

> comprend ainsi que les contraintes acoustiques d'une salle de théâtre diffèrent de celles d'une salle de concert, sans parler de l'opéra qui conjugue parole et musique...

Comment connaître le temps de réverbération pour une pièce de forme quelconque? Il faut d'abord estimer le parcours moyen entre deux réflexions du son sur les parois en tenant compte de tous les trajets possibles, y compris les réflexions multiples sur les murs. Chose remarquable, il existe une estimation simple dans le cas d'une salle parallélépipédique: le parcours moyen est égal à 4 fois le rapport entre le volume de la pièce et sa surface. Pour une pièce large de 3 mètres, longue de 4 mètres et haute de 2,5 mètres, on obtient environ 2 mètres, une valeur inférieure à toutes les dimensions de la pièce. La raison en est que les réflexions dominantes sont celles entre murs adjacents (au niveau des arêtes et des coins).

Il nous faut ensuite connaître comment le son est absorbé, car plus l'absorption est importante, plus le temps de réverbération est court. Or les moyens de moduler l'absorption sont nombreux.

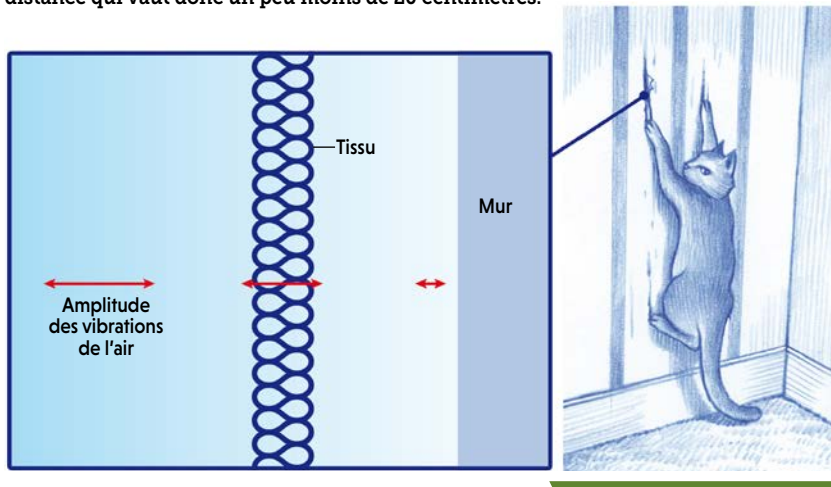
CONTRÔLER LA RÉVERBÉRATION EN MODULANT L'ABSORPTION

L'absorbant idéal (100%) est évidemment une ouverture – porte ou fenêtre ouverte – qui ne renvoie aucun son. Sinon, le son peut être partiellement transmis (et donc moins réfléchi) à travers des surfaces rigides. Par exemple, une vitre en verre transmet le son d'autant plus efficacement que celui-ci est grave: la transmission est de 35% à 150 hertz, 20% à 500 hertz (la tonalité du téléphone) et seulement 4% à 4000 hertz.

On peut aussi utiliser des matériaux poreux ou fibreux (moquette, tapis, plaque de liège...). D'une part, les oscillations de l'air provoquées par le passage de la vibration sonore s'amortissent dans les multiples petits canaux du matériau, par effet de viscosité (comme l'écoulement de l'eau dans un tuyau). D'autre part, une partie de l'énergie acoustique se transmet aux fibres, qui sont mises en mouvement. Toutefois, ces amortissements sont faibles si on colle le matériau à la paroi, qui est un nœud de vibration: les oscillations de l'air perpendiculairement à la surface y ayant une très faible amplitude, on a tout à gagner à écarter le matériau du mur (*voir l'encadré ci-dessus*). C'est flagrant avec les tissus et tentures suspendus: à 1 kilohertz, un rideau de velours absorbe près de 80% de l'intensité sonore.

DU TISSU MURAL BIEN POSÉ

Pour qu'un tissu mural absorbe bien les bruits, il faut laisser un espace entre lui et le mur, de l'ordre du centimètre. En effet, au niveau du mur, on a un nœud de vibration de l'air: les oscillations de l'air (*doubles flèches, échelle exagérée*) perpendiculaires au mur et dues à l'onde sonore y sont d'amplitude nulle. Or pour absorber de l'énergie sonore, un tissu mural (ou un rideau) doit se trouver là où les vibrations acoustiques sont notables. Pour une fréquence sonore de 440 hertz – la tonalité du téléphone –, l'amplitude des oscillations de l'air est maximale à une distance au mur égale au quart de la longueur d'onde du son, distance qui vaut donc un peu moins de 20 centimètres.



