

Des maîtres dans l'art du flux

Non, une fourmilière n'est pas un bazar grouillant aléatoirement ! Elle est en réalité astucieusement organisée. Les chercheurs aimeraient s'inspirer de l'intelligence collective des fourmis ou des termites pour gérer la circulation des êtres humains.

Vous l'avez sans doute remarqué en vous promenant dans la forêt ou en montagne, on préfère souvent marcher là où le chemin est déjà tracé et dégagé plutôt que de traverser des fourrés. Sans avoir besoin d'indication, le promeneur emprunte la même voie que ceux qui l'ont précédé et renforce, par son passage, la force du signal pour les randonneurs suivants. Les fourmis, les termites et les abeilles utilisent le même principe pour s'organiser. Par un marquage chimique, les fourmis indiquent à leurs congénères une source de nourriture ou le lieu où construire leur nouveau nid. Se déplacer de manière fluide sans feu rouge ni Code de la route, combattre un envahisseur sans général, bâtir un repaire à la charpente complexe sans architecte... la remarquable capacité des insectes eusociaux à s'organiser sans chef fascine les chercheurs depuis le milieu du XX^e siècle. Quels

sont les mécanismes de leur intelligence collective ? Peut-on s'en inspirer, pour faciliter la circulation dans un couloir de métro ou encore pour transmettre une information à un groupe de personnes en quelques secondes ?

L'ORDRE DANS LE CHAOS APPARENT

La spécialiste des fourmis aujourd'hui en France, c'est Audrey Dussutour, éthologiste au Centre national de la recherche scientifique (CNRS). En 2019, dans son laboratoire à Toulouse, elle mène une expérience devenue célèbre. Son équipe dépose des fourmis dans une boîte reliée à une source de nourriture seulement par un pont. En jouant sur la taille de la colonie, de 400 à 25 000 individus et en modifiant la largeur du pont, les scientifiques font varier la densité des fourmis. Ils mesurent la vitesse de chacune d'elles ainsi que le flux, c'est-à-dire le nombre de fourmis qui franchissent une ligne dans

un temps donné. « Normalement, en augmentant la densité, la vitesse aurait dû diminuer puis devenir nulle, au lieu de quoi les fourmis ont accéléré puis leur vitesse s'est stabilisée. Nous étions très surpris », se souvient Audrey Dussutour (voir ci-dessous). La circulation des fourmis rappelle celle des piétons humains car c'est l'une des rare chez les animaux à aller dans deux sens. Avec une différence de taille néanmoins : les fourmis ne craignent pas les collisions, bien protégées qu'elles sont par leur exosquelette. Elles n'ont ainsi pas peur d'accélérer quand la densité augmente afin de compenser le temps qu'elles perdent à éviter leurs congénères. De plus, ces petites bêtes partagent un but commun : rapporter un maximum de nourriture. Elles n'ont donc aucun scrupule à renoncer à se déplacer si cela permet à leurs congénères de mieux circuler.

LE CHEMIN LE PLUS COURT

Les recherches d'Audrey Dussutour s'inscrivent dans la droite ligne de celles de Jean-Louis Deneubourg. Dans les années 1980, ce biologiste belge s'intéresse aux comportements collectifs chez les fourmis. En effet, celles-ci sont capables de trouver le chemin le plus court entre leur abri et une source de nourriture. La fourmi laisse sur son chemin un marquage chimique. En croisant cette piste, d'autres fourmis sont tentées de la suivre, trouvent la nourriture et la rapportent au bercail. Ce faisant, elles pavent la route. S'il y a plusieurs voies entre les deux points, la plus courte est empruntée par le plus grand nombre, renforçant ainsi le marquage. Comme cette trace

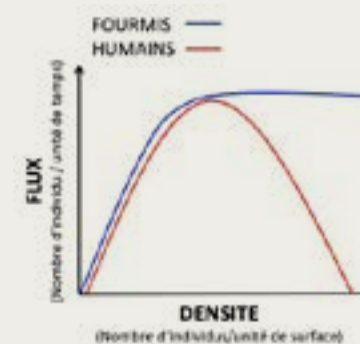
chimique est volatile, les autres pistes finissent par disparaître. Ces travaux ont inspiré Marco Dorigo, un étudiant italien. Dans sa thèse publiée en 1991, il met au point un algorithme capable de calculer le chemin le plus court entre deux points dans un réseau. Cet algorithme est utilisé dans de nombreuses applications, notamment par les voyageurs de commerce cherchant le chemin le plus court pour relier les différentes villes qu'ils devaient prospecter.

