

Des illusions visuelles aux hallucinations: une porte sur la perception

🔗 Document source

Ce texte est publié dans [The conversation](#) dans une forme légèrement abrégée. Les additions aux texte sont marquées dans des bannières et peuvent être suivies sur le [REPO GITHUB](#) .

This manuscript ([permalink](#)) was automatically generated from [laurentperrinet/2019-05 illusions-visuelles@52441ec](#) on April 29, 2020.

Authors

- **Laurent U Perrinet**

🆔 [0000-0002-9536-010X](#) · 🌐 [laurentperrinet](#) · 🐦 [laurentperrinet](#)

Institut de Neurosciences de la Timone, CNRS / Aix-Marseille Université · Funded by ANR project "Horizontal-V1"
N°ANR-17-CE37-0006.

Résumé

Soudain, votre voisin s'envole dans les airs tandis que la rivière remonte son cours et que des serpents se mettent à tourner... Les illusions visuelles, créations d'artistes ou de scientifiques sont très populaires auprès du public qui les diffuse largement sur les réseaux sociaux. Amusantes, elles nous en apprennent beaucoup sur le fonctionnement du cerveau. En particulier quand l'illusion devient hallucination visuelle, pour cause de maladie par exemple. Chercheur à l'Institut de Neurosciences de la Timone à Marseille, je m'y suis intéressé et voudrait ici vous expliquer comment et pourquoi une image peut tromper nos sens ou des objets voyager dans le temps. L'idée sous-jacente est celle d'une théorie de la vision envisagée comme un processus actif en relation directe avec le monde qui nous entoure.

This manuscript is a template (aka "rootstock") for [Manubot](#), 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 superscripts](#)⁰¹²³⁴⁵⁶⁷⁸⁹

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 [editing](#) and [version control](#).

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

A heading centered on its own printed page

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>

[Long link with lots of words and stuff and junk and bleep and blah and stuff and other stuff and more stuff yeah](#)

[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 tag [[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-geneticheskikh-
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.

<i>Bowling Scores</i>	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
e	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:

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

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.

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



Blue Banner

useful for *important information* - manubot.org



Light Red Banner

useful for *warnings* - manubot.org

Illusion visuelle et hallucinations

L'étymologie du mot illusion se réfère à la tromperie. On définit donc les illusions visuelles comme une stimulation de la vue qui induit une perception décalée par rapport à sa réalité physique. Dans l'illusion classique dite de Hering par exemple (voir Figure 5), deux lignes parallèles placées sur un faisceau de lignes convergentes semblent courbées comme si le centre de l'image avait gonflé par rapport à sa périphérie. Cette illusion perdure même si l'on prend une règle pour vérifier physiquement le parallélisme des lignes (ou simplement en enlevant les lignes fuyantes): il n'est pas possible de ne *pas* la percevoir.

