

Capture des satellites et migration des planètes géantes

Comme le soulignent les auteurs de l'article, quel que soit le mécanisme de capture des satellites irréguliers, reste la question de leur origine. Se sont-ils formés près de leur planète ou dans les régions externes du Système solaire ?

En 2007, David Nesvorny, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest, à Boulder, David Vokrouhlicky, de l'Université Charles, à Prague, et Alessandro Morbidelli, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice, ont proposé, dans le cadre du « modèle de Nice », un scénario de formation des essaims de satellites irréguliers qui penche en faveur de la seconde hypothèse.

Le modèle de Nice a été proposé en 2005 par A. Morbidelli, Harold Levison, de l'Université du Sud-Ouest, à Boulder, Rodney Gomes, de l'Université de Rio de Janeiro, au Brésil, et moi-même. Dans ce cadre, le Système solaire externe, entre 13 et 35 unités astronomiques (la distance de la Terre au Soleil) est resté peuplé de débris pendant près de 700 millions d'années après

la formation des planètes, jusqu'à ce que la forte interaction gravitationnelle entre Jupiter et Saturne induise des résonances qui ont bousculé l'ensemble du Système solaire. Des millions d'astéroïdes et de comètes ont été dispersés, tandis que les planètes principales ont migré vers leurs orbites actuelles, plus stables.

D. Nesvorny et ses collègues ont montré que, pendant la phase chaotique supposée par le modèle de Nice, lorsque les planètes s'approchent fréquemment les unes des autres (on parle de « rencontres proches »), les planétésimaux voisins peuvent être facilement capturés par celles-ci.

Il s'agit d'une variante de la capture à trois corps, où deux planètes se rencontrent et perturbent l'orbite d'un planétésimal proche, de sorte que ce dernier pénètre dans la sphère de Hill d'une des planètes. Lorsque les planètes s'écartent ensuite, quelques-uns des planétésimaux piégés deviennent des satellites permanents.

Les simulations montrent que la distribution des satellites capturés est similaire, tant en nombre qu'en termes de caractéristiques orbitales, à celle observée pour Saturne, Uranus et Neptune.

Dans la majorité des simulations, cependant, Jupiter semble se comporter différemment : la planète ne capture pas autant de satellites qu'attendu, tout simplement parce qu'elle ne subit pas beaucoup de rencontres avec les autres planètes.

Toutefois, dans un certain nombre de simulations, Jupiter passe par des rencontres suffisamment proches et fréquentes avec les autres planètes pour lui permettre de capturer des satellites irréguliers.

Des résultats récents du « groupe du modèle de Nice » suggèrent que ces simulations dont les paramètres conduisent à la capture sont plus proches de la réalité, bien que moins nombreuses.

Une évolution plus brutale de l'orbite de Jupiter semble en effet nécessaire, d'une part, pour que les orbites finales de Jupiter et de Sa-

turne soient les plus proches de celles observées ; d'autre part, pour assurer la stabilité des planètes telluriques durant la migration, et enfin pour satisfaire la distribution observée des astéroïdes entre Mars et Jupiter.

Une telle évolution est caractérisée par des rencontres plus proches et plus fréquentes que dans les autres simulations entre Jupiter et l'une des géantes de glace (Neptune ou Uranus), qui font migrer Jupiter vers son orbite finale en quelques centaines de milliers d'années, au lieu de millions d'années.

Les planètes telluriques sont alors « insensibles » au mouvement des planètes géantes, tandis que le « balayage » des orbites des planètes géantes est trop rapide pour que les résonances aient le temps de déstabiliser les astéroïdes.

Une évolution rapide de l'orbite de Jupiter semble ainsi expliquer la capture de ses satellites irréguliers.

Kleomenis Tsiganis

Université de Thessalonique, Grèce

La capture à trois corps pourrait expliquer pourquoi chaque planète a, à peu près, le même nombre de lunes irrégulières : bien qu'Uranus et Neptune soient moins massives que Jupiter et Saturne, elles sont plus loin du Soleil, et leurs sphères de Hill sont de taille comparable.

