

os et les dents) pourraient davantage tenir de l'adaptation à l'environnement que de l'évolution. Depuis une vingtaine d'années, les découvertes de fossiles s'accumulent et la famille de l'homme s'agrandit. Cependant, ses origines ne s'éclaircissent pas pour autant : l'ancienne théorie, selon laquelle les hominidés s'étaient succédé, selon un processus d'évolution linéaire,

n'a plus court. On avait d'abord pensé que les genres d'hominidés plus proches de l'homme que du chimpanzé n'étaient qu'un nombre de trois, à savoir les australopitèques, les paranthropes et les *Homo*. Puis, la découverte de trois nouveaux australopitèques, au Kenya, en Éthiopie et au Tchad a montré que ce genre était plus répandu qu'on ne le supposait. Depuis,

deux autres genres ont été créés : *Ardipithecus*, d'abord daté de 4,4 millions d'années, mais qu'un fossile récemment trouvé fait remonter à 5,8 millions d'années, et *Ororin*, de 6 millions d'années. La découverte de *Kenyanthropus platyops*, qui ajoute à la confusion, laisse supposer que les incertitudes qui planent sur nos origines ne sont pas près de disparaître.

Cerveau et pesanteur

Pour prévoir la trajectoire d'un objet, notre cerveau tient compte de l'accélération due à la pesanteur.

Le petit d'homme acquiert très rapidement la notion de la pesanteur : l'enfant de un an sait que s'il lâche un objet, celui-ci tombe. Jusqu'à quel point notre cerveau assimile-t-il la gravité ? La question se pose notamment lorsque nous attrapons un objet qui nous est lancé. Sachant que les influx nerveux mettent un certain temps pour aller du cerveau aux muscles et que ces derniers ne répondent pas immédiatement, le cerveau doit donner les ordres pour la saisie de l'objet (lever l'avant-bras, contracter les muscles du biceps, puis tendre les doigts) de quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes avant que l'objet n'arrive au niveau de la main. En d'autres termes, il doit anticiper la trajectoire afin que la main se trouve au bon endroit, au bon moment. Comment prévoit-il la trajectoire ? Une équipe du Laboratoire européen de neurosciences de l'action, dont Joe McIntyre et Alain Berthoz du Collège de France, à Paris, et Francesco Lacquaniti et Myrka Zago, à Rome, ont comparé des saisies de balles réalisées sur Terre et en impesanteur au cours d'un vol de la navette américaine. Ils ont montré que le cerveau prévoit une trajectoire en tenant compte de l'accélération de la pesanteur.

On peut envisager *a priori* trois hypothèses sur la façon dont le cerveau opère pour prévoir une trajectoire. Selon la première, le cerveau évalue la vitesse de l'objet et ne se fonde que sur cette information. Dans la deuxième, il estime non seule-

ment la vitesse, mais aussi l'accélération de l'objet. Dans la troisième, il n'apprécie que la vitesse, mais sait que l'objet est soumis à la pesanteur et que cela modifie sa trajectoire. Le système visuel évalue mal les accélérations, de sorte que l'on peut éliminer la deuxième hypothèse.

Pour trouver laquelle des deux autres hypothèses est la bonne, J. McIntyre et ses collègues ont filmé le mouvement du bras de spationautes qui devaient attraper une balle lancée vers eux, par le haut, à différentes vitesses. Afin que les sujets ne s'accoutument pas à la saisie de la balle, la vitesse des lancers variait de façon aléatoire. La même expérience a été réalisée également sur Terre.

Sur Terre, l'avant-bras se lève environ 200 millisecondes avant l'impact. Dans l'espace, il se lève plus tôt (500 millisecondes avant l'impact pour une vitesse de lancer égale à 1,7 mètre par seconde) et arrête sa course, voire l'inverse, quand le sujet s'aperçoit qu'il n'attrapera pas la balle. L'avant-bras a manifestement reçu trop tôt l'ordre de bouger. Ce résultat écarte d'emblée la première hypothèse : dans le cas où le cerveau ne se fonderait que sur la vitesse de la balle pour prévoir la trajectoire, l'homme capturerait la balle au bon moment dans l'espace, où la vitesse est constante.

