

La naissance de la Lune

Des simulations précisent la naissance de notre satellite.

Des missions Apollo, les astronautes ont rapporté des roches de Lune dont, après analyse, la composition chimique s'est révélée identique à celles du manteau terrestre. Toutefois, à la différence de la Terre dont le noyau ferreux est important, la Lune ne contient que très peu de fer et son noyau est très petit. Toute théorie de la formation de la Lune doit expliquer ces deux faits.

Depuis les années 1970, les planétologues pensent que la Lune est apparue à la suite d'une collision entre la Terre et un planétoïde. La chaleur dégagée par l'impact aurait volatilisé le planétoïde et le manteau supérieur de la Terre, propulsant un nuage de matière chaude autour de notre planète. Une partie de cette matière serait retombée sur Terre, tandis que l'autre se serait condensée pour former son satellite.

On suppose que l'impact a eu lieu à la fin de la formation de la Terre, lorsque le fer qu'elle contenait – plus dense que les

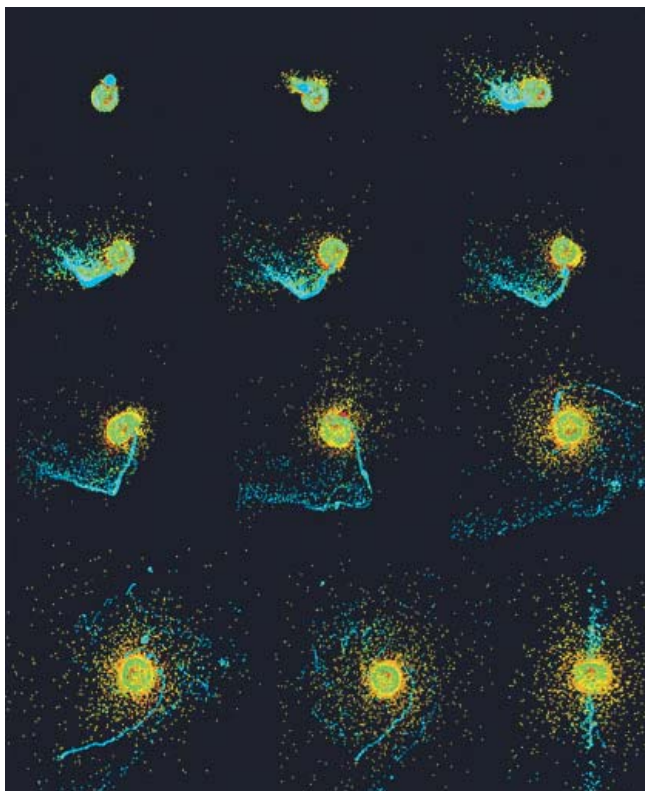
autres éléments – avait déjà migré vers le centre pour y former le noyau. Ainsi, la matière propulsée dans l'espace par l'impact ne contenait que peu de fer et l'hypothèse est compatible avec les compositions respectives de la planète et de son satellite. Toutefois, les simulations numériques réalisées pour étudier cet événement n'aboutissaient jamais, jusqu'ici, à un couple semblable au système Terre-Lune. L'hypothèse de l'impact perdait de sa crédibilité. Or, Robin Canup, du Département d'études spatiales de l'Université de Boulder et Erik Asphaug, du Département des sciences de la Terre de l'Université de Santa Cruz, viennent de réaliser un modèle numérique plus précis qui valide l'hypothèse de l'impact.

Lorsque l'on calcule les conséquences d'un impact entre deux planétoïdes afin de produire un système semblable au couple formé par la Terre et par la Lune, plusieurs difficultés apparaissent : l'énergie et le moment cinétique – la « quantité de rotation » – apportés par la collision doivent être suffisants pour placer en orbite une quantité de matière équivalente à la masse de la Lune. On choisit un « impacteur » massif par rapport à la planète, qu'il percute de biais. Les simulations antérieures n'autorisaient que deux types de configurations. Dans le premier, la masse et la trajectoire de l'impacteur étaient telles que le moment cinétique du couple final était environ deux fois supérieur à celui du système Terre-Lune actuel (la Terre tournerait sur elle-même en à peine plus de deux heures). Il fallait alors imaginer que des impacts ultérieurs avaient fortement réduit la vitesse de rotation. L'autre possibilité conduisait à un moment cinétique proche de celui que l'on connaît aujourd'hui, mais imposait une masse du système (planète et impacteur) inférieure à 65 pour cent de celle de la Terre actuelle. Dans ce cas, la collision devait avoir pris place à une époque plus reculée, lorsque la Terre n'était pas encore entièrement formée et la collision n'expliquait pas l'absence de fer dans la Lune.

