

## VOIR DANS UN MONDE QUI CHANGE : COMMENT LA RÉTINE RÉAGIT-ELLE AUX CHANGEMENTS DE NOTRE ENVIRONNEMENT ?

Michal Rivlin-Etzion \* et Lea Ankri \*

Département des Sciences du cerveau, Faculté de Biologie, Institut Weizmann des Sciences, Rehovot, Israël

La rétine est la fine couche de cellules située à l'arrière du globe oculaire où commence la vision, et elle est considérée comme faisant partie du cerveau. Malgré sa petite taille, la rétine transmet des informations complexes sur les couleurs, les bords et les mouvements que nous voyons grâce à ses cellules nerveuses. La rétine est plus facile à étudier que d'autres zones du cerveau, de sorte que la recherche sur la rétine peut non seulement nous aider à comprendre la vision, mais aussi nous apprendre comment fonctionnent d'autres zones du cerveau. Le cerveau est *adaptable* ; il peut modifier son activité en fonction des changements qui surviennent dans l'environnement, mais on pensait que l'activité des cellules rétiniennes était fixe et stable, même en présence de changements dans l'environnement visuel de l'animal. Au cours de nos recherches, nous avons découvert que la rétine peut elle aussi modifier son activité. Ainsi la recherche sur la rétine peut nous apprendre des choses sur d'autres zones du cerveau, notamment sur la manière dont elles s'adaptent aux changements de l'environnement.

### LE CERVEAU, UN ORGANE COMPLEXE

Le cerveau est le lieu où sont traitées les informations relatives à tout ce que nous ressentons, pensons et faisons. Depuis des milliers d'années, les scientifiques et les philosophes tentent de comprendre le fonctionnement du cerveau et la manière dont nos sens nous permettent d'appréhender le monde qui nous entoure. Aujourd'hui, nous savons que le cerveau fonctionne grâce à des cellules nerveuses, appelées neurones, qui envoient des messages sous forme de signaux électriques. L'endroit où deux neurones se connectent l'un à l'autre pour envoyer et recevoir ces messages s'appelle une *synapse*.

**SYNAPSE.** Site de connexion entre deux neurones où s'effectue le transfert de signaux électriques

**RÉTINE.** Couche fine et transparente de neurones sensibles à la lumière, située à l'arrière de la partie interne du globe oculaire. La rétine convertit la lumière en signaux électriques envoyés au cortex visuel

**PHOTORÉCEPTEUR.** Type particulier de neurone capable de convertir la lumière en signaux électriques

**INTERNEURONE.** Neurone qui transfère des informations entre les cellules d'un même réseau neuronal, comme la rétine

**CELLULE GANGLIONNAIRE.** Cellule de la rétine qui envoie au cerveau des signaux électriques sur ce qui est vu

**CELLULE GANGLIONNAIRE SÉLECTIVE DE DIRECTION.** Type de cellules ganglionnaires de la rétine qui ne réagit que lorsqu'il y a un mouvement dans le champ visuel dans une certaine direction (direction préférée)

En laboratoire, nous pouvons observer différentes zones du cerveau et même mesurer leur activité électrique, mais nous ne comprenons pas encore tout à fait comment l'activité des neurones représente le monde qui nous entoure. Par exemple, comment le cerveau peut-il déterminer la direction et la vitesse d'une voiture en mouvement ? Comment fait-il la distinction entre les lettres A et B ?

L'une des raisons pour lesquelles il est difficile de comprendre l'activité cérébrale est que le cerveau compte un nombre immense de neurones. Chaque neurone peut envoyer et recevoir des signaux électriques vers et depuis des milliers d'autres neurones, ce qui rend la compréhension de l'activité des neurones extrêmement complexe. C'est pourquoi les scientifiques se concentrent parfois sur de petits groupes de neurones, appelés réseaux neuronaux. En apprenant comment fonctionnent les réseaux neuronaux, les chercheurs peuvent mieux comprendre l'ensemble du cerveau.

