

et $\lambda/12$, où λ est la longueur d'onde considérée. Il s'ensuit que pour des fréquences élevées (courtes longueurs d'onde), le nombre de sommets du maillage se révèle souvent prohibitif. Ainsi, le maillage d'une pièce mesurant $3 \times 4 \times 2,5$ mètres avec des mailles cubiques de 0,5 centimètre de côté comporterait environ 240 millions de sommets, ce qui donnerait lieu à un système d'équations à 240 millions d'inconnues !

Il est possible de réduire l'ampleur de la tâche. En effet, des manipulations mathématiques permettent de donner à l'équation des ondes une formulation en termes d'intégrales où la fonction inconnue n'intervient plus que par les valeurs qu'elle prend sur la frontière du domaine de propagation (voir l'encadré page 45). Ainsi, pour une onde sonore se propageant dans un milieu ouvert où se trouve l'auditeur, seules interviennent dans l'équation intégrale les valeurs prises par la fonction inconnue sur la surface de l'auditeur.

Un calcul ramené à une surface finie

La résolution numérique de cette équation intégrale surfacique nécessite une écriture mathématique et une algorithmique sous-jacente plus complexes que les méthodes volumiques. Mais l'avantage est que seule la surface de l'objet soumis aux ondes doit être discrétisée, et non tout le volume de propagation. Dans le cas de la pièce de quelques mètres envisagée plus haut où est placé l'auditeur, on réduit ainsi le nombre d'inconnues de 240 millions à seulement quelques millions. Et de façon plus générale, comme la formulation intégrale ramène un problème posé dans tout l'espace (infini) à un problème posé sur une surface finie, sa résolution numérique est

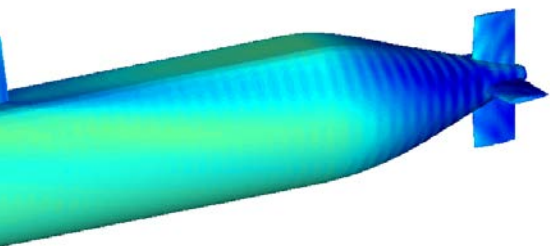
bien plus précise que celle de l'équation aux dérivées partielles.

Le développement de méthodes performantes pour résoudre numériquement ces équations intégrales a démarré un peu avant les années 2000 et est un champ de recherche encore très actif. Citons les noms de trois méthodes rapides adaptées aux problèmes de propagation d'ondes et aujourd'hui utilisées dans la recherche et l'industrie : les méthodes multipolaires rapides, inventées à l'université Yale par Leslie Greengard et Vladimir Rokhlin en 1988, la méthode des matrices hiérarchiques, inventée en 1999 par Wolfgang Hackbusch, de l'institut Max-Planck à Leipzig, et la *sparse cardinal sine decomposition*, que nous avons conçue en 2013.

Toutes ces méthodes permettent de réduire très sensiblement le temps de calcul et la mémoire nécessaires à la résolution de formulations intégrales pour la propagation des ondes, ce qui rend aujourd'hui le calcul numérique des HRTF accessible sur un ordinateur usuel. Typiquement, il faut compter une dizaine d'heures pour calculer tous les filtres HRTF avec une précision suffisante pour les applications.

Le calcul numérique des HRTF ouvre la voie à une meilleure compréhension du lien entre ce que perçoit un auditeur et ses détails morphologiques, en particulier les formes de ses oreilles et de sa tête. Il est facile, en utilisant le modèle numérique, de déformer les oreilles ou la tête d'un sujet virtuel, puis de construire une base de données exhaustive des formes possibles. On pourra alors proposer une famille de HRTF adaptées à chacun. Plus généralement, ces approches numériques aideront à améliorer la spatialisation sonore des casques de réalité virtuelle, mais aussi, pourquoi pas, les prothèses auditives ou les dispositifs de guidage de personnes malvoyantes.