Toutefois, après avoir décelé, dans les modèles numériques précédents, plusieurs insuffisances qui pouvaient expliquer ces paradoxes (notamment sur la prise en compte des interactions gravitationnelles), R. Canup et E. Asphaug ont créé un modèle plus complet. La matière en orbite est modélisée par 30 000 particules non ponctuelles, des petits volumes de densité variable ; de cette façon, la matière simulée, plutôt que d'avoir une répartition granulaire, est plus uniforme, même dans les régions de très faible densité. Par ailleurs, leur modèle prend en compte les interactions gravitationnelles entre ces différentes « particules ».

Les calculs effectués correspondent à la collision d'une planète semblable à la Terre avec un impacteur environ dix fois plus léger (semblable à Mars). Leur masse totale représente 98 pour cent de celle du système Terre-Lune actuel : on suppose ainsi que la Terre était presque complètement formée. Les angles d'attaque du bolide sont choisis de sorte que le moment cinétique total, étant donné les masses en présence, soit égal à celui du système Terre-Lune. La moyenne des simulations indiquent que la masse de la planète formée est 0,99 fois la masse de la Terre. La masse qui reste en orbite est de l'ordre de 1,7 masse lunaire ; le fer ne représente que deux pour cent de ce nuage et 80 pour cent retombe sur la Terre.

Ainsi, l'hypothèse selon laquelle la Lune s'est formée, il y a 4,5 milliards d'années, par impact d'un planétoïde de la taille de Mars sur une Terre presque entièrement formée reste, aujourd'hui, la plus plausible.



Robin Canup et Erik Asphaug

Évolution de la planète et de son « impacteur » au cours de la première journée du cataclysme qui a donné naissance à la Lune, de 18 minutes après la collision (en haut à gauche) jusqu'à 23 heures après (en bas à droite, où le système est observé par la tranche). Les couleurs des particules de matière représentent leur énergie interne ce qui permet de distinguer la matière condensée (bleu et vert) de la matière à haute énergie interne (rouge) c'est-à-dire fluide, ou condensée sous très haute pression (comme dans les couches interne de la Terre). À la vingt-troisième heure, un disque de poussière est déjà formé et, au cours des années qui suivront, ces poussières s'aggloméreront pour former la Lune.

La force au bout des doigts

Dans la perception des formes par le toucher, les forces de résistance comptent plus que les déplacements de la main.

En explorant des objets avec la main, les yeux fermés, nous reconnaissons sans difficulté une balle, un bol ou une paille. Le toucher est si fin que les non-voyants déchiffrent les lettres en les effleurant seulement du bout des doigts, lisant ainsi le braille.

La perception des formes par le toucher repose sur les informations captées par les doigts et qui parviennent ensemble au cerveau. Par exemple, l'exploration d'une surface plane correspond à une force de résistance uniforme rencontrée par le doigt. La présence d'une bosse se traduit par un mouvement du doigt vers le haut, puis vers le bas. En première approximation, nous pourrions penser que ces mouvements sont responsables de la perception de cette bosse. Toutefois, ils coïncident avec une force de résistance au mouvement, qui varie de façon concomitante avec le mouvement : quand la pente augmente, la force de résistance croît, par exemple. Dans le monde des objets réels, la force de résistance et le mouvement obéissent aux lois de la méca-

nique, mais leurs rôles respectifs dans la perception des formes par le toucher sont mal connus.

