

fissures se sont refermées toutes seules (voir la figure 6). L'analyse au microscope électronique à balayage a révélé que des composés solides se sont formés sur les bords de la fissure et sur la fibre qui la traverse. Ces composés sont constitués d'un mélange de silicate de calcium hydraté et de bicarbonate de calcium. Ils se sont formés lorsque l'eau et l'air (chargé en dioxyde de carbone) ont pénétré dans les fissures et ont réagi avec les ions calcium de l'ECC. Ils ont fini par sceller la microfissure. Comme ces composés se développent autour de la fibre, celle-ci renforce le matériau de réparation. Les mesures montrent que l'ECC récupère alors ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance et sa ductilité.

## Du béton intelligent

L'autodétection pourrait être réalisée au moyen de la tomographie par impédance électrique, une piste explorée par l'équipe de Jerome Lynch, à l'Université du Michigan. Cette technique consiste à faire circuler

de faibles courants dans le matériau (ils se propagent dans le béton grâce à des mouvements d'ions entre les pores du ciment), puis à mesurer les variations de résistivité. En perturbant le flux d'ions, une microfissure augmente localement la résistivité. On dresse alors des cartes où les microfissures apparaissent comme les lignes de plus grande résistivité. Cette technique doit encore être améliorée, mais elle pourrait fournir un moyen de contrôle bon marché : on pourrait surveiller en permanence, sans l'aide de dispositifs externes, l'état d'une structure dotée des électrodes et des capteurs adéquats.

Ces fonctions d'autodétection et d'autoréparation peuvent être combinées : tandis que les dommages s'autoréparent, leur profondeur, et donc le degré de récupération, est mesurée en continu. Ainsi, le béton du futur ne sera pas seulement ductile, mais aussi intelligent. Il aidera à réaliser des infrastructures plus sûres et plus durables, avec une empreinte carbone et énergétique plus faible. ■

## ■ BIBLIOGRAPHIE

V. C. Li et E. Herbert, **Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure**, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, pp. 207-218, 2012.

V. C. Li, **Tayloring ECC for special attributes: A review**, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 6, pp. 135-144, 2012.

M. Sahmaran et V. C. Li, **Engineered cementitious composites: Can composites be accepted as crack-free concrete?**, *Transportation Research Record*, vol. 2164, pp. 1-8, 2010.

T. Hou et J. P. Lynch, **Electrical impedance tomographic methods [...]**, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 1363-1379, 2009.



**Palais**  
DÉCOUVERTE



# les conférences

au Palais de la découverte

entrée gratuite (réservation conseillée: [conferences@universcience.fr](mailto:conferences@universcience.fr))

## Les Martiens à six membres de « John Carter » sont-ils plausibles ?

Pourquoi ne trouve-t-on pas d'animaux à trois pattes, alors que c'est la configuration la plus stable ? Et vous, comment imaginez-vous la forme d'un extraterrestre ? Avec les auteurs de la rubrique « Science & Fiction » de la revue Pour la science : Roland Lehoucq et Sébastien Steyer.

mercredi 29 mai à 19h

programme complet sur [www.universcience.fr](http://www.universcience.fr)

Avec le soutien de






# La fusion des SENS

Lawrence Rosenblum

**Ce que nous entendons dépend notablement  
de ce que nous voyons et ressentons. Pourtant,  
l'intégration de toutes ces perceptions au sein du cerveau  
livre une version cohérente du monde environnant.**

**À** la fin des années 1970, le FBI engagea Sue Thomas et huit autres personnes sourdes pour analyser des empreintes digitales. On les supposait plus aptes à se concentrer sur cette tâche méticuleuse. Cependant, S. Thomas trouva ce travail d'une monotonie insupportable. Les agents du FBI, qui avaient remarqué son habileté à lire sur leurs lèvres, lui confièrent une autre tâche : ils lui montrèrent une vidéo muette, où deux suspects discutaient, et lui demandèrent de reconstituer leur conversation. S. Thomas s'en acquitta facilement, révélant l'implication des suspects dans des cercles de jeux clandestins. Ainsi débuta sa carrière en tant que premier expert – sourd – de lecture sur les lèvres du FBI.

