Un zoo de yeux

This manuscript (<u>permalink</u>) was automatically generated from <u>laurentperrinet/2023-02-01_un-zoo-de-yeux@5084ec8</u> on August 12, 2023.

Authors

• Laurent U Perrinet

© 0000-0002-9536-010X · ♠ laurentperrinet · ② @laurentperrinet@neuromatch.social
Institut de Neurosciences de la Timone, CNRS / Aix-Marseille Université · Funded by This research was funded by the European Union ERA-NET CHIST-ERA 2018 research and innovation program under grant number ANR-19-CHR3-0008-03 "APROVIS3D", ANR grant number ANR-20-CE23-0021 "AgileNeuroBot", as well as from Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université-A*MIDEX grant number AMX-21-RID-025 "Polychronies".

Résumé

La plupart d'entre nous peut aisément et instantanément explorer le monde visible qui nous entoure grâce à nos yeux et à notre système visuel qui analyse ces informations. Toutefois, des problèmes en relation avec la vision sont fréquents, qu'il s'agisse de conditions comme l'hypermétropie ou la myopie, pouvant être corrigées par le port de lunettes. Cependant, des problèmes plus sévères existent, comme les affections rétiniennes liées à l'âge ou à des facteurs génétiques. Ce sont des conditions graves pouvant entraîner des handicaps importants. Mais au fond, comment fonctionne le mécanisme des yeux ? Quelle est l'origine de ces problèmes potentiels ? Quelles leçons pouvons-nous tirer de la diversité des structures oculaires présentes dans le règne animal ? Est-il possible de remonter aux origines de leur évolution pour comprendre comment les yeux ont émergé au fil de l'évolution du monde vivant ?

L'œil humain

L'œil humain, l'organe sensible de notre vision, suscite un émerveillement devant les mécanismes ingénieux qui le caractérisent. Penchons-nous sur quelques caractéristiques de la vision qui nous semblent naturelles, mais qui feraient pâlir d'envie n'importe quel concepteur de caméras artificielles. En effet, notre vision nous permet de capturer en continu et en haute définition des images en couleur et avec une relative perception de la profondeur. Notre œil peut fonctionner dans des conditions de lumière variées, du plein soleil à la lueur de la lune, et s'adapter à différentes situations de visibilité. Tout cela se déroule de manière autonome, avec une consommation d'énergie relativement faible par rapport à un dispositif artificiel.

Vu de l'extérieur, l'œil présente le globe oculaire, entouré par les paupières, et au centre se trouve la pupille, autour de laquelle l'iris coloré peut se dilater ou se contracter selon la luminosité ou l'attention. Ce globe, d'environ deux centimètres de diamètre, a une forme sphérique qui lui permet de réaliser des mouvements de rotation rapides pour diriger le regard vers des points d'intérêt ou pour suivre des objets en mouvement. Une coupe transversale permet de suivre le parcours de la lumière : elle traverse d'abord la cornée, une surface bombée à l'extérieur. Ensuite, elle passe par le cristallin, qui joue le rôle d'une lentille en concentrant les rayons lumineux sur le fond de l'œil. Sur cette surface rétinienne réside un tissu qui représente le composant sensible de l'œil, la rétine.

Dans cette rétine se trouvent de nombreux neurones sensibles à la lumière et des mécanismes qui transforment ces signaux pour les acheminer vers le cerveau. Environ 100 millions de photorécepteurs sont présents qui convertissent l'énergie électromagnétique portée par les photons en réactions électrochimiques. Celles-ci génèrent une activité neuronale qui passe par différentes couches de traitement. Les quelques 1,5 million de cellules ganglionnaires, en particulier, rassemblent ces informations pour les transmettre au cerveau. Les sorties de ces neurones s'unissent pour former le nerf optique, reliant ainsi la rétine au reste du cerveau. De fait, la rétine est la seule portion du système nerveux que nous pouvons directement observer!

