

Voir avec les oreilles

Malika AUVRAY et Kevin O'REGAN

Aujourd'hui des aveugles voient grâce à des stimulations tactiles ou auditives. Cette transformation de modalité sensorielle interroge les classifications figées utilisées pour définir nos sens.

Depuis Aristote, nous estimons que nous avons cinq sens. Chacune de nos modalités sensorielles nous semble exister « à l'intérieur » de l'organisme, antérieurement à toute expérience. Nous déterminons chacun de ces sens selon la nature des objets perceptifs auquel il a accès. Par exemple, les objets propres de la vue sont la couleur et la forme, ceux de l'audition correspondent aux caractéristiques des sons. Pour chaque type d'objet rencontré, nous disons avoir une sensation déterminée. Ainsi, lorsque nos yeux reçoivent de la lumière, nous pensons ressentir une sensation uniquement visuelle. Pourtant, comme nous allons le voir, nos localisations sensorielles et la distinction entre nos sens sont subjectives.

Intuitivement, nous considérons que notre sensation naît à l'intérieur de notre corps : un objet externe entre en contact avec l'un de nos organes récep-

teurs – l'œil, la peau, la langue, le nez, l'oreille – qui véhicule l'information jusqu'au cerveau et ce dernier interprète la stimulation. Sommes-nous cependant sûrs que le nerf stimulé véhicule et restitue fidèlement l'information sur l'origine de la sensation ? Si, ayant fermé les yeux, on vous pince, comment être certain que la douleur se manifeste exactement à l'endroit où vous avez été pincé ?

Déjà Aristote dans la *Métaphysique* doute de certaines sensations. Il invite à l'expérience suivante : croisez les deux doigts, fermez les yeux, et placez entre vos doigts croisés une boule. Votre toucher vous fera percevoir deux boules là où il n'y en a qu'une. En 1937, le français J. Tastevin rapporte une variante de l'expérience d'Aristote qu'il a effectuée à l'aide d'un compas dont chaque extrémité était munie, pour les masquer, d'une petite collerette de papier. Il a manœuvré le compas comme pour

produire deux contacts simultanés sur les deux doigts croisés d'un tiers, de manière à ne toucher que l'un des deux doigts. La personne ne regardait que l'une ou l'autre des deux collerettes. C'est à chaque fois sous la collerette qui était l'objet du regard que se localisait la sensation due à un unique contact. L'erreur de localisation de la sensation serait liée à la subjectivité de la perception visuelle, non à l'habitude : c'est au sens de la vue que nous faisons le plus facilement confiance.

Organes imaginaires et sensations réelles

Les phénomènes de ce type sont nombreux : Tastevin a, par exemple, utilisé un dessin colorié ou un moulage en plâtre des deux dernières phalanges d'un doigt. Le doigt factice, partiellement couvert par une feuille de papier cachant aussi le doigt réel et la main, a été posé à trois ou quatre centimètres du majeur. Le sujet a alors été invité à fermer les yeux. En les rouvrant, il a eu tendance à associer le doigt factice aux perceptions sensibles du majeur. En répétant l'opération plusieurs fois et en reculant chaque fois le doigt factice de quelques centimètres, Tastevin a amené la perception sensible du doigt factice à quinze et même trente centimètres de son siège normal : la sensation est « captée » par le doigt factice.

Le phénomène de captage de la sensation d'un membre par un membre factice est encore étudié aujourd'hui. Des neurologues américains ont répliqué l'expérience en 1998 avec un bras en caoutchouc : un expérimentateur pose un écran vertical sur une table et demande à une personne de placer son bras derrière l'écran, de telle sorte qu'elle ne puisse plus le voir. Devant l'écran, il pose un bras en caoutchouc. L'expérimentateur caresse ou tapote simultanément le bras réel et le bras en caoutchouc. Au bout d'une dizaine de minutes, la personne a l'impression que la sensation qu'elle ressent vient du bras en caoutchouc.



1. ILLUSION D'ARISTOTE. En posant ses doigts croisés sur une bille et en fermant les yeux, on a la sensation qu'il y a deux billes.