Chez S. Thomas, cette compétence était particulièrement développée, car elle lui était nécessaire pour communiquer, mais nous l'utilisons tous plus ou moins. De fait, nous associons les mots lus sur les lèvres à ceux entendus, et nous comprenons moins bien notre interlocuteur quand nous ne

## L'ESSENTIEL

- On pensait auparavant que les aires cérébrales consacrées aux différents sens (la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher) interagissaient peu.
- Au cours des 30 dernières années, on s'est aperçu que le cerveau mêle les informations issues de sens distincts.
- Ces recherches ont inspiré de nouveaux moyens d'aider les aveugles et les sourds, et ont contribué à améliorer les logiciels de reconnaissance vocale.

voyons pas ses lèvres, en particulier s'il a un accent inconnu ou si l'environnement est bruyant. Voir parler aide aussi à apprendre à parler. Ainsi, cet apprentissage est souvent plus long chez les enfants aveugles. Les recherches récentes ont éclairé la façon dont le cerveau organise les informations reçues des différents sens.

Autrefois, le cerveau était vu comme un couteau suisse, où chaque sens aurait une région dédiée. La plupart des neuroscientifiques et des psychologues pensent aujourd'hui que l'évolution a conduit à des échanges importants entre les sens – autrement dit, à des aires sensorielles « entrelacées » physiquement dans le cerveau. Ainsi, bien que le cortex visuel traite essentiellement la vue, il peut aussi être influencé par d'autres informations sensorielles, issues par exemple du toucher. Les chercheurs peuvent changer les résultats de tests de goût en modifiant ce que les sujets entendent. L'endroit où nous regardons et ce que nous voyons influent sur notre posture.



En d'autres termes, les recherches de ces 15 dernières années montrent qu'aucun de nos sens ne fonctionne isolément. On espère s'en inspirer pour améliorer les dispositifs d'assistance aux personnes aveugles ou sourdes, tels les implants cochléaires (où les sons sont transformés en impulsions électriques, qui stimulent directement les fibres nerveuses normalement activées par les cellules de l'audition, les cellules ciliées).

## Voir et sentir les mots

L'un des premiers exemples d'interaction sensorielle, décrit par les psychologues cognitivistes britanniques Harry McGurk et John MacDonald en 1976, est nommé l'effet McGurk. Si vous regardez une personne formant silencieusement sur ses lèvres la syllabe « ga » tout en écoutant un enregistrement sonore de la syllabe « ba », vous entendrez la syllabe « da ». La syllabe « ga » silencieuse modifie la perception de la syllabe « ba » audible, car le cerveau mélange ce que l'on entend et voit. L'effet McGurk fonctionne dans toutes les langues et se manifeste encore chez quelqu'un qui l'a étudié pendant 25 ans – je peux en témoigner.

Les paroles entendues sont aussi influencées par les paroles « ressenties ». En 1991, Carol Fowler, du Collège Dart-

mouth, aux États-Unis, et ses collègues ont demandé à des volontaires de s'essayer à la technique Tadoma, qui consiste à interpréter les paroles de quelqu'un en plaçant les doigts sur ses lèvres, ses joues et son cou (avant l'apparition des implants cochléaires, de nombreuses personnes sourdes et aveugles utilisaient cette technique). Dans le même temps, d'autres syllabes étaient émises par des haut-parleurs voisins. Les syllabes ressenties par les volontaires modifiaient leur perception des syllabes entendues.

En 1997, Gemma Calvert, de l'Université d'Oxford, fit une cartographie des aires cérébrales impliquées dans la lecture sur les lèvres. Des volontaires inexpérimentés lisaient sur les lèvres d'un individu qui articulait des nombres, de un à neuf. G. Calvert et ses collègues découvrirent que la lecture sur les lèvres active le cortex auditif – qui traite les sons – et des aires cérébrales apparentées, connues pour s'activer quand on entend des mots. C'était l'une des premières preuves d'influences sensorielles multiples dans une aire cérébrale que l'on pensait consacrée à un seul sens, la vision. Des études plus récentes ont confirmé la multiplicité des influences. Ainsi, une partie du tronc cérébral supposée impliquée uniquement dans un traitement rudimentaire des sons réagit aussi lorsqu'on voit quelqu'un parler sans l'entendre. Des études d'imagerie cérébrale ont montré que

durant l'effet McGurk – le fait d'entendre « da » alors que le son diffusé est « ba » –, le cerveau se comporte comme si la syllabe « da » parvenait aux oreilles du sujet.