Mais nos yeux ne se résument pas simplement à ça! Une complexité incroyable réside autour du globe oculaire pour permettre son mouvement, maintenir son humidité par les larmes et même accomplir un simple clignement. Globalement, cet ensemble ressemble à une mécanique parfaitement réglée, presque comme une horloge. Certains utilisent cette analogie pour justifier l'idée d'une conception intelligente derrière nos yeux: "Comment aurait-il pu en être autrement?" Répondre à cet argument n'est pas évident d'emblée... En poussant davantage la curiosité, nous réalisons la variété des formes oculaires dans le règne animal, démontrant que les animaux utilisent des mécanismes étonnants. Cette exploration peut avoir des applications technologiques futures,

mais surtout, elle nous aide à mieux comprendre notre propre vision et à répondre à la question : "Qui a conçu l'œil ?"

La pupille, la prunelle de nos yeux

Commençons notre exploration de la diversité des yeux dans le règne animal en portant notre attention sur la partie la plus apparente : la pupille. Comme nous l'avons vu, cette composante du globe oculaire règle le passage de la lumière. Intéressons-nous d'abord à un voisin proche, le chat domestique et à sa pupille en forme de biseau verticale allongée. En fonction de la luminosité, elle peut changer de la forme parfaitement ronde qu'elle adopte dans l'obscurité pour se contracter graduellement et former cette fente caractéristique. Les humains présentent un mécanisme similaire, mais la contraction y est uniforme dans toutes les directions, maintenant ainsi une forme ronde. Il est supposé que cette contraction chez les chats permet de former une image nette sur la rétine en favorisant la perception de la profondeur tout en maximisant la captation de lumière.

De manière plus étonnante, les pupilles des moutons se contractent selon un axe horizontal, et ceci même quand ces animaux baissent leur tête pour brouter. Cette adaptation est expliquée par le statut de proie plus fréquent chez les moutons. Cette configuration leur permet d'étendre leur attention sur un champ de vision panoramique. En revanche, les chats sont des prédateurs, et pour eux, la distinction de la profondeur s'avère plus utile pour une attaque. Ainsi, la sélection naturelle a conduit à une évolution distincte des pupilles de ces deux espèces.

D'autres animaux présentent des pupilles aux formes encore plus remarquables. Un exemple est la seiche, dont la pupille, une fois contractée, arbore une forme ondulée ressemblant à la lettre manuscrite "w". Cette pupille unique dans le règne animal a longtemps suscité l'énigme. Il s'avère d'autre part que ces animaux modifient la couleur de leur peau pour communiquer ou se camoufler, bien qu'ils ne possèdent pas de photorécepteurs sensibles à différentes couleurs comme le font les humains. Ceci constitue un paradoxe car une telle réaction de camouflage nécessite la perception de la couleur ou de la texture de l'objet à imiter.

Une hypothèse fascinante a émergé, reliant ces deux mystères. Elle suggère que la forme de la pupille pourrait jouer un rôle dans la perception des couleurs. À l'instar d'un arc-en-ciel décomposant les couleurs en bandes distinctes, les systèmes optiques peuvent réfléchir les couleurs à des angles légèrement variés. La pupille singulière de la seiche pourrait ainsi produire différentes formes pour chaque couleur, et le cerveau pourrait en extraire des informations pour discerner les couleurs, sans nécessiter de photorécepteurs spécifiques. Cette hypothèse nécessite davantage de validation, mais elle illustre l'ingéniosité des stratégies mises en place par ces systèmes. N'oublions pas que la biologie s'explique uniquement à travers la sélection naturelle, où des millions de générations et des milliards d'individus ont favorisé ces traits pour la survie de l'espèce.

D'autres facettes des yeux

Les yeux des humains, des chats et des moutons partagent de nombreux traits communs, mais présentent également une grande variabilité dans leurs formes. Il semble donc qu'ils aient évolué selon des trajectoires distinctes et indépendantes, tout en ayant probablement un ancêtre commun. Si l'on remonte encore plus loin dans les branches de l'arbre de l'évolution, on découvre une autre forme d'œil radicalement différente. Au lieu de focaliser une image sur la rétine grâce à une pupille, ces yeux sont constitués de multiples éléments oculaires allongés et juxtaposés.

