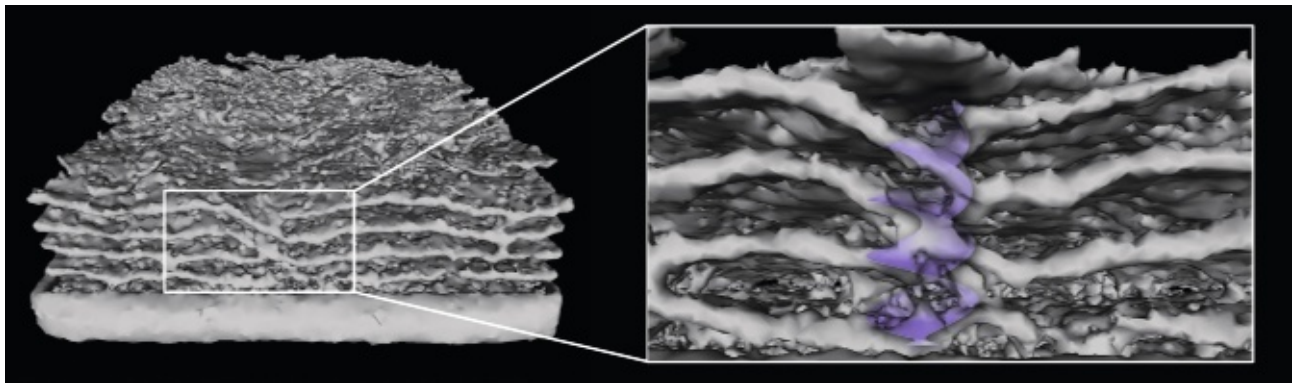




sont ensuite construits sur celle-ci, bientôt surplombés d'une autre cloison. La construction se poursuit jusqu'à épuisement du matériel. La structure résultante est alors constituée d'une série de plateaux espacés de façon à peu près régulière. Ces derniers sont reliés en plusieurs endroits par une continuité entre le plancher d'un niveau et celui d'un autre niveau (voir la figure 7).

Des rampes spirales entre les étages

En étudiant ces zones de connexion, nous avons constaté avec surprise que certaines avaient une forme hélicoïdale que nous avions déjà observée dans les nids réels, lors de l'exploration de leur reconstitution tridimensionnelle. Comment de telles structures pouvaient-elles apparaître au cours de la simulation ? En analysant la dynamique de construction de notre modèle, nous avons tout d'abord observé que si la forme globale du nid demeurerait identique au cours du temps, la structure était en permanence détruite et reconstruite. Ce remodelage permanent est lié au fait que les agents-fourmis du modèle détruisent ce qu'ils ont construit auparavant. Comme le font les fourmis réelles, ils prélèvent du matériel sur la surface supérieure des cloisons, qu'ils déposent ensuite sur leur face inférieure. Cela entraîne le déplacement progressif de l'ensemble des niveaux du sommet jusqu'à la base de la structure.

Nous avons constaté qu'au fil des remodelages successifs, certaines cloisons horizontales nées de la fusion progressive des chapiteaux entraînent en collision avec d'autres situées au niveau inférieur. Les rampes spirales sont construites dans les zones où ces défauts apparaissent ; elles établissent la jonction des cloisons entre deux étages contigus. Ces résultats montrent qu'une grande partie de la complexité des nids

■ LES AUTEURS

Guy THERAULAZ, directeur de recherche au CNRS, travaille au Centre de recherches sur la cognition animale à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse.

Andrea PERNA est chercheur postdoctoral à l'Université d'Uppsala, en Suède.

Pascale KUNTZ, professeur à l'École polytechnique de l'Université de Nantes, travaille au Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique.

■ À ÉCOUTER

Jeudi 4 octobre, Guy Theraulaz reviendra sur les prouesses techniques des termites dans la partie Actualités de l'émission *La marche des sciences*, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Perna *et al.*, From local growth to global optimization in insect built networks, dans P. Lio et D. Verma (dir.), *Biologically Inspired Networking and Sensing: Algorithms and Architectures*, IGI Global, pp. 132-144, 2011.

A. Perna *et al.*, The structure of gallery networks in the nests of termite *Cubitermes spp.* revealed by X-ray tomography, *Naturwissenschaften*, vol. 95, pp. 877-884, 2008.

A. Perna *et al.*, Topological efficiency in three-dimensional gallery networks of termite nests, *Physica A*, vol. 387, pp. 6235-6244, 2008.

7. SIMULATION D'UNE STRUCTURE OBTENUE avec suffisamment de matériel de construction. On obtient alors une série de plateaux régulièrement espacés et parfois connectés par des rampes hélicoïdales (en violet). Une telle structure est similaire à celles observées dans certaines termitières et fourmilières.

construits par les fourmis, et sans doute aussi les termites, pourrait résulter d'un décalage spatial et temporel dans la croissance des différentes régions du nid.