Enfin, de l'autre côté du spectre, la généralité de l'outil mathématique développé le rend applicable à de nombreux autres problèmes de propagation d'ondes. Ainsi, le même logiciel et les mêmes algorithmes de calcul de HRTF permettent de simuler efficacement la propagation d'ondes sonores dans un théâtre, des ondes émises par un sonar en milieu aquatique (voir la figure ci-contre), des ondes radar (électromagnétiques) auxquelles cherche à échapper un avion furtif, etc. Un vaste champ d'applications ! ■



MyBino, un logiciel gratuit pour son 3D

L'équipe X-Audio du Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique a développé un logiciel de rendu binaural gratuit, à destination des professionnels du son et du grand public. Issu d'une collaboration avec les ingénieurs du son du Conservatoire national de musique et danse de Paris (CNSMDP), cet outil permet de mixer et d'écouter des enregistrements sonores contenant jusqu'à 48 canaux avec un simple casque audio. Il a été conçu pour maximiser la sensation d'externalisation des sons, tout en réduisant le plus possible les artefacts de traitement audibles (www.cmap.polytechnique.fr/xaudio/mybino).

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Alouges et M. Aussal, *The sparse cardinal sine decomposition and its application for fast numerical convolution*, *Numerical Algorithms*, vol. 70(2), pp. 427-448, 2015.

M. Aussal, *Méthodes numériques pour la spatialisation sonore, de la simulation à la synthèse binaurale*, thèse de doctorat, École polytechnique, 2014.

J.-C. Nédélec, *Acoustic and Electromagnetic Equations: Integral Representations for Harmonic Problems*, Springer, 2001.

D. R. Begault et L. J. Trejo, *3-D sound for virtual reality and multimedia*, rapport NASA/TM-2000-209606, 2000.

J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, MIT Press, 1997.

L'amertume sentinelle du système immunitaire

Robert Lee et Noam Cohen

Les récepteurs du goût amer ne se trouvent pas seulement sur la langue. Présents dans tout l'organisme, ils forment... une première ligne de défense contre les infections !

■ imaginez votre pire rhume. Le nez complètement bouché, vous avez du mal à respirer. La pression sur les sinus est telle que votre tête semble sur le point d'éclater. Vous avez perdu l'odorat, et la nourriture a la saveur du carton. Au bord de la nausée, vous êtes dans un état pitoyable. À présent, imaginez que les symptômes, même s'ils s'estompent au bout d'une semaine, réapparaissent toujours. Vous n'arrivez jamais à vous en débarrasser. Jamais.

C'est malheureusement le lot des patients atteints de sinusite chronique – ou rhinosinusite chronique en jargon médical. Cette maladie du nez et des voies aériennes supérieures affecte environ 35 millions d'Américains. En Europe, 11 % des 15-75 ans sont concernés – selon une étude publiée en 2011 par le Réseau global européen sur l'allergie et l'asthme (GA²LEN) à partir d'un questionnaire posé dans 19 villes européennes –, avec des disparités selon les régions : seulement 7 % à Helsinki, en Finlande,

L'ESSENTIEL

■ Les protéines qui détectent l'amertume sont présentes sur la langue, mais aussi dans des organes jamais en contact avec les aliments.

■ Nommées récepteurs gustatifs, ces protéines déclenchent des mécanismes de défense ultrarapides qui tuent les bactéries.

■ Stimuler ces récepteurs à l'aide de substances amères pourrait renforcer les défenses immunitaires naturelles et réduire notre dépendance aux antibiotiques.

© Science Source



LES RÉCEPTEURS DE L'AMERTUME,
présents sur les papilles
de la langue (*en orange*
sur cette section
de un millimètre),
interviennent aussi
dans la lutte
contre les bactéries.

■ LES AUTEURS



Robert J. LEE est professeur assistant au sein du service d'otorhinolaryngologie, chirurgie de la tête et du cou et du service de physiologie de la faculté de médecine Perelman à l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Noam A. COHEN est maître de conférences au sein du service d'otorhinolaryngologie de l'université de Pennsylvanie.

