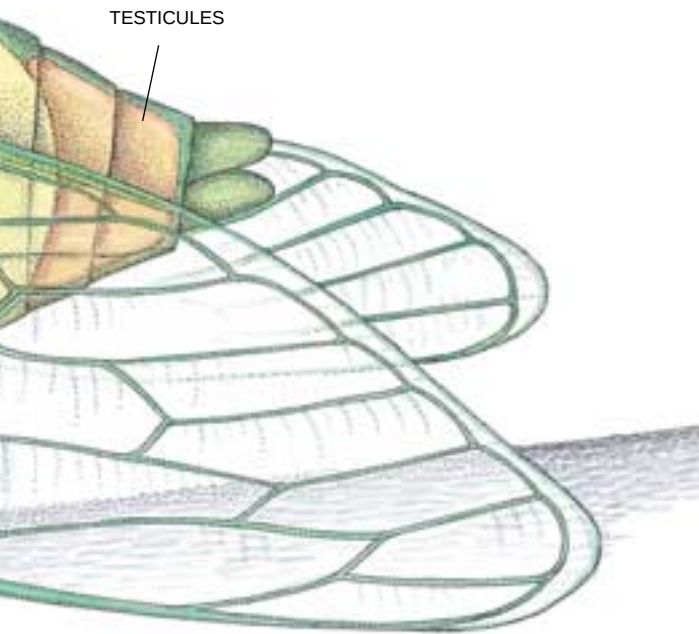
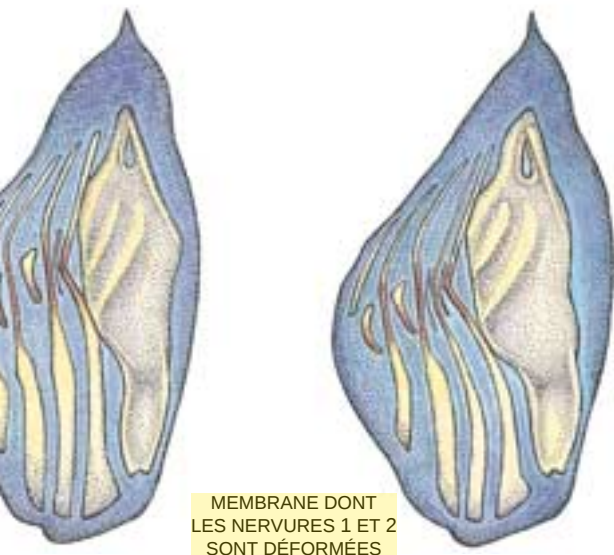


respond à un cycle par seconde). En fait, les deux membranes des tambours ne se déforment pas d'un bloc, mais nervure après nervure.

En se contractant rapidement, les muscles produisent suffisamment d'énergie, durant les trois premières milli-secondes de chaque contraction, pour déformer, les unes après les autres, deux ou trois nervures de chaque «cou-vercle». Ce mouvement déplace, en deux ou trois fois, les deux faces de chaque tambour vers l'intérieur. À chaque fois qu'une nouvelle nervure se déforme, un claquement



LES NERVURES sont déformées les unes après les autres par le puissant muscle de chaque tambour. Chaque déformation crée une pression sonore atteignant 158 décibels. Les nervures des membranes sont entourées d'un tissu élastique (en bleu).



bref et intense retentit. Comme, à chaque contraction des muscles, chaque nervure produit plusieurs clics, que les nervures d'une même membrane sont déformées les unes après les autres et que les nervures des deux membranes sont actionnées séquentiellement, l'ensemble aboutit à 4 300 clics par seconde : l'ensemble des clics produit un train de vibrations dont la fréquence résultante est celle du chant de la cigale, soit 4,3 kilohertz.