Si le scénario d'interaction à trois corps peut expliquer comment les lunes irrégulières ont été capturées, il n'indique pas d'où elles provenaient. Les chercheurs ont avancé deux origines possibles. Les lunes pourraient être des astéroïdes ou des comètes qui se seraient agrégés dans la même région du Système solaire que les planètes qui les ont finalement capturées. L'essentiel de la cohorte aurait alors été intégré à la planète elle-même, ou catapulté hors du Système solaire. Les lunes irrégulières seraient les plus chanceuses : ni englouties, ni condamnées à errer dans l'espace interstellaire.

Une autre possibilité est que les satellites irréguliers proviennent tous des régions extérieures du Système solaire, dans l'actuelle ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune. Selon le « modèle de Nice »,

proposé en 2005 (voir l'encadré ci-dessus), des millions d'astéroïdes et de comètes ont été dispersés lors d'une phase chaotique survenue 700 millions d'années après la formation des planètes. Une fraction des petits corps dispersés aurait pu être capturée par les planètes lors des passages à leur proximité.

L'aspect de Phœbé, la lune de Saturne, ainsi qu'un spectre légèrement plus rouge des satellites irréguliers à mesure qu'on s'éloigne du Soleil appuient cette hypothèse, mais ne permettent pas de conclure. Des observations spectroscopiques plus précises sont nécessaires.

Si les lunes irrégulières des différentes planètes avaient des compositions chimiques différentes, cela conforterait l'hypothèse d'une formation locale. Si au contraire elles avaient des compositions chimiques semblables, cela renforcerait l'hypothèse d'une région d'origine commune.

Ainsi, comme des traces sur la chausmée après un accident, les satellites irréguliers pourraient nous révéler si le Système solaire est passé par une phase chaotique dans son enfance. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Nesvornyn, D. Vokrouhlicky et A. Morbidelli, **Capture of irregular satellites during planetary encounters**, *The Astronomical Journal*, vol. 133, p. 1962, 2007.

D. Jewitt et N. Haghighipour, **Irregular satellites of the planets: products of capture in the early Solar system**, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 45, pp. 261-295, 2007.

C. Agnor et D. Hamilton, **Neptune's capture of its moon Triton in a binary-planet gravitational encounter**, *Nature*, vol. 441, pp. 192-194, 2006.

D. Jewitt et S. Sheppard, **Irregular satellites in the context of giant planet formation**, *Space Science Reviews*, vol. 116, n° 1-2, pp. 441-456, janvier 2005.

LES VICTIMES du changement climatique

Alex de Sherbinin, Koko Warner et Charles Ehrhart

Les modifications des régimes de pluies et des rivages côtiers pourraient entraîner des migrations humaines d'une ampleur sans précédent.

© Getty Images/Joim Stockart

L'ESSENTIEL

✓ Le changement climatique dû au réchauffement global bouleversera les ressources de millions de personnes, incitant nombre d'entre elles à quitter leur pays.

✓ Trois régions du globe qui ont déjà commencé à souffrir de ses effets sont examinées ici : le Mozambique, le delta du Mékong et l'Amérique centrale.

✓ Certaines migrations seront inévitables. Comment gérer au mieux ces flux ? Comment garantir les droits de ces populations ? La communauté internationale doit se poser ces questions dès maintenant.

Depuis toujours, les migrations dues aux changements climatiques ont façonné la civilisation humaine. Ainsi, l'homme serait sorti de son berceau africain à la faveur d'un changement climatique, il y a plus de 100 000 ans. Il y a 3 000 ans, une longue période de sécheresse en Asie centrale et le manque de pâturages ont poussé les armées mongoles jusqu'en Europe, où nombre de soldats se sont établis. Et au XX^e siècle, aux États-Unis, le *Dust Bowl* (le nuage de poussière), une catastrophe écologique due à la sécheresse et aggravée par des politiques agricoles erronées a obligé 3,5 millions de personnes du Midwest à émigrer.

Aujourd'hui, cette histoire séculaire prend un tour nouveau. Nous entrons dans une ère – « l'anthropocène » – marquée par des changements rapides du climat que provoquent les gaz à effet de serre émis par les activités humaines. Les modèles climatiques prévoient notamment une plus grande variabilité des précipitations, une fréquence plus élevée des événements climatiques extrêmes – telles les sécheresses et les inondations –, une hausse du niveau de la mer et une acidification des précipitations. Chacun de ces changements pourrait perturber les écosystèmes qui nous fournissent nos res-

sources naturelles. Et obliger des populations entières à quitter leurs habitations, dans des proportions inégalées jusqu'à aujourd'hui.