Le plus souvent, une pièce a des parois de natures différentes sur le plan acoustique. On caractérise alors chaque surface par sa surface équivalente de fenêtre ouverte, obtenue en multipliant l'aire considérée par le coefficient d'absorption. L'unité utilisée est le sabin, du nom du physicien américain Wallace Sabine qui, en 1898, a trouvé une très bonne approximation du temps de réverbération.

La probabilité moyenne d'absorption d'un son est alors le rapport entre la surface équivalente d'absorption et la surface totale des parois de la pièce. On calcule ensuite le temps de réverbération à partir du parcours moyen du son et de la probabilité moyenne d'absorption. *In fine*, il ne reste, dans la formule de Sabine donnant le temps de réverbération, que le rapport entre le volume de la pièce sur la surface absorbante, le tout multiplié par un coefficient numérique qui vaut environ 0,16.

Pour la salle parallélépipédique évoquée plus haut, le temps de réverbération avec des murs en béton est de 8 secondes. Avec de la moquette et du liège sur les murs, ce temps est divisé par 20, ce qui donne 0,4 seconde, une valeur tout à fait acceptable. En pratique, la présence de mobilier ou de spectateurs pour les salles de concerts change aussi considérablement les choses, et il faut prendre cela en compte pour estimer avec précision les propriétés acoustiques de la salle. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Keepports, **Simple echoes and subtle reverberations**, *Physics Education*, vol. 45(2), pp. 190-195, 2010.

H. G. Leventhall, **The acoustics of rooms**, *Physics Education*, vol. 2(2), pp. 101-106, 1967.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

COMMENT UNE BLATTE DEVIENT ZOMBIE

Deux piqûres de la guêpe émeraude suffisent à transformer une blatte américaine en un garde-manger docile pour une de ses larves. Son secret? Un cocktail venimeux qui attaque les neurones de la blatte sur tous les fronts...

Une fourmi qui grimpe au sommet des brins d'herbe et finit dans l'estomac d'un mouton; un rat qui ne fuit pas devant un chat et se laisse dévorer; une coccinelle qui couve le cocon d'une guêpe... Derrière ces comportements paradoxaux se cache toujours un parasite, qui optimise la dispersion de sa descendance en infestant un animal et en le manipulant. La biologie évolutive s'est saisie de ce phénomène fascinant et a montré qu'il s'établit sous la pression de la sélection naturelle. Par exemple, des expériences ont montré que les cocons de guêpes braconides (*Dinocampus coccinellae*) protégés par des coccinelles maculées (*Coleomegilla maculata*) vivantes sont moins soumis à la prédation que ceux laissés seuls ou recouverts d'une coccinelle morte.

Toutefois, jusqu'à récemment, on ne savait pas expliquer comment le parasite agit sur la physiologie de l'hôte. Certes, en 2015, Nolwenn Dheilly, alors à l'université de Perpignan, et ses collègues ont résolu une part du mystère dans le cas de la coccinelle: ils ont montré que la guêpe *D. coccinellae* agit sur sa proie en lui transmettant un virus qui bloque sa réponse immunitaire antivirale et se multiplie dans ses ganglions nerveux, mais le

scénario reste à préciser. En revanche, une étude récente du venin de la guêpe émeraude (*Ampulex compressa*) vient d'établir avec précision ce qui se passe dans le système nerveux de son hôte, la blatte américaine (*Periplaneta americana*).

LA GUÊPE PREND LES COMMANDES

La guêpe émeraude est un hyménoptère dit parasitoïde: elle ne parasite son hôte que durant une partie de sa vie, la phase larvaire. La guêpe femelle fécondée attaque la blatte qui, d'ailleurs, ne se laisse pas faire et tente de la repousser. Deux piqûres venimeuses lui suffisent à transformer sa victime en une proie passive pour une de ses larves. La première piqûre, effectuée dans le ganglion nerveux du premier segment thoracique de la blatte, induit la paralysie de sa première paire de pattes pendant quelques minutes. La guêpe en profite pour lui infliger une deuxième piqûre très précise dans deux ganglions nerveux céphaliques, le cerveau proprement dit et le ganglion sous-œsophagien (voir l'encadré page 94). La blatte commence alors un comportement de toilette intense qui dure une trentaine de minutes. Pendant ce temps, la guêpe apprête le terrier qu'elle a déjà creusé non loin du lieu de l'attaque.

