

trasons de forte intensité : les températures supérieures à 65 °C détruisent des tissus biologiques en quelques secondes. Des appareils faisant appel aux techniques classiques pour focaliser les ultrasons existent déjà sur le marché, mais leur application est restreinte aux tissus statiques, comme les tumeurs cancéreuses de la prostate. Les mouvements du cœur et de la respiration limitent les applications abdominales et cardiaques. Emad Ebbini et ses collègues de l'Université du Michigan mettent au point des réseaux à focalisation automatique pour surmonter le problème. Avec Mikael Tanter et Jean-Louis Thomas, nous étudions l'hyperthermie du cerveau. Nous voulons focaliser les ondes au travers de la boîte crânienne, qui réfracte et disperse considérablement le faisceau d'ultrasons. De surcroît, le crâne est un matériau poreux : il dissipe une partie de l'énergie de l'onde en chaleur et brise la symétrie par retournement temporel des équations de propagation de l'onde. Nous avons mis au point une technique de focalisation qui corrige ces effets de dissipation avant l'opération de retournement temporel. Grâce à cette technique, nous envoyons un faisceau d'ultrasons au travers du crâne, qui se focalise sur une tache de 1,5 millimètre (voir la figure 5).

Nous avons également utilisé des miroirs à retournement temporel pour la détection de défauts dans des pièces. Lorsque les défauts sont petits, que la forme de la pièce est complexe ou que le matériau est hétérogène, la détection des défauts est délicate. Habituellement, on immerge la pièce à tester et les transducteurs dans une piscine, mais les faisceaux sont déviés par réfraction au passage de l'interface entre l'eau et le solide, ce qui complique la détection de petits défauts. De surcroît, dans les solides, les ondes ultrasonores engendrent des ondes variées, de types et de polarisation différentes. Nous avons montré que les techniques de focalisation à l'aide de miroirs à retournement temporel compensent automatiquement tous ces effets. Dans le cadre d'une collaboration avec la SNECMA (Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation), nous avons mis au point, avec F. Wu, un miroir à retournement temporel formé de 128 transducteurs capable de détecter des défauts de faible contraste dans des alliages de

titane utilisés dans les moteurs d'avion. Le titane possède une microstructure hétérogène, qui engendre un bruit échographique gênant, parce qu'il masque l'écho résultant des défauts. Par l'itération du retournement temporel, nous avons détecté des défauts de 0,4 millimètre dans des billettes de titane de 250 millimètres de diamètre, avec un rapport signal sur bruit bien meilleur que classiquement.

Maintenant que la technique de retournement temporel des ondes acoustiques est bien maîtrisée en laboratoire, un travail d'application s'impose. Le retournement d'un «allô» est amusant, mais le principe de la focalisation du «olla» au niveau de la bouche du locuteur peut également servir à engendrer des hologrammes acoustiques : le réseau de transducteurs peut, par exemple, être programmé pour focaliser simultanément le son «bonjour» près d'une personne, et «hello» près d'une autre.

D'autres ondes que les ondes sonores peuvent également être retournées temporellement. Des ingénieurs explorent les applications de ces techniques au radar pulsé, en utilisant les ondes électromagnétiques. Un autre type d'onde intervient en mécanique quantique : les fonctions d'onde quantiques qui décrivent la matière. Lorsque la fonction d'onde d'un électron heurte la frontière entre un conducteur et un supraconducteur, on assiste à une réflexion qui s'apparente au retournement temporel. À quels tours de magie assisterions-nous si l'on parvenait à retourner des ondes quantiques!

Mathias FINK est directeur du Laboratoire ondes et acoustique à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI) et professeur à l'Université Paris VII (Denis Diderot).

D. ROYER et E. DIEULESANT, *Ondes élastiques dans les solides*, tome 1, Masson, 1996.

M. FINK et C. PRADA, *Ultrasonic Focusing with Time-Reversal Mirrors*, *Advances in Acoustic Microscopy Serie*, sous la direction de A. Briggs et W. Arnold, Plenum Press, 1996.