Pour éclaircir ce point, nous avons mis au point un dispositif de réalité virtuelle, fondé sur un mécanisme à retour de force, lequel procure des sensations tactiles contrôlables. Ce dispositif, dit haptique, combine des objets virtuels et réels : le sujet suit avec le doigt la forme d'un objet réel, mais des objets virtuels sont représentés indépendamment de la géométrie de l'objet réel par l'intermédiaire d'un poussoir produisant des forces de résistance programmables.

Le sujet est assis derrière un rideau opaque qui l'empêche de voir sa main et il pose le doigt sur le dispositif, qu'il déplace au-dessus d'un objet réel, un creux, une bosse ou une surface plane. Son doigt monte et descend avec la géométrie de la surface.

Simultanément, le dispositif de simulation impose au doigt des forces de résistance sans rapport avec l'objet réel, mais qui simulent un autre objet. Ainsi, la force virtuelle peut imposer une sensation de résistance (comme dans une montée) alors que le doigt est, en fait, en train de descendre. Pour simuler les forces de résistance de tels objets, nous avons mesuré la composante verticale de la force appliquée par un sujet sur des objets réels, et nous avons programmé le dispositif haptique pour que la résultante totale des forces corresponde à celle de l'objet virtuel. Ce dispositif réalisé, nous demandons aux sujets quelle forme ils perçoivent pour chaque combinaison d'objets réels et virtuels proposée.

Dans la majorité des cas, les sujets perçoivent la forme de l'objet virtuel ! Ils sont donc plus sensibles aux forces de résistance qu'ils rencontrent, qu'à la géométrie des objets décrite par les mouvements de leur doigt. Nous ne connaissons pas encore bien les mécanismes perceptifs qui produisent cet effet, ni ses limites.

Toutefois, on peut d'ores et déjà envisager des applications, dans les simulateurs d'opérations chirurgicales, par exemple. Les chirurgiens se servent de tels dispositifs pour s'entraîner à des opérations délicates. Ces simulateurs cherchent à reproduire l'ensemble des sensations perçues lors d'une intervention. Désormais, les concepteurs de ces simulateurs seront plus attentifs aux forces de résistance rencontrées lorsqu'on explore un objet qu'à sa géométrie réelle.

G. ROBLES-DE-LA-TORRE et V. HAYMARD,
Centre des machines intelligentes,
Université McGill, Montréal

BRÈVES

Mandibule humaine de 450 000 ans

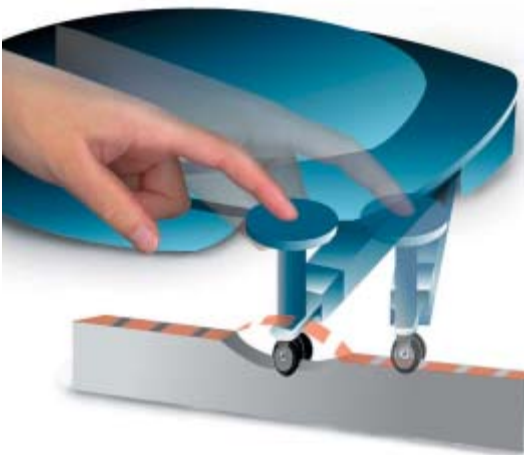
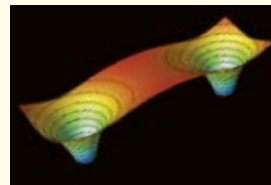
Dans la grotte de l'Argo, à Tautavel, les paléontologues ont découvert une mandibule d'*Homo erectus* complète, vieille de 450 000 ans. Les neuf dents peu usées indiquent que la mandibule était probablement celle d'une jeune fille âgée de 17 ans environ. À l'époque où elle a vécu, l'endroit était occupé par des chasseurs de grands herbivores (chevaux, rhinocéros, cerfs et rennes), comme en témoignent les ossements d'animaux et les restes d'outils préhistoriques découverts à proximité. Auparavant, le continent européen n'avait livré que trois mandibules d'hommes antérieurs aux néandertaliens : deux à Tautavel et une en Allemagne.