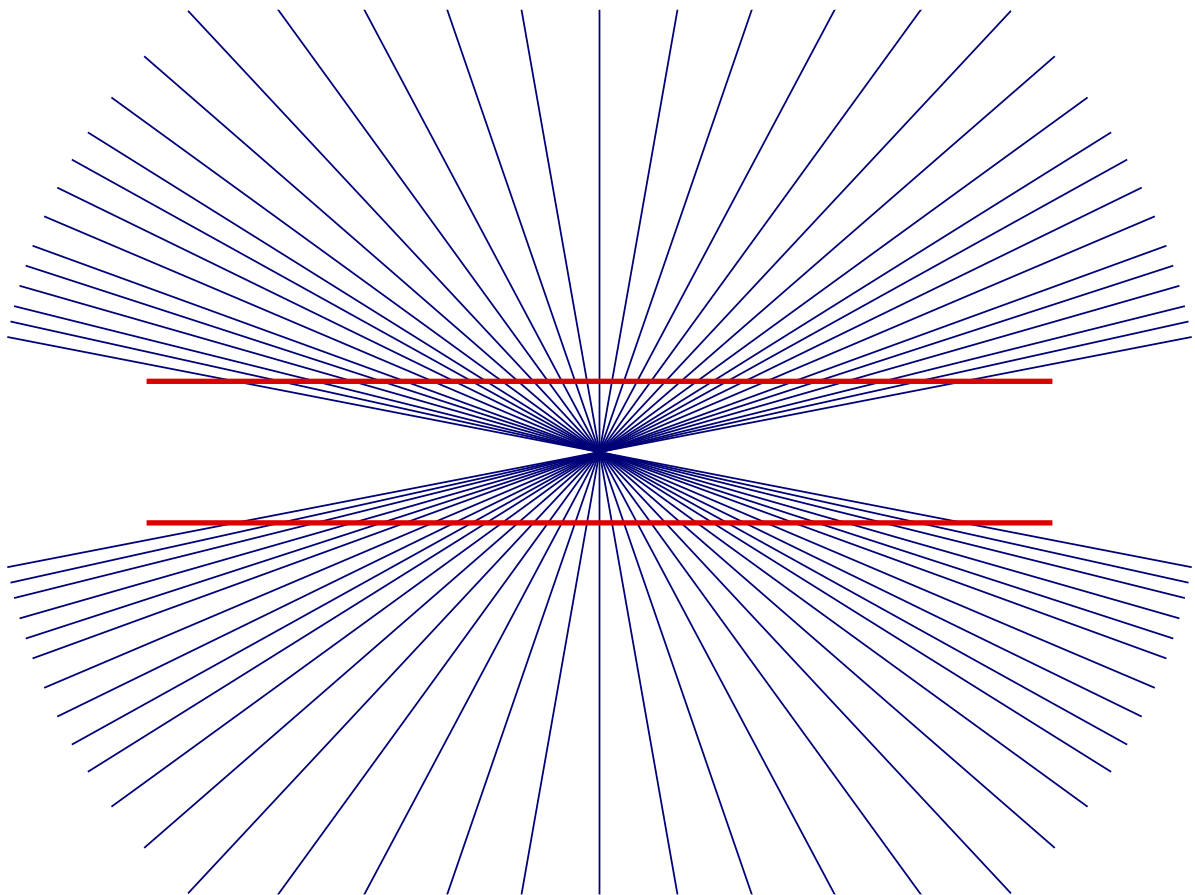


Figure 5: Illusion de Hering. Deux lignes parallèles (en rouge) paraissent bombées quand elles sont placées sur un faisceau de lignes convergentes.

Ainsi, dans cette grande variété d'illusions, statiques ou dynamiques, visuelles ou encore portant sur d'autres sens comme le toucher, se dégage une unité derrière une perception intuitive, partagée

universellement: les illusions n'ont pas besoin de mode d'emploi!



Figure 6: #LaRobe. La robe est-elle blanche avec des rayures dorées ou bleue avec des bandes sombres?
(source=WP:NFCC/Wikipedia)

Certaines illusions sont cependant sujettes à interprétations différentes. Ainsi, le [cube de Necker](#). De même, celle dénommée [#LaRobe](#), très populaire sur les réseaux sociaux. Cette image a le pouvoir de diviser une population entre des perceptions alternatives: est-ce une robe blanche et or ou bien est-elle bleue avec des bandes noires? Tout est parti d'une simple photo prise lors de la préparation d'une cérémonie de mariage: un vrai exemple de [sérendipité](#)! Et alors vous, lectrices et lecteurs, quel serait votre choix?

Même si le débat fait toujours rage, les explications scientifiques concernant cette robe convergent sur une perception de la couleur de la figure modifiée par le contexte du fond. Notre système visuel doit en effet pouvoir identifier la couleur d'un objet (par exemple pour évaluer la maturité d'un fruit) quelles que soient les conditions lumineuses, que ce soit avec la lumière crue du midi ou la lumière orangée du soir. Ici le fond est surexposé et rend cette interprétation ambiguë et deux interprétations sont possibles pour cette image comme illustré dans la figure ci-dessous [7](#) : L'illumination ambiante vire-t-elle vers le jaune (la robe est alors perçue bleue) ou le contexte est plutôt bleuâtre (la robe est alors blanche et jaune)? Je peux vous dévoiler que, sur un échantillon représentatif, une courte majorité perçoit la robe en bleue et noir.



Figure 7: Le contexte d'illumination ambiante permet de concilier les deux interprétations les plus communes.

Un aspect remarquable de cette illusion est sa stabilité et, également, la difficulté de changer d'interprétation une fois une première interprétation formée. Cette illusion est à mes yeux d'autant plus intéressante qu'elle montre que pour chaque perception, il y a une interprétation de l'image par notre système visuel. Cela signifie qu'une fonction de notre cerveau est de pouvoir interpréter l'image projetée par le même objet physique de la façon la plus appropriée. Ainsi, des groupes humains peuvent avoir des façons contrastées de percevoir des objets physiques qui sont physiquement identiques. C'est là matière à un nouveau proverbe: oui, «l'illusion est humaine»!

Pour aller plus loin, il est intéressant de considérer cette image prise en 1971 par la sonde Viking d'une partie de la surface de la planète Mars (Figure 10). L'image est relativement floue, elle contient des points noirs (des erreurs de mesure détectées), mais l'on distingue très clairement un visage de type humain comme une sculpture géante laissée là par une civilisation extraterrestre.