13% à Montpellier, et le maximum observé à Coimbra, au Portugal, avec 27%. Pour se soigner, nombre de personnes prennent des antibiotiques et des stéroïdes de manière prolongée. Si le traitement n'a aucun effet, ils subissent une intervention chirurgicale délicate, consistant à nettoyer les cavités sinusiennes infectées – une opération de plus en plus courante aujourd'hui à cause, semble-t-il, de la prise excessive d'antibiotiques qui diminue leur efficacité. Actuellement, aux États-Unis, une prescription d'antibiotique sur cinq est destinée à un patient souffrant de rhinosinusite. Cette maladie fait désormais partie d'un cercle vicieux contribuant à l'apparition de bactéries extrêmement dangereuses, tel le staphylocoque doré résistant à la méticilline.

Tel est le point de départ de notre histoire : nous voulons rompre ce cycle infernal. Comme de nombreux autres scientifiques, nous cherchons à comprendre les mécanismes de défense immunitaire que déploient les cellules épithéliales tapissant les parois internes des voies aériennes lors des infections respiratoires. Une personne inspire en moyenne plus de 10 000 litres d'air par jour, la plupart du temps par le nez. Cet air contient un nombre incalculable de bactéries, de champignons et de virus. Le nez est la première ligne de défense de l'appareil respiratoire. À chaque inspiration, particules de débris, virus, bactéries et spores fongiques y sont pris au piège. Pourtant, la plupart des gens vivent en respirant librement, sans souffrir d'aucune infection des voies respiratoires.

Nous aurions un agent jusque-là insoupçonné de cette immunité sur le bout de la langue – au sens propre. Celle-ci est en effet parsemée de protéines – nommées récepteurs gustatifs – qui non seulement

ce qui repousse les envahisseurs. Ensuite, les récepteurs déclenchent la libération, par des cellules, de monoxyde d'azote, qui tue les bactéries. Enfin, ils signalent à d'autres cellules de produire des protéines antimicrobiennes nommées défensines.

Plus surprenant encore, des chercheurs ont découvert ce type de récepteurs non seulement sur la langue et dans le nez, mais aussi ailleurs dans les voies respiratoires, de même que dans le cœur, les poumons, les intestins et d'autres organes. Avec d'autres scientifiques, nous pensons désormais que ces récepteurs font partie d'un système immunitaire inné différent de celui que l'on connaissait, fondé sur l'action d'anticorps et de cellules circulant dans l'organisme – et potentiellement plus rapide. En effet, des heures, voire des jours, sont parfois nécessaires pour produire des anticorps spécifiques contre des virus ou des bactéries. La réponse des récepteurs gustatifs, bien que d'action plus générale, moins ciblée sur des bactéries particulières, se produit, elle, en quelques minutes. Il s'agit là d'un véritable système d'alerte précoce.

Le goût du danger

On peut voir les récepteurs gustatifs comme des sentinelles qui réagissent aux substances pénétrant dans l'organisme. Sous cet angle, ils ont toute leur place dans le système immunitaire. À la surface des cellules formant les papilles gustatives de la langue, par exemple, les récepteurs déclenchent l'envoi au cerveau de signaux l'informant de la valeur nutritionnelle ou de la toxicité potentielle de la nourriture que nous mettons dans la bouche. La langue détecte cinq saveurs fondamentales : l'amer, le sucré, le salé, l'acide et l'umami (un terme emprunté au japonais, qui signifie savoureux et désigne le goût conféré aux aliments par un acide aminé, le L-glutamate, et divers nucléotides, présents en quantité dans des aliments tels que les sauces de poisson fermenté, la sauce soja, les champignons, les tomates mûres ou les épinards). Notre perception du goût agit ainsi comme le gardien du système digestif : elle fournit des informations sur les aliments que nous mangeons, nous permettant de décider si nous pouvons ou non les avaler.

Les récepteurs de l'amertume détectent la présence de poisons végétaux, notamment les alcaloïdes, une classe de molécules dont

La réponse des récepteurs de l'amertume contre une invasion bactérienne se produit en quelques minutes

détectent les saveurs amères, mais aussi nous protègent des bactéries. Nos recherches ont montré que ces récepteurs, également présents dans le nez, déclenchent trois types de réponses contre les bactéries. D'abord, ils envoient des signaux qui activent le battement de cils (de minuscules protubérances) à la surface des cellules de la paroi nasale,