## LES CELLULES DE LA RÉTINE ONT DES RÔLES SPÉCIFIQUES

Dans notre laboratoire, nous étudions la vision : nous nous demandons comment le cerveau réagit aux choses que nous voyons autour de nous. Nous étudions la **rétine**, qui est la première structure impliquée dans la vision. La rétine, une fine couche de neurones située à l'arrière du globe oculaire, est en fait une partie du cerveau (**Figure 1A**).

Quels types de cellules composent la rétine et comment fonctionnent-elles ensemble pour permettre la vision ? La première couche de la rétine contient des cellules sensibles à la lumière appelées **photorécepteurs** (**Figure 1B**). Lorsqu'un faisceau lumineux atteint les photorécepteurs, une séquence de réactions biochimiques provoque une réaction électrique. Les photorécepteurs transforment donc la lumière en signaux électriques. Les signaux électriques sont ensuite transmis à la deuxième couche de la rétine, composée d'**interneurones**, et de là, à la dernière couche où se trouvent des **cellules ganglionnaires**. Les cellules ganglionnaires envoient de longues extensions appelées axones vers le cerveau. Ces axones transportent des messages électriques vers les parties du cerveau qui traitent les signaux visuels, en les informant de ce que l'œil voit.

Il existe plusieurs types de cellules ganglionnaires, chacune ayant sa propre fonction [1]. Par exemple, il existe des cellules ganglionnaires qui réagissent à l'apparition de la lumière (appelées cellules ganglionnaires "On"), d'autres qui réagissent à la disparition de la lumière (appelées cellules ganglionnaires "Off"), et même d'autres qui réagissent au mouvement dans une certaine direction (appelée direction préférée). Les cellules de ce dernier type sont appelées **cellules ganglionnaires sélectives de direction**. Certaines ne réagissent que lorsque nous voyons quelque chose se déplacer vers la droite. Ces cellules envoient des signaux électriques au cerveau lorsqu'une voiture passe devant nous de gauche à droite (**Figure 1C**), ou si nous regardons un match de tennis et que la balle passe de notre gauche à notre droite. Mais si la voiture fait demi-tour et se dirige vers la gauche, ou si le joueur de tennis frappe la balle vers le joueur de gauche, ces mêmes cellules ne réagissent pas. En revanche, d'autres cellules ganglionnaires sélectives de direction

réagissent aux mouvements vers la gauche et d'autres encore aux mouvements vers le haut et vers le bas.

**Figure 1.** (A) Vue latérale de l'œil et du cerveau. (B) Couches de cellules dans la rétine. Les couches appelées « On » et « Off » désignent la localisation des synapses entre les interneurons et les cellules ganglionnaires. (C) Réaction de chaque type de cellules aux stimulations visuelles (présence de lumière : ampoule jaune ; absence de lumière : ampoule grise ; sens de déplacement indiqué par les flèches au dessus des voitures). La coche verte indique que la cellule réagit ; la croix rouge indique l'absence de réaction.