L'exemple le plus frappant de cette configuration est celui de la mouche. Les yeux d'une mouche commune comportent environ 10 000 facettes organisées en une grille hexagonale relativement

régulière. Cette structure permet à la mouche d'avoir un champ de vision panoramique de tout l'environnement qui l'entoure. Chacune de ces facettes comprend une lentille et quelques photorécepteurs, ce qui permet aux mouches d'exécuter des manœuvres impressionnantes, avec des accélérations dignes des meilleurs avions de chasse. Le plus surprenant peut-être est que ce système pèse moins d'un gramme et consomme très peu d'énergie. Comprendre ce mécanisme pourrait être extrêmement précieux pour guider la conception de futurs robots volants.

Ces yeux dérivent certainement d'un ancêtre commun. En remontant encore plus en avant dans "l'arbre du vivant", on peut identifier une forme encore plus élémentaire chez certains microorganismes dotés d'un mécanisme phototactique, c'est-à-dire un mouvement guidé par la lumière. Ce mécanisme repose sur une association simple entre un capteur photosensible, une position excentrée dans l'organisme définissant une direction et des cils agissant comme des moteurs pour déplacer l'organisme. En fonction de si l'organisme cherche à se diriger vers une source de lumière (potentiellement une source de nourriture) ou à l'éviter, un mécanisme basique entre les cellules sensibles et motrices permet de mettre en place cette orientation.

Au cours de notre exploration, il apparaît que les yeux ont évolué dans l'arbre de la vie à partir d'un ancêtre commun, et que la diversité des formes oculaires que nous observons résulte de différentes branches de cette évolution. Par exemple, considérons le système visuel de la coquille Saint-Jacques. En examinant sa coquille, on remarque les nombreux trous sur le bord de l'ouverture. Ces 21 ouvertures abritent 21 yeux indépendants, permettant à ce mollusque de bouger ses yeux de façon autonome et d'explorer son environnement lumineux immédiat. Plus étonnant encore, ses yeux peuvent détecter jusqu'à 12 couleurs différentes, offrant une sensibilité décuplée.

Des études récentes suggèrent que les yeux ont probablement été "inventés" à plusieurs reprises. En effet, certaines morphologies sont si distinctes qu'elles semblent ne pas partager d'ancêtre commun. Cela est particulièrement vrai pour différentes formes de globes oculaires, ainsi que pour la variété observée à travers les espèces vivantes. Cette hypothèse peut sembler difficile à accepter, car nous avons tendance à placer les humains au sommet de la hiérarchie. Cependant, nous avons également vu que les yeux évoluent en réponse à des fonctions spécifiques, et à la lumière des pressions exercées par la sélection naturelle, il n'y a peut-être pas de nécessité à ce qu'il existe un ancêtre commun pour tous les types d'yeux dans le règne vivant.

De l'imitation à la compréhension.

Ainsi, au lieu de considérer l'humain comme la seule source d'inspiration pour construire un système artificiel, on a pu voir l'émergence récemment de nouvelles technologies basée sur l'imitation de formes du vivant et qui pourrait révolutionner notre façon de comprendre la vision. Un exemple exotique est le comportement d'une araignée du désert qui utilise la polarisation de la lumière pour s'orienter. En effet, la lumière peut être caractérisée par son énergie et sa couleur, mais elle possède aussi une polarisation. Cette propriété est par exemple utilisée dans les lunettes des cinémas 3D et permettre de montrer à chaque œil une image différente et ainsi de créer une impression de binocularité. Cette propriété est aussi utilisée dans les filtres polarisants, qui permettent d'éliminer des rayons qui sont nettement polarisé, comme, quand ils se réfléchissent sur une vitre.

