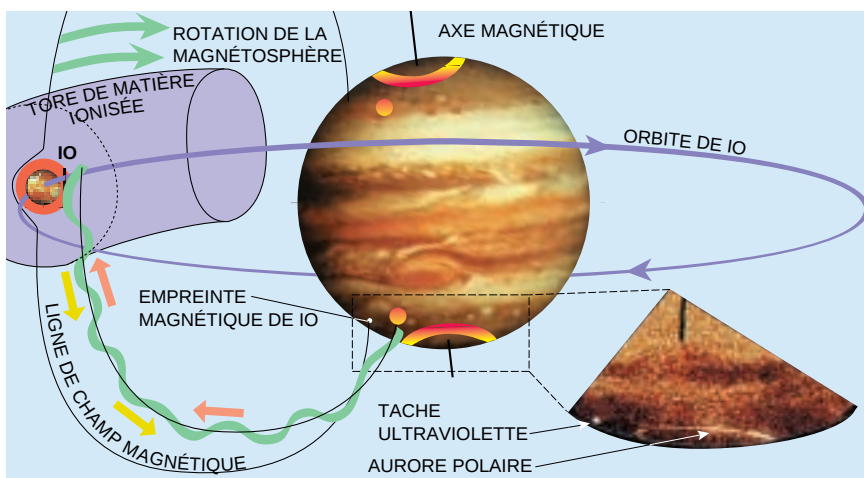
UN PUISSANT GÉNÉRATEUR DE COURANT

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 kiloélectronvolts pour les électrons et entre 25 et 500 kiloélectronvolts 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.

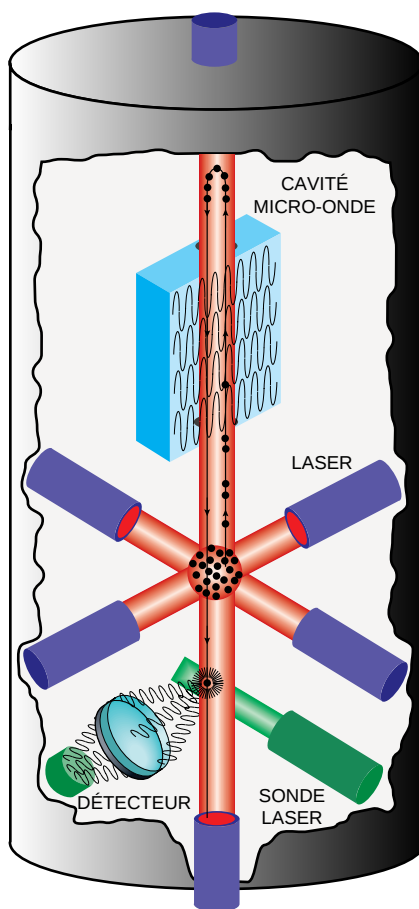
En 3 000 ans d'évolution, on est passé des horloges à eau, ou clepsydres, aux atomes : à l'Observatoire de Paris, André Clairon et ses collègues mesurent le temps en jetant en l'air des atomes de césium refroidis par laser. Leur horloge atomique est trois fois plus précise que les plus précises des horloges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