Puis la blatte présente un comportement étonnant, appelé hypokinésie. Alors que la plupart des autres insectes parasitoïdes paralysent simplement leurs proies, le venin de la guêpe émeraude modifie spécifiquement le comportement de fuite et de marche spontanée, toutes les autres fonctions motrices – marche, nage, prise de nourriture – restant intactes: la blatte hypokinésique marche si elle est tirée, nage si on la pousse dans l'eau... La guêpe peut ainsi tranquillement mener sa proie vers son terrier, pondre un œuf sur le fémur d'une patte et fermer le terrier avec des graviers et des feuilles.

La larve éclôt dans les trois jours et se nourrit de l'hémolymph de la blatte en mordant l'articulation de la base de la patte, où la cuticule est souple. La salive de la larve contient un impressionnant cocktail de molécules antimicrobiennes qui préservent l'intégrité de la blatte. Après deux mues, à la fin du deuxième stade larvaire, la larve pénètre dans la cavité corporelle de la blatte, où elle mange en priorité le tissu adipeux et les muscles, laissant de côté les organes vitaux comme l'intestin et les tubes de Malpighi, l'analogue des reins chez les insectes.

La blatte survit ainsi jusqu'à la fin du troisième stade larvaire, environ huit jours après l'éclosion. La larve engage >



Guêpe émeraude
(*Ampulex compressa*)
Longueur: 2,2 cm



Blatte américaine
(*Periplaneta americana*)
Longueur: 4 cm

EN CHIFFRES

200

La famille des Ampulicidae, les guêpes à cafards, dont fait partie la guêpe émeraude *Ampulex compressa*, compte actuellement environ 200 espèces, qui vivent principalement sous les tropiques. Toutes utilisent des blattes pour nourrir leurs larves.

264

Le venin de la guêpe émeraude contient 264 protéines différentes.

50 %

On estime qu'au moins 50 % des espèces animales et végétales sont des parasites à certains stades de leur cycle de vie. Le groupe des guêpes parasitoïdes compte à lui seul plus de 100 000 espèces. Il existerait depuis longtemps : en 2018, une équipe allemande a identifié quatre espèces de telles guêpes dans des fossiles de pupes de mouches vieux de 34 à 40 millions d'années.

La blatte américaine est très rapide : son record de vitesse est de 5,4 km/h, ce qui signifie qu'elle est capable de parcourir en une seconde une distance 50 fois supérieure à sa longueur. Mais cela ne suffit pas à la sauver de la guêpe...

Un seul accouplement suffit pour que la guêpe femelle parasite une douzaine de blattes



> alors la pupaison (sa transformation en nymphe), qui dure quatre semaines, puis l'adulte émerge et la vie libre de l'insecte ailé commence.

L'originalité de ce comportement est telle que différents laboratoires s'y sont intéressés. Les études ont permis de déceler une particularité insoupçonnée: l'hypokinésie est réversible et, si aucun œuf n'est déposé, le comportement de fuite est récupéré au bout d'une semaine, ce qui d'ailleurs correspond au temps nécessaire à la larve pour envahir le corps de la blatte. On remarque alors que la piqûre n'a d'effet ni léthal ni nécrotique, l'animal ne présentant aucune séquelle après un tel traitement.

DANS LE VENIN DE LA GUÊPE

En 2018, l'équipe de Michael Adams, de l'université de Californie à Riverside, s'est lancée dans une étude biochimique fine du venin. On savait déjà que la première piqûre entraînant la paralysie de la première paire de pattes injectait en quantité de l'acide γ -aminobutyrique (GABA), un neurotransmetteur (un messager moléculaire entre neurones) connu pour inhiber le système nerveux central chez les mammifères et les oiseaux. Maintenant, on connaît le cocktail de la seconde piqûre.

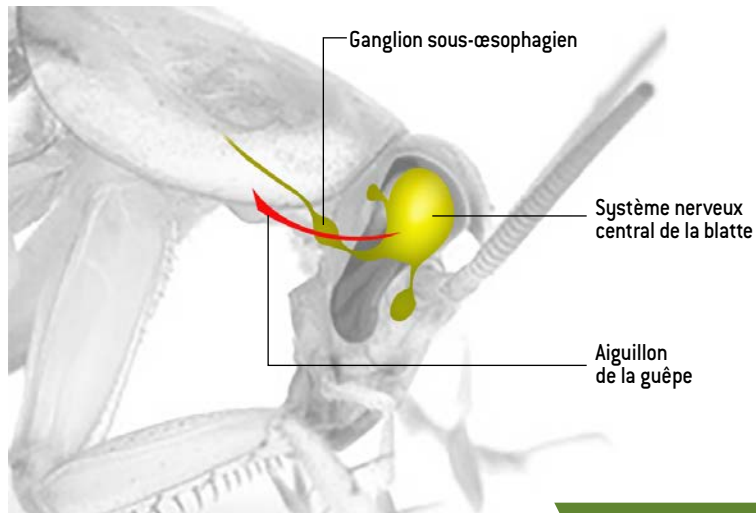
D'abord, la réaction de toilettage initiale semble due à de la dopamine, un autre neurotransmetteur: injectée seule à la blatte, cette molécule déclenche la même réaction. Par ailleurs, quatre neuropeptides nommés ampulexines ont été mis en évidence. Injectés à la blatte, ils entraînent la perte du réflexe de fuite. Il en est de même d'autres neuropeptides détectés dans le cocktail, les tachykinines.