Figure 8: Un visage sur Mars? En 1971, la sonde Viking prend une surprenante image de la surface de Mars. Une sculpture extraterrestre géante? (source NASA/Wikipedia)

Quelque 20 ans plus tard, de nouvelles images réalisées par de nouvelles sondes spatiales montrent de nouveau une forme de visage. Mais une fois la résolution de l'image affinée, les détails du relief révèlent qu'il n'y a pas de sculpture de ce type mais seulement... un simple rocher. C'est un cas de [paréidolie](#): quelque chose est perçu alors qu'il est physiquement absent. De la même façon, on peut voir un cheval courir dans les nuages, ou le visage du Christ dans un toast. Le constat est le même: le système visuel, non seulement interprète les images, mais surtout, il ne sait pas faire autrement que de générer une interprétation à partir d'images, et comme on vient de le voir même si elles ne font pas sens *a priori*. Ce genre d'illusion se rapproche donc d'une hallucination, qui elle peut être définie comme une perception sans objet.



Figure 9: Vingt ans plus tard, une nouvelle sonde peut prendre un nouveau cliché de cette même surface de Mars. À basse résolution, on distingue toujours un visage... (source NASA/Wikipedia)



Figure 10: Mais il disparaît à haute résolution. La sculpture est seulement une colline martienne, évidence que nous avions "halluciné" ce visage. (source NASA/Wikipedia)

Pour résumer, les illusions visuelles nous révèlent des caractéristiques essentielles de notre perception visuelle. Malgré la diversité des formes des illusions visuelles et la diversité des explications, existe-t-il des points communs qui permettraient d'en avoir une compréhension unifiée? Quelles pourraient être les liens profonds entre illusions visuelles et hallucinations?

Prédire pour mieux percevoir

En particulier, l'anatomie de notre cerveau induit des délais temporels et notre travail de recherche nous a conduit à émettre l'hypothèse que le cerveau utilise les régularités statistiques du monde pour arriver d'une façon ou d'une autre à compenser ces délais et à «prédire le présent». Une telle hypothèse permet de formaliser un bon nombre d'illusions et en particulier l'illusion de Hering ci-dessus. En effet, les lignes fuyantes donnent une perspective et induisent un mouvement significatif, comme une marche vers le point de fuite. Les courbes horizontales de la figure de Hering sont le plus probablement interprétées comme perpendiculaires à l'axe de vision et à celui de la marche. Elles sont alors inconsciemment anticipées dans l'espace de l'œil de telle sorte à ce que leur position est prédite à l'instant présent, d'où la forme bombée caractéristique de la perception dans cette illusion. Une extension de cette hypothèse est que le cerveau construit constamment une image mentale de la scène visuelle par des processus prédictifs.

[Ⓞ Avant d'essayer de donner une réponse à ces questions, rappelons une contrainte fondamentale à laquelle notre cerveau est confronté : l'environnement est dynamique et notre cerveau est (relativement) lent pour traiter ces informations. En effet les travaux de Simon Thorpe à Toulouse au Cerco ont montré des capacités ultra-rapides de catégorisation d'image chez les primates. Cette vitesse peut atteindre environ 100 ms chez l'humain [9] et 80 ms chez le singe. C'est remarquablement

rapide mais relativement long si l'on considère cette fois-ci une tâche simple d'interception d'un objet en mouvement. Considérons par exemple un agent qui suit une balle de tennis lancée à une vitesse de 20 m/s à une distance de 1 m devant son regard. Au moment de passer dans l'axe de vision du joueur de tennis, la balle va être perçue en arrière de la trajectoire à cause du délai sensoriel. Plus précisément la balle est placée à l'instant où l'image est prise à environ 45° d'angle visuel en retard sur la position réelle actuelle de la balle. À noter que la position de la balle est sur l'axe de vision (telle celle figurée par cette position des yeux), mais que pour le système sensoriel, cette position au temps présent doit être anticipée. Notons aussi que la position de la balle, dans cette représentation rétinienne, au moment où l'action sera réalisée (après le délai sensorimoteur total) pourra être estimée à partir de la continuité du mouvement de la balle. C'est-à-dire qu'elle sera encore environ à 45° d'angle visuel mais cette fois-là en avant de la trajectoire, dans son futur. Il semble incroyable que ce genre de voyage dans le temps puisse s'opérer dans notre cerveau, mais une simple illusion visuelle permet de mettre ces mécanismes en évidence.

