

LES VERTUS DES CONNEXIONS CROISÉES (VÉHICULES 2, 3 ET 4)

Les véhicules 1 à 4, premiers ancêtres de la race, découlent d'une tentative de compréhension de ce principe de base très curieux en neurosciences qu'est la représentation croisée du monde dans le cerveau des vertébrés. Le principe général est visible dans la projection de l'espace visuel dans le cerveau. Les deux nerfs optiques sont formés d'environ un million de fibres qui transportent, vers le cerveau, le signal provenant de chacun des yeux. Ces deux nerfs optiques se croisent de telle sorte que le cerveau gauche reçoive l'image de tout ce qui se trouve à droite de l'animal et vice versa dans le cerveau droit. Le nombre exact de fibres de l'œil droit qui perçoivent la moitié droite du champ visuel dépend bien entendu de la position de l'œil dans le visage. Pour une grenouille ou une souris, l'œil droit regarde à droite et l'œil gauche regarde à gauche, mais pour un chat ou un singe - animaux qui ont les yeux sur le devant du visage, comme nous - chaque œil perçoit des parties égales des moitiés gauche et droite du champ visuel. Dans tous les cas, les fibres du nerf optique suivent exactement la même règle: ce qui se trouve sur la droite est projeté dans la partie gauche du cerveau et réciproquement. Les choses sont seulement un petit peu plus compliquées dans le cas d'une position frontale des yeux. Entre parenthèses, la même règle s'applique au sens du toucher pour lequel on retrouve aussi une projection sur le cerveau droit des informations provenant de la peau située sur la partie gauche et inversement. Le système moteur est croisé lui aussi : les cellules ner-

veuses dont l'activité est associée de façon évidente à un acte moteur sont projetées sur le cerveau situé sur le côté opposé au muscle à mouvoir. Il doit y avoir une justification pour que chacune des deux moitiés du monde soit projetée sur la moitié opposée du cerveau. Mais pourquoi en est-il ainsi?

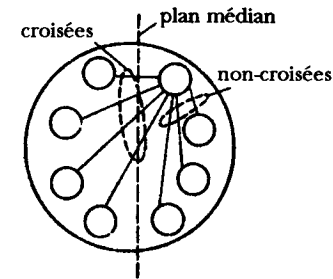


Fig. 22. Explication simple des connexions croisées dans le cerveau. Lorsque le plan médian se forme pour un animal ayant une symétrie sphérique, si tous les éléments sont interconnectés, il y a plus de fibres traversant le plan médian que de fibres connectées sur le même côté. Cette petite différence a été invoquée comme étant la source de la présence massive de connexions croisées chez les vertébrés.

Depuis leur première découverte, l'existence des projections croisées est toujours restée un problème ouvert et les explications les plus variées ont été avancées. Celles-ci allaient des plus simples interprétations mécaniques jusqu'aux constructions beaucoup plus évoluées, comprenant même des arguments sur le traitement de l'image à l'intérieur du système nerveux central. Au niveau le plus élémentaire, l'argument proposé est que la profusion des paquets de fibres croisées rend le cerveau mécaniquement plus stable, à cause de l'effet de laçage ou d'entrelaçage. Un autre argument très répandu place l'origine du croisement des fibres dans la transition entre un cerveau primitif (hypothétique) possédant une symétrie sphérique et un cerveau à symétrie bilatérale comme en possèdent presque tous les animaux (fig. 22). Ainsi, dès qu'on effectue la transition en fixant un plan médian, on peut renommer chacune des connexions, supposées

MON LOBE DROIT
N'IGNORE PAS CE QUE
FAIT MA MAIN GAUCHE

aléatoires à l'origine, comme étant croisée ou non: les paquets de fibres les plus longs et donc les plus importants seront ceux qui traversent le plan médian. En dehors des quelques points faibles de cet argument, son principe fait qu'il devrait être valable aussi bien pour les vertébrés que pour les invertébrés. Malheureusement, s'il existe des projections croisées dans les cerveaux des invertébrés, cela ne semble pas pour autant être une règle générale.

Ramon y Cajal a probablement proposé la meilleure explication de la représentation croisée du monde dans le cerveau. Son explication, spécifique au croisement des nerfs optiques, repose sur la correction de l'inversion de l'image qui se produit pour des raisons d'optique géométrique dans la lentille d'une caméra [1]. Son argument est le suivant. Supposons que les moitiés gauche et droite du champ visuel soient projetées, avec l'inversion optique, sur les rétines gauche et droite. Si ces deux demi-images sont projetées à l'aide de paquets de fibres non-croisées sur une surface commune, une ligne de discontinuité va apparaître au centre de la projection sur la surface de ce champ visuel (fig. 23 A). Ramon y Cajal pense que le croisement chiasmal était un moyen simple d'éviter cette discontinuité (fig. 23 B).

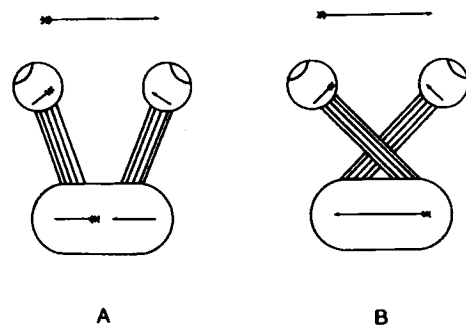


Fig. 23. Explication de Ramon y Cajal à propos de l'existence des connexions croisées. A partir de l'inversion qui s'effectue dans l'œil pourvu d'une lentille, le croisement des connexions rétablit la continuité de la flèche (fig. 23 B), qui sinon serait représentée de façon erronée dans le cerveau (fig. 23 A).