Cette expérience fonctionne, mais moins bien, avec des objets qui ne ressemblent pas à la partie du corps en question, par exemple une chaussure. Lorsque les personnes affirment avoir l'impression que leur sensation vient de la chaussure, ce n'est pas simplement une figure de style. Si, pendant qu'elles regardent l'objet dans lequel elles ont projeté leur sensation, on frappe le bras factice ou la chaussure avec un marteau en caoutchouc, les personnes grimacent de douleur.

Ces expérimentations remettent en question la conscience de son propre corps. Elles aident à comprendre, voire à guérir certains troubles rapportés par les amputés, comme la sensation de douleur dans un membre fantôme (voir *La perception des membres fantômes*, par Régine Roll, dans ce dossier).

Stimulations et réponses sensorielles

Nos erreurs ne viennent pas seulement de la localisation de nos perceptions. Croire que chacun de nos sens fait référence à la seule nature de la stimulation ne résiste pas non plus à l'expérience. Par exemple, la lumière est le stimulus habituel qui engendre des sensations visuelles. Cependant, si l'on presse l'œil fermé, on a la sensation d'un flash de lumière, tandis qu'une stimulation similaire sur le bras donne une impression de toucher. Le nerf optique répond toujours par une sensation lumineuse, qu'il soit activé de la manière habituelle ou qu'il soit pincé, chauffé, irrité par de l'acide ou stimulé par un courant électrique. Les sensations de nature visuelle peuvent donc résulter non seulement de stimulations visuelles, mais aussi de stimulations tactiles, par exemple. Dès lors, pourquoi ne pas imaginer que l'on pourrait percevoir une image avec les oreilles ? Les dispositifs de substitution sensorielle prouvent que nos sens ne sont pas immuablement spécifiés et que nos performances sensorielles et motrices ne sont pas limitées à une région corporelle précise.

Les dispositifs pour les non-voyants utilisent souvent l'idée de substitution sensorielle. Ces systèmes, qui prennent de multiples formes, sont fondés sur la conversion des stimulus propres à une modalité sensorielle (vision, audition, toucher et odorat) en des stimulus propres à un autre sens. Examinons quelques-uns de ces systèmes, d'abord



ceux qui convertissent les signaux optiques en signaux tactiles, ensuite, ceux qui convertissent ces mêmes signaux optiques en signaux auditifs.

Les dispositifs visuo-tactiles

Un non voyant peut-il avoir accès à une forme de sensation visuelle si les informations ne lui sont pas fournies par les yeux, mais de manière tactile ? Cette question a amené Paul Bach-y-Rita, de l'Université du Wisconsin, à mettre au point, en 1963, le premier système de substitution visuo-tactile : une prothèse transformant une image visuelle en une image tactile. Dans sa version moderne, ce dispositif est relativement simple :

une caméra vidéo est reliée à une plaque de stimulation tactile hérissée de picots mobiles ou portant des électrodes qui envoient des impulsions électriques. Ce stimulateur, en contact avec une partie du corps comme le bas du dos, l'index ou l'abdomen, reçoit et convertit les images enregistrées par la caméra en stimulations tactiles.

Cette expérience a d'abord échoué. Il a fallu attendre que l'un des sujets s'empare de la caméra, jusque-là fixe, posée devant le sujet, et la bouge lui-même pour qu'il perçoive des informations. Le système n'est efficace que si l'exploration de l'environnement se fait de manière active : en déplaçant lui-même la caméra, le sujet établit des liens indispensables entre ses actions et les sensations qui en résultent.

TOUCHER POUR VOIR : SITES WEB POUR AVEUGLES

À l'Université de technologie de Compiègne, l'équipe de suppléance perceptive dirigée par Charles Lenay s'intéresse à la perception humaine. Les chercheurs visent une compréhension scientifique de la perception assistée par des prothèses. Les recherches sur les dispositifs de substitution visuo-tactile ont abouti à la mise au point d'un prototype d'interface baptisé le stylet tactile.