Objets de fascination et d'interrogation depuis près d'un siècle, les rampes hélicoïdales sont aujourd'hui produites par notre modèle. Cela indique qu'elles ne sont pas codées dans le comportement des agents, mais résultent de la dynamique engendrée par les règles de comportement des agents et des contraintes physiques imposées par les structures sur leurs déplacements. Ces résultats illustrent l'une des plus importantes propriétés des processus d'auto-organisation chez les insectes sociaux : l'émergence de propriétés nouvelles à l'échelle collective à partir de comportements individuels et d'interactions simples – propriétés qui seront bénéfiques à tous les individus de la colonie.

Ces processus d'auto-organisation permettent donc une réelle économie de codage des mécanismes qui, au niveau individuel, conditionnent l'émergence de ces propriétés. Cependant, de nombreuses questions restent encore ouvertes : quels sont les autres processus impliqués dans la construction des nids ? Comment l'architecture du nid intervient-elle dans la thermorégulation et les échanges gazeux ? Comment s'organise la vie dans de tels nids ? Ces questions intéressent les biologistes, mais aussi les architectes et les urbanistes qui, aujourd'hui, s'inspirent des principes de construction des insectes sociaux pour concevoir de nouvelles formes d'architectures. ■

Voyage au centre des termitières et des fourmilières

Guy Theraulaz, Fabien Picarougne et Christian Jost

Grâce à la tomographie à rayons X et à une reconstitution informatique, des éthologues visitent virtuellement les galeries de ces nids à l'architecture remarquable. Voici les premières images de leur voyage. À vos lunettes 3D !

Les nids construits par les termites sont parmi les structures les plus élaborées et les plus complexes du monde animal. Ces architectures, tout autant que leurs bâtisseurs, sont difficiles à observer. Les constructions s'opèrent dans l'obscurité la plus totale et l'intérieur des nids n'est accessible qu'en endommageant leur structure externe. Aujourd'hui, les outils d'imagerie médicale permettent d'analyser et de voyager au cœur de ces édifices sans les détruire.

Pour étudier l'architecture des nids, on utilise la tomographie à rayons X. Les rayons « découpent » la termitière en minces tranches, au sein desquelles la structure interne de la termitière est repérée par les différences de densité. On obtient une série de coupes virtuelles des nids dont l'épaisseur est de l'ordre d'un demi-millimètre. À partir de ces coupes, on reconstruit par ordinateur la structure tridimensionnelle des nids, que l'on utilise pour quantifier leurs caractéristiques spatiales.

La structure interne des nids est constituée de piliers et de cloisons en terre qui forment un dédale complexe de chambres interconnectées par des tunnels. Pour l'étudier, le Laboratoire d'informatique de Nantes-Atlantique a

développé un logiciel qui permet de visualiser en temps réel les données issues de la tomographie et de reconstituer la structure tridimensionnelle associée. Ces deux modes de représentation sont complémentaires : avec l'un, on perçoit la forme générale du nid en ajustant la transparence des murs et, avec l'autre, on précise la structure interne du nid grâce à des détails très fins.

Le logiciel a été conçu pour permettre une navigation interactive à l'intérieur des structures visualisées. Grâce à une souris 3D ou à des capteurs inertiels, le navigateur se déplace librement dans le nid virtuel, projeté sur un dôme qui l'entoure. Chaque image est produite en moins de 40 millisecondes. Elle comporte plus de trois millions de facettes (éléments de surface) à afficher.

La perception de la profondeur est facilitée par la production d'images stéréoscopiques selon différents modes : l'anaglyphe, utilisé ici, où chaque œil reçoit une image différente grâce à des lunettes à filtres colorés (*détacher les lunettes page 28*) ou par projection avec des lunettes actives ou passives. Voici quelques-unes des images en relief produites à partir des nids de cinq espèces de termites et d'une de fourmis.

1 Les termites *Trinervitermes geminatus* (a) vivent dans les savanes au Nord du bloc forestier africain, du Sénégal à l'Ouganda. Partiellement enterrés, leurs nids sont constitués de quatre à cinq unités (b) – des calies – interconnectées par des tunnels souterrains. On trouve souvent 40 à 50 calies par hectare, parfois plus de 500. La terre du nid est enrichie en argile que les termites prélèvent parfois à plusieurs mètres de profondeur. La forme de la partie hypogée (souterraine) du nid, fruit du creusement et du renforcement des galeries, est influencée par la structure du sol. La partie épigée (émergée) est en revanche bâtie de toutes pièces par les termites. Sa structure lacunaire, constituée de piliers et de lamelles de terre, ne comporte pas de passages rétrécis (galeries), ce qui autorise un déplacement de masse des termites (c).

