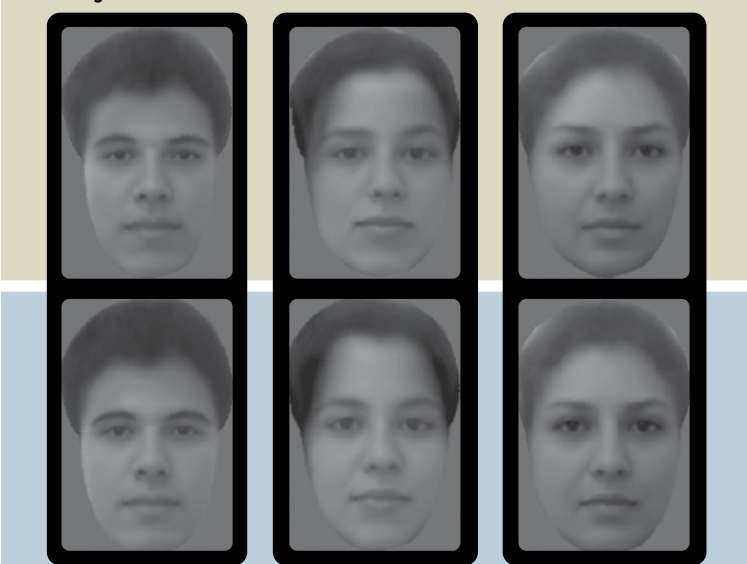


DES PHOTOS QUI VALENT 205 NEURONES

Pour un visage donné, on peut prédire comment un neurone facial réagira en prenant une somme pondérée des 50 coordonnées décrivant le visage. Pour deviner à partir de l'activité neuronale quel visage le singe a vu, il suffit d'inverser le calcul : connaissant la réponse des 205 neurones faciaux enregistrés, on peut calculer les 50 coordonnées définissant le visage présenté et ainsi reconstituer celui-ci avec précision.

Photos originales de la base de données



Visages correspondants reconstruits à partir de l'activité neuronale

➤ distance, et même être partiellement masquée par des objets plus proches tels que des arbres ou d'autres voitures. Reconnaître un objet malgré ces transformations visuelles est le « problème de l'invariance », et il nous semble clair qu'une fonction majeure du réseau des zones faciales est de surmonter cet obstacle.

Étant donné la grande sensibilité des cellules des zones faciales aux variations de l'aspect d'un visage, on pourrait s'attendre à ce qu'une altération de la réponse de ces cellules modifie la perception des visages chez l'animal. En 2012, Jacques Jonas et ses collègues, de l'université de Lorraine et du CHRU de Nancy, avaient stimulé électriquement une zone faciale chez des sujets humains à qui on avait implanté des électrodes afin de déterminer la source des crises d'épilepsie. Ils avaient montré que cette stimulation entraînait une perte de reconnaissance du visage par le patient.

Nous nous sommes demandé si nous retrouverions le même effet chez les singes en stimulant les zones faciales. Cela n'affecterait-il que la perception des visages ou y aurait-il également une incidence sur la perception d'autres objets ? La frontière entre un visage et un autre

objet est floue (on peut voir un visage dans un nuage ou dans une prise électrique). Nous voulions utiliser la microstimulation électrique comme un outil permettant de caractériser précisément ce qui définit un visage pour une zone faciale. Nous avons alors entraîné des singes à indiquer si deux visages présentés l'un après l'autre étaient identiques ou différents. Conformément aux résultats obtenus chez l'humain, nous avons constaté que la microstimulation des zones faciales déformait fortement la perception, de sorte que l'animal signalait toujours deux visages identiques comme étant différents.

Il est intéressant de noter que la microstimulation n'a pas d'effet sur la perception de nombreux objets n'ayant rien à voir avec des visages, mais qu'elle altère notablement la réponse à des objets dont la forme pourrait être associée à un visage, les pommes par exemple.

Pourquoi cette stimulation influe-t-elle sur la perception d'une pomme ? Il est possible que les zones faciales servent généralement à représenter non seulement des visages, mais aussi d'autres objets ronds, telles les pommes. Une autre hypothèse est que les zones faciales ne soient normalement pas utilisées pour représenter ces objets, mais que la stimulation donne à une pomme l'apparence d'un visage. Il reste à déterminer si les zones faciales sont utiles pour détecter des objets autres que les visages.

DÉCHIFFRER LE CODE NEURONAL

La découverte de l'organisation du système de zones faciales et des propriétés des neurones qui les composent était un accomplissement majeur. Mais mon rêve, quand nous avons commencé à enregistrer l'activité neuronale des zones faciales, allait bien plus loin. J'avais l'intuition que cela nous permettrait de déchiffrer le code neuronal de l'identité faciale. C'est-à-dire de comprendre comment les neurones traitent les visages, avec un niveau de détail permettant de prédire la réponse d'une cellule à un visage donné ou de décoder l'identité d'un visage en s'appuyant uniquement sur l'activité neuronale.

Le principal défi consistait à décrire les visages quantitativement et avec précision. Le Chang, alors postdoctorant dans mon laboratoire, a eu la brillante idée d'adopter une technique du domaine de la vision par ordinateur nommée « modèle actif d'apparence ». Dans cette approche, un visage est décrit par deux ensembles de caractères, un pour la forme et un autre pour l'aspect (voir l'encadré page 48). Les caractéristiques de la forme sont, en gros, celles définies par le squelette (la largeur de la tête, l'écart des yeux...). Les caractéristiques d'aspect définissent la texture de la surface du visage (teint, couleur des yeux ou des cheveux...).

