

Satellites d'astéroïdes

Les passages répétés d'astéroïdes près de la Terre forment et détruisent les astéroïdes binaires.

Sur la Terre, parmi les 28 cratères d'impacts connus pour leur diamètre supérieur à 20 kilomètres, trois sont formés par des impacts simultanés de deux astéroïdes de tailles comparables. En simulant les trajectoires d'astéroïdes en orbite près de la Terre, les astronomes américains William Bottke et Jay Melosh, montrent que des passages répétés près de la Terre brisent des astéroïdes en deux, ce qui expliquerait le nombre d'impacts doubles observés.

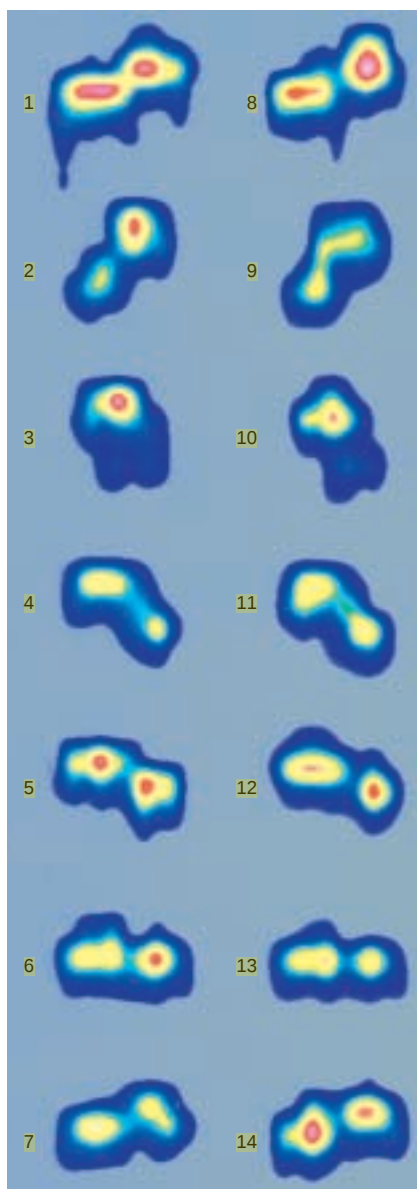
Les astronomes utilisent des techniques d'imagerie radar pour observer la structure des astéroïdes dont l'orbite approche suffisamment celle de la Terre. En 1989, les images radar de l'astéroïde Castalia révèlent sa forme allongée, avec un étranglement en son milieu : cet astéroïde pourrait être composé de deux corps en contact ou de deux corps proches orbitant l'un autour de l'autre (système binaire aux composantes serrées). En 1992, on note une structure analogue pour l'astéroïde Toutatis. Un an plus tard, lors de son survol de l'astéroïde Ida, la sonde Galileo observe la présence d'un satellite, Dactyl. Cet objet est beaucoup plus petit qu'Ida, mais il prouve l'existence de satellites d'astéroïdes.

Le couple Ida-Dactyl constitue un système binaire aux composantes bien séparées. En revanche, Toutatis n'est sans doute pas un tel système, car on distinguerait ses composantes sur les images radar. S'agit-il d'un système binaire aux composantes serrées ? De tels couples ont une période de rotation de quelques heures : s'ils tournaient plus vite, la force centrifuge l'emporterait sur la force de gravitation et le satellite serait éjecté ; s'ils tournaient moins vite, le satellite s'écraserait sur son compagnon. Comme la période de rotation de Toutatis est de l'ordre d'une semaine, il s'agit plutôt de deux corps en contact ou d'un corps unique en forme de cacahouète. Pour Castalia, la période de rotation est de quatre heures et il pourrait s'agir d'un astéroïde binaire aux composantes serrées.

Les impacts doubles sur la surface terrestre aident à déterminer la proportion d'astéroïdes binaires aux compo-

santes séparées : seuls les objets binaires avec des composantes suffisamment séparées créent ces impacts.