Le claquement d'une des nervures produit des pressions sonores élevées, atteignant 158 décibels, dans l'abdomen de la cigale, ce qui équivaut au bruit produit par l'explosion d'une grenade à un mètre de distance (un décibel est un dixième de bel, unité d'intensité sonore relative ; un son est un bel plus haut qu'un autre lorsque le rapport de leurs intensités est égal à dix). Chez la plupart des cigales, l'abdomen contient une grande poche d'air, ou chambre sonore ; chez la cigale australienne, cette poche, dont le volume atteint 1,8 millilitre, occupe 70 pour cent de l'abdomen de l'insecte. L'abdomen contient une paire de membranes amplificatrices qui s'étendent sur toute la largeur de la face ventrale de l'insecte et qui relie la chambre sonore à l'extérieur.

Les impulsions sonores produites par les tambours et par les nervures résonnent dans la chambre sonore abdominale. Les membranes amplificatrices transmettent efficacement le son vers l'extérieur et l'amplifient : le son est environ 20 fois plus puissant que s'il était émis par les tambours seuls. De cette façon, l'insecte est audible de beaucoup plus loin.

Pourquoi ce son de 158 décibels n'endommage-t-il pas le système auditif de la cigale ? Parce qu'il est transmis grâce aux membranes amplificatrices, tandis que la partie sensorielle du système auditif du mâle est localisée dans une capsule séparée et n'est reliée à ces membranes que par un petit canal. Cette séparation semble protéger les mâles de la surdité.

L'orchestration du chant

L'abdomen et les tympanes ne diffusent pas seulement les sons vers l'extérieur : ils garantissent la qualité du chant nuptial. En étirant l'abdomen et en ouvrant les opercules qui recouvrent les membranes amplificatrices, la cigale ajuste son résonateur abdominal à la fréquence de 4,3 kilohertz, celle des vibrations sonores produites par les tambours. Les structures abdominales améliorent à la fois la pureté du chant et son intensité : elles corrigent et équilibrent les tambours.

De nombreuses espèces de cigales semblent pourvues d'un mécanisme similaire de production des sons, et d'autres insectes sonores «chantent» quasiment de la même façon. Toutefois, pour autant que nous le sachions, les mâles des cigales australiennes restent les insectes les plus bruyants du monde... au grand dam des habitants de Melbourne et de Sydney.

Henry BENNET-CLARK est attaché au département de zoologie des invertébrés de l'Université d'Oxford.

H.C. BENNET-CLARK et D. YOUNG, *A Model of the Mechanism of Sound Production in Cicadas*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 173, pp. 123-153, 1992.

D. YOUNG et H.C. BENNET-CLARK, *The Role of the Tymbal in Cicada Sound Production*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 198, pp. 1001-1019, 1995.

Patricia J. Wynne

Mélange et désordre figé

ÉTIENNE GUYON • JEAN-PIERRE HULIN

Deux liquides se mélangent quand ils traversent un solide poreux. Inversement, les solides poreux peuvent aussi séparer des mélanges. La physique explore les raisons de ces différences.

Devant la gare de Dijon, la grande place Henry Darcy rappelle la mémoire de l'ingénieur en chef du corps des Ponts qui, entre 1834 et 1842, met en place le réseau d'alimentation en eau de cette ville. Il en fait alors la ville la plus propre de France, avec une consommation en eau de 200 litres par jour rapportés à chacun des 30 000 habitants de l'époque.

Dijon est traversé par le Suzon, qui, lit-on dans un écrit du XVIII^e siècle, «se mouvait dans un lit de roc pourry, entremêlé de sable mouvant». En appendice d'un article sur «les fontaines publiques de la ville de Dijon», Darcy mentionne ce lit poreux du Suzon et il exprime la loi de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. Son nom est resté attaché à cette loi (voir la figure 2).