⊗ En particulier, l'illusion du flash retardé ("Flash Lag Effect" en anglais) permet de mettre en évidence des dynamiques de traitement dans le système visuel. Dans cette illusion, l'observateur doit fixer environ au centre de l'écran. Une cible en mouvement horizontal apparaît et quand elle passe aux environs du centre de l'écran, un bref flash est présenté immédiatement au-dessous du centre de l'image. Perceptivement, on observe chez une vaste majorité d'observateurs que la cible en mouvement est perçue, au moment du flash, *en avant* de la trajectoire. L'hypothèse originale de Romi Nijhawan propose que la cible est perceptivement représentée de telle façon à ce qu'elle occupe sa position au temps présent, donc de manière anticipée. Par contre, le flash est imprévu et sa position ne peut pas être anticipée. C'est ce que nous avons montré dans ce travail de modélisation qui montre une évaluation quantitative des productions d'un tel modèle [10].

Plus généralement, ce travail nous a conduit à émettre l'hypothèse que le cerveau utilise les régularités statistiques du monde pour arriver d'une façon ou d'une autre à compenser les contraintes de délai et par exemple à « prédire le présent ». Une telle hypothèse permet de formaliser un bon nombre d'illusions et en particulier l'illusion de Hering que nous avons défini ci-dessus. En effet, les lignes fuyantes donnent un contexte de perspective et induisent un mouvement écologiquement significatif, comme une marche vers le point de fuite. À ce titre, les courbes horizontales de la figure de Hering sont le plus probablement perpendiculaires à l'axe de vision et à celui de la marche. Au niveau perceptif, elles sont donc placées à des distances différentes de l'œil et sont alors anticipées dans l'espace rétinien de telle sorte à ce que leur position est prédite à l'instant présent, d'où la forme bombée caractéristique de la perception dans cette illusion. Une extension de cette hypothèse est que le cerveau construit par des processus prédictifs une image mentale de la scène visuelle. Une telle hypothèse permet de développer un formalisme théorique complet qui peut être validé quantitativement vis-à-vis de notre compréhension actuelle du cerveau.]{.banner .lightred}

Cette théorie a été formalisée par le professeur Karl Friston [11] sous le terme de principe de minimisation de l'énergie libre. À ce jour, c'est le seul paradigme théorique qui soit aussi complet pour expliquer le fonctionnement global du cerveau. Sans rentrer dans les détails mathématiques de ce principe, cette théorie permet de formaliser des modèles génératifs pour toute sensation qui est reçue par nos organes et de considérer une représentation interne comme un état dit caché, c'est-à-dire un état ou une [représentation interne que l'on va essayer d'estimer](#). L'ensemble de ces hypothèses définit un système dont on déduit ensuite une variable globale dite d'énergie libre, qui donne une borne supérieure à la surprise de l'agent connaissant un modèle génératif, des sensations, des états internes et des actions effectuées. L'agent peut alors minimiser cette variable propre pour prédire au mieux son état, comme la position d'une cible. On peut aussi considérer un agent qui puisse agir sur cet environnement et on parle alors d'inférence active. En utilisant cette formalisation, il est alors possible de l'exprimer sous forme d'équations qui reprennent la structure du passage

d'information dans le graphe formé par les différentes régions cérébrales. Depuis les aires sensorielles comme la rétine aux aires associatives comme celles qui forment les voies visuelles jusqu'aux aires cérébrales regroupant les motoneurones qui vont permettre de générer une action motrice et un comportement.

Nous avons contribué avec Rick Adams et Karl Friston à l'application de ce principe pour expliquer des différences entre des patients typiques et des schizophrènes. En se focalisant sur les mouvements des yeux, nous avons démontré que ce paradigme permet d'expliquer les différences dans les mouvements dit de poursuites lente [12]. Il est alors remarquable d'observer en perturbant dans le modèle les gains synaptiques des voies descendantes, c'est-à-dire celle qui permet d'affiner le modèle interne de représentation du monde, ont répliqué des caractéristiques comportementales des patients schizophrènes. En particulier, ces mouvements sont expliqués dans ce modèle comme une forme de « délusion », qui consiste à accorder un poids relatif exagéré aux croyances représentées par le cerveau par rapport à celle apportées par les sens. Cette approche est actuellement étendue par le docteur Richard Adams afin d'apporter à terme des solutions thérapeutiques et une meilleure compréhension de pathologies comme la schizophrénie.

Illusions et des hallucinations

À la différence des illusions visuelles, les hallucinations émergent sans stimulation sensorielle directe. Témoin, le mouvement induit dans l'image, Figure 11, des serpents qui tournoient. Mais comment peut-on expliquer la formation d'images hallucinées, comme celle induite par la prise de drogue ou de psychotropes? Peut-on alors identifier des mécanismes qui sont impliqués dans le cerveau, et définir une neuro-anatomie fonctionnelle qui puisse expliquer ces illusions et hallucinations?

