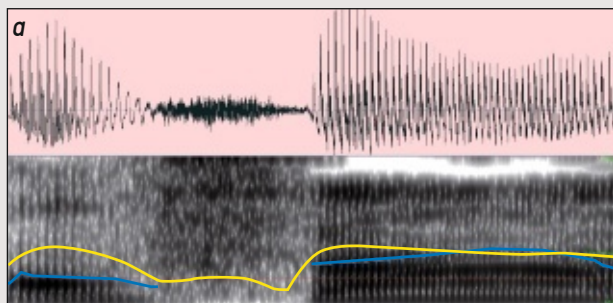
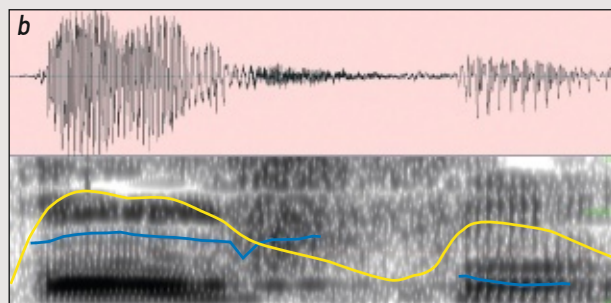


L'intonation d'un mot reflète un sens, qui ne peut être compris qu'en écoutant le mot. Il est possible de décomposer le son d'un mot en différents paramètres, représentés sous forme d'un spectrogramme. Par exemple, dans la phrase « Enfin ! Paul arrive ! », *Enfin* s'interprète comme un

soulagement avec de la satisfaction (a) ou comme un soulagement avec de l'énervement (b). Sur les spectrogrammes de *enfin*, représentés ci-dessous, la ligne bleue correspond à la mélodie ou hauteur du son (grave ou aigu), et la ligne jaune à son intensité (forte ou faible).



« Ouf ! J'étais très inquiète et je suis pleinement soulagée que la venue de Paul mette un terme à mon angoisse. »



« Je commençais vraiment à en avoir assez d'attendre Paul ; il m'énervé. »

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Petit, *Discrimination prosodique et représentation du lexique : application aux emplois des connecteurs discursifs*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.

G. Boulakia et al., *Un plaisir coupable... mais un plaisir (Étude prosodique de la rhétorique de plaidoiries et de réquisitoires)*, Actes d'IDP 2009, Paris, pp. 123-135, septembre 2009.

R. Bertrand et C. Chagnet, *Fonctions pragmatiques et prosodie de enfin en français spontané*, *Revue de Sémantique et Pragmatique*, vol. 17, pp. 41-68, 2005.

P. Cadiot et Y.-M. Visetti, *Motifs, profils, thèmes : une approche globale de la polysémie*, *Cahiers de lexicologie*, vol. 79, pp. 5-46, 2001.

F. Nemo, *Enfin, encore, toujours entre indexicalité et emplois*, Actes du XXII^e Congrès international de linguistique et de philologie romanes, Niemeyer Max (éd.), Tübingen : Verlag, pp. 499-511, 2000.

I. Léglise, *Contraintes de l'activité de travail et contraintes sémantiques sur l'apparition des unités et l'interprétation des situations*, Thèse de doctorat, Université Paris 7-Denis Diderot, 1999.

la quantité (forte ou faible) évoquée, mais elle renseigne sur l'importance que cette quantité a dans l'argumentation. Par exemple, dans « Il a fait des miracles en quelques jours », on comprend « Il a fait des miracles rapidement » ou « Il a fait des miracles, et notez qu'en plus, il les a faits en très peu de jours ».

En outre, combien de fois un *oui* que notre interlocuteur aurait voulu franc et sincère apparaît-il teinté de réticence ? Si le *oui* est franc, la voix est montante, sinon, elle retombe après s'être un peu élevée. Et toutes les nuances vocales correspondent à différents degrés de franchise. Nous avons aussi constaté que le plus souvent, quand quelqu'un évoque une couleur, l'intonation permet de deviner si elle lui plaît ou non.

Ce que l'analyse de *enfin* nous a appris pourrait s'appliquer à d'autres connecteurs discursifs et à d'autres mots. Lorsqu'un locuteur s'exprime, il révèle également une partie de ses pensées, volontairement ou non. On peut ainsi savoir ce qu'il pense, ou s'il considère un point comme important ou négligeable. L'expression d'un sentiment est inhérente à la parole et les connecteurs discursifs permettent de le révéler. De fait, il serait peut-être nécessaire de revoir le sens conventionnel des mots, en tenant compte de l'intonation.

Aujourd'hui, c'est une réécriture des dictionnaires qui peut être envisagée. En utilisant un support multimédia, on pourrait différencier les sens des mots selon leur intonation. L'intégration de la prosodie dans les dictionnaires électro-

niques peut commencer avec les « mots de discours » tels que les connecteurs ou les adverbes (« Tu es toujours là » ou « Tu es déjà là » peuvent être interprétés comme un reproche ou un contentement selon l'intonation).

Créer un dictionnaire sonore

Pour ce faire, il reste à proposer diverses représentations de la prosodie, sous forme de courbes par exemple, et à approfondir la description du sens des connecteurs. Ce dictionnaire sonore serait alors utile dans le domaine du traitement automatique de la langue, quand il s'agit de reconnaissance vocale ou de voix artificielle.