M. FINK, *Time-Reversed Acoustics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 3, pp. 34-40, mars 1997.

M. FINK, *Ultrasound Puts Materials of the Test*, in *Physics World*, vol. 11, n° 2, pp. 41-45, février 1998.

Les reines esclavagistes



HOWARD TOPOFF

Chez certaines espèces de fourmis, les invasions, les meurtres et les prises d'otages font partie de la vie quotidienne. Les reines qui mènent ces assauts pratiquent une forme de parasitisme social.

Les parasites vivent aux dépens d'autres espèces. Pourquoi sont-ils moins bien considérés que les prédateurs, qui font de même ? De nombreuses associations collectent des fonds pour la protection des loups ou des orques, mais personne ne se préoccupe des vers solitaires. Nous associons ces parasites à la maladie et les percevons comme des organismes sournois qui, contrairement à des prédateurs décents, s'insinuent dans notre corps et nous détruisent lentement.

Le parasitisme social est beaucoup moins macabre. Il est pratiqué par des animaux variés, tels les oiseaux et les fourmis. Par exemple, les coucous pondent leurs œufs dans le nid d'autres espèces, telle la fauvette, à

qui ils laissent le soin d'élever leur progéniture. Le pique-bœuf à tête brune aussi. Dans les deux cas, les œufs du parasite ressemblent à ceux du «baby-sitter».

Les fourmis esclavagistes ont des comportements de parasitisme social plus variés que les oiseaux. Depuis 15 ans, au Muséum d'histoire naturelle d'Arizona, nous étudions celui de la fourmi *Polyergus breviceps*. Comme les quatre autres espèces de *Polyergus* existantes, ces fourmis sont incapables d'assurer elles-mêmes leur survie. Leurs ouvrières ne rapportent pas à manger, ne nourrissent pas les jeunes ni la reine et ne nettoient même pas la fourmilière. Elles font ces travaux

1. POUR CAPTurer DES ESCLAVES, les fourmis *Polyergus* attaquent les colonies de fourmis *Formica* (1) : elles s'emparent de leurs cocons, qu'elles rapportent ensuite dans leur propre fourmilière. Lors de ces raids, de jeunes reines *Polyergus* s'accouplent, puis partent établir leur propre colonie (2). L'une d'entre elles reste dans la colonie de *Formica* qu'elle cherche à dominer : elle affronte les ouvrières (3), puis pénètre dans la fourmilière, souvent distante de quelques mètres de la sienne seulement. Elle se fraye un passage vers la chambre inférieure où se trouve la reine *Formica* et tue cette dernière (4). Puis, elle la lèche pour s'imprégner de ses phéromones, grâce auxquelles les ouvrières l'acceptent comme nouvelle reine et s'occupent de ses œufs (5).



à la place des fourmis d'une espèce voisine, *Formica*, qu'elles capturent et utilisent comme esclaves : périodiquement, des armées de quelque 1 500 *Polyergus* partent en raid (elles vont parfois jusqu'à 150 mètres de leur propre nid), pénètrent dans une fourmilière construite par l'espèce *Formica*, expulsent la reine et les ouvrières, et capturent les cocons. De retour chez elles, elles laissent à leurs esclaves le soin de s'en occuper, jusqu'à ce que les ouvrières *Formica* qu'ils contiennent soient prêtes à en sortir. Celles-ci se chargent alors de toutes les tâches nécessaires au maintien de la colonie, par exemple de l'approvisionnement en nectar et en insectes morts, de régurgiter de la nourriture pour leurs maîtres et d'entretenir la fourmilière en enlevant les débris et en creusant de nouvelles chambres. Quand la population devient excessive, les quelque 3 000 esclaves d'une colonie

de *Polyergus* cherchent un endroit où construire une nouvelle fourmilière et y transportent les ouvrières *Polyergus* (2 000 environ), les œufs, les larves, les cocons et la reine.