Menacés par l'élévation du niveau de la mer, les 38 États insulaires de faible altitude de la planète sont l'objet d'une attention particulière. Selon certains scénarios, nombre d'entre eux pourraient disparaître d'ici la fin de ce siècle. Cependant, le problème auquel sont confrontés les habitants de ces États n'est que le sommet de l'iceberg. Rien qu'en Inde, une élévation de un mètre du niveau de la mer obligerait 40 millions de personnes à migrer. En outre, l'inondation côtière est loin d'être le seul problème lié au climat en Asie du Sud. Des modèles développés par Arthur Green et Andrew Robertson, de l'Université Columbia, suggèrent à la fois un accroissement du total des pluies de mousson et une diminution de leur fréquence – en d'autres termes, des précipitations plus intenses concentrées sur moins de jours. Des décalages de la saisonnalité des crues fluviales (dus à la diminution de la couche neigeuse) pourraient réduire les ressources agricoles de plusieurs centaines de millions d'Asiatiques vivant en zone rurale, ainsi que l'approvisionnement en nourriture d'autant de citadins.



L'augmentation du nombre de catastrophes liées au climat est un fait. La fréquence des catastrophes naturelles a plus que doublé depuis les années 1980 et, parmi elles, celles liées au climat représentent une proportion croissante. Selon le Bureau pour la coordination des affaires humanitaires des Nations unies et le Centre de veille des déplacements locaux (*Internal Displacement Monitoring Center*), en 2008, les catastrophes liées au climat ont conduit plus de 20 millions d'individus à quitter leur toit – soit plus de quatre fois le nombre de personnes déplacées à la suite d'un conflit local.

Trois cas dans trois continents

Ces déplacements de populations et ces migrations forcées, provoqués par le changement climatique, pourraient donc devenir un problème humanitaire international de premier plan dans les décennies à venir. Dans cet article, nous donnons une idée de ce que l'avenir pourrait nous réserver en examinant les facteurs qui ont commencé à provoquer de tels déplacements dans trois régions du monde. Nous considérerons d'abord le Mozambique, où les populations subissent fortes inondations et sécheresses périodiques. Nous examinerons ensuite

le delta du Mékong. Ici, les inondations rythment la vie depuis longtemps ; cependant, ces dernières années, leur ampleur a dépassé tous les précédents historiques. L'élévation du niveau de la mer entraînera en outre des pertes considérables de terres agricoles. Nous terminerons par le Mexique et l'Amérique centrale, où les tempêtes tropicales et les cyclones ont entraîné le déplacement de milliers de personnes, et où la sécheresse menace constamment.

Nous ne prétendons pas prévoir l'ampleur, la direction et la périodicité des migrations à venir. En présentant ces études de cas, nous espérons susciter des analyses plus complètes des zones où des migrations en masse pourraient se produire et encourager le développement de plans régionaux et internationaux pour venir en aide aux populations contraintes de se déplacer.

Les analyses que nous présentons proviennent du programme Changement environnemental et scénarios de migration forcée (EACH-FOR) de la Commission européenne, une étude globale des migrations dues à l'environnement, et d'une étude cartographique conduite par le Consortium pour un réseau international d'information en sciences de la Terre (CIESIN), à l'Institut de la Terre de l'Université Columbia.

UNE FAMILLE avance péniblement dans les rues de Chokwe, au Mozambique. Des inondations de plus en plus fréquentes dans cette région ont poussé de nombreuses familles à déménager.

LES AUTEURS



Alex DE SHERBININ, chercheur à l'Institut de la Terre de l'Université Columbia, est directeur adjoint du Centre de données socio-économiques et applications de la NASA. Koko WARNER est chercheur à l'Institut pour l'environnement et la sécurité humaine de l'Université des Nations unies. Charles EHRHART coordonne la réponse au changement climatique au sein de l'organisation non gouvernementale CARE international.