Les enseignants du français comme langue étrangère souhaitent aussi intégrer l'intonation des mots dans les cours qu'ils dispensent. Une étude comparative de la prosodie des unités lexicales entre différents types de français (de France, québécois, etc.), mais aussi selon son évolution au fil des années, est une perspective de recherche. La deuxième Enquête sociolinguistique à Orléans est en cours. Elle permettra de comparer les intonations des Orléanais sur le même type de mots à 40 ans d'intervalle. Bien sûr, nous étudierons aussi le rôle de l'intonation dans la discrimination des autres types d'unités lexicales tels que les verbes, les adjectifs, les noms communs ou les noms propres. Un dernier conseil : faites bien attention à la façon dont, finissant de lire cet article, vous allez dire *enfin*. ■

universcience présente

esuper.fr

OCEAN CLIMAT ET NOUS

EXPO > 6 AVRIL 2011 > JUIN 2012

© PORTE DE LA VILLETTE / UNIVERSCIENCE.FR



EN PARTENARIAT AVEC :

Ifremer



SCIENCE



VALEURS
VERTES



Nature
& Découvertes

FUTURA - SCIENCES

thalassa





DIFFORME ET GLACÉE, la plus grosse lune irrégulière de Saturne, Phœbé, ressemble à une comète qui aurait été arrachée à son orbite autour du Soleil. Les cratères portent les noms des héros du mythe grec des Argonautes : le plus grand, au sommet, est le cratère Jason, à sa gauche se trouve Erginos, et celui dans l'ombre en bas est Oïlée.

Les satellites

les plus étranges du Système solaire

David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna

Évoluant sur des orbites étirées
et dans le sens souvent inverse de celui attendu,
les satellites irréguliers ouvrent une fenêtre
sur la formation des planètes.

Il y a dix ans, deux d'entre nous, David Jewitt et Scott Sheppard, firent un pari sur le nombre de satellites qu'il restait à découvrir dans le Système solaire. D. Jewitt paria 100 dollars qu'une recherche avec des télescopes dédiés n'en dénicherait pas plus de dix nouveaux. Après tout, les astronomes n'en avaient trouvé que très peu durant tout le XX^e siècle. S. Sheppard, plus optimiste, en prédit le double, au vu de la sensibilité accrue des instruments astronomiques.

S. Sheppard est aujourd'hui plus riche de 100 dollars : depuis ce pari, notre équipe a découvert 62 nouveaux satellites et il en reste sans doute d'autres à découvrir dans les données. Si nous faisons le compte des découvertes des autres équipes, le nombre total de nouvelles lunes découvertes est passé de 11 à 105 (au sens strict, il n'y a qu'une Lune, le satellite de la Terre, mais le terme « lune » est communément employé pour désigner un satellite naturel).

Personne n'avait prédit que la famille du Soleil recélait autant de membres cachés. Ces satellites discrets sont « irréguliers », ce qui signifie que leurs orbites sont larges, très elliptiques et inclinées par

rapport à l'équateur de leur planète-hôte. Les lunes dites régulières, comme celle de la Terre ou les satellites galiléens de Jupiter, ont par comparaison des orbites serrées, quasi circulaires et pratiquement équatoriales.

De façon encore plus étonnante, la plupart des lunes irrégulières sont sur des orbites rétrogrades, c'est-à-dire qu'elles tournent autour de leur planète-hôte dans le sens contraire à celui de la rotation de la planète sur elle-même. *À contrario*, les satellites réguliers tournent dans le même sens que leur planète (orbites progrades). Par exemple, vue d'au-dessus du pôle Nord de la Terre, la Lune tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, comme la Terre autour de son axe (et autour du Soleil). Les autres planètes tournent aussi dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, ce qui reflète sans doute le mouvement du disque de gaz et de poussières à partir duquel elles se sont formées, il y a 4,5 milliards d'années. Les satellites réguliers partagent ce mouvement, car ils se seraient formés à partir de disques entourant leurs planètes respectives. La rotation contraire

L'ESSENTIEL

✓ Par opposition aux satellites classiques, les lunes irrégulières parcourent des orbites très allongées et inclinées, parfois dans le sens opposé à celui de la rotation de leur planète sur elle-même.

✓ D'après les observations récentes, les satellites irréguliers sont la règle plutôt que l'exception.

✓ Leurs caractéristiques orbitales indiquent que les planètes les ont capturés après leur formation autour du Soleil.

✓ Ils nous renseignent sur les processus à l'œuvre dans les débuts du Système solaire.

Don Dixon: IMSK/PLSSI

des satellites irréguliers est par conséquent le signe d'une origine différente.

Les modèles classiques ne rendent pas bien compte de cette famille d'objets, et une vague de nouveaux travaux théoriques est en cours. Il semblerait que les satellites irréguliers soient des survivants d'une époque révolue depuis longtemps, où l'attraction gravitationnelle exercée par les planètes nouvellement formées a extirpé les petits corps de leurs orbites initiales. Leur étude permettra de mettre en lumière les premières étapes du développement du Système solaire.

Bien que la première lune irrégulière connue, Triton, satellite de Neptune, ait été découverte dès 1846, la plupart d'entre elles n'ont été détectées que récemment, car elles sont souvent plus petites, donc moins lumineuses, que leur cousines régulières. S'ajoute aux difficultés le fait qu'elles soient distribuées dans une région de l'espace beaucoup plus vaste.