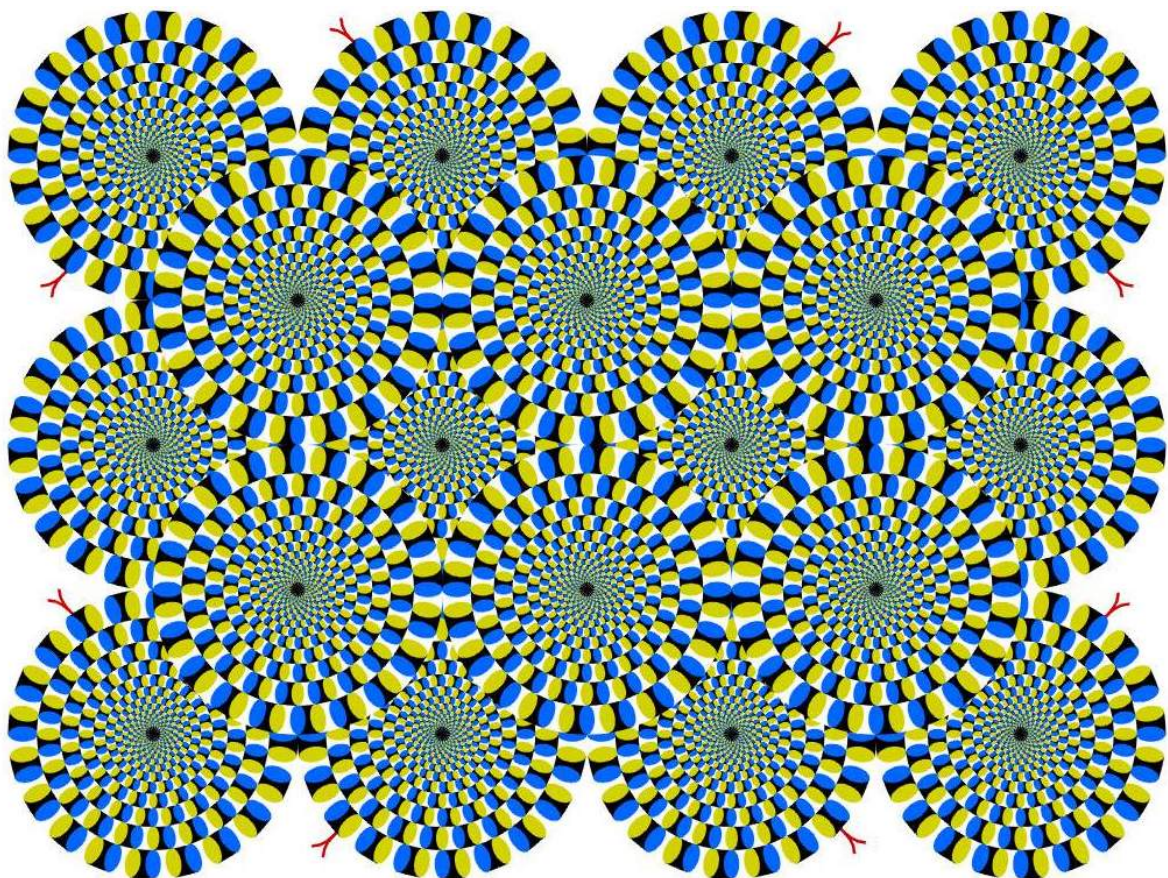


Figure 11: Les serpents qui tournoient Cette illusion créée par le professeur [Akiyoshi Kitaoka](#) induit des hallucinations de mouvements dans une image qui n'en contient pas.

Une hypothèse novatrice proposée par Paul Bressloff et ses collègues en 2002 [13] est de voir l'origine de certaines illusions ou d'hallucinations dans l'interaction entre structures du cerveau avec la représentation de l'espace visuel sur la surface de notre cortex visuel primaire, la partie de notre cerveau qui représente les éléments les plus simples de l'image visuelle. Cette carte corticale représente notamment des bords élémentaires en privilégiant une résolution plus fine au centre du champ visuel. Ces auteurs ont analysé mathématiquement les états du système quand on perturbe certains paramètres du système, et notamment les interactions dans la carte corticale.