Comment évoluent les astéroïdes binaires ? Un astéroïde qui s'approche



Les images radar de l'astéroïde Castalia révèlent une structure formée de deux objets ; cette structure tourne sur elle-même en quatre heures environ. On suit la rotation de haut en bas, puis de gauche à droite.

de la Terre subsiste 100 millions d'années avant d'entrer en collision avec elle. Au cours de son existence, un astéroïde passe donc de nombreuses fois près de la Terre. Or, notre planète perturbe l'orbite des corps dans son voisinage par des forces de marées : pour un système binaire, les orbites de chaque composante ne subissent pas la même force gravitationnelle, car elles passent à des distances différentes de la planète. Cet effet différentiel, d'autant plus important que la distance entre l'astéroïde et la Terre est faible, modifie le mouvement relatif des composantes du système binaire. De surcroît, les forces de marées internes, dues aux forces gravitationnelles entre les composantes, modifient aussi les mouvements.

MODIFICATION D'ÉTAT

Avec Paolo Farinella, de l'Université de Pise, nous avons montré que ces phénomènes modifient rapidement les systèmes binaires aux composantes initialement séparées. En un temps bref (environ dix millions d'années) devant leur temps de vie, ces systèmes deviennent des systèmes binaires compacts ou des objets indépendants par éjection d'une de leurs composantes. Ceci expliquerait la structure « binaire-contact » d'astéroïdes comme Castalia et Toutatis. De plus, lorsqu'il y a éjection d'une composante, la période de rotation de l'astéroïde restant peut augmenter sensiblement : elle passe de quelques heures à un jour ou deux. Ce modèle d'évolution dynamique n'explique cependant pas pourquoi Toutatis possède une période si longue.

Pourquoi les astéroïdes binaires à proximité de la Terre n'ont-ils pas tous disparu ? Sans doute parce que les systèmes binaires récemment injectés sur une orbite croisant l'orbite terrestre ont été peu perturbés. Ensuite, parce que le mécanisme décrit peut aussi fonctionner en sens inverse : au lieu de faire disparaître les astéroïdes binaires, les forces de marées dues à la Terre peuvent « casser » certains astéroïdes, agrégats de corps de tailles variées. Pour un objet de quelques kilomètres de diamètre la cohésion gravitationnelle est faible. Aussi, l'effet des forces de marées différentielles sur les parties de ces astéroïdes provoque leur rupture, engendrant un astéroïde binaire. Un équilibre s'établit entre création et disparition des astéroïdes binaires. La proportion des couples d'astéroïdes dans cet état binaire, calculée par les astronomes américains, expliquerait la proportion de cratères doubles à la surface des planètes.

Bertrand CHAUVINEAU
Observatoire de la Côte d'Azur, Grasse

Le cheval, athlète abouti ?

La plus noble conquête de l'homme est fragile.

Pourquoi les athlètes humains ont-ils considérablement progressé, au cours du dernier demi-siècle, et pas les chevaux ? Le physiologiste anglais Stephen Budiansky invoque une limitation physiologique du cheval, mais cette idée est controversée.

Les observations sont incontestables : dans les 50 dernières années, le record humain du 1 500 mètres est passé de 3 minutes 50 secondes à moins de 3 minutes 28 secondes, et les marathoniens ont gagné plus de 28 minutes sur leurs 42 kilomètres. En revanche, les courses équestres de plat se courent dans les mêmes temps. S. Budiansky donne deux explications. Tout d'abord, les chevaux seraient, par nature, si bien adaptés à la course que leur entraînement serait inutile. Ainsi, dans un graphique qui indique l'intensité métabolique maximale en fonction de la taille, pour les divers mammifères, le cheval est largement en tête. Autrement dit, le cheval ne pourrait pas progresser beaucoup, parce qu'il serait déjà un super-athlète. D'autre part, les caractéristiques du galop limiteraient les performances, notamment en limitant la consommation d'oxygène.

Ces explications sont critiquables. Tout d'abord, l'amélioration des temps de course humains est due à des techniques d'entraînement de mieux en mieux adaptées, à une sélection plus efficace des sportifs et, surtout, à une amélioration du matériel : chaussures et pistes ! Cette différence expliquée, il reste à comprendre comment les performances s'améliorent, chez le cheval ou chez l'homme.