Par exemple, le satellite régulier de Jupiter le plus externe, Callisto, est en orbite à 1,9 million de kilomètres de la planète géante, alors que ses satellites irréguliers sont répartis dans un rayon de 30 millions de kilomètres. Cette taille est comparable à celle du domaine d'influence gravitationnelle de Jupiter, ou sphère de Hill, au-delà de laquelle le Soleil arracherait tout satellite à la planète. Si elle était visible à l'œil nu, la sphère de Hill aurait un diamètre apparent de dix degrés, soit 20 fois celui de la pleine Lune. C'est énorme comparé au champ de vision de la plupart des télescopes.

Des lunes à foison

Pour explorer une telle région à la recherche de satellites, il faut disposer des capteurs numériques les plus modernes et analyser presque 100 gigaoctets de données par nuit (voir l'encadré page 68). Notre propre relevé, *Hawai Moon survey*, entre 2000 et 2003, s'est focalisé initialement sur Jupiter, dont la proximité nous permet de détecter des petites lunes qui seraient trop faibles pour être vues autour des autres planètes géantes, plus lointaines. Des équipes menées par Brett Gladman, de l'Université de Colombie-Britannique, Mathew Holman, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et de John Kavelaars, de l'Institut d'astrophysique Herzberg, au Canada, ont mené des recensements similaires pour Saturne, Uranus et Neptune.

Les quatre planètes géantes se révèlent être accompagnées de lunes irrégulières. En extrapolant les découvertes actuelles, on estime que chacune d'entre elles possède environ 100 satellites irréguliers ayant un diamètre de plus d'un kilomètre. Ces corps célestes occupent une large gamme de tailles, les plus petits étant beaucoup plus représentés. Dans le cas de Jupiter, les tailles des lunes irrégulières vont de 180 kilomètres pour la plus grosse, J6 Himalia, jusqu'à des objets qui ne font qu'un ou deux kilomètres.

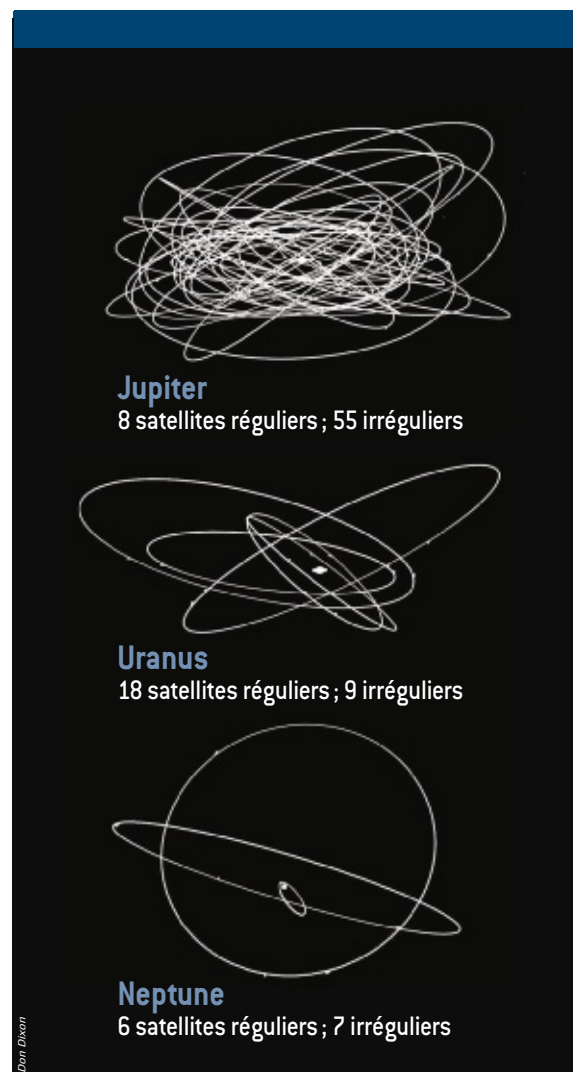
Résonances célestes

Les orbites de ces lunes sont parmi les plus compliquées du Système solaire. Comme elles gravitent loin de leur planète-hôte, elles sont tiraillées entre l'attraction du Soleil et celle de leur planète, si bien que leurs orbites ont un fort taux de précession (décalage du grand axe de l'ellipse au fil du temps). La précession est souvent si rapide qu'il n'est même pas adéquat de considérer que la trajectoire est une boucle fermée. Ces lunes irrégulières tracent dans le ciel des orbites étranges, semblables à des rosaces.

Quand les différentes influences gravitationnelles agissent de façon synchrone, la situation peut devenir très complexe. Par exemple, si le taux de précession d'un satellite est égal à la période de révolution de la planète autour du Soleil, le satellite entre dans une résonance dite d'éviction. L'attraction du Soleil est alors maximale toujours au même endroit de l'orbite et ses effets s'accumulent avec le temps, ce qui déstabilise l'orbite. L'ellipse s'allonge au point que la Lune entre en collision avec sa planète ou, au contraire, s'échappe de la sphère de Hill et tombe sous l'emprise gravitationnelle du Soleil.

Les orbites lunaires progrades sont plus vulnérables à ce phénomène que les orbites rétrogrades, l'influence du Soleil et de la précession se combinant dans le premier cas et se compensant en partie dans l'autre. Si les lunes irrégulières étaient autrefois équitablement réparties entre les deux sens, ce mécanisme de résonance pourrait expliquer que la plupart d'entre elles sont aujourd'hui rétrogrades.