Reste la troisième hypothèse, celle de la prédiction qui tient compte de la pesanteur. Dans le cas où le cerveau tiendrait compte de la pesanteur, il s'attend à ce que la balle soit accélérée et, par conséquent, plus bas qu'elle ne l'est en réalité dans l'espace : il sous-estime la durée avant impact et déclenche les mouvements trop tôt. Cette sous-estimation est d'autant plus importante que la vitesse de lancer est faible. C'est bien ce que J. McIntyre et ses collègues ont observé : le retard pris dans

l'espace passe de 100 millisecondes pour une vitesse de lancer de 2,7 mètres par seconde à 700 millisecondes pour 0,7 mètre par seconde. On explique quantitativement ces variations en considérant que le cerveau prévoyait que l'objet allait subir une accélération égale à celle de la pesanteur terrestre et qu'il s'est décidé à donner l'ordre à l'avant-bras de bouger environ 300 millisecondes avant ce qu'il pensait être l'impact. J. McIntyre et ses collègues concluent que le cerveau possède un modèle interne de trajectoire qui a assimilé la valeur de la pesanteur terrestre.

À mesure des expériences pratiquées dans l'espace à plusieurs jours d'intervalle, les spationautes ont montré un début d'adaptation à l'absence de gravité. Qu'est-ce qui a provoqué cette adaptation ? Des indices visuels ? Des expériences où les indices visuels feront croire aux sujets qu'ils sont tête en bas devraient répondre en partie à ces questions.



Un astronaute doit saisir une balle lancée vers lui en impesanteur à des vitesses initiales différentes.

Vous cherchez des services personnalisés d'information scientifique ?

//connectsciences.inist.fr

Le portail CNRS d'information scientifique et technique

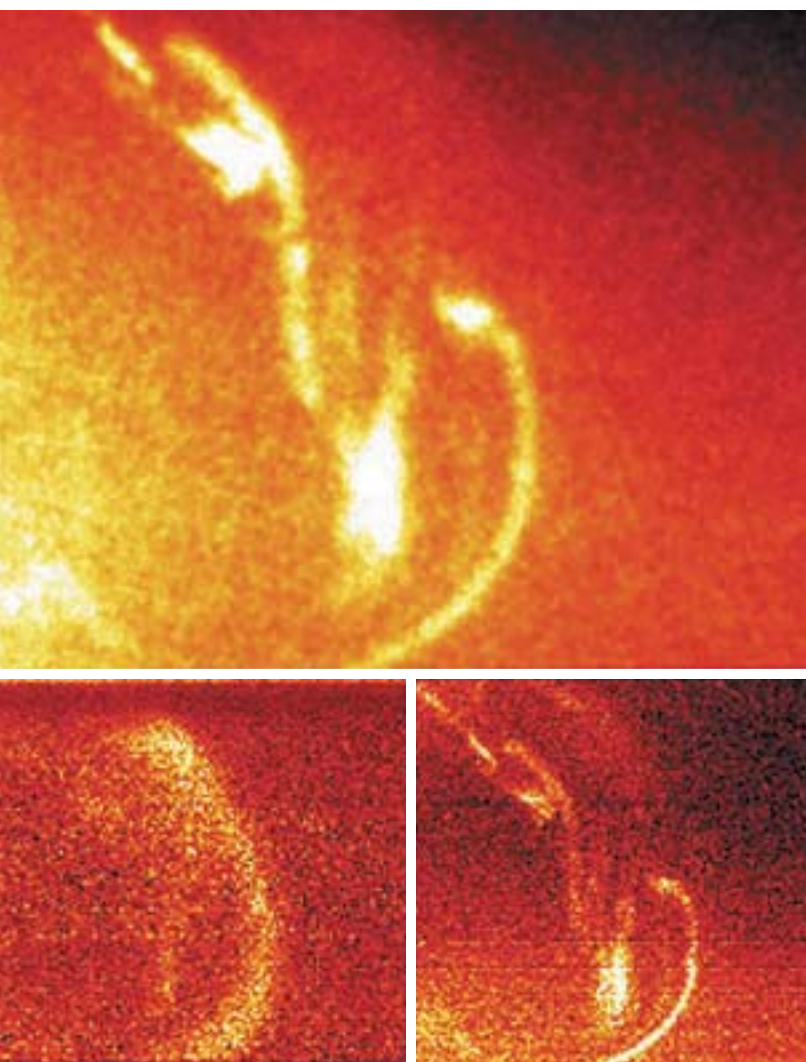
Un service de l'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS
www.inist.fr

Les aurores à protons

Pour la première fois, des aurores boréales à protons ont été observées depuis l'espace.

Les aurores boréales sont d'une beauté féerique. Pourtant, une partie du spectacle, invisible à l'œil nu, nous échappe, car certaines des longueurs d'onde émises se situent dans l'ultraviolet, comme celles émises par les aurores dites à protons. Grâce à une caméra sensible au rayonnement ultraviolet, embarquée à bord du satellite américain IMAGE, en orbite depuis mars 2000, les géophysiciens du Laboratoire de physique atmosphérique et planétaire de l'Université de Liège et leurs collègues américains ont, pour la première fois, observé ces aurores à protons sur l'ensemble de l'hémisphère Nord.