Ce dispositif fait intervenir un système informatique reliant le stylet d'une tablette graphique à une matrice de stimulateurs tactiles. Le sujet explore avec le stylet la surface de la tablette graphique et reçoit sur sa main libre des stimulations qui dépendent des formes rencontrées. Le mécanisme repose sur la virtualisation de la perception: le déplacement spatial du stylet sur la tablette graphique conditionne le déplacement virtuel d'un curseur sur une image en noir et blanc affichée sur l'écran de l'ordinateur. À l'écran, le curseur, dont la position dépend des mouvements du stylet, analyse une matrice d'une quinzaine de champs récepteurs de quelques pixels. Lorsqu'un champ récepteur croise au moins un pixel noir, il provoque un mouvement d'un picot sur une cellule de barrette braille ou la vibration en tout ou rien d'un transducteur électromagnétique. Cette stimulation tactile est transmise à la main libre de l'utilisateur, qui decode l'information.

Après un court apprentissage, les sujets deviennent capables de suivre les contours d'une forme, de reconnaître et de localiser cette forme. L'intérêt d'un tel dispositif est que la relation entre les mouvements du stylet et les retours tactiles est déterminée par le logiciel. Elle est donc modifiable et modulable à volonté: l'image peut changer, ainsi que la forme, la disposition, l'orientation et le nombre des champs récepteurs. Par exemple, les entrées sensorielles sont réductibles à leur minimum: on peut faire en sorte qu'un seul champ récepteur donne lieu à une seule stimulation tactile en tout ou rien. Mieux: le stylet, utilisable pour reconnaître des formes, fonctionne aussi en mode écriture. L'appareil autorise même la «relecture» des caractères ainsi formés.

Les chercheurs travaillent en ce moment sur une nouvelle utilisation de ce système de couplage: grâce à lui, les jeunes



Le stylet tactile traduit les contrastes entre le blanc et le noir d'une page d'écriture en stimulations tactiles. Il permet donc, à l'aide d'une tablette graphique reliée à un ordinateur et à un stimulateur de lire sans voir.

aveugles en classe de mathématiques auraient accès aux courbes et aux graphiques. Le principe est identique à celui du stylet tactile, mais l'utilisation d'une souris, d'un joystick ou d'un clavier sont également envisageables. Cette interface, qui fait déjà l'objet d'un brevet, sera utilisée pour la perception des graphiques, des icônes et des formes simples bi-dimensionnelles lors de cours de mathématiques adaptés aux non-voyants.

L'étape suivante sera la mise en réseau de plusieurs de ces interfaces tactiles. Les aveugles apprendront à utiliser ce dispositif sur un site Web commun. Grâce à l'espace numérique partagé sur le réseau, les participants auront aussi l'occasion de se «rencontrer» tactilement et, à terme, de suivre en temps réel les mouvements des uns et des autres. L'interface tactile de perception de formes telle qu'elle est envisagée par cette équipe propose une entrée originale sur le réseau Internet. De nouveaux modes d'interaction, de nouvelles communautés se développeront ainsi. Ces «espaces virtuels, d'interaction tactile» ont une infinité d'applications, ludiques, éducatives, ou autres destinés aux non-voyants comme aux voyants: tout est à imaginer.

tent. L'action est constitutive de la perception. La caméra vidéo a alors été fixée sur des lunettes.

Au bout d'un temps d'adaptation assez court – entre cinq et quinze heures en moyenne – le sujet oublie les stimulations sur la peau et perçoit les objets comme étant à l'extérieur, devant lui. Il distingue des formes tridimensionnelles, statiques ou en mouvement. Après la phase d'apprentissage, la caméra ou le dispositif vibro-tactile peuvent être déplacés sans troubler la localisation de l'image.

Nombre de tâches, dont certaines assez complexes, sont facilitées grâce à ces dispositifs de substitution sensorielle. Par exemple, en 1981 Gunnar Jansson, de l'Université d'Uppsala, en Suède, et John Brabyn, du centre de

recherches Smith-Kettlewell, à San Francisco, ont montré qu'un sujet bien entraîné, muni d'une batte, peut frapper une balle roulant vers lui avec pour seules informations les impulsions tactiles correspondant au mouvement de la balle et à la position de la batte. Deux sujets aveugles ont obtenu des performances proches de la perfection.

Parmi les nombreux systèmes de substitution sensorielle visuo-tactiles, le seul qui ait été largement commercialisé, à partir du début des années 1970, est l'*Optacon* de la société américaine *Telesensory Systems*. Destiné à la lecture, il se présente comme un stylet que l'on utilise pour parcourir un texte. Une caméra miniaturisée placée au bout du stylet sert à enregistrer le texte qui est ensuite restitué sous forme de vibrations

tactiles par une petite matrice de micro-vibreurs sur laquelle le lecteur aveugle place l'un des doigts de sa main libre.