Une autre résonance, connue sous le nom de résonance de Kozai, couple l'inclinaison et la forme de l'orbite. Les orbites inclinées deviennent très excentriques (l'ellipse s'allonge), ce qui conduit aussi poten-

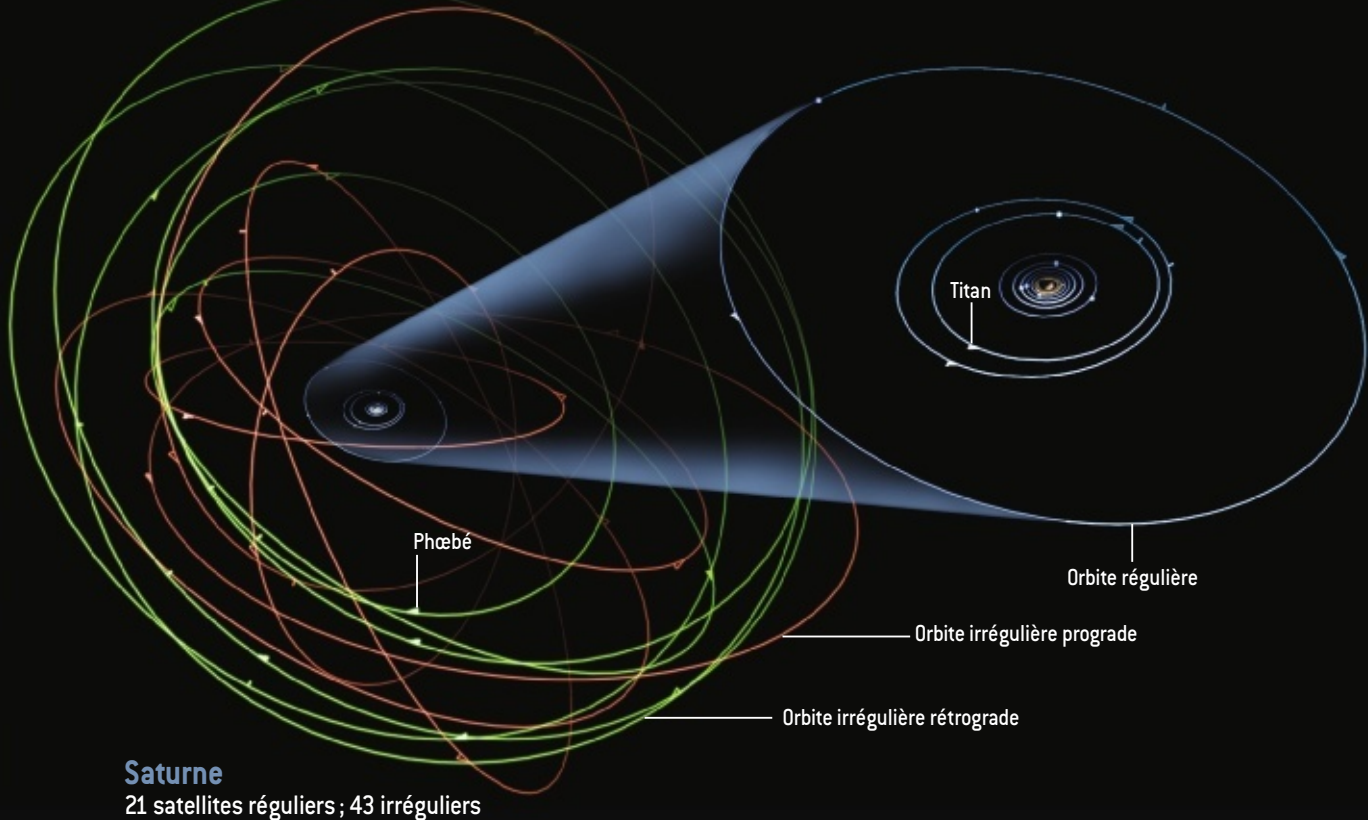


tiellement à l'éjection ou la destruction du satellite. C'est peut-être pourquoi on n'observe pas de lunes dont l'inclinaison s'écarte de plus de 50 degrés par rapport au plan équatorial de la planète.

Pour résumer, les satellites irréguliers actuels semblent être les survivants d'interactions gravitationnelles qui ont détruit nombre de leurs semblables. D'autres caractéristiques orbitales des satellites irréguliers n'ont cependant rien à voir avec les interactions gravitationnelles. Les lunes appartiennent à des groupes distincts, ou familles, dont les membres ont des paramètres orbitaux très proches. Les familles de satellites de Jupiter comptent par exemple jusqu'à 17 membres. Selon l'interprétation la plus simple, les membres d'une famille sont les restes d'une lune plus grande qui a été fragmentée par un impact, ses morceaux continuant à suivre des orbites proches de celle de l'objet

L'étendue du cortège de satellites de Saturne était encore mal connue il y a quelques années. Ses membres se répartissent en deux catégories. Les lunes régulières (*en bleu*), comme Titan et Japet, sont relativement proches de la planète et évoluent quasiment dans son plan équatorial. Les lunes irrégulières, comme Phœbé et nombre de petits corps dépourvus de

nom, sont bien plus éloignées et ont des orbites orientées de diverses façons. Certaines tournent dans le même sens que Saturne sur elle-même (*progrades, en rouge*), d'autres tournent dans le sens inverse (*rétrogrades, en vert*). Des systèmes similaires entourent chacune des planètes géantes (*seule une partie de l'ensemble des lunes est représentée ici*).



initial. De fait, lorsqu'on simule en remontant le temps les orbites des membres d'une famille, celles-ci se fondent en une seule. Ainsi, une fraction importante des satellites observés serait en fait des lunes de seconde génération.