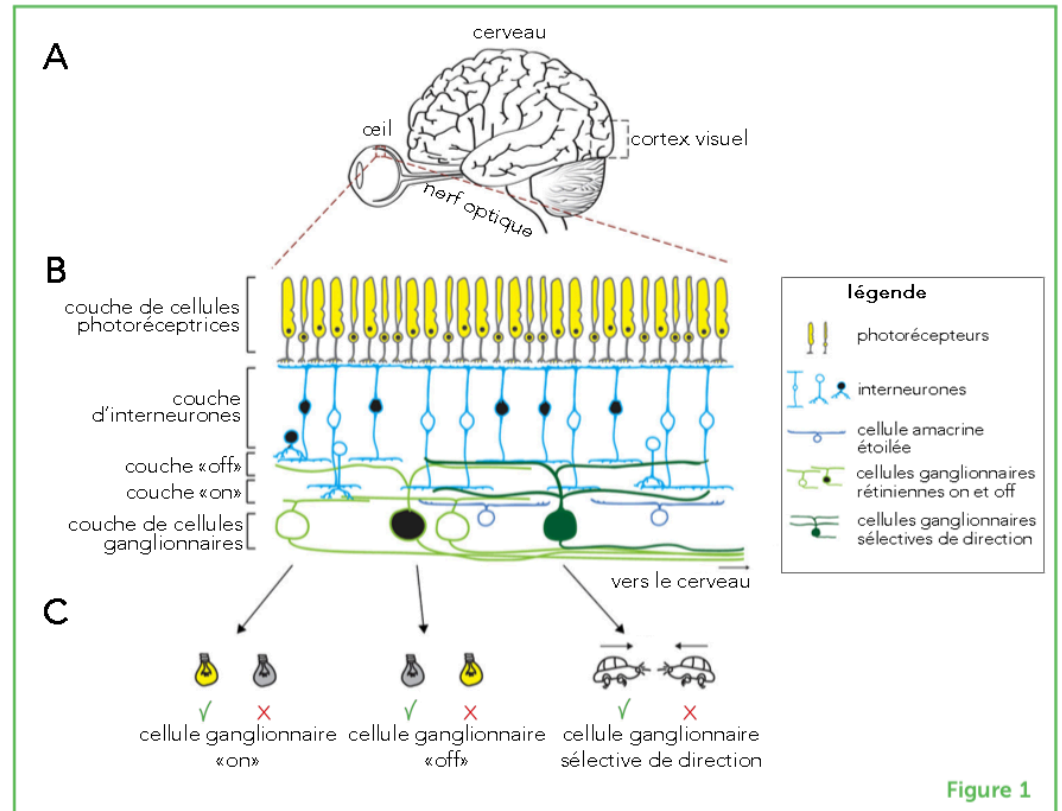


Figure 1

## LES CONNEXIONS ENTRE LES CELLULES DE LA RÉTINE DÉTERMINENT LEURS RÉPONSES

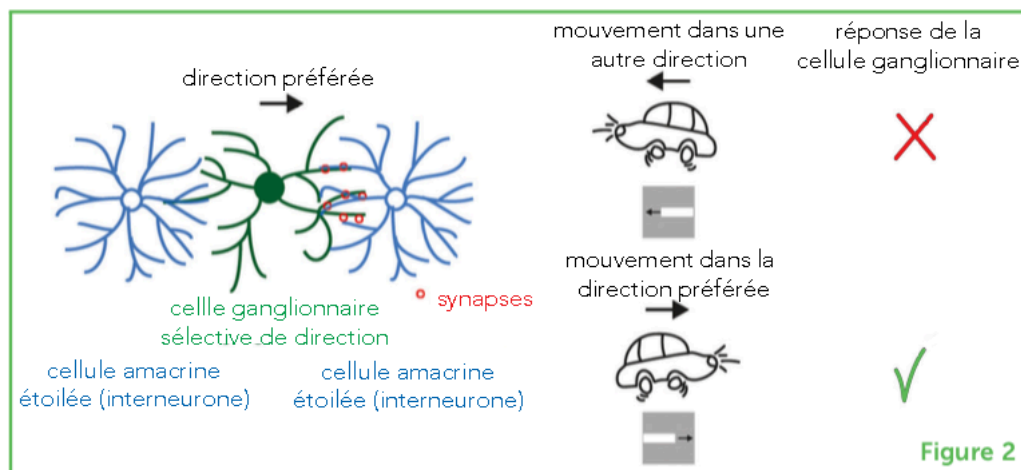
Comment les cellules ganglionnaires peuvent-elles agir de manière aussi différente et spécifique ? La réponse se trouve dans les interneurons qui transmettent les signaux électriques des photorécepteurs aux cellules ganglionnaires. Il existe plus de 60 types d'interneurones, et la réponse d'une cellule ganglionnaire dépend du type de l'interneurone avec lequel elle est connectée. Cette connexion entre l'interneurone et la cellule ganglionnaire (son emplacement, sa force, etc.) détermine la réponse de la cellule ganglionnaire.