Les aurores boréales classiques sont provoquées par le vent solaire qui «se heurte» à la magnétosphère terrestre.



Cette aurore boréale a été observée dans l'ultraviolet à l'aide de plusieurs caméras du satellite IMAGE : l'une des images correspond à l'azote excité principalement par les électrons auroraux (*en haut*), une autre à l'oxygène, également dû aux électrons (*en bas à droite*) ; une image de l'aurore à protons (*en bas à gauche*) a été obtenue par une caméra sensible à l'émission de l'hydrogène. La différence de structure est flagrante : l'émission aurorale est nettement plus diffuse pour les protons, et certaines régions excitées par les électrons ne le sont pas par les protons.

Le vent solaire est un plasma composé d'électrons, de protons, de noyaux d'hélium et d'ions, issus des couches externes du Soleil. Les électrons y sont presque aussi nombreux que les protons. Arrivé en périphérie de la Terre, le vent solaire rencontre la magnétosphère, qui s'étend à plus de 500 rayons terrestres, du côté opposé au Soleil, mais seulement à dix rayons terrestres du côté exposé au Soleil. Certaines particules chargées s'accumulent dans un réservoir, le «feuillet de plasma», situé dans la queue de la magnétosphère, du côté opposé au Soleil. D'autres, du côté exposé au Soleil, suivent les lignes de force du champ géomagnétique qui convergent vers les régions polaires. Quand elles abordent les couches les plus élevées de l'atmosphère terrestre, elles entrent en collision avec les molécules et les atomes de l'ionosphère (de l'azote et de l'oxygène). Elles les excitent, et quand les atomes se dés excitent, ils émettent des photons : c'est la lumière des aurores boréales.

À beaucoup d'égards, les aurores à protons sont semblables aux aurores boréales à électrons. Les protons et les électrons ont une énergie similaire, de quelques milliers d'électronvolts. Ils excitent les mêmes atomes et provoquent les mêmes émissions, à l'exception d'une excitation de l'atome d'hydrogène. Dans ce cas, le mécanisme est un peu différent. Les protons du vent solaire sont des atomes d'hydrogène qui ont perdu un électron. Quand un tel ion positif entre en collision avec les atomes des hautes couches de l'atmosphère, il capture un électron, et devient neutre pendant une fraction de seconde. L'atome d'hydrogène ainsi créé est le plus souvent dans un état excité, et il se dés excite en émettant un photon dans l'ultraviolet. Lors d'une nouvelle collision, il perd à nouveau son électron, puis en regagne un autre lors de la collision suivante, le perd de nouveau, et ainsi de suite. Un proton incident perd et retrouve successivement sa charge plus d'une centaine de fois, et émet ainsi des dizaines de photons ultraviolets.

Grâce au satellite IMAGE, les physiciens étudient la morphologie globale des aurores à protons de l'hémisphère Nord. Généralement, les électrons et les protons proviennent des mêmes régions de la magnétosphère et ils sont canalisés par les lignes de force : les aurores à électrons et à protons se superposent à environ 80 pour cent. Toutefois, chaque jour, en fin d'après-midi, l'aurore à protons se décale vers le Sud, et les deux aurores sont séparées. En effet, comme les particules ont une charge opposée, et une masse très différente (les protons sont environ 1 850 fois plus lourds que les électrons), leur comportement dans le champ électromagnétique terrestre diffère.

Les physiciens étudient les mécanismes qui précèdent les aurores : comment les particules pénètrent dans le champ terrestre, comment elles sont «triées» par les champs, et comment elles acquièrent leur énergie dans la magnétosphère, souvent très supérieure à celle qui règne dans le vent solaire. L'énergie ainsi déversée dans l'atmosphère peut dépasser 10 milliards de watts lors des fortes tempêtes magnétiques, qui suivent certaines éruptions solaires, fréquentes en ce moment où le Soleil traverse une période d'activité maximale. En moyenne, les protons seraient responsables d'environ 15 pour cent de cette énergie, mais cette fraction est variable. La contribution énergétique des protons dans les aurores était considérée comme faible. Or, les astrophysiciens liégeois ont découvert que les protons sont dominants dans certaines zones aurorales, car ils transportent alors l'essentiel de l'énergie injectée dans notre atmosphère. Ils jouent un rôle primordial dans l'ionisation de la haute atmosphère et dans la structure des courants qui y circulent. Dans les aurores boréales aussi, l'essentiel est parfois invisible pour les yeux.

LPAP/LIJ/NASA