Semblables à des résidus de comètes

David Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest à Boulder, dans le Colorado, et ses collègues ont modélisé la destruction des lunes par des collisions. Ils ont montré qu'aujourd'hui, il est rare qu'une lune entre en collision avec une autre (ou avec une comète). C'est pourquoi l'existence de familles suggère une époque ancienne où les populations de satellites irréguliers ou de comètes étaient bien plus importantes que maintenant, et les collisions plus fréquentes.

Au-delà des orbites, les connaissances des astronomes ont progressé sur d'autres aspects des satellites irréguliers. La plupart de ces lunes sont si petites qu'on ne peut pas apprendre grand-chose sur leur composition. Ni leur masse ni leur spectre de lumière réfléchie, ou couleur, ne peuvent être déterminés avec précision. Tommy Grav, du Centre d'astrophysique Smithsonian à Harvard, et des collègues ont cependant découvert que les lunes d'une même famille tendent à avoir la même couleur. Cela suggère une parenté de composition entre les membres d'une famille, et appuie l'hypothèse de la fragmentation d'un corps parent.

L'un des rares satellites irréguliers que les astronomes connaissent en détail est Phœbé, une lune de Saturne observée par la sonde *Cassini* en juin 2004. *Cassini* a obtenu des images de haute résolution montrant une grande densité de cratères à la

surface de Phœbé; la sonde y a aussi détecté par spectroscopie la présence de glaces d'eau et de dioxyde de carbone. Les deux lunes de Neptune observées par la sonde *Voyager 2* en 1989, Néréide et Triton, ont elles aussi des surfaces gelées. Cela indique que ces corps se sont formés relativement loin du Soleil, comme les comètes.

Les satellites irréguliers de Jupiter sont noirs comme de la suie et semblent dépourvus de glace, probablement parce qu'ils sont plus proches du Soleil. Ils ressemblent à des résidus de comètes qui auraient perdu leurs composés volatils au fil du temps.

Les propriétés des satellites irréguliers – en particulier leurs orbites rétrogrades – suggèrent que ces corps ne se sont pas formés *in situ*. Il s'agirait plutôt de matériaux de construction planétaire inutilisés, comme les astéroïdes ou les comètes, qui gravitaient à l'origine autour du Soleil et

ont été d'une façon ou d'une autre capturés par les planètes. Le mécanisme de capture est encore mal compris. Dans les interactions complexes de la gravité du Soleil et des planètes, les astéroïdes et les comètes sont attirés sur d'éphémères orbites autour des planètes géantes. Ils sont alors comme des feuilles dans un tourbillon du vent d'automne : ils entrent dans la danse, font quelques dizaines de tours et sont éjectés de façon imprévisible.

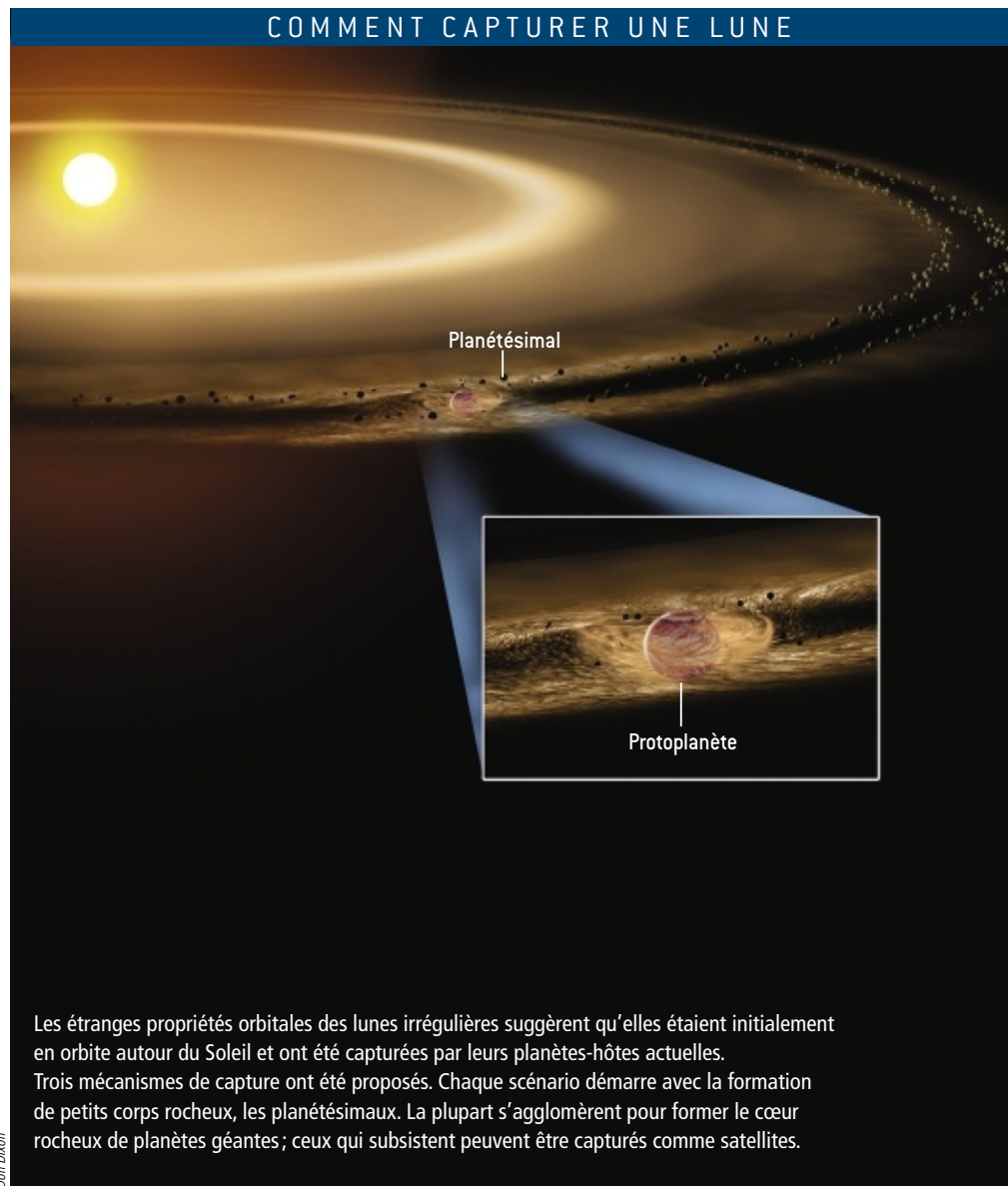
Des corps capturés par aérofreinage ?