Les fourmis seraient-elles plus douées que nous pour éviter les embouteillages ? « Les humains ont une tendance individualiste. Chacun avance à sa propre vitesse. Le conducteur d'un camion qui roule à 85 km/h peut décider d'en doubler un autre qui roule à 80 km/h, même s'il risque de ralentir le rythme sur la voie de gauche, la plus rapide, voire de créer un bouchon », décrit Audrey Dussutour. Au contraire, les fourmis coupeuses de feuilles sont capables d'ajuster leur vitesse sur celle de l'individu le plus lent si cela bénéficie au collectif. L'ouvrière chargée de nourriture est prioritaire : les fourmis légères se rangent derrière elle, si bien qu'elles avancent plus lentement mais bénéficient des priorités. » Les applications du travail de la chercheuse pourraient donc se trouver plutôt du côté de la gestion de la circulation de véhicules autonomes qui ne sont pas soumises aux décisions égoïstes des humains.

DES CONSTRUCTIONS SANS ARCHITECTE

À Toulouse, le biologiste Christian Jost travaille sur la construction collective chez les termites. Les fourmis sont faciles à étudier car elles ne volent pas ●●●

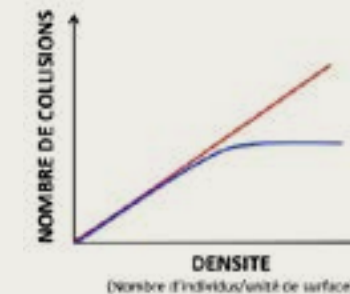
PAS DE BOUCHON CHEZ LES FOURMIS



▲ Quand la densité augmente sur un axe de circulation, le flux se stabilise chez les fourmis alors qu'il diminue jusqu'à devenir nul chez les humains.



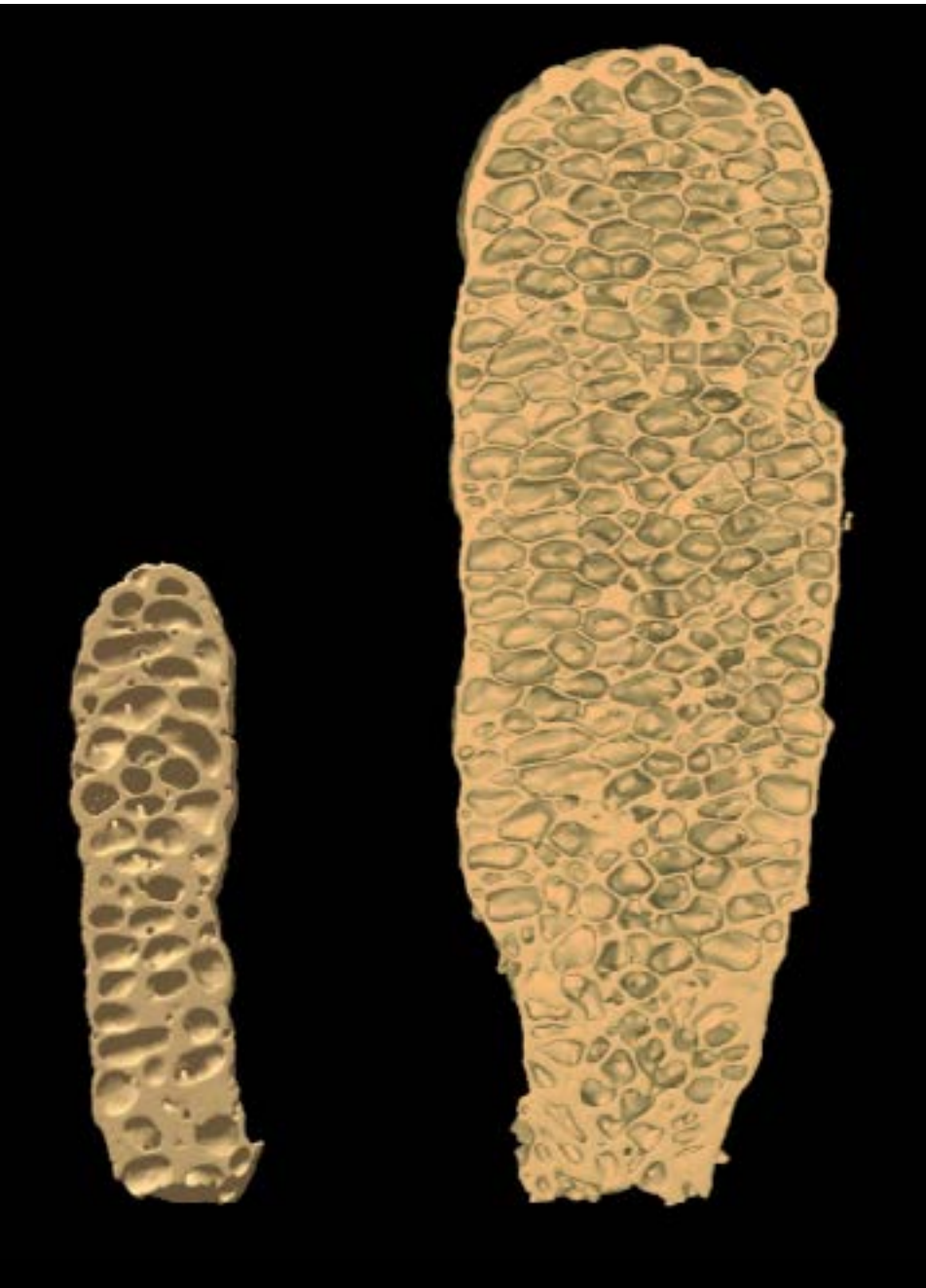
▲ Dans le même temps, la vitesse de déplacement de l'insecte croît légèrement avant de baisser, sans devenir nulle, alors que les humains finissent par se retrouver à l'arrêt.