Ces découvertes suggèrent que dans le cerveau, les informations vocales recueillies par l'intermédiaire des oreilles, des yeux et de la peau sont toutes importantes. Cela ne signifie pas que ces canaux fournissent une quantité égale d'informations, car l'ouïe est sensible à des détails (tels des mouvements de la langue qui modifient le son) inaccessibles à la vue ou au toucher.

Dans d'autres cas, les sens s'entraident pour extraire une même information, telle l'identité du locuteur. Chacun a des traits visuels et auditifs caractéristiques dans sa façon de parler. Mes collègues et moi avons filmé des personnes en train de parler et modifié les vidéos résultantes, afin de retirer toutes les caractéristiques faciales reconnaissables – transformant les visages en motifs de points brillants qui remplaçaient les joues et les lèvres. Les volontaires à qui nous avons présenté ces vidéos ont réussi à lire sur les « lèvres » de ces amas de points et à reconnaître leurs amis!

Des sons simples dérivés de la parole d'un locuteur renseignent aussi sur son identité. Robert Remez, de l'Université Columbia, à New York, et ses collègues ont transformé des paroles enregistrées en ondes sinusoïdales, qui ressemblaient aux sifflements émis par le robot R2-D2 dans le film *La guerre des étoiles*. Malgré l'absence de paramètres caractéristiques d'une voix tels que le ton et le timbre, les auditeurs ont reconnu leurs amis. Plus étonnant, des sujets ont visionné une série de vidéos représentant les locuteurs par des points brillants, et identifié ceux qui émettaient telle ou telle onde.

Le fait qu'on associe la même information sur l'identité à ces perceptions visuelles et auditives suggère qu'elles sont enchevêtrées dans le cerveau. Les études d'imagerie cérébrale confirment cette connexion : écouter la voix d'une personne connue active le gyrus fusiforme, une aire cérébrale impliquée dans la reconnaissance des visages.

Si les formes de perception sont mélangées, apprendre à lire sur les lèvres de quelqu'un permettrait de mieux le comprendre quand il parle (ses mots deviendraient alors plus audibles). Nous avons demandé à des volontaires de lire sur les lèvres d'une personne qui parlait pendant une heure dans un film muet. Ces volontaires

### DES AIRES CÉRÉBRALES À LA CROISÉE DES SENS

Les neuroscientifiques savaient depuis quelques décennies que l'activité de certaines aires cérébrales (*en noir*) est influencée par plusieurs sens. Des perceptions visuelles et somatosensorielles (tels le toucher et la température) peuvent par exemple se mêler au sein d'une même région. On s'est récemment aperçu que ce phénomène est bien plus répandu dans le cerveau qu'on ne le pensait.

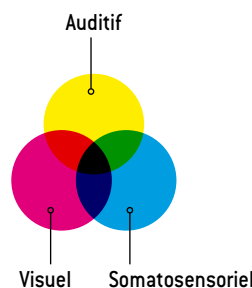
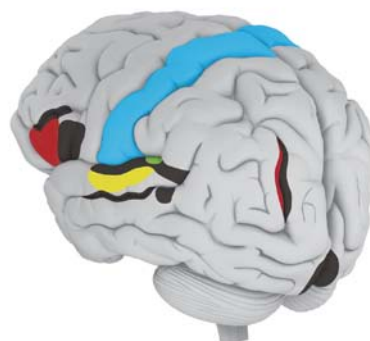


SCHÉMA CLASSIQUE



NOUVEAU SCHÉMA

Ces illustrations ont été extrapolées en partie à partir de données sur des cerveaux de primates. Seules les aires sensorielles primaires sont représentées.



ont ensuite écouté un ensemble de phrases mêlées à un fond sonore aléatoire. À leur insu, la moitié des participants entendaient des phrases prononcées par la personne sur les lèvres de laquelle ils venaient de lire. Ils ont mieux réussi à détecter les phrases au milieu du bruit de fond que les autres.