La célèbre comète D/Shoemaker-Levy 9 (le D signifie « défunte ») en est un exemple. Après s'être placée sur une orbite temporaire autour de Jupiter au long du XX^e siècle, elle s'est écrasée la géante gazeuse en 1994. Si elle n'avait pas connu cette fin prématurée, elle aurait été éjectée sur une orbite héliocentrique en quelques centaines d'années. On connaît ainsi plusieurs corps qui ont survécu à une capture temporaire par Jupiter et qui sont retournés tourner autour du Soleil.

Mais pour qu'un corps soit définitivement capturé d'une orbite héliocentrique jusqu'à une orbite fixe et stable autour d'une planète, il doit perdre une partie de son énergie initiale, faute de quoi il s'échappera à nouveau. Or il n'existe à l'heure actuelle aucun mécanisme efficace de dissipation d'énergie dans le Système solaire. La capture des satellites a donc dû avoir lieu il y a longtemps, à une époque où le Système solaire avait des propriétés différentes.

Dans les années 1970, les théoriciens ont proposé trois mécanismes possibles de capture, intervenus pendant ou peu après la formation des planètes.

D'après le premier mécanisme, proposé par les Américains James Polack, Joseph Burns et Michael Tauber, les lunes ont perdu de l'énergie par friction en traversant les gigantesques atmosphères qu'avaient alors les géantes gazeuses embryonnaires. Jupiter et Saturne, contrairement à la Terre et aux autres planètes telluriques, sont constituées principalement d'hydrogène et d'hélium. Elles se sont sans doute formées à partir d'un noyau de roche et de glace de plusieurs dizaines de masses terrestres, qui a drainé de grandes quantités de gaz du disque protoplanétaire. Avant de prendre leur forme compacte actuelle, ces planètes ont pu passer par



Les étranges propriétés orbitales des lunes irrégulières suggèrent qu'elles étaient initialement en orbite autour du Soleil et ont été capturées par leurs planètes-hôtes actuelles.

Trois mécanismes de capture ont été proposés. Chaque scénario démarre avec la formation de petits corps rocheux, les planétésimaux. La plupart s'agglomèrent pour former le cœur rocheux de planètes géantes ; ceux qui subsistent peuvent être capturés comme satellites.