Chez l'homme, le temps de course en fond ou en demi-fond dépend de la consommation maximale d'oxygène : on peut prévoir les temps de course en mesurant cette capacité. En revanche, aucune étude du cheval n'a démontré que les performances des chevaux en compétition sont limitées par la consommation maximale d'oxygène (mesurée en laboratoire). Chez l'homme comme chez le cheval, les poumons fournissent de l'oxygène au sang, le cœur pompe le sang vers les muscles, et les muscles transforment en travail mécanique l'énergie stockée sous forme chimique. La per-

formance est au prix d'une bonne efficacité de chacune de ces transformations.

Dans les muscles, plusieurs métabolismes se déclenchent dès le début de l'exercice : après la consommation de l'énergie directement utilisable (la dissociation de la phosphocréatine en ATP), le métabolisme devient anaérobie (sans oxygène), transformant le glycogène en ATP. Toutefois, ce métabolisme, que l'entraînement n'améliore pas beaucoup, libère de l'acide lactique dans les muscles. Aussi le métabolisme aérobie prend-il le relais.

S. Budiansky suppose que le métabolisme anaérobie des chevaux ne leur permettrait de courir qu'une cinquantaine de mètres, mais cette hypothèse est fautive : les chevaux peuvent courir plusieurs centaines de mètres en utilisant leur métabolisme anaérobie, car leurs réserves de glycogène sont supérieures. Le métabolisme anaérobie reste actif tout au long d'une course ou d'un cross de concours complet.



Le cheval de course est sélectionné pour sa capacité à gagner de nombreuses courses plutôt que pour sa vitesse absolue.

Puis S. Budiansky suppose que le métabolisme aérobie est également limité, parce que les chevaux respirent exactement une fois par foulée et ne peuvent modifier ce rythme respiratoire. Il est exact que le cheval n'a pas de clavicle, et que le mouvement de ses membres antérieurs est directement lié aux muscles de sa poitrine et, de ce fait, à sa cage thoracique : quand les antérieurs se posent, au galop, l'impact transmis par les membres fait remonter les côtes, ce qui expulse l'air des poumons, en même temps que le cheval baisse la tête et le cou ; puis, quand le cheval ramène les membres sous lui, pendant le temps de suspension, il inspire jusqu'au poser des membres postérieurs. Comme la quantité d'oxygène est limitée par la fréquence de mouvement des membres, et que celle-ci est limitée, on pourrait supposer que les animaux n'auraient bientôt plus assez d'oxygène pour courir correctement.

Cette idée est insuffisante : les chevaux peuvent augmenter leur vitesse soit en augmentant la fréquence du galop, soit en allongeant leur foulée. Et l'antagonisme avec le fonctionnement respiratoire n'est pas évident : le volume ventilé et l'efficacité de l'échange gazeux à la surface des alvéoles pulmonaires sont d'autres facteurs importants de la consommation d'oxygène.

UN ATHLÈTE FRAGILE

La physiologie du galop et les effets de l'entraînement des chevaux restent trop mal connus pour que l'on puisse déterminer aujourd'hui les raisons des performances. Le métabolisme aérobie d'un animal bien entraîné lui permet de soutenir la vitesse moyenne de la course, mais, pour les accélérations, c'est le métabolisme anaérobie qui entre en jeu, car il délivre une puissance bien supérieure. Aujourd'hui les techniques d'entraînement améliorent essentiellement la capacité aérobie. Après avoir étudié un millier de trotteurs, Éric Barrey et ses collègues de la Station d'amélioration génétique, au Centre INRA de Jouy-en-Josas, ont montré que la fréquence cardiaque était moyennement corrélée aux performances, tout comme la fréquence des foulées et divers paramètres métaboliques sensibles à l'entraînement.

Enfin les éleveurs ne visent pas les records de vitesse, mais des gains (en argent) totaux des chevaux dans leur année de compétition. En effet, le cheval de course est un animal fragile des membres, et dont la carrière est brève ; son entraînement améliore ses performances, mais il conduirait, chez trop d'animaux, à des blessures qui ruineraient leur carrière. Aussi les écuries de galo-