Par exemple, comment les cellules ganglionnaires sélectives de direction reconnaissent-elles la direction où elles doivent réagir ? Des études ont montré qu'un type d'interneurone appelé **cellule amacrine étoilée** aide la cellule ganglionnaire à le faire. Ces cellules amacrine étoilées sont connectées à des cellules ganglionnaires sélectives de direction d'un seul côté. Par exemple, une cellule ganglionnaire qui reçoit des connexions de la droite d'une cellule amacrine étoilée répondra à un mouvement vers la droite (Figure 2).

**CELLULE AMACRINE ÉTOILÉE.** Interneurone rétinien considéré comme acteur clé du codage de la direction en se connectant de manière asymétrique (d'un seul côté) aux cellules ganglionnaires sélectives de direction

**Figure 2.** La réponse de chaque cellule ganglionnaire sélective de direction (verte) est déterminée par les connexions qu'elle établit avec des interneurons appelés cellules amacrine étoilées (bleues), qui forment des synapses

(cercles rouges) d'un seul côté de la cellule ganglionnaire. Dans l'exemple, la direction préférée de mouvement de la cellule ganglionnaire sélective de direction est vers la droite. Un mouvement vers la gauche ne provoque pas de réaction dans cette cellule



Cette connectivité unilatérale permet aux cellules ganglionnaires sélectives de direction de répondre lorsque le mouvement est dans une direction, mais pas lorsqu'il est dans l'autre. C'est ainsi que les cellules ganglionnaires de la rétine envoient au cerveau des informations complexes sur ce que l'œil voit.

## LA RÉTINE, UN MODÈLE POUR LE RESTE DU CERVEAU

La rétine est constituée de neurones reliés par des synapses, tout comme les cellules qui composent le reste du cerveau. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la plupart des zones du cerveau présentent des connexions complexes entre les neurones, difficiles à étudier. La rétine, elle aussi, présente une multitude de connexions précises entre différents types de cellules, mais sa structure organisée et stratifiée facilite pour les chercheurs la compréhension de ces connexions et de la manière dont elles façonnent les réponses des neurones rétinien aux stimuli visuels. Par conséquent, la rétine est plus facile à étudier et à comprendre que le reste du cerveau. Malgré sa relative simplicité, la rétine peut-elle nous aider à comprendre d'autres parties du cerveau ?

Prenons l'exemple du [cortex visuel](#). Le cortex visuel fait partie du cortex cérébral ([Figure 1A](#)), qui est la couche externe du cerveau où a lieu le traitement le plus complexe des informations reçues par le cerveau. Cette complexité est due au nombre considérable de neurones présents dans le cortex; ces neurones sont connectés les uns aux autres de manière alambiquée et compliquée, et ils peuvent présenter différents types de réponses. Certains de ces neurones sont similaires aux cellules de la rétine.