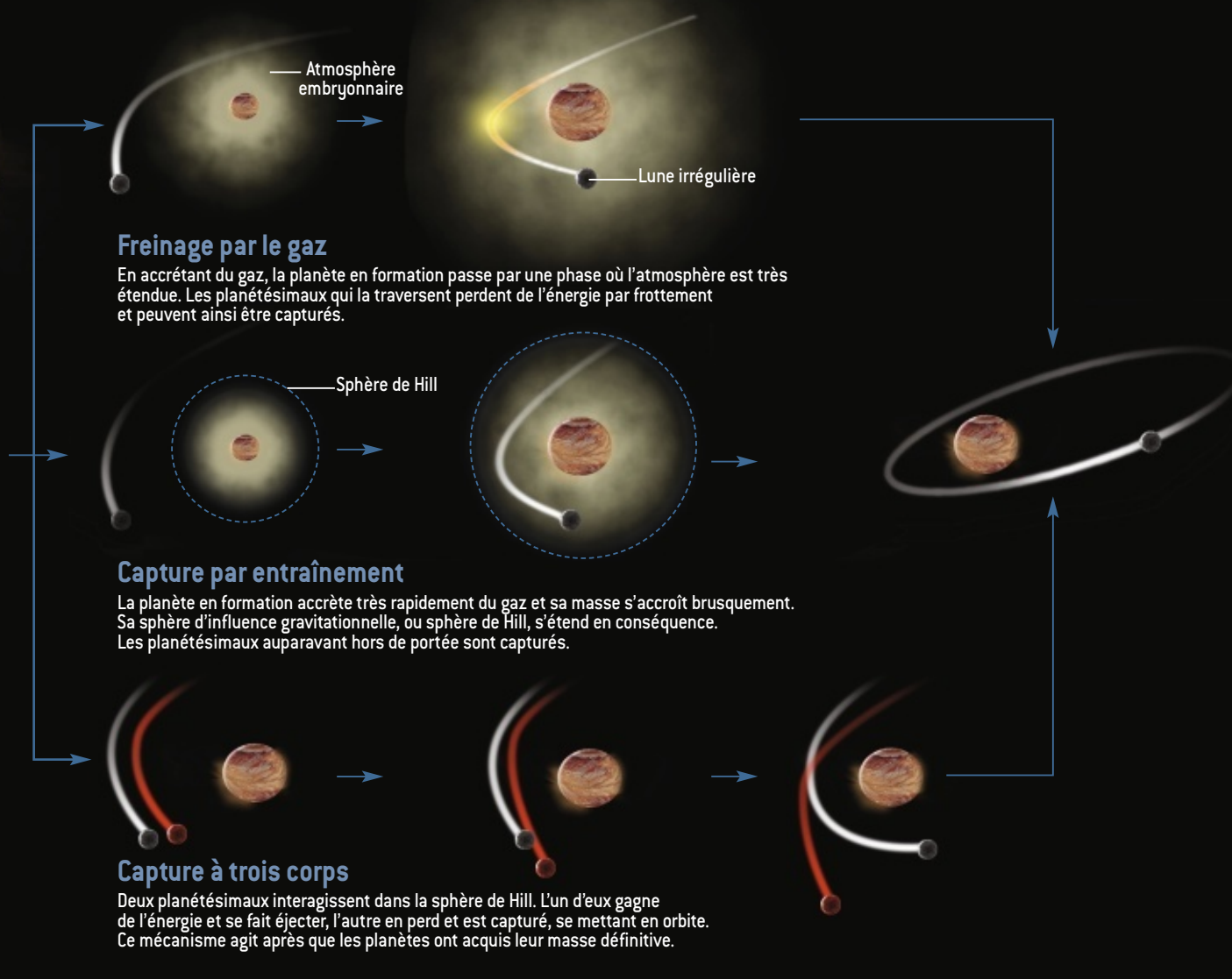
une phase durant laquelle leurs atmosphères étaient des centaines de fois plus étendues qu'aujourd'hui.

Trop grand, trop petit ou juste bien : comme Boucle d'Or, un astéroïde ou une comète de passage aurait eu trois destins possibles. Trop petit, il se serait consumé dans l'atmosphère ; trop grand, il aurait traversé sans entrave ; de la bonne taille, il aurait été ralenti, puis capturé. Cet effet d'« aérofreinage » est aujourd'hui utilisé par de nombreuses sondes planétaires pour se placer en orbite.

Un problème posé par le modèle du freinage atmosphérique est qu'il n'explique pas la présence de satellites irréguliers autour d'Uranus et de Neptune. Ces planètes ne sont pas des géantes

gazeuses, mais plutôt des géantes glacées, dominées par la roche et la glace avec un modeste vernis d'hydrogène et d'hélium. En raison de leur éloignement et de la plus faible densité de matériaux dans les régions externes du disque protoplanétaire, leurs cœurs ont grossi plus lentement et ont atteint la masse critique nécessaire à la captation du gaz alors que la nébuleuse solaire avait déjà été largement dissipée : Neptune et Uranus n'ont jamais eu d'atmosphères étendues. Dès lors, comment pourrait-il y avoir eu freinage par le gaz ?

Le deuxième mécanisme de capture proposé se déroule aussi pendant la croissance planétaire. L'accrétion du gaz sur le cœur rocheux des géantes gazeuses



aurait entraîné un accroissement rapide et spectaculaire de leur masse dans un processus auto-amplifié, d'où une croissance soudaine de la sphère de Hill de chaque planète. Les astéroïdes et autres objets se trouvant dans le voisinage au moment de cette croissance brutale se sont trouvés piégés dans le champ de gravité de la planète. Ce mécanisme de capture a été proposé pour la première fois par Thomas Heppenheimer et Carolyn Porco, à l'Institut de technologie de Californie. Ils l'ont appelé, un peu maladroitement, capture par entraînement (*pull down*).

Cependant, comme le freinage gazeux, ce mécanisme a des difficultés à rendre compte des lunes d'Uranus et Neptune, puisqu'aucune des deux planètes n'est

passée par une phase de croissance brutale. La plupart des modèles suggèrent que ces deux planètes ont grandi progressivement, en accumulant des planétésimaux de la taille d'astéroïdes et de comètes durant des dizaines ou des centaines de millions d'années. Même Jupiter et Saturne auraient dû croître en seulement quelques siècles pour que la capture par entraînement y soit effective ; une durée trop brève pour être plausible.

Un modèle alternatif pour expliquer la formation d'Uranus et Neptune a été proposé par Alan Boss, de l'Institut Carnegie de Washington. Il suggère qu'elles étaient au départ aussi massives que Jupiter et Saturne, mais qu'elles ont été dépouillées de leur enveloppe par le rayonnement

LES AUTEURS



David JEWITT est professeur d'astronomie à l'Université de Hawaï.

Scott SHEPPARD est chercheur à l'Université Carnegie de Washington.