Les résultats sur la perception multisensorielle de la parole ont incité les chercheurs à examiner tous les types d'interactions. Dès lors, ils ont multiplié les découvertes. Le goût perçu est par exemple influencé par l'odeur, mais aussi par les images et les sons. Ainsi, une boisson parfumée à l'orange semble avoir le goût de cerise si elle est colorée en rouge, et *vice versa*. En 2005, Massimiliano Zampini, de l'Université de Trente, en Italie, et son équipe ont montré que la diffusion d'un son modifié de « croquant » à des sujets qui mangent des chips change la façon dont ils perçoivent la fraîcheur et le croustillant de l'aliment. Quand on regarde un motif visuel qui descend continuellement, telle une chute d'eau, tout en touchant certaines surfaces immobiles, on a l'impression que ces surfaces sont en train de monter. Tom Stoffregen, de l'Université du Minnesota, et ses collègues ont demandé à des sujets de se tenir droits et de déplacer leur regard, d'une cible proche à une cible éloignée. Ce décalage de leur centre d'attention visuel a entraîné de légères modifications de leur posture.

## Des interactions dans tous les sens

L'activité d'une aire sensorielle est donc souvent modulée par des signaux issus de plusieurs sens. En outre, le cerveau fait preuve d'une plasticité importante : une aire cérébrale peut changer de fonction lors d'une privation sensorielle, même partielle ou de courte durée. Des études d'imagerie menées depuis quatre ans l'ont confirmé pour le cortex visuel : quand on bande les yeux d'une personne ne serait-ce que durant une heure et demie, on constate que son cortex visuel se met à réagir au toucher, ce qui renforce la sensibilité tactile. Autre exemple, la myopie accroît souvent les facultés auditives et spatiales d'un individu, même s'il porte des lunettes (qui laissent flou une partie du champ visuel périphérique). Ainsi, la compensation multisensorielle est omniprésente.

On en déduit des indications thérapeutiques pour ceux qui ont perdu l'un de

## Aire multisensorielle ou redirection de l'attention ?

La privation temporaire d'un sens augmente la sensibilité aux autres sens, ce que l'auteur de l'article semble attribuer aux capacités multisensorielles des aires cérébrales. Ainsi, le cortex visuel s'active en réponse au toucher lorsqu'on a les yeux bandés depuis une heure et demie. Toutefois, cette activation pourrait être le signe non pas d'un traitement des données tactiles par le cortex visuel (qui n'est plus accaparé par les données visuelles), mais d'as-

sociations apprises entre les deux types de propriétés : on associe par exemple une certaine texture tactile avec l'apparence des objets sur lesquels on l'a rencontrée, de sorte que toucher cette texture active le cortex visuel.

D'où viendrait alors l'augmentation de la sensibilité au toucher ? Elle pourrait être due à des effets attentionnels : n'étant plus mobilisée par les autres sens, l'attention peut se concentrer sur le toucher. Des études sup-

plémentaires sont nécessaires pour trancher. Le phénomène est différent lors de la privation définitive d'un sens : chez les aveugles, par exemple, le cortex visuel se « recâble » pour l'audition, et l'augmentation de la sensibilité aux sons est donc due à l'établissement de nouvelles connexions neuronales.

**Pascal Mamassian,**  
Laboratoire Psychologie  
de la perception, CNRS  
et Université Paris Descartes

leurs cinq sens. Par exemple, les implants cochléaires sont moins efficaces si le cerveau a eu trop de temps pour « reprogrammer » le cortex auditif pour d'autres formes de perception, tels la vue et le toucher. C'est pourquoi, quand on décide de mettre un implant cochléaire à un enfant sourd de naissance, mieux vaut le faire aussi tôt que possible. On encourage aussi les enfants sourds dotés de ces implants à regarder des films de personnes qui parlent, afin qu'ils apprennent à associer les mouvements des lèvres à ce qu'ils entendent.

Les dispositifs de reconnaissance de la parole (tels ceux traduisant les paroles captées par un microphone en un texte écrit) ont aussi bénéficié des recherches sur la perception multisensorielle. Ces dispositifs sont souvent perturbés par le bruit de fond, même modéré. Quand on leur fait analyser les mouvements de la bouche du locuteur (ils doivent alors disposer d'une caméra), leur précision s'améliore notablement. Cette stratégie fonctionne avec les caméras des téléphones cellulaires.