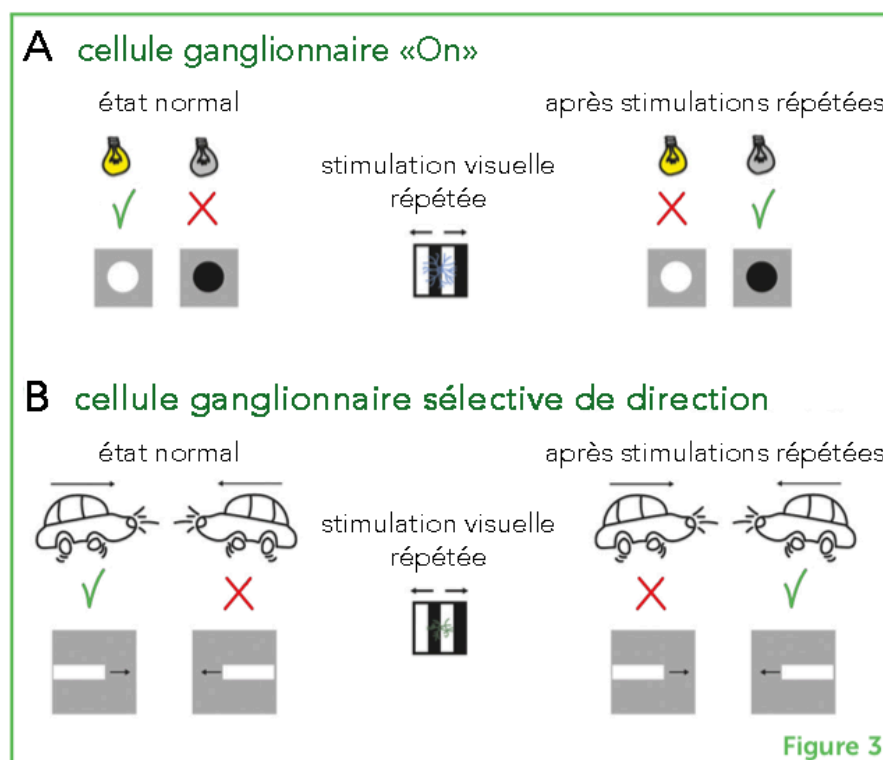
Par exemple, tant dans la rétine que dans le cortex visuel, il existe des cellules qui réagissent à l'apparition ou à la disparition de la lumière, ainsi que des cellules sélectives de direction.

Pendant de nombreuses années, les scientifiques ont cru que le cortex visuel était très différent de la rétine, car ses cellules peuvent s'adapter et modifier leurs réponses en fonction de ce que l'animal a vu auparavant. Par exemple, une cellule sélective de direction dans le cortex visuel a une certaine direction préférée, mais si on lui présente une stimulation visuelle répétitive et mobile, comme des bandes blanches et noires en mouvement (voir l'exemple de la [Figure 3A](#)), sa direction préférée peut être modifiée et réorientée. On pensait que, contrairement au cortex, les cellules sélectives de direction de la rétine ne pouvaient pas changer de

**CORTEX VISUEL.** Partie du cortex cérébral (couche externe du cerveau des mammifères) qui traite les informations visuelles.

direction préférée, car celle-ci dépend de leurs connexions avec les cellules amacriques étoilées. Il a donc été très surprenant de découvrir que les cellules de la rétine pouvaient modifier leurs réponses [2].

**Figure 3.** (A) Réponse électrique d'une cellule ganglionnaire « On ». À gauche, l'état normal : la cellule réagit à l'apparition de la lumière. À droite, état après une exposition répétée à une alternance de bandes noires et de bandes blanches pendant plusieurs minutes : la cellule cesse de réagir à la lumière et commence à réagir à l'obscurité. (B) La réponse d'une cellule ganglionnaire sélective de direction change également à la suite de stimulations répétées. À gauche, état normal : la direction préférée de la cellule est vers la droite. À droite, après stimulations répétées : la cellule inverse sa direction préférée et réagit lorsque le mouvement se fait vers la gauche.



Dans notre étude, nous avons exposé la rétine à un signal visuel mobile court et répétitif pendant plusieurs minutes. Au bout d'un certain temps, des cellules ganglionnaires « On » actives (Figure 3A) ont cessé de répondre à l'apparition de la lumière et ont commencé à répondre à la disparition de la lumière, comme les cellules « Off » (Figure 1C) [3].