▲ En parallèle, le nombre de collisions se stabilise chez les fourmis alors qu'il empire chez les humains. Conclusion : mieux vaut prendre le volant chez les hyménoptères !

Source : L.-A. Poissonnier, S. Motsch, J. Gautrais, C. Buhl, A. Dussutour, « Experimental investigation of ant traffic under crowded conditions », dans eLife, octobre 2019.

●●● et sortent régulièrement de leur fourmilière. Concernant les termites, qui ne sortent que la nuit, c'est plus compliqué. Afin d'observer l'intérieur d'une termitière sans la détruire, « nous avons amené les nids à l'hôpital », sourit Christian Jost. Le chercheur et son équipe ont passé les termitières aux rayons X. Grâce à la tomographie, une technique qui mesure la densité à différentes profondeurs, les scientifiques ont obtenu d'impressionnantes reconstitutions en trois dimensions de ces habitats (ces images sont disponibles sur le site internet mesomorph.org, voir



ci-dessous). La termitière est composée de chambres de grand diamètre reliées entre elles par des galeries étroites. On dit que le réseau est faiblement connecté car il y a peu de tunnels : chaque chambre n'est connectée qu'à un ou deux boyaux. « Nous l'avons interprété comme une stratégie anti-invasion car il suffit à une termite soldate de bloquer un tunnel avec sa tête pour empêcher que les prédateurs conquièrent le nid », détaille Christian Jost.

Dans un réseau faiblement connecté, on pourrait s'attendre à ce que les déplacements soient plus longs car il y a moins d'options d'itinéraires. En réalité, chez les termites, les déplacements sont très efficaces. « Ce qui signifie qu'au moment de construire leur nid les termites anticipent leurs trajets futurs et bâtissent les tunnels les plus stratégiques pour leur permettre de se déplacer rapidement », s'émerveille le biologiste. Et tout ça, sans chef ! Pour édifier leurs impressionnantes termitières, leurs habitantes ont recours à la « stigmergie ». Ce terme, inventé par le zoologiste français Pierre-Paul Grassé dans les années 1950, désigne « le fait que le travail individuel de chaque ouvrier constructeur stimule et oriente celui du voisin ». Pour construire un pilier, par exemple, une première termite dépose une boulette de matière marquée chimiquement à un endroit. La termite suivante détecte le marquage et dépose sa boulette sur la première. Et ainsi de suite jusqu'à édifier un poteau de la taille d'une termite sur ses pattes arrière.