La notion de perception multisensorielle semble contredire notre expérience quotidienne. D'instinct, nous séparons les sens, qui paraissent traiter des aspects différents du monde. Nous utilisons les yeux pour voir et les oreilles pour entendre ; nous ressentons la consistance d'une pomme avec les mains et son goût avec la langue. Cependant, lorsqu'une information sensorielle atteint le cerveau, tout s'amalgame. Le cerveau ne range pas l'information visuelle provenant des yeux dans un conteneur neuronal, et celle, auditive, issue des oreilles dans un autre. Au contraire, il interprète le monde qui nous entoure en mêlant les diverses formes de perceptions sensorielles. ■

### ■ L'AUTEUR



Lawrence  
ROSENBLUM  
est professeur  
de psychologie  
à l'Université  
de Californie  
à Riverside, aux États-Unis.

### ■ SUR LE WEB

Vidéos sur l'effet McGurk et d'autres expériences de perception multisensorielle : [ScientificAmerican.com/jan2013/multisensory-perception](http://ScientificAmerican.com/jan2013/multisensory-perception).

### ■ BIBLIOGRAPHIE

Barry Stein (éd.), *The New Handbook of Multisensory Processing*, MIT Press, 2012.

L. Rosenblum, *See What I'm Saying : The Extraordinary Power of Our Five Senses*, W. W. Norton, 2010.

L. Rosenblum, *Speech perception as a multimodal phenomenon*, *Current Directions in Psychological Science*, vol. 17, pp. 405-409, 2008.

# Les grappes de sphères collantes

Brian Hayes

**Dans un tas de billes, quel est le nombre maximal de contacts que l'on peut former ? On connaît depuis peu la réponse... mais seulement pour moins de 12 billes !**

**P**renez 12 billes identiques, et serrez-les pour former un amas compact. Comptez alors le nombre de points où les billes se touchent. Quel est le plus grand nombre que vous pouvez obtenir ? Quel est l'arrangement géométrique correspondant ? La grappe optimale est-elle unique, ou bien en existe-t-il plusieurs donnant le même maximum ?

Pour une grappe constituée de trois, quatre ou cinq sphères de taille égale, on imagine que le problème ne pose pas de difficultés particulières. Mais il se corse très vite quand la taille des grappes augmente. Ces trois dernières années, le nombre maximal de contacts a été déterminé pour les grappes comprenant jusqu'à 11 sphères. Pour ce faire, il a fallu recourir à des outils mathématiques empruntés à la théorie des graphes ou à la géométrie, ainsi qu'à de gros calculs et, à quelques étapes cruciales, à la construction de modèles de boules et de tiges.

Pour les grappes de 12 sphères ou plus, on ne connaît toujours pas les réponses. Il est un peu humiliant d'être mis en échec par de si modestes tas de billes, mais ce n'est en fait pas si surprenant. Les problèmes

## L'ESSENTIEL

■ Les empilements de sphères intéressent depuis longtemps les mathématiciens et les physiciens.

■ L'une des questions porte sur le nombre maximal de contacts entre sphères dans un empilement fini.

■ Ce problème est facile pour moins de cinq sphères, mais il n'a été résolu que récemment pour des agrégats contenant jusqu'à 11 sphères.

■ Le cas d'une grappe de 12 sphères pourrait être bientôt réglé. Au-delà, c'est l'inconnu.

Sauf mention contraire, toutes les illustrations sont de Brian Hayes

d'empilements compacts de sphères sont notoirement épineux. Certains résistent depuis des siècles.

Ainsi, en 1611, Johannes Kepler a affirmé que l'empilement le plus dense possible de sphères identiques est l'arrangement correspondant aux pyramides d'oranges que l'on voit chez les marchands de primeurs (voir la figure 1). Toute sphère y touche 12 autres sphères, et la fraction du volume rempli par les sphères s'élève à  $\pi/\sqrt{18}$ , soit environ 0,74. Kepler pensait apparemment que la supériorité de son empilement était tellement évidente qu'aucune démonstration n'était nécessaire ; et aucune preuve n'a été fournie pendant près de 400 ans. Ce n'est qu'en 1998 que Thomas Hales, de l'Université de Pittsburgh, a enfin démontré qu'aucun autre empilement tridimensionnel n'était plus dense.

La conjecture de Kepler et sa démonstration par Th. Hales s'appliquent à un réseau infini de sphères. Mais une autre énigme pluricentenaire concerne les grappes finies. Tout a commencé dans les années 1690 avec une dispute entre Isaac Newton et son disciple David Gregory. D'après une version de