Un phénomène remarquable et le fait que la lumière qui nous parvient du soleil est modifiée différentiellement dans le ciel de telle façon à ce que la polarisation autour du soleil dessine une forme caractéristique en forme de croix. Il a été mis en évidence que ces araignées ont la capacité de détecter cette forme grâce à des capteurs sensibles à la polarité et qui leur permettent de deviner la position du soleil, même quand celui-ci n'est pas directement visible par exemple à cause des nuages. L'équipe de Stéphane Viollet à Marseille a récemment développé un robot qui utilise cette propriété. En utilisant la lumière polarisée, leur système est capable de détecter avec une grande précision la

position du soleil dans le ciel dans une large gamme de conditions météorologiques, notamment quand le ciel est couvert de nuages, et donc à l'utiliser comme un compas pour un système de navigation. Typiquement ces systèmes sont très dépendants de systèmes d'origines militaires, comme le GPS, mais que ceux-ci peuvent être défaillants ou inaccessibles. Cette nouvelle technologie pourrait se révéler comme un complément essentiel aux systèmes de navigation des voitures du futur.

Une autre avancée récente est le développement de nouvelles caméras basées sur le fonctionnement de la rétine. Cette nouvelle caméra, appelée aussi caméra événementielle, se base sur deux observations. D'abord que les informations sont transformées de façon indépendante par les neurones de sortie de la rétine, sans horloge centrale. Aussi que cette information ne comporte pas une information sur la luminance de ces pixels, mais seulement des événements sur les changements de cette luminance. Ce dernier point est essentiel, car il permet de réduire énormément l'information qui est passé : ainsi une image statique ne produira aucune sortie. De façon encore plus intéressante, l'utilisation de ces caméras induit un changement de paradigme.

À la différence d'une caméra classique, qui va traiter des images de façon séquentielle par exemple à 30 images par seconde, ce type de caméra envoie des informations de façon continue. D'une part, l'information temporelle est beaucoup plus finement représentée, souvent à la microseconde, mais surtout ce sont seulement les zones intéressantes, comme les bords des objets, qui sont représentés. Ce nouveau type de représentation implique un changement de paradigme radical dans la façon de construire les algorithmes de traitement de l'image. Ce changement de paradigme est accompagné par une révolution dans la façon de construire des puces électroniques. En effet, de nouvelles technologies inspirées par le fonctionnement du cerveau permettent de construire des puces dans lequel le calcul est parallélisé à l'extrême. Ceci vient en contraste avec les plus traditionnels dont le rôle est de traiter, sur un nombre limité de processeur, l'information la plus rapidement possible.

Ce type d'ingénierie neuromorphique devrait faire émerger une révolution dans le traitement des images. En effet, l'utilisation de ces processeurs massivement parallèle est particulièrement bien adapté à ces caméras événementielles, notamment par rapport aux caméras classiques. Un caractère novateur de ses technologies est le fait qu'ils utilisent beaucoup moins d'énergie. C'est un point essentiel pour ces systèmes qui visent à être embarqués sur des véhicules autonomes ou des systèmes embarqués et à se démultiplier sur différents systèmes et répondre aux exigences de consommation, d'énergie, de ses systèmes embarqués, mais aussi à celui lié à la transition écologique.

Que nous apporte cette compréhension?

En explorant la diversité du zoo des yeux observés dans le monde vivant, nous avons opéré sur le système visuel un chassé-croisé entre connaissances fondamentales et appliquées. Les différentes anatomies des yeux que nous avons explorées démontrent que chaque système reste adapté à son répertoire comportemental. En particulier, nous avons vu que certaines technologies peuvent exploiter ces "inventions" au lieu de simplement affiner le modèle développé autour de l'analogie de l'appareil photo. Et si ces inventions ont parfois des complexités semblables à celle des machines qui sont créés par les mains d'un horloger, nous avons surtout vu que les yeux ont été inventés plusiers fois de façon indépendante, démontrant une nouvelle fois la richesse des systèmes émergents des mécanismes de l'évolution du vivant.

This manuscript is a template (aka "rootstock") for <u>Manubot</u>, a tool for writing scholarly manuscripts. Use this template as a starting point for your manuscript.