Chez les fourmis, l'esclavagisme n'est pas rare. Sur près de 8 000 espèces, au moins 200 ont une relation symbiotique avec une autre espèce. À une extrémité du continuum de comportements, les *Formica wheeleri* sont des parasites facultatifs : elles savent subvenir à leurs propres besoins, mais capturent des esclaves pour augmenter leur force de travail. À l'opposé, d'autres espèces esclavagistes, telles les *Polyergus*, sont des parasites sociaux obligatoires : sans esclaves, elles ne survivent pas.

Nous nous intéressons aux fourmis *Polyergus* parce que nous voulons déterminer les adaptations évolutives liées au parasitisme social obligatoire. Les raids pour capturer des esclaves existent aussi chez d'autres espèces de fourmis, mais les *Polyergus* ont un comportement spécifique que nous avons étudié : la prise de pouvoir par la reine sur une fourmilière *Formica*, sans l'aide d'aucune ouvrière.

Chez la plupart des fourmis, la fondation d'une nouvelle colonie se déroule de la manière suivante : la reine s'accouple le plus souvent lors de son vol nuptial (toutes les espèces ne le pratiquent pas), puis elle se débarrasse de ses ailes, creuse un trou, y pond quelques œufs, nourrit les larves avec des aliments qu'elle a en réserve, jusqu'à ce que celles-ci parviennent à maturité et assurent l'entretien de la nouvelle fourmilière. Toutefois, les reines *Polyergus* sont incapables d'élever leur première ponte sans esclaves. Elles semblent condamnées : comment parviendraient-elles à envahir une fourmilière *Formica*, à tuer la reine et à se faire accepter par ses ouvrières, sans l'aide d'une seule ouvrière pour les aider ?

Tous les ans, une certaine d'œufs pondus par chaque reine *Polyergus* se développent en fourmis sexuées, qui quittent la colonie parentale pour tenter d'en fonder une nouvelle. En Arizona, les jeunes reines *Polyergus breviceps* ont abandonné le vol nuptial. Au lieu de s'élancer vers le ciel, elles partent avec les ouvrières, lors d'un raid, s'arrêtent au milieu de la cohorte, attirent un mâle à l'aide d'une phéromone sécrétée par leur glande mandibulaire, s'accouplent et se débarrassent de leurs ailes. Ensuite, elles ont une alternative : continuer le raid et atteindre une colonie *Formica* déjà envahie, ou trouver seules une autre colonie *Formica* plus éloignée. La dispersion des ouvrières *Formica* facilite la première solution, mais d'autres *Polyergus* risquent de détruire ultérieurement la nouvelle colonie, car ces espèces ne tolèrent pas de colonies de congénères sur leur territoire. La deuxième solution est l'abandon du raid : la reine augmente ses chances en partant seule chercher une fourmilière d'accueil hors du territoire d'une population de *Polyergus* déjà installée.

Des machines à tuer

Quand elle trouve une fourmilière *Formica*, une reine *Polyergus* l'usurpe par une méthode qu'on ne peut pas observer directement : tout se passe sous terre. Aussi, avec mes collègues, nous étudions le comportement des fourmis dans des fourmilières artificielles transparentes : nous plaçons une reine, 15 cocons et 15 ouvrières de *Formica gnava* (une vraie colonie contient environ 5 000 ouvrières) dans une fourmilière de notre construction, puis nous plaçons une reine



2. UNE OUVRIÈRE de l'espèce *Polyergus* transporte un cocon de l'espèce *Formica* (en haut à gauche) vers sa fourmilière, où il sera pris en charge par les esclaves *Formica* capturées lors d'un raid précédent. Près de 1 500 ouvrières *Polyergus* participent à chaque raid de pillage des cocons (ci-dessus). Elles en volent jusqu'à 14 000 par saison.