EXTRAPOLER DU MACAQUE À L'HUMAIN ?

Les travaux de Doris Tsao et son équipe constituent une prouesse technique dont seuls sont capables quelques laboratoires au monde. Se pose toutefois la question de leur validité pour élucider les mécanismes neuronaux de reconnaissance des visages chez l'homme.

Celui-ci se fonde essentiellement sur le visage pour reconnaître des individus et faire la différence entre des visages connus et inconnus. Alors qu'un adulte est capable de reconnaître plusieurs milliers de visages rapidement et

automatiquement, le singe rhésus ou le macaque a besoin de centaines d'essais d'entraînement avec les mêmes images pour atteindre des performances modestes. De plus, contrairement à l'homme, les performances du macaque sont identiques pour un visage présenté à l'endroit ou à l'envers et ne dépendent pas du degré de familiarité du visage (voir l'article de B. Rossion et J. Taubert cité en bibliographie).

Cela n'est guère surprenant : l'homme et le macaque diffèrent par 25-30 millions d'années d'évolution, et le cerveau humain compte 16 fois plus de neurones. Surtout, le macaque ne possède pas les structures cérébrales clés pour la reconnaissance du visage chez l'homme, en particulier le gyrus fusiforme du cortex occipitotemporal ventral, et une dominance de l'hémisphère droit. Pourquoi, dès lors, trouve-t-on des régions qui répondent

spécifiquement aux visages dans la partie latérale du lobe temporal du macaque et parvient-on à y décoder des « identités faciales » ? D'une part, parce que cette espèce décode dans le visage de congénères de simples expressions faciales, l'orientation de la tête et du regard. D'autre part, parce que le bombardement d'images de visages (humains) à discriminer dans des conditions artificielles de laboratoire entraîne, ou augmente, l'activité de régions cérébrales pour ces catégories d'images dans le cerveau du macaque. Il n'est alors pas surprenant que des images physiques différentes activent des réponses de populations de neurones différentes dans ces régions, permettant un décodage fiable de leur « identité ».

Les capacités de reconnaissance du visage chez l'homme vont cependant bien au-delà de la discrimination d'images 2D ; elles se fondent sur des

propriétés physiques, mais également sémantiques et contextuelles. Cela permet de reconnaître un visage familier malgré les différences importantes entre les diverses vues de ce visage, celle d'une caricature par exemple.

Malgré l'intérêt des travaux sur les singes, il nous semble que la compréhension des mécanismes de reconnaissance des visages chez l'humain passera essentiellement par l'étude de notre espèce, par exemple de patients cérébrolésés ayant perdu la capacité de reconnaissance faciale (prosopagnosie), la neuroimagerie et les enregistrements intracérébraux.

**BRUNO ROSSION,
JACQUES JONAS
ET LAURENT KOESSLER**
CNRS (CRAN, UMR7039),
université de Lorraine et service
de neurologie du CHRU de Nancy

Pour générer ces caractères de forme et d'aspect, nous sommes partis d'une grande base de données de photos de visages. Pour chaque visage, nous avons placé un ensemble de marqueurs sur les traits principaux. La position de ces marqueurs décrit la forme du visage. À partir de ces formes variées, nous avons calculé un visage moyen. Nous avons ensuite transformé chaque photo de la base de données afin que ses principaux traits correspondent exactement à ceux du visage moyen.

Les images résultantes constituent l'aspect des visages indépendamment de la forme. Nous avons ensuite effectué une « analyse en composantes principales », sur les caractères de forme et sur les caractères d'aspect, pour l'ensemble des visages. Il s'agit d'une technique mathématique qui détermine les axes, ou dimensions, décrivant le mieux la variabilité au sein d'un ensemble complexe de données.

En prenant 25 composantes principales pour la forme et 25 composantes principales pour l'aspect, nous avons créé un espace facial à 50 dimensions (voir l'encadré page 49). Chaque visage est représenté dans cet espace par un point (ou vecteur) ayant 50 coordonnées (ou composantes), alors que dans l'espace usuel, chaque point représente une position et est repéré par 3 coordonnées.

Dans notre expérience, nous avons pris au hasard 2000 visages et les avons présentés à un singe tout en enregistrant les neurones de deux

zones faciales. Nous avons constaté que presque chaque cellule présentait des réponses dépendant linéairement d'un sous-ensemble des 50 caractères, ce qui est cohérent avec mes expériences précédentes sur les visages dessinés. Mais nous avions une meilleure idée de la raison pour laquelle cela est important. Si une cellule faciale présente une réponse linéaire à différents traits, on peut approximer sa réponse par une simple somme pondérée des traits faciaux, les poids de cette somme caractérisant la dépendance linéaire de la réponse. En termes plus précis, les réponses des neurones sont données par la relation :

Réponses des cellules faciales = $(M) \times (50 \text{ traits faciaux})$, où M est la matrice de pondération, tableau de nombres où chaque ligne correspond aux poids associés à une cellule faciale. On peut alors simplement inverser cette équation pour prédire le visage montré au sujet à partir des réponses des cellules faciales : $(50 \text{ traits faciaux}) = (M^{-1}) \times (\text{réponses des cellules faciales})$.

Pour tester cette relation, nous avons utilisé les réponses à tous les 2000 visages sauf un afin de déterminer la matrice de pondération, puis nous avons calculé les 50 traits du visage exclu à partir des réponses des cellules faciales et de notre formule. Étonnamment, la prédiction s'est révélée presque indistinguishable du visage réel.

Lors d'une conférence tenue en 2015 à Ascona, en Suisse, j'ai présenté nos ➤