The rest of this document is a full list of formatting elements/features supported by Manubot. Compare the input (.md files in the /content directory) to the output you see below.

Basic formatting

Bold text

Semi-bold text

Centered text

Right-aligned text

Italic text

Combined italics and bold

Strikethrough

- 1. Ordered list item
- 2. Ordered list item
 - a. Sub-item
 - b. Sub-item
 - i. Sub-sub-item
- 3. Ordered list item
 - a. Sub-item
- List item
- · List item
- List item

subscript: H₂O is a liquid

superscript: 2¹⁰ is 1024.

unicode superscripts⁰¹²³⁴⁵⁶⁷⁸⁹

unicode subscripts₀₁₂₃₄₅₆₇₈₉

A long paragraph of text. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

Putting each sentence on its own line has numerous benefits with regard to <u>editing</u> and <u>version</u> <u>control</u>.

Line break without starting a new paragraph by putting two spaces at end of line.

Document organization

Document section headings:

Heading 1

Heading 2

Heading 3

Heading 4

Heading 5

Heading 6



Horizontal rule:

Heading 1's are recommended to be reserved for the title of the manuscript.

Heading 2's are recommended for broad sections such as Abstract, Methods, Conclusion, etc.

Heading 3's and Heading 4's are recommended for sub-sections.

Links

Bare URL link: https://manubot.org

<u>Long link with lots of words and stuff and junk and bleep and blah and stuff and other stuff and more stuff yeah</u>

Link with text

Link with hover text

Link by reference

Citations

Citation by DOI [1].

Citation by PubMed Central ID [2].

Citation by PubMed ID [3].

Citation by Wikidata ID [4].

Citation by ISBN [5].

Citation by URL [6].

Citation by alias [7].

Multiple citations can be put inside the same set of brackets [1,5,7]. Manubot plugins provide easier, more convenient visualization of and navigation between citations [2,3,7,8].

Citation tags (i.e. aliases) can be defined in their own paragraphs using Markdown's reference link syntax:

Referencing figures, tables, equations

Figure 1

Figure 2

```
Figure 3

Figure 4

Table 1

Equation 1

Equation 2
```

Quotes and code

Quoted text

Quoted block of text

Two roads diverged in a wood, and I—I took the one less traveled by, And that has made all the difference.

Code in the middle of normal text, aka inline code.

Code block with Python syntax highlighting:

```
from manubot.cite.doi import expand_short_doi

def test_expand_short_doi():
    doi = expand_short_doi("10/c3bp")
    # a string too long to fit within page:
    assert doi == "10.25313/2524-2695-2018-3-vliyanie-enhansera-copia-i-
        insulyatora-gypsy-na-sintez-ernk-modifikatsii-hromatina-i-
        svyazyvanie-insulyatornyh-belkov-vtransfetsirovannyh-geneticheskih-
        konstruktsiyah"
```

Code block with no syntax highlighting:

```
Exporting HTML manuscript
Exporting DOCX manuscript
Exporting PDF manuscript
```

Figures



Figure 1: A square image at actual size and with a bottom caption. Loaded from the latest version of image on GitHub.



Figure 2: An image too wide to fit within page at full size. Loaded from a specific (hashed) version of the image on GitHub.



Figure 3: A tall image with a specified height. Loaded from a specific (hashed) version of the image on GitHub.



Figure 4: A vector .svg image loaded from GitHub. The parameter sanitize=true is necessary to properly load SVGs hosted via GitHub URLs. White background specified to serve as a backdrop for transparent sections of the image.

Tables

Table 1: A table with a top caption and specified relative column widths.

Bowling Scores	Jane	John	Alice	Bob
Game 1	150	187	210	105
Game 2	98	202	197	102
Game 3	123	180	238	134

Table 2: A table too wide to fit within page.