Du sang à la souche

Les cellules souches sont des cellules «originelles» dont la destinée n'est pas encore déterminée : elles peuvent se «différencier» en chacun des 220 types de cellules de l'organisme humain. Toutefois, la spécialisation «sur commande» de ces cellules en un type cellulaire particulier est difficile. L'équipe de Dan Kaufman, de l'Université du Wisconsin, a réussi à fabriquer des cellules sanguines (des globules rouges, des globules blancs et des plaquettes) à partir de cellules souches embryonnaires dites hématopoïétiques. Ces résultats ouvrent des voies nouvelles pour la production de substituts sanguins.

Trou noir

Lorsque deux trous noirs gravitent l'un autour de l'autre, ils impriment à l'espace-temps une déformation comparable à celle que subit une pâte sous l'action des pâles d'un robot mixeur. Cette déformation s'éloigne du couple sous la forme d'ondes gravitationnelles. Trois interféromètres géants, deux américains et un franco-italien, vont entrer en fonction au cours des années 2002-2004 pour tenter de détecter de telles ondes. Toutefois, les effets attendus sont faibles, et les astrophysiciens auront besoin de connaître à l'avance l'allure du signal attendu pour pouvoir l'extraire du bruit de fond. Éricourgoulhon et Philippe Grandclément, à l'Observatoire de Paris, viennent de réaliser la première simulation complète du mouvement de deux trous noirs gravitant l'un autour de l'autre sur des trajectoires initialement circulaires. Ce premier modèle va servir de condition initiale pour calculer la suite de l'évolution du système.



Dans l'expérience, le sujet explore une surface par l'intermédiaire d'un poussoir. Son doigt suit ainsi la géométrie d'un objet réel, ici un trou (en gris) à l'aide du poussoir, mais ressent en même temps des forces de résistance «contradictoires» qui correspondent à une bosse virtuelle (en pointillés orange). Au final, il perçoit la bosse et non le trou. Dans la perception des formes par le toucher, les forces de résistance comptent plus que les mouvements des doigts.

Zones marines

Adieu Manche Ouest, Ouest Bretagne, Nord Gascogne... À partir de février 2002, la météo marine chantera une autre litanie. Afin d'harmoniser ces zones en Europe, l'administration va les reconfigurer et les rebaptiser. Une carte commune ayant déjà été établie pour les pays de la Méditerranée et ceux de la mer du Nord, ce sont les côtes françaises qui sont concernées par ces changements. Ainsi, la zone Manche Ouest qui allait de Ouessant à La Hague se divisera l'année prochaine en deux régions nommées Ouessant et Casquets. De façon générale, les nouveaux noms attribués (Antifer, Iroise, Yeu...) empruntent ceux de ports et de zones de trafic connus de tous les marins.

Fullerènes supraconducteurs

Coup de chaleur sur les fullerènes! Ces molécules de carbone en forme de ballon de football sont supraconductrices à 18 kelvins. En les dopant avec des molécules de tribromométhane, B. Batlogg, de la Société *Lucent Technologies*, et des

physiciens de l'Université de Constance, en Allemagne, ont augmenté à 117 kelvins la température de la transition supraconductrice. L'introduction des molécules dopantes change la distance entre les atomes de carbone, qui passe de 1,415 à 1,445 nanomètres.

Cette modification a pour conséquence une conduction non plus par les électrons, mais par les «trous» (des absences d'électrons) du cristal.

Le visage de Louis XI

Reconstituer le visage de Louis XI à partir de son crâne : tel est l'objectif des spécialistes ukrainiens réunis à Cléry-Saint-André, dans le Loiret, où les restes du roi sont conservés. De Louis XI, artisan de l'unité française au XV^e siècle, il existe une vingtaine de représentations, mais elles n'auraient pas été réalisées d'après nature. Dans un laboratoire improvisé installé dans la sacristie, les scientifiques ont réalisé un moulage en silicone du crâne du souverain, ainsi que de celui de son épouse, Charlotte de Savoie. L'ADN royal sera également analysé. Les parties manquantes du crâne du souverain (l'étage moyen et supérieur), que l'on n'a pas retrouvées, seront sans doute reconstituées par trois fragments d'os appartenant à ses enfants.