Ils ont alors montré un point essentiel: à partir d'un certain seuil de prise de drogue, des «hallucinations» peuvent émerger comme des structures stables dans la carte corticale. Étonnamment, ces états peuvent être visualisés en les reprojétant sur l'espace visuel et ils dessinent alors des spirales et des ensembles de lignes qui sont très proches des hallucinations telles qu'elles ont été rapportées après la prise de drogues diverses allant de la marijuana au peyotl ou à la mescaline, voir Figure 12. Ce type de modélisation permet d'un côté d'expliquer la formation d'hallucinations, mais aussi de définir une «neuro-géométrie», c'est-à-dire un formalisme mathématique reliant neurosciences et la géométrie des relations existant entre des sous modules du cortex visuel primaire. On peut aussi imaginer alors des hallucinations plus complexes émerger de réseaux plus complexes qui représentent par exemple des superpositions de visages.

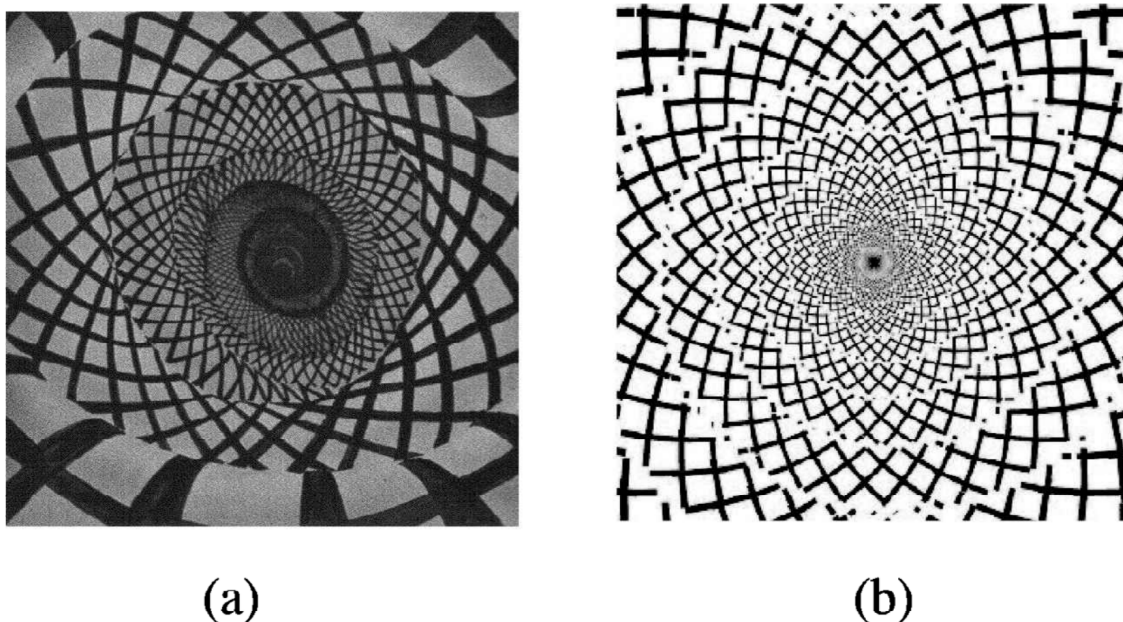


Figure 7: (a) Lattice tunnel hallucination seen following the taking of marijuana (redrawn from Siegel & Jarvik, 1975), with the permission of Alan D. Iselin. (b) Simulation of the lattice tunnel generated by an even hexagonal roll pattern on a square lattice.

Figure 12: Modèles d'hallucination Modèles d'hallucination sous drogues: une modélisation mathématique permet de prédire leur forme.

🔗 Pour aller plus loin ...

Dans cette direction, peut-on étendre cette méthodologie à la dynamique présente dans certaines illusions, comme celle du « Point-Ligne » ? En effet, en présentant un simple point puis une ligne on induit une perception d'une expansion du point pour « remplir » la ligne (un mouvement dit Phi). L'originalité de l'étude de Jancke et collègues est d'utiliser une technique d'imagerie qui permet d'enregistrer l'activité sur le cortex visuel primaire (ici du chat anesthésié) lors de la présentation de

cette illusion d'optique. À noter qu'en comparant l'activité produite par les deux éléments présentés séparément ou conjointement, on met en évidence une activité différentielle qui est caractéristique de la perception de cette illusion. Une même méthodologie permet de mettre en évidence un mécanisme original. Pour cela on utilise cette fois une illusion encore plus simple qui consiste à montrer un point à une position de l'espace visuel puis un autre point exactement similaire mais à une distance proche (mais supérieure à la taille de ce point). On perçoit alors un et un seul point qui se déplace de la première à la seconde position. Au niveau des enregistrements (cette fois chez le macaque) la réponse différentielle montre que relativement à un traitement indépendant des deux points, il existe une vague d'activité qui se déplace sur le cortex qui en particulier supprime une partie de l'activité [14]. Une modélisation sur ordinateur a permis de montrer qu'une fonction de cette vague de suppression est de lever les ambiguïtés sur les différents mouvements possibles représentés sur la carte. Dans ce cas particulier, la vague permet de supprimer la représentation d'un mouvement dans le sens, voir Figure 13. Toutefois, beaucoup de questions restent en suspens. Ces résultats montrent le rôle potentiel des vagues d'activité sur la surface du cortex comme un outil potentiel de traitement de l'information et de sa modulation [15]. Ces vagues peuvent en effet induire facilitations ou suppressions dans l'espace et le temps et produire une forme de « calcul » pour représenter au mieux l'image visuelle.

