

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

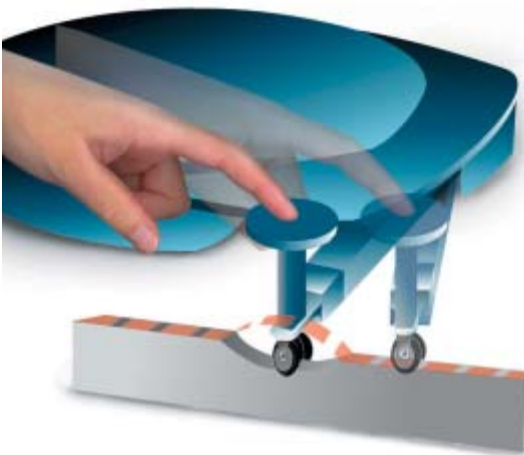
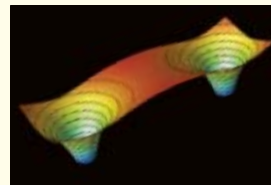
Dans la grotte de l'Argo, à Tautavel, les paléontologues ont découvert une mandibule d'*Homo erectus* complète, vieille de 450 000 ans. Les neuf dents peu usées indiquent que la mandibule était probablement celle d'une jeune fille âgée de 17 ans environ. À l'époque où elle a vécu, l'endroit était occupé 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.

Changement de régime

L'Etna évolue lentement d'un volcanisme où le magma remonte des profondeurs de la Terre à un autre type de volcanisme où le magma affleure en raison de mouvements des plaques tectoniques.

Une éruption importante de l'Etna vient de s'achever. Le plus grand volcan actif d'Europe dresse ses 3 323 mètres en Sicile orientale, près de l'endroit où le plancher de la mer Ionienne, qui fait partie de la plaque africaine, s'enfonce sous la plaque européenne. Ce phénomène de subduction explique l'émergence, au Nord de la Sicile, d'un arc d'îles volcaniques : l'arc éolien. Ainsi, l'île Stromboli ou encore l'île Vulcano se formèrent parce que la subduction produit du magma. À ce volcanisme de subduction s'oppose le volcanisme de point chaud attribué à la remontée localisée de matières des profondeurs de la Terre. Les géologues considéreraient jusqu'à présent que l'Etna était un volcan de point chaud. Cependant, nous avons étudié les reliquats du magma d'origine dans les laves du volcan et nous avons montré qu'au cours de 100 000 dernières années, l'Etna a progressivement évolué vers un volcan de subduction.

Les laves se forment à partir de roches fondues profondes et chaudes. Matières composites, elles comportent, outre les roches fondues, des gaz et des minéraux. Les géologues nomment «magma primaire» la toute première fraction de roches fondues, celle qui apparaît lors de la formation des laves. La formation du magma primaire diffère suivant le type de volcanisme. Sous un volcan de point chaud, elle résulte de la fusion de roches d'origine très profonde : parce que leur densité est inférieure à la densité moyenne du manteau, des poches de roches chaudes remontent jusque sous le volcan, où la baisse de pression les liquéfie. En revanche, sous un volcan de subduction, la formation du magma primaire résulte de la fusion des roches du manteau, provoquée par l'arrivée d'eau, de soufre et d'autres éléments volatils libérés par une plaque qui plonge dans le manteau supérieur. Ces éléments s'échappent à mesure que la température de la plaque augmente avec la profondeur.

Quel que soit le type de volcanisme, quand le magma primaire se forme, il subit une cristallisation partielle lorsque sa température diminue. L'olivine, un silicate de fer et de magnésium, est le premier minéral à cristalliser. Ensuite, des remontées, des cristallisations d'autres minéraux et, parfois, des mélanges avec de nouveaux magmas se succèdent. Il en résulte la formation des laves. Toutefois, quelle que soit la complexité de cette «maturation magmatique», de petites gouttelettes de magma primaire restent piégées dans les lacunes des cristaux d'olivine lors de la première cristallisation et y subsistent jusqu'à l'éruption. Elles représentent des signatures du mécanisme de production du magma primaire d'un volcan.

Nous avons étudié des inclusions magmatiques dans des cristaux d'olivine en provenance de diverses laves de l'Etna, de l'île Vulcano, ainsi que des monts ibléens. Situés au Sud-Est de la Sicile, les monts ibléens sont les restes d'un volcan de point chaud. Pour sélectionner les inclusions magmatiques (qui mesurent quelque 200 micromètres), nous avons employé un microscope optique. Puis, nous avons déterminé les compositions des «éléments en traces incompatibles» à l'aide de microsondes électronique et ionique.