Quand l'industrie aide... la paléontologie

Une méthode de contrôle de la qualité des pièces industrielles contribue à mettre au jour un dinosaure.

Il y a quelques mois, un journaliste allemand décide de filmer la découverte d'un dinosaure. Il contacte Günther Viohl, le directeur du musée du Jurasique de la ville bavaroise d'Eichstätt et les ingénieurs de l'Institut Fraunhofer, à Nuremberg, et leur propose d'appliquer la tomographie industrielle à la paléontologie. La tomographie établit des cartes de densité dans un matériau en mesurant l'absorption des rayons X. Cette méthode d'analyse de la structure interne d'un matériau sert, en médecine, à découvrir des tumeurs et, dans l'industrie, à contrôler la qualité de composants électroniques et mécaniques. Grâce à cette méthode, l'équipe de G. Viohl a découvert le membre antérieur d'un dinosaure d'une espèce nouvelle.

Les paléontologues disposaient déjà du crâne de l'animal. Sa mise au jour s'était révélée particulièrement longue et difficile, parce que ce crâne se trouvait à l'intérieur d'une plaque d'un calcaire siliceux très dur. Les paléontologues supposèrent que le reste du squelette se trouvait à l'intérieur d'une autre plaque. Un paléontologue doit souvent travailler des mois pour dégager un fossile, et libérer le squelette de sa gangue minérale en préservant ce qui l'entoure : restes d'épiderme ou autres tissus, empreintes, etc. Les multiples précautions prises pour recueillir le maximum d'informations allongent le temps de préparation.

Afin d'évaluer si la tomographie réduit ce temps de préparation, le Conservateur a décidé de soumettre à l'exploration tomographique le bloc contenant la tête du dinosaure (artificiellement reconstitué). En quelques heures, les ingénieurs de l'Institut Fraunhofer ont fait apparaître la structure osseuse. La conclusion s'imposait : l'image obtenue par tomographie aurait été une aide précieuse pour les paléontologues s'ils en avaient disposé ; progressant vite dans les zones sans intérêt, ils se seraient concentrés sur la couche entourant le fossile.

Dans l'autre plaque, qui n'avait pas encore été étudiée, le tomographe a révélé un membre antérieur du dinosaure. Forts de cette réussite, les paléontologues espéraient retrouver le reste du dinosaure dans une plaque restée sur le terrain, mais ils

ont appris que cette plaque avait été perdue, car déplacée et utilisée dans un remblai de route...

Pourtant le fossile découvert est rarissime : c'est un jeune d'une espèce inconnue de petit théropode, un groupe de dinosaures qui serait à l'origine des oiseaux. Les paléontologues connaissent déjà plusieurs petits théropodes du Crétacé (-145 à -65 millions d'années) dotés de caractéristiques d'oiseaux, qui étaient recouverts de duvet ou de plumes. Toutefois, la plume est apparue avant le Crétacé, probablement au Jurassique (-205 à -145 millions d'années). L'archéoptéryx, le plus ancien théropode aux caractéristiques aviaires, date de 150 millions d'années. Il en existe huit exemplaires au monde, dont celui du musée Humboldt de Berlin, entouré d'empreintes de «vraies plumes». Pour déterminer si la plume est apparue avec l'archéoptéryx ou avant, les paléontologues étudient les petits théropodes du Jurassique dotés de squelettes d'oiseaux. Le nouveau théropode est un cousin de *Compsognathus*, un petit théropode contemporain de l'archéoptéryx, dont les deux exemplaires qui ont été mis au jour sont dépourvus du moindre reste de couverture épidermique. Le théropode découvert à Eichstätt vivait un ou deux millions d'années avant l'archéoptéryx et avant *Compsognathus*. Des traces de proto-plumes existent-elles autour de son bras ? Si c'est le cas, la tomographie sera précieuse pour les dégager.



Tête du théropode mise en évidence par tomographie industrielle (*en haut*), et cette même tête dégagée de sa gangue (*en bas*). La tête mesure environ 15 centimètres.