À notre grande surprise, nous avons également constaté que lorsque des cellules ganglionnaires sélectives de direction étaient exposées à un signal visuel court et répétitif pendant plusieurs minutes, ces cellules pouvaient changer leur direction préférée (Figure 3B) [4].

### EN RÉSUMÉ

Nous avons découvert que les cellules de la rétine, comme les cellules du cortex cérébral, peuvent modifier la façon dont elles réagissent aux choses que l'on voit. Après avoir constaté ces changements, nous nous sommes posé la question suivante : qu'est-ce qui permet aux cellules de la rétine de modifier leurs réponses de manière aussi spectaculaire ? Nous avons utilisé des techniques sophistiquées qui nous permettent de mesurer les signaux que les cellules amacriques étoilées envoient aux cellules ganglionnaires sélectives de direction. Nous avons découvert que des signaux visuels courts et répétitifs peuvent entraîner des changements spectaculaires dans la réponse globale des cellules ganglionnaires sélectives direction et inverser leur préférence directionnelle [5].

Le cortex cérébral est complexe et difficile à étudier, c'est pourquoi l'étude des cellules de la rétine peut nous aider à comprendre le fonctionnement des cellules du cortex cérébral. Ce que nous avons

découvert peut nous aider à comprendre les mécanismes neuronaux dans d'autres régions du cerveau et pourrait apporter une réponse à une question centrale de la recherche sur le cerveau : "Que se passe-t-il dans notre cerveau lorsque nous apprenons et changeons ?

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Conseil européen de la recherche (ERC starter No. 757732), I-CORE (grant No. 51/11), et la Fondation israélienne de la science (1396/15). MR-E est la Sara Lee Schupf Family Chair. LA a bénéficié du soutien de l'ISEF.

## RÉFÉRENCES

- [1] Baden. T., Berens, P., Franke, K., Román Rosón, M., Bethge, M., and Euler, T. 2016. The functional diversity of retinal ganglion cells in the mouse. *Nature* 529:345–50. doi: 10.1038/nature16468
- [2] Rivlin-Etzion, M., Grimes, W. N., and Rieke, F. 2018. Flexible neural hardware supports dynamic computations in retina. *Trends Neurosci.* 41:224–37. doi: 10.1016/j.tins.2018.01.009
- [3] Vlasits, A. L., Bos, R., Morrie, R. D., Fortuny, C., Flannery, J. G., Feller, M. B., et al. 2014. Visual stimulation switches the polarity of excitatory input to starburst amacrine cells. *Neuron* 83, 1172–84. doi: 10.1016/j.neuron.2014.07.037
- [4] Rivlin-Etzion, M., Wei, W., and Feller, M. B. 2012. Visual stimulation reverses the directional preference of direction-selective retinal ganglion cells. *Neuron* 76:518–25. doi: 10.1016/j.neuron.2012.08.041
- [5] Ankri, L., Ezra-Tsur, E., Maimon, S. R., Kaushansky, N., and Rivlin-Etzion, M. 2020. Antagonistic center-surround mechanisms for direction selectivity in the retina. *Cell Rep.* 31:107608. doi: 10.1016/j.celrep.2020.107608

## VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi: 10.3389/frym.2023.1091174 ; Rivlin-Etzion M and Ankri L (2023) Seeing In a Changing World: How the Retina Responds to Changes in the Environment. *Front. Young Minds.* 11:1091174).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTOR SCIENTIFIQUE : Daniel Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

## JEUNES EXAMINATRICES :

Joanna et Valentina sont élèves au Collège International Eridan à Montpellier. C'est dans ce cadre qu'elles ont endossé le rôle de jeunes éditrices.