En 1998, P. Bach-y-Rita a amélioré son dispositif de substitution sensorielle en mettant au point une matrice de stimulateurs applicable sur la langue (voir la figure 2). Comme c'est l'organe le plus innervé du corps, on obtient, pour une matrice de taille équivalente, une précision de localisation cinq fois supérieure à celle que l'on avait en sollicitant la peau du ventre. De surcroît, la langue ne requiert que trois pour cent du voltage nécessaire à la perception de la stimulation par le derme; constamment imbibée de salive, elle conduit parfaitement les micro-impulsions et possède une résistance électrique presque constante.

Les dispositifs visuo-auditifs

L'autre grande famille de dispositifs de substitution sensorielle est celle des dispositifs d'écholocalisation, qui fournissent des signaux auditifs dépendant de la direction, de la taille, de la distance et de la texture des objets.

Le premier dispositif, commercialisé en 1965, a été inventé par Leslie Kay, de l'Université de Birmingham, au Royaume Uni. Essentiellement utilisé par les aveugles pour la détection des obstacles, il est composé d'un appareil de transmission qui émet un signal ultrasonore modulé en fréquence et avec une grande ouverture angulaire, afin de détecter les obstacles. Un récepteur à deux canaux reçoit et retransmet les signaux. Le signal détecté est converti en un signal auditif transmis aux oreilles par deux écouteurs. Le principe est identique à celui de l'écholocalisation des chauves-souris : un signal ultra sonore émis par l'animal se réfléchit sur les obstacles et de son analyse sont déduits la taille, la distance, la forme et éventuellement le mouvement de ces objets.

En 1974, L. Kay invente les *Sonic Glasses*. Le principe est identique, sauf que les capteurs ultrasons sont montés sur des lunettes. Deux transducteurs fixés sur la monture d'une paire de lunettes et tournés de quelques degrés vers la droite et la gauche captent l'énergie ultrasonore

réfléchi par les objets. Chacun restitue l'information à une oreille. En raison de la dissociation des signaux entre la droite et la gauche, le sujet déduit la direction.

De nouveaux dispositifs utilisent pour capter une caméra vidéo miniaturisée (voir figure 3a). L'ingénieur Peter Meijer, du laboratoire de recherche Philips, à Eindhoven aux Pays-Bas, a mis au point en 1992 le système *The vOICe* (les capitales signifiant *Oh I see* pour « Oh, je vois »). Le logiciel utilisé par ce système transforme des images vidéo en sons. Les images, captées par une webcam maniable, sont converties en niveaux de gris, puis transformées en informations sonores selon trois lois élémentaires (voir la figure 3b). La première concerne la droite et la gauche. L'image est numérisée de la gauche vers la droite : on entend donc de la gauche vers la droite. Le début du son correspond aux éléments situés le plus à gauche de l'image et la fin du son correspond aux éléments situés le plus à droite de l'image. La deuxième loi définit le haut et le bas : la hauteur du son est proportionnelle à l'élévation. Ainsi, plus le signal visuel provient de haut, plus le son est aigu. Si la hauteur du son décroît, on a l'impression d'un signal visuel qui tombe. Enfin, l'intensité est reliée à la luminosité : plus le signal visuel est lumineux, clair, plus le son est intense. Le silence signifie donc noir et un son fort veut dire blanc, les intensités intermédiaires correspondant à un dégradé de gris.

Par exemple, une ligne claire en diagonale allant du bas à gauche en haut à droite, sur fond noir, sera entendue comme un son s'accroissant en hauteur. Deux lignes donnent deux sons. Deux points distincts sont traduits par deux courts bips et ainsi de suite.

À partir de ces trois principes, le dispositif *The vOICe* donne une idée de la direction, de la hauteur, de la taille, de la distance et de la texture d'un ou de multiples objets qui constituent l'environnement. Il est utilisable pour se déplacer, manier divers objets et les reconnaître. Comme pour les systèmes visuo-tactiles, l'apprentissage s'effectue en quelques heures. Après cette phase, les sujets n'ont plus besoin d'interpréter l'information décrite par le son : ils perçoivent directement et automatiquement les éléments constitutifs de l'environnement.