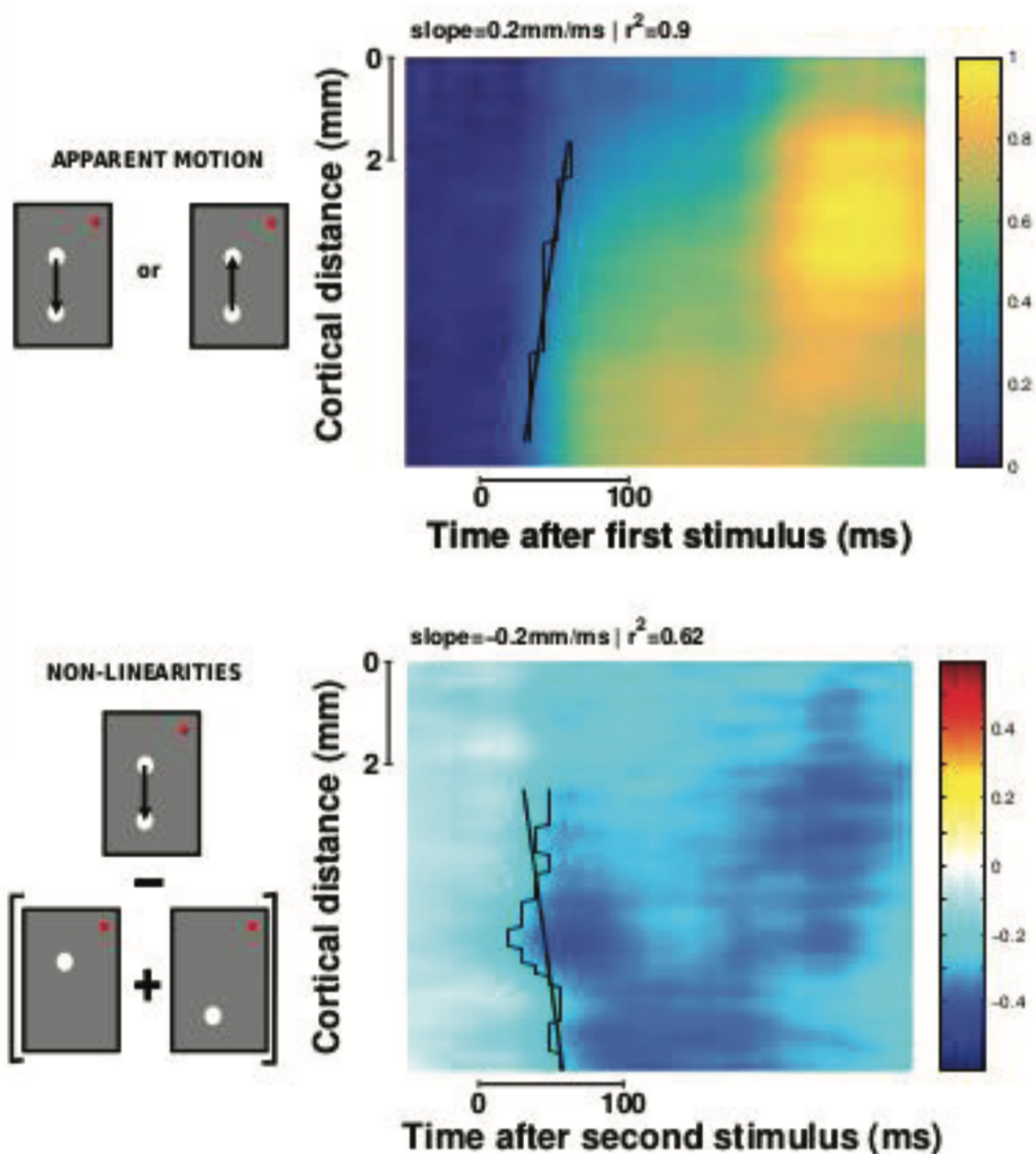


Figure 13: Vagues corticales Des vagues de propagation détectées sur la surface du cortex semblent avoir un rôle fonctionnel pour représenter des informations visuelles.