JOANNA, 13 ANS

Je vis dans le sud de la France et j'aime la littérature. Je joue de la musique (piano, violoncelle et guitare) avec ma famille depuis presque toujours. J'ai fait du karaté pendant trois ans. Je passe des heures à expérimenter dans l'art et j'aime le cinéma et voyager dans le monde entier

#### VALENTINA, 13 ANS

Je vis à Sète, dans le sud de la France. J'adore lire, écrire et me cultiver. En ce moment même j'écris un récit. Je voudrais devenir journaliste et étudier dans une école réputée. J'adore voyager aux quatre coins du monde pour en apprendre plus sur différentes cultures. Je suis passionnée d'animaux marins.

#### ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 6 novembre 2022 ; ACCEPTÉ le 17 mars 2023.

PUBLIÉ EN LIGNE le 30 mars 2023.

ÉDITEUR : Idan Segev

MENTORS SCIENTIFIQUES : Yachel Baker , Galia Zer Kavod

CITATION : Rivlin-Etzion M and Ankri L (2023) Seeing In a Changing World: How the Retina Responds to Changes in the Environment. *Front. Young Minds*. 11:1091174. doi: 10.3389/frm.2023.1091174

#### DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

#### DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 Rivlin-Etzion and Ankri

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

#### JEUNES EXAMINATEURS

##### HILLEL, 12 ans

Je vis à Tel Aviv, j'étudie dans une classe d'élèves doués et talentueux et j'aime l'art et la science. J'ai remporté les Olympiades nationales de mathématiques et je participe au programme Da Vinci à l'université de Tel Aviv. Je joue du piano depuis mon plus jeune âge, je compose de la musique, je joue de divers instruments et je chante dans un ensemble musical.

##### THE N. YADLIN INTERDISCIPLINARY CAMPUS, Rishon Lezion, 13 ans

Nous sommes un groupe d'élèves de 7ème année au Campus interdisciplinaire N. Yadlin à Rishon Lezion. Au cours de l'année, nous avons participé au cours "Frontières" à l'école, où nous avons étudié à partir d'articles de Frontières (en hébreu et en anglais), réalisé des vidéos et des affiches, fait des recherches dans différents domaines scientifiques

et même révisé certains articles. Nous sommes curieux, critiques et aimons la science et les défis.

## AUTEURS

### MICHAL RIVLIN-ETZION

Michal est chercheuse au département des sciences du cerveau de l'Institut Weizmann. Michal a une licence en mathématiques et en informatique de l'Université hébraïque, où elle a également obtenu un doctorat en informatique neuronale. Pour son doctorat, Michal a étudié l'activité cérébrale dans la maladie de Parkinson dans le laboratoire du professeur Hagai Bergman. À la fin de ses études, elle a voyagé avec sa famille en Californie, aux États-Unis, où elle a rejoint le laboratoire du professeur Marla Feller et a été captivée par la magie du système visuel et de la rétine. Michal aime jouer à des jeux de société avec son mari et leurs quatre enfants, et travailler dans le jardin.

[\\*michal.rivlin@weizmann.ac.il](mailto:michal.rivlin@weizmann.ac.il)

### LEA ANKRI

Lea est postdoctorante dans le laboratoire du Dr Michal Rivlin, dans le département des sciences du cerveau de l'Institut Weizmann, où elle a également terminé ses études de doctorat. Elle a découvert qu'elle voulait faire de la recherche sur le cerveau au lycée, après avoir lu le livre "The Man Who Thought His Wife Was a Hat", qui décrit des personnes souffrant de plusieurs types de lésions cérébrales. Elle a obtenu une licence en psychologie et en biologie à l'université hébraïque et a terminé sa maîtrise dans le laboratoire du professeur Yosef Yarom, où elle a appris à utiliser des techniques pour étudier des cellules individuelles avec une précision maximale. Elle a ensuite utilisé ces méthodes pour étudier la rétine dans le cadre de son doctorat. Lorsqu'elle n'est pas au laboratoire, Lea aime aller à la plage en vélo, écrire de la poésie et donner des conférences publiques sur la science.

[\\*lea.ankri@weizmann.ac.il](mailto:lea.ankri@weizmann.ac.il)