2. LE DISPOSITIF VISUO-TACTILE mis au point par Paul Bach-y-Rita transforme l'information visuelle en stimulations tactiles perçues par la langue. Richement innervé, très sensible et conduisant bien les impulsions électriques, cet organe est un choix judicieux. Après une phase d'apprentissage, les sujets ne décodent plus l'information, mais y ont directement accès, comme s'ils avaient acquis un nouveau sens.

Ce passage d'une déduction des stimulations sonores à une véritable « perception » des objets est particulièrement bien décrit par une utilisatrice. Devenue aveugle assez tardivement, elle utilise *The vOICe* presque quotidiennement. Elle détaille les progrès qu'elle a effectués avec ce dispositif.

Une étape importante est la première sensation d'extériorisation : le moment où l'on distingue les sons engendrés par le dispositif des autres sons, même s'il est difficile de faire cohabiter les deux. Par exemple, l'utilisatrice dit avoir du mal à utiliser le dispositif en écoutant la radio. Toutefois, après une phase d'habitude, la perception des objets ne demande plus d'analyse. Ce ne sont plus les sons qui sont perçus : l'accès à l'information est direct. Elle ne pense



Jean-Michel Thiriet

plus aux sons entendus, mais « fait l'expérience du dispositif comme s'il faisait partie d'elle », de sorte que le son de la radio ne le gêne plus. Par exemple, en voyant un escalier, nous n'avons pas à ralentir, ni à réfléchir à l'adaptation du mouvement des jambes pour enjamber les marches. Les premiers temps, avec *The VOICE*, elle devait effectuer ce raisonnement déductif consciemment, puis c'est devenu de plus en plus automatique : « mes sens voient les marches et mon corps sait par expérience ce qu'il doit faire ensuite », écrit-elle.

L'extériorisation

Ce moment où l'utilisateur ne pense plus à ce qu'il entend, mais accède directement à l'information est particu-

lièrement intéressant pour comprendre la notion de sensation. Avec le dispositif visuo-tactile, cet instant arrive lorsque l'utilisateur ne sent plus sur sa peau les stimulations qui se succèdent, mais qu'il perçoit les objets comme étant stables et à distance, devant lui. C'est l'extériorisation.

L'utilisateur doit donc, dans un premier temps, comprendre que l'information donnée n'est pas simplement la stimulation sensorielle, mais que cette stimulation traduit une autre information qui est l'objet à percevoir. Après quelques heures d'utilisation, la stimulation sensorielle n'est presque plus ressentie : l'accès à l'information que cette stimulation véhicule est direct et il ne fait plus appel à aucune déduction. Ainsi, un sujet portant la matrice d'un

dispositif visuo-tactile sur le dos se laisse « piéger » par une expansion brusque de l'image tactile qui résulte du déclenchement du zoom de la caméra. Pensant qu'un objet arrive brusquement sur lui, il adopte un comportement d'évitement caractéristique : il lève les bras et se recule.

Une autre preuve de l'accès direct à l'information se manifeste après la fin de l'apprentissage. À ce stade, l'emplacement de l'interface ne joue pas sur les performances du sujet. Déplacer le dispositif sur une autre partie de la peau ou fixer la caméra sur une autre partie du corps ne nuit pas à la perception de l'information et aucun délai d'adaptation n'est requis. Ainsi, la conscience de l'utilisateur ne s'arrête plus sur les entrées sensorielles de l'information, il ne perçoit plus les sensations sur la peau mais traite directement l'information en termes sémantiques, en tant qu'objets localisés dans l'espace.

Cet effacement des dispositifs techniques s'observe pour tous les systèmes efficaces : l'apprentissage d'un dispositif est réussi lorsque nous oublions sa présence (voir la figure 3). En d'autres termes, l'apprentissage perceptif est justement l'oubli de la construction technique de cette perception. Lorsque nous nous habituons au port de lunettes, elles disparaissent de notre perception, lorsque nous conduisons une voiture, nous oublions que les vibrations sont produites sur la tôle, mais nous les localisons sous les roues, sur la route, et lorsque nous jouons à des jeux vidéo d'action, nous oublions parfois que nous sommes assis dans un salon à appuyer sur des boutons.