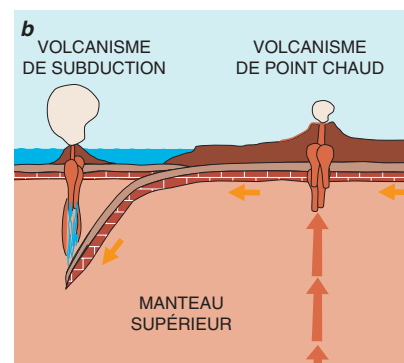
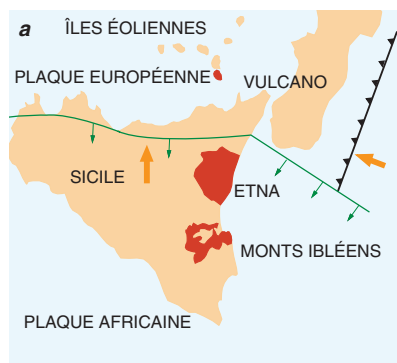
De quels éléments s'agit-il ? Les roches du manteau contiennent de nombreux éléments à l'état de traces. Parmi ceux-ci,

certains sont trop gros pour se loger dans la structure dense des minéraux, raison pour laquelle les géologues les nomment éléments incompatibles. Aussi, quand une roche du manteau fond, ils s'accumulent dans le magma primaire, puis dans la lave. Les valeurs des concentrations en éléments incompatibles d'un magma primaire dépendent des valeurs initiales de la roche qui fond ; les couches profondes du manteau sont plus riches en éléments incompatibles que le manteau supérieur. Les laves de point chaud, formées de roches provenant du manteau profond, sont donc beaucoup plus riches en éléments incompatibles que les laves formées à partir des roches du manteau supérieur. Toutefois, les laves d'un volcan de subduction contiennent aussi certains éléments incompatibles : ceux qui sont solubles dans les fluides libérés par la plaque qui plonge sous le volcan. Dès lors, comment distinguer des laves de subduction et celles de point chaud ? On sélectionne les éléments incompatibles qui sont insolubles dans les fluides de subduction : le titane, le niobium et le zirconium, toujours rares dans les laves de subduction.

Nous avons constaté que les laves anciennes de l'Etna, vieilles de 500 000 à 100 000 ans, contiennent de fortes concentrations de tous les éléments incompatibles. Ceci atteste d'un volcanisme de point chaud alimenté par la remontée de roches profondes. En revanche, les laves de moins de 100 000 ans contiennent des concentrations de plus en plus faibles en titane, en niobium et en zirconium. Elles témoignent de la présence de plus en plus marquée, à la verticale du volcan, d'une fusion localisée du manteau supérieur.

Selon nous, l'évolution des laves de l'Etna s'explique par la coexistence de deux volcanismes. On assisterait, sous la Sicile, à une lente superposition de la zone de subduction avec le point chaud qui alimente l'Etna. Ainsi des magmas de subduction se forment sous l'Etna : ils interagissent avec les magmas de point chaud, et engendrent les laves étnéennes mixtes observées aujourd'hui. Cette transition de l'Etna d'un volcanisme de point chaud vers un volcanisme de subduction explique aussi pourquoi les laves de l'Etna sont si riches en soufre et en eau, deux composants volatils caractéristiques des magmas de subduction. Tandis que le volcanisme de point chaud se manifeste par des effusions calmes de magma fluide, le volcanisme de subduction provoque des explosions de magma visqueux accompagnées de projections de blocs et de cendres. L'Etna, qui ne fut jamais très dangereux pour les populations massées autour de lui, le deviendra-t-il d'ici quelques... dizaines de milliers d'années ?

Pierre SCHIANO, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand
Robert CLOCCHIATTI, CEN-Saclay, Gif-sur-Yvette



L'Etna est, à l'origine, un volcan de point chaud, dont le magma est issu des couches profondes du manteau terrestre (b, à droite). Toutefois, il évolue progressivement vers un volcan de subduction (b, à gauche), car il est situé aux confins de la plaque africaine, qui remonte vers le Nord et s'enfonce sous la plaque européenne. La ligne verte, sur l'illustration de gauche (a) sépare (grossièrement) les volcans de type subduction (au Nord de la ligne) et les volcans de type point chaud (au Sud de la ligne) dans cette région : cette frontière se rapprocherait de l'Etna.