Jan KLEYNIA travaille à l'Université de Hawaï.

d'étoiles massives voisines. Mais la présence des satellites irréguliers est encore plus difficile à expliquer dans le cadre de ce modèle, car une planète qui perd de la masse aurait tendance à perdre des lunes plutôt qu'à en gagner.

Capture à trois corps

Dans les scénarios de freinage gazeux ou de capture par entraînement, les satellites irréguliers ont sans doute été capturés dans les 10 à 20 premiers millions d'années du Système solaire, longtemps avant que la Terre ne prenne sa forme actuelle. Un troisième scénario très différent a été avancé en 1971 par Bepi Colombo et Fred Franklin, alors tous deux au Centre d'astrophysique de Harvard. Selon eux, la collision entre deux corps dans la sphère de Hill d'une planète dissiperait suffisamment d'énergie pour que l'un des deux soit capturé. Cette idée de « capture à trois corps » a reçu assez peu d'attention depuis, peut-être parce que ce type de collision est extrêmement rare aujourd'hui.

Cependant, des travaux récents montrent qu'aucune collision n'est nécessaire. Les trois corps ont juste besoin d'inter-

agir par le biais de la gravitation. L'un d'entre eux peut gagner de l'énergie au détriment des deux autres. Ce processus est l'équivalent à grande échelle de l'effet de fronde gravitationnelle utilisé pour propulser les sondes spatiales vers les planètes lointaines. En 2006, Craig Agnor, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et Doug Hamilton, de l'Université du Maryland, ont proposé une nouvelle forme de capture à trois corps, où un couple d'objets liés est séparé par la gravité de la planète, ce qui entraîne l'éjection d'une composante du couple tandis que l'autre est satellisée.

Ce mécanisme est intéressant, car les quatre planètes géantes, sans exception, sont dotées de nombreuses lunes irrégulières. Il fonctionne en effet aussi bien pour les géantes gazeuses que les géantes glacées, sans recours à une enveloppe gazeuse étendue ou une croissance brutale. Il ne nécessite qu'un nombre suffisant de collisions ou de passages dans le voisinage des planètes. La période la plus favorable à ce type d'interaction est la fin de la formation des planètes, après que la sphère de Hill a atteint ses proportions actuelles, mais avant que les débris résiduels de la formation planétaire aient été balayés.

LA CHASSE AUX SATELLITES

Éloignés, minuscules, mal éclairés : les satellites irréguliers sont parmi les corps célestes les plus difficiles à observer. Pour les dénicher, il faut utiliser les meilleurs télescopes de relevé, des instruments qui scrutent de larges bandes du ciel au lieu de se focaliser sur une région limitée. La plupart des découvertes des auteurs ont été réalisées à l'aide du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) du Mauna Kea, à Hawaï. Bien que son miroir de 3,6 mètres soit petit

comparé à ceux des télescopes actuels, il est équipé de l'un des plus grands capteurs numériques, *MegaCam*, dont les 268 millions de pixels couvrent une surface de un degré carré sur la voûte céleste.

Le principal problème est de distinguer les petits corps du Système solaire d'objets situés en arrière-plan comme des galaxies ou des étoiles. Pour cela, on utilise deux méthodes. La première consiste à changer d'angle. On compare trois images de la même zone prises à

différents instants. Entre les prises, la Terre a avancé sur son orbite, ce qui change l'angle de vue. Les objets apparaissent décalés, et ce d'autant plus qu'ils sont proches. En pratique, les étoiles ne bougent pas et seuls les objets du Système solaire semblent décalés.

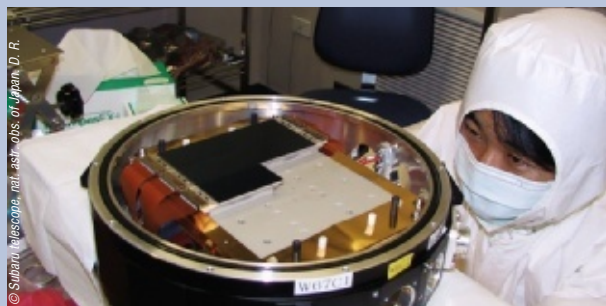
La seconde méthode est une mesure de vitesse. On prend dix images d'une même zone, on les décale en fonction des vitesses orbitales attendues des lunes que l'on cherche, et on les superpose. Dans l'image-somme, les étoiles d'arrière-plan apparaissent comme des traits, et les satellites irréguliers comme des points lumineux. Cette méthode utilisant plus d'images pour une même région du ciel est plus sensible aux objets peu visibles que la première, mais il faut plus de temps pour réaliser un relevé complet.

Pour s'assurer que les corps détectés sont bien des lunes et non



Le satellite de Jupiter S/2003 a été découvert en 2003 sur ces deux images prises à 39 minutes d'intervalle. Les autres objets sont des étoiles d'arrière plan.

des astéroïdes ou des comètes, on les observe plusieurs mois durant pour retracer leurs orbites et vérifier qu'elles tournent bien autour de leurs planètes respectives.



Le détecteur Prime focus Camera du télescope Subaru, à Hawaï.

David Jewitt, Scott Sheppard et Jan Kleyna

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 Nesvorný, de l'Institut de recherche du Sud-Ouest, à Boulder, David Vokrouhlický, 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. Nesvorný 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. Nesvorný, D. Vokrouhlický 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.**

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.