Remerciements

Mes remerciements à [Aline Richard Zivohlava](#) pour les (nombreuses!) corrections apportées à ce texte.

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](https://doi.org/10.7554/elife.32822) · PMID: [29424689](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29424689/) · PMCID: [PMC5832410](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/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: [10.1038/nbt.3780](https://doi.org/10.1038/nbt.3780) · PMID: [28288103](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28288103/) · PMCID: [PMC6103790](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC6103790/)

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](https://doi.org/10.1038/d41586-019-00447-9) · PMID: [30718888](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/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](https://www.isbn-international.org/product/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 (2020-01-14) <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 (2018-04-04) <https://doi.org/gddkhn>

DOI: [10.1098/rsif.2017.0387](https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0387) · PMID: [29618526](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29618526/) · PMCID: [PMC5938574](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5938574/)

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](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007128) · PMID: [31233491](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31233491/) · PMCID: [PMC6611653](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC6611653/)

9. Ultra-rapid object detection with saccadic eye movements: Visual processing speed revisited

Holle Kirchner, Simon J. Thorpe

Vision Research (2006-05) <https://doi.org/d8gpjq>

DOI: [10.1016/j.visres.2005.10.002](https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.10.002) · PMID: [16289663](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16289663/)

10. The Flash-Lag Effect as a Motion-Based Predictive Shift

Mina A. Khoei, Guillaume S. Masson, Laurent U. Perrinet
PLOS Computational Biology (2017-01-26) <https://doi.org/b2t5>
DOI: [10.1371/journal.pcbi.1005068](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005068) · PMID: [28125585](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28125585/) · PMCID: [PMC5268412](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5268412/)

11. Perceptions as Hypotheses: Saccades as Experiments

Karl Friston, Rick A. Adams, Laurent Perrinet, Michael Breakspear
Frontiers in Psychology (2012) <https://doi.org/gdj5wg>
DOI: [10.3389/fpsyg.2012.00151](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00151) · PMID: [22654776](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22654776/) · PMCID: [PMC3361132](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC3361132/)

12. Smooth Pursuit and Visual Occlusion: Active Inference and Oculomotor Control in Schizophrenia

Rick A. Adams, Laurent U. Perrinet, Karl Friston
PLoS ONE (2012-10-26) <https://doi.org/f4b2g4>
DOI: [10.1371/journal.pone.0047502](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047502) · PMID: [23110076](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23110076/) · PMCID: [PMC3482214](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC3482214/)

13. Geometric visual hallucinations, Euclidean symmetry and the functional architecture of striate cortex

Paul C. Bressloff, Jack D. Cowan, Martin Golubitsky, Peter J. Thomas, Matthew C. Wiener
Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences (2001-03-29) <https://doi.org/cm5ct6>
DOI: [10.1098/rstb.2000.0769](https://doi.org/10.1098/rstb.2000.0769) · PMID: [11316482](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11316482/) · PMCID: [PMC1088430](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC1088430/)

14. Suppressive Traveling Waves Shape Representations of Illusory Motion in Primary Visual Cortex of Awake Primate

Sandrine Chemla, Alexandre Reynaud, Matteo di Volo, Yann Zerlaut, Laurent Perrinet, Alain Destexhe, Frédéric Chavane
The Journal of Neuroscience (2019-05-29) <https://doi.org/gfw8hr>
DOI: [10.1523/jneurosci.2792-18.2019](https://doi.org/10.1523/jneurosci.2792-18.2019) · PMID: [30886010](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30886010/) · PMCID: [PMC6538863](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC6538863/)

15. Cortical travelling waves: mechanisms and computational principles

Lyle Muller, Frédéric Chavane, John Reynolds, Terrence J. Sejnowski
Nature Reviews Neuroscience (2018-03-22) <https://doi.org/gc7dvn>
DOI: [10.1038/nrn.2018.20](https://doi.org/10.1038/nrn.2018.20) · PMID: [29563572](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29563572/) · PMCID: [PMC5933075](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC5933075/)

Conclusion

Pour conclure, les illusions et hallucinations nous ouvrent une porte sur les possibilités de la perception mais aussi sur une compréhension des mécanismes cérébraux qui les induisent. La modélisation, notamment celle que nous proposons, offre une opportunité nouvelle d'appréhender ces mécanismes. Les outils théoriques permettant de progresser dans cette voie de recherche existent mais ne sont pas pour le moment exploités à leur plein potentiel. Ils seront essentiels pour une meilleure compréhension des illusions visuelles, des hallucinations et de ce qui peut la provoquer, mais aussi du cerveau en général.