Selon cette théorie, les autres systèmes sensoriels et moteurs se seraient adaptés par la suite à cette représentation croisée du monde dans le cerveau. Si les images visuelles des objets situés sur la droite sont traitées par le cerveau gauche, il est économique de laisser les commandes motrices qui traitent ces objets (et qui probablement seront exécutées avec les extrémités droites) se situer à l'intérieur de l'hémisphère gauche.

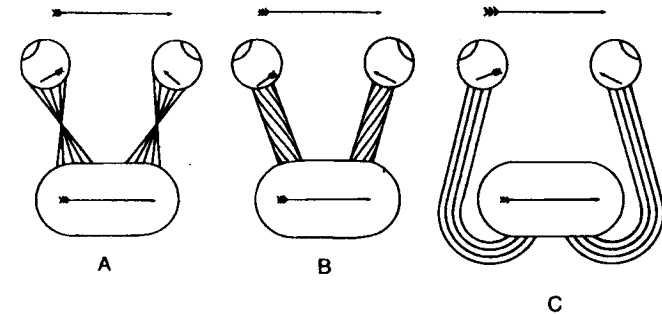


Fig. 24. Faiblesses de l'argumentation de Cajal. La permutation circulaire globale (fig. 24 A), la permutation circulaire individuelle de chaque paquet de fibres (fig. 24 B) ou le détour par l'arrière du cerveau (fig. 24 C) fourniraient le même résultat.

On peut faire plusieurs objections aux arguments suggérés par Ramon y Cajal, à la fois sur la base même de son raisonnement mais aussi à la lumière des expériences faites depuis cette date:

- Le croisement est suffisant, mais il n'est pas nécessaire pour une correction d'inversion optique. Par exemple, une permutation circulaire de 180 degrés des paquets de fibres non croisées ou encore la permutation interne équivalente de chaque fibre à l'intérieur de chaque paquet permettent une correction sans inversion de l'image (fig. 24A et 24B). De même, une projection directe recourbée sur la face postérieure des lobes optiques permet aussi de corriger la discontinuité (fig. 24C).
- La force de l'argument de Cajal présuppose que la représentation continue du champ visuel dans le cerveau apporte un avantage. Si la

surface réceptrice de l'image est identifiée dans la partie visuelle du cerveau moyen, connue sous le nom de tectum optique – comme Ramon y Cajal le fait apparemment – alors les études expérimentales sur la topographie des projections sur le tectum sont pertinentes. R. M. Gaze a découvert sur la grenouille, par exemple, une projection ordonnée du champ visuel gauche, sur le tectum droit et vice versa [2]. De plus, l'orientation des deux projections est faite de telle sorte qu'un motif continu dans le champ visuel est représenté par un motif continu sur la surface du tectum, même si une partie de l'objet est vue par un œil et qu'une autre est vue par l'autre œil. Mais il est difficile de voir pourquoi le tectum optique réalise cette continuité, puisqu'il n'y a pas de continuité de la substance grise à travers la ligne médiane. Les deux moitiés du réseau nerveux du tectum sont bien séparées. Il n'est pas tellement important de connaître l'orientation des deux parties l'une par rapport à l'autre si la connexion est réalisée avec des paquets de fibres de la substance blanche. Ainsi donc, le tectum optique de la grenouille ne fournit pas, en terme d'optique géométrique, une bonne base d'explication sur le croisement des fibres.

L'ŒIL COMPOSÉ DE LA MOUCHE :
RECONSTRUCTION DE LA CONTINUITÉ
DANS LA REPRÉSENTATION VISUELLE
(VÉHICULE 8)

J'ai moi-même trouvé un argument en faveur de la justesse du principe de Cajal dans un autre système de fibres multiples croisées, le système visuel de la mouche. Dans ce cas, l'entrelacement compliqué des fibres qui vont de l'œil composé jusqu'au cerveau compense exactement la discontinuité de l'image produite par chacune des lentilles qui projettent des petites portions d'images inversées représentant le champ visuel sur la matrice d'éléments sensibles à la lumière [3].

L'œil composé de la mouche est l'assemblage d'environ 3000 sous-unités à peu près identiques, appelées *ommatidies*. Chacune des unités est équipée de son propre système optique et contient huit éléments photosensibles séparés, les *rhabdomères*. Chaque rhabdomère est une portion spécialisée d'une cellule, appelée la cellule rétinienne. Dans chaque ommatidie, les extrémités supérieures de sept de ces rhabdomères sont arrangées selon un motif très régulier situé dans le plan focal du système optique inversé. Ce motif s'appelle *rétinule* (petite rétine) pour une très bonne raison: à chaque rhabdomère correspond une ligne de vision, il y a donc sept lignes de vision pour la rétinule complète; ces sept lignes traversent un plan distal sur lequel elles forment un motif qui est celui de la rétinule ayant subi une rotation de 180 degrés.

L'information optique, qui est collectée en quantités discrètes par les éléments de la rétinule puis transformée par les pigments visuels en différents types de signaux transportés par les fibres