	Digits 1-33	Digits 34-66	Digits 67-99	Ref.
pi	3.14159265358979323 846264338327950	28841971693993751 0582097494459230	78164062862089986 2803482534211706	piday.org
е	2.71828182845904523 536028747135266	24977572470936999 5957496696762772	40766303535475945 7138217852516642	nasa.gov

Table 3: A table with merged cells using the attributes plugin.

	Colors		
Size	Text Color	Background Color	
big	blue	orange	
small	black	white	

Equations

A LaTeX equation:

$$\int_0^\infty e^{-x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \tag{1}$$

An equation too long to fit within page:

$$x = a + b + c + d + e + f + g + h + i + j + k + l + m + n + o + p + q + r + s + t + u + v + w + x + y + z + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9$$
(2)

Special

▲ WARNING The following features are only supported and intended for .html and .pdf exports. Journals are not likely to support them, and they may not display correctly when converted to other formats such as .docx.

LINK STYLED AS A BUTTON

Adding arbitrary HTML attributes to an element using Pandoc's attribute syntax:

Manubot Manubot Manubot Manubot Manubot. Manubot Manubot Manubot Manubot. Manubot. Manubot Manubot. Manubot. Manubot. Manubot. Manubot.

Adding arbitrary HTML attributes to an element with the Manubot attributes plugin (more flexible than Pandoc's method in terms of which elements you can add attributes to):

Manubot Manubot.

Available background colors for text, images, code, banners, etc:

white lightgrey grey darkgrey black lightred lightyellow lightgreen lightblue lightpurple red orange yellow green blue purple

Using the Font Awesome icon set:



Light Grey Banner
useful for general information - manubot.org

1 Blue Banner

useful for important information - manubot.org

♦ Light Red Banner useful for *warnings* - <u>manubot.org</u>

References

1. Sci-Hub provides access to nearly all scholarly literature

Daniel S Himmelstein, Ariel Rodriguez Romero, Jacob G Levernier, Thomas Anthony Munro, Stephen Reid McLaughlin, Bastian Greshake Tzovaras, Casey S Greene *eLife* (2018-03-01) https://doi.org/ckcj

DOI: 10.7554/elife.32822 · PMID: 29424689 · PMCID: PMC5832410

2. Reproducibility of computational workflows is automated using continuous analysis

Brett K Beaulieu-Jones, Casey S Greene

Nature biotechnology (2017-04) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6103790/

DOI: <u>10.1038/nbt.3780</u> · PMID: <u>28288103</u> · PMCID: <u>PMC6103790</u>

3. **Bitcoin for the biological literature.**

Douglas Heaven

Nature (2019-02) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30718888

DOI: 10.1038/d41586-019-00447-9 · PMID: 30718888

4. Plan S: Accelerating the transition to full and immediate Open Access to scientific publications

cOAlition S

(2018-09-04) https://www.wikidata.org/wiki/Q56458321

5. **Open access**

Peter Suber

MIT Press (2012)

ISBN: 9780262517638

6. Open collaborative writing with Manubot

Daniel S Himmelstein, Vincent Rubinetti, David R Slochower, Dongbo Hu, Venkat S Malladi, Casey S Greene, Anthony Gitter

Manubot (2020-05-25) https://greenelab.github.io/meta-review/

7. Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine

Travers Ching, Daniel S Himmelstein, Brett K Beaulieu-Jones, Alexandr A Kalinin, Brian T Do, Gregory P Way, Enrico Ferrero, Paul-Michael Agapow, Michael Zietz, Michael M Hoffman, ... Casey S Greene

Journal of The Royal Society Interface (2018-04) https://doi.org/gddkhn

DOI: <u>10.1098/rsif.2017.0387</u> · PMID: <u>29618526</u> · PMCID: <u>PMC5938574</u>

8. Open collaborative writing with Manubot

Daniel S Himmelstein, Vincent Rubinetti, David R Slochower, Dongbo Hu, Venkat S Malladi, Casey S Greene, Anthony Gitter

PLOS Computational Biology (2019-06-24) https://doi.org/c7np

DOI: 10.1371/journal.pcbi.1007128 · PMID: 31233491 · PMCID: PMC6611653