Bien des problèmes que Darcy se posait sont encore ouverts et d'actualité. Ils se présentent sous des formes variées : comment des polluants déchargés accidentellement se mélangent-ils aux eaux souterraines et à quelle vitesse se dispersent-ils ? Comment évaluer la sécurité d'un site de stockage de déchets chimiques ou radioactifs ? Comment récupérer efficacement un polluant (ou du pétrole) dans le sous-sol ? Nous verrons plus loin que d'autres questions, apparemment disjointes, sont pourtant très proches : comment mélanger les constituants visqueux d'un mélange ou d'une pâte ? Comment séparer les éléments d'un mélange chimique ?

La réponse à ces questions impose des études en laboratoire et des tests pratiques des théories : l'écoulement désordonné d'un liquide dans un réseau complexe de canaux, à l'intérieur du sol ou d'une roche poreuse, mélange souvent les espèces entraînées par le liquide. De même, certains

mélangeurs industriels, sans aucune pièce mobile, contiennent un ensemble de cloisons qui imposent au fluide un écoulement analogue à celui qui aurait lieu dans une roche poreuse ; les espèces à mélanger sont divisées en fines lanières qui s'entremêlent. Comment optimiser de tels systèmes ?

Nombre de ces questions simples restent ouvertes. Nous verrons toutefois que certains écoulements que l'on inverse renseignent sur la structure des milieux poreux. D'autre part, la compréhension des phénomènes d'hydrogéologie tire également parti d'expériences de laboratoires sur des milieux stratifiés ou de porosité particulière. On ne pourra vraiment interpréter les écoulements observés dans le sous-sol que lorsque les mécanismes de base auront été analysés finement par de telles expériences.

Enfin le mélange n'est pas le seul effet que produit la traversée d'un solide poreux : ce passage peut, au contraire, séparer des espèces et produire une eau pure. C'est ce que réalisent les bons filtres, qui ne sont que des matériaux poreux particuliers : ils arrêtent les particules trop grosses pour passer dans les pores, ou les molécules qui se lient aux parois. Les chimistes séparent ainsi les molécules dissoutes dans les solvants à l'aide de colonnes de chromatographie, où un empilement de grains aux propriétés chimiques particulières retient différemment les divers constituants : au lieu d'être arrêtés, comme dans un filtre, ces constituants sont plus ou moins retardés, selon l'intensité de leurs interactions avec les grains. L'examen des mécanismes de mélange et de séparation montre en quoi ces deux phénomènes sont bien des frères ennemis.

Diffusion et convection

Le mécanisme physique qui mélange le plus intimement deux matériaux est la diffusion moléculaire : dans un bol de café, ajoutons un peu de lait ; même si nous déposons celui-ci précautionneusement, dans un coin du bol, l'agitation naturelle des molécules assure le mélange. Cette diffusion moléculaire agit très lentement, car les trajectoires des molécules sont erratiques : les molécules se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'elles heurtent d'autres molécules ou la paroi du récipient qui les contient ; elles rebondissent et repartent en ligne droite, et ainsi de suite. En raison de cette progression en zigzag, les molécules s'éloignent très lentement du point où on les a placées. La distance atteinte augmente seulement comme la racine carrée du temps écoulé : une molécule met 100 fois plus de temps pour aller seulement dix fois plus loin ! Et une molécule d'eau, dans la tasse à café, ne franchit le rayon de la tasse qu'en plusieurs centaines d'heures, quand elle n'est mue que par l'agitation moléculaire.

Pourtant, ce mécanisme est essentiel, à la fin de tout mélange, car c'est le seul qui reste efficace jusqu'aux distances moléculaires. Quand on a mélangé macroscopiquement deux liquides au point de former des zones de petite taille composées des deux liquides, la diffusion parachève le mélange.

C'est ainsi que, pour obtenir rapidement un café au lait homogène, on agite le contenu du bol à l'aide d'une cuiller. Le mouvement désordonné du liquide, nommé convection, étire chaque goutte de lait, réduit ses dimensions transverses et favorise ensuite le mélange par diffusion moléculaire avec le café environnant. La séquence d'opérations ressemble beaucoup à celle qu'ef-