DES APPLICATIONS DANS LA ROBOTIQUE

La stigmergie, telle qu'elle est pratiquée par les termites, inspire la robotique actuelle. Au lieu de robots très perfectionnés et très chers, la recherche se tourne de plus en plus vers de petites machines moins intelligentes capables de s'auto-organiser en groupes. Ces robots dits « en essaim » pourraient être utilisés pour la construction ou le transport de matériaux dans des milieux hostiles ou difficiles d'accès, comme un champ de mines ou les lieux d'un séisme. Et pourquoi pas sur une autre planète ? La Nasa, l'agence spatiale des États-Unis, songe à envoyer des robots en essaim pour une prochaine mission sur Mars. ■ **ADÈLE HOSPITAL**

◀ Images de termitières en trois dimensions obtenues grâce à la tomographie par l'équipe du biologiste Christian Jost.

Au sein des essaims

Dans la famille des robots, préférez-vous un appareil ultraperfectionné ou une multitude de petites machines interchangeables qui agissent toutes ensemble ? La robotique, elle, a déjà arrêté son choix.

En un battement de cils, tous les petits robots s'éclairent de la même couleur. On pourrait croire qu'ils s'illuminent ainsi en même temps, mais en réalité l'un d'eux a changé de nuance en premier et ses congénères l'ont imité en seulement quelques fractions de seconde. « Chaque robot a pour seules informations le coloris de ses voisins immédiats et à quand remonte leur dernier changement de couleur. Cela lui suffit pour savoir s'il doit changer de nuance et imiter le reste du groupe », s'enthousiasme Alessia Loi. La doctorante et sa collègue Loona Macabre ont disposé 25 robots de la taille d'une clémentine sur une table du laboratoire de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (Isir), à Paris. Par cette expérience, les deux chercheuses étudient la diffusion d'un signal au sein d'un groupe de machines. Un processus qui s'inspire de la manière dont s'organisent les insectes vivant en colonie. C'est le principe de la robotique en essaim.

À LA RECHERCHE DE L'AUTO-ORGANISATION

Jusque dans les années 1990, le secteur de la robotique a produit des machines de plus en plus perfectionnées, mais on comprend vite que le plus intelligent des robots ne saura anticiper tous les changements de son environnement. Les chercheurs tablent sur une association de robots simples et de taille plus modeste qui interagissent afin d'engendrer une action d'ampleur, plus grande que l'addition de tout ce qu'ils font. Tout comme les fourmis fourrageuses qui échangent des informations afin d'apporter de la nourriture à la colonie. Chez les insectes comme chez les machines, il n'y a pas de chef. Chaque individu agit en fonction des données qu'il reçoit de ses congénères : c'est l'auto-organisation.

En 2012, Nicolas Bredeche, formé à l'informatique et aux sciences cognitives, fonde un groupe spécialisé en robotique en essaim à l'Isir. Aujourd'hui, son bureau à l'université, dans le V^e arrondissement parisien, est empli de prototypes de minirobots, certains montés sur des pattes en plastique, d'autres sur roues. Après quelques tâtonnements, l'unité décide de fixer les robots sur deux têtes de brosse à dents. « Leurs poils sont inclinés et

lorsque le robot vibre, il se déplace », commente Nicolas Bredeche, démonstration à l'appui. Les appareils sont également capables d'échanger des informations par infrarouge avec leurs plus proches voisins.

La robotique en essaim poursuit deux buts. « Le premier, c'est de servir de modèle pour tester ce que l'on pense avoir compris de la façon dont les insectes sociaux s'organisent », définit Nicolas Bredeche. Le second est la recherche d'efficacité dans la robotique. Un groupement de machines est plus robuste qu'un seul robot perfectionné, il peut continuer à fonctionner malgré une panne d'un des individus. Ce dispositif permet aussi de « paralléliser les actions » : les robots remplissent différentes missions simultanément, ce qui fait gagner du temps. Cependant, Nicolas Bredeche prévient : « Leur déploiement dans la société humaine pose des questions techniques et éthiques. » Qu'on se le dise. ■ **A.H.**



▼ Deux chercheuses de l'Isir, à Paris, mènent une expérience avec des Pogobots, de petits robots travaillant collectivement, le 26 mars 2024.