La sensation n'est pas confinée aux limites de la peau : elle est extensible. Les relations naturelles entre nos sens et l'environnement se déplacent au gré des modes de couplage entre nous et notre environnement. Nos sensations et la distinction entre nos sens se modifient et se redéfinissent chaque fois que nous utilisons une nouvelle interface entre notre corps et l'environnement.

Ces dispositifs ne restaurent pas les sens manquants, ils ne superposent pas simplement une nouvelle modalité perceptive à la modalité déficiente : ils sont un nouvel outil de perception du monde. C'est pourquoi certains chercheurs préfèrent parler de suppléance perceptive plutôt que de substitution sensorielle. Lorsque nous avons expéri-



3. DANS SON OUVRAGE *L'Art invisible*, comprendre la bande dessinée, Scott McCloud explore les limites de la perception et de la conscience de soi.



Barbara Schweitzer (www.seeingwithsound.com)



Peter Meijer (www.seeingwithsound.com)

4 LES DISPOSITIFS VISUO-AUDITIFS utilisent l'ouïe à la place de la vue. Le système *The vOICe* (à gauche) fait intervenir une caméra. L'ordinateur associé, contenu dans un sac à dos, numérise les images et les décompose en niveaux de gris (à droite). La luminosité, et la localisation des images sont traduites en terme d'intensité, de hauteur et d'émission du son à l'oreille droite ou gauche.

Comme pour les dispositifs utilisant le toucher, l'accès à l'information est direct après une phase d'apprentissage: le recours à la déduction devient inutile et le dispositif se comporte comme un nouveau sens. Toutefois ce type de dispositifs amène un déficit d'émotion probablement parce qu'ils sont utilisés que lorsque les sujets sont adultes.

menté *The vOICe* sur des sujets voyants dont les yeux étaient bandés, tous ont eu la sensation d'un nouveau sens et non celle d'un remplacement de la vue.

L'odeur de la madeleine

Malgré l'ensemble des possibilités qu'ouvrent les dispositifs de substitution sensorielle, il leur est souvent reproché de ne procurer aucune émotion. Un aveugle, «regardant» sa femme grâce au mécanisme élaboré par P. Bach-y-Rita fut ainsi déçu par son absence d'émotion. Ce qui manquerait le plus dans cette nouvelle modalité perceptive seraient les qualités de nos expériences subjectives du monde, c'est-à-dire ce que nous font ressentir la vue d'un tableau, le goût du café, l'odeur d'une madeleine. Les valeurs que nous attribuons aux choses perçues feraient donc défaut.

L'émotion est probablement liée à l'apprentissage que l'on fait du sens et non au sens lui-même: le sens ou la signification émotionnelle ne sont pas inhérents à l'environnement, comme une information à capter. Peut-être que cette émotion ne peut se développer que lors d'un apprentissage plus long ou plus précoce du système, avec des échanges entre les utilisateurs.

Ce développement de l'émotion est au cœur du projet développé en partenariat entre l'équipe de P. Bach-y-Rita et celle d'Eliana Sampaio, de l'Université Louis Pasteur, à Strasbourg. L'idée consiste à équiper très tôt des bébés non-voyants avec un système de substitution sensorielle. E. Sampaio utilise actuellement un dispositif électro-tactile placé sur l'abdomen de jeunes aveugles qui commandent le zoom de la caméra grâce à une tétine. Les deux équipes tentent aussi de mettre au point un dispositif visuo-tactile pour bébés construit dans

une tétine, avec une microcaméra à l'extrémité et le dispositif électro-tactile en contact avec la langue.

Outre une meilleure perception du monde grâce au couplage des stimulateurs et des récepteurs, on peut aussi imaginer une myriade d'applications en associant des senseurs obéissant à un système de réalité virtuelle à des stimulateurs réels. Voilà qui promet de nouvelles façons d'entendre et de voir... sans utiliser nécessairement les yeux ou les oreilles.

Malika AUVRAY, prépare sa thèse au laboratoire de psychologie expérimentale de l'Université Paris 5 que dirige Kevin O'REGAN

Site de Peter Meijer:
<http://www.seeingwithsound.com>
 Site de Malika Auvray:
<http://www.malika-auvray.com>