Une quantité d'enzymes de dégradation se retrouvent également dans le venin, comme des protéases qui altèrent la réponse immunitaire innée de la blatte, ou des hyaluronidases, qui hydrolysent des sucres complexes, constituants majeurs de la matrice extracellulaire. Enfin, des protéines d'adhésion cellulaire et des Rho-GTPases, des enzymes impliquées dans la régulation de la dynamique du cytosquelette d'actine, sont aussi abondantes dans le cocktail.

Tout cela permet de proposer un modèle intégré d'action du venin sur les ganglions nerveux de la blatte. Les neuropeptides agissent immédiatement sur le comportement de l'insecte. Puis des enzymes dégradent la matrice extracellulaire des neurones, en particulier au niveau des synapses, les zones de communication entre neurones. De plus, les

LA GUÊPE ÉMERAUDE FAIT DE LA MICROCHIRURGIE

Frédéric Libersat, de l'université Ben-Gourion, en Israël, s'est demandé comment la guêpe pouvait faire une piqûre aussi précise. Il a fourni à des guêpes des blattes dont certaines avaient une partie de leur système nerveux central lésé. Il a alors mesuré le temps que met la guêpe à pratiquer sa piqûre. Quel que soit l'état de l'animal, la première piqûre dure le même temps, soit environ 15 secondes. La deuxième piqûre, plus longue, habituellement de l'ordre de 40 secondes, dure un temps considérable lorsque le ganglion sous-œsophagien a été enlevé, de l'ordre de 3 minutes ! En fait, la guêpe possède des terminaisons sensorielles à l'extrémité de son aiguillon et cherche les ganglions pour les cibler avec précision.



protéines d'adhésion cellulaire s'intercalent dans l'espace intersynaptique, perturbant leur fonctionnement. Les Rho-GTPases induisent par ailleurs le désassemblage du cytosquelette d'actine, ce qui entraîne une rétraction des prolongements nerveux et perturbe deux processus indispensables à la transmission de l'influx nerveux, l'exocytose et l'endocytose. Ces deux processus par lesquels les cellules respectivement sécrètent et ingèrent des molécules sont en effet dépendants de l'actine.

L'efficacité synaptique est donc anéantie, ce qui explique la disparition des comportements de fuite et de marche spontanée. Et comme toutes ces molécules ont des durées de vie assez courtes, on comprend que le mécanisme soit réversible. Ainsi, la manipulation de l'hôte par le parasitoïde correspond à une intoxication chimique du système nerveux central dont tous les paramètres commencent à être décodés. Reste maintenant à reconstruire l'histoire évolutive du venin. Quels processus de sélection ont abouti à un tel cocktail de protéines, dont certaines redondantes? La réponse devrait être bien plus passionnante qu'une simple optimisation... ■

 Hervé Le Guyader a récemment publié: **L'Aventure de la biodiversité**, (Belin, 2018).

BIBLIOGRAPHIE

R. Arvidson et al., **Parasitoid jewel wasp mounts multi-pronged neurochemical attack to hijack a host brain**, *Mol. Cell. Proteomics*, vol. 10(1), pp. 99-114, 2019.

M. Kaiser et al., **Molecular cross-talk in a unique parasitoid manipulation strategy**, *Insect Biochem. Mol. Biol.*, vol. 106, pp. 64-78, 2019.

R. Gal et F. Libersat, **A wasp manipulates neuronal activity in the sub-oesophageal ganglion to decrease the drive for walking in its cockroach prey**, *PloS One*, vol. 5(4), article e10019, 2010.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 82,80€	79€ Au lieu de 114,40€	99€ Au lieu de 174,40€
	29 % de réduction *	31 % de réduction *	43 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

A renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG19STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à**
**POUR LA
SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)



**FORMULE
DÉCOUVERTE**

• 12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

DIA59E



**FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

PIA79E



**FORMULE
INTÉGRALE**

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

IIA99E

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal [] [] [] [] [] [] Ville:

Téléphone [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Date d'expiration [] [] [] [] Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) [] [] []

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.