



L'icosaèdre

Elias Sorel

 ORCID 0009-0003-7980-9944

ce qui s'étage, se lit, résonne

ÉCHELLE

PERCEPTION

RÉSONANCE

« La résonance est ce qui naît quand une échelle se lit. »

TEXTE V4.2 · 08/10/2026 · DÉPOSÉ LE 09/10/2026
DOI.ORG/10.5281/ZENODO.23250209

SOMMAIRE

Seuil	3
THÈSE une question	3
ANTITHÈSE le motif et sa trace	4
SYNTHÈSE la méthode, les mots, la thèse	4
I THÈSE L'échelle	7
§0 La rivière	7
§1 THÈSE chaque échelle a ses lois	8
§2 ANTITHÈSE et pourtant la même forme revient, déplacée	11
§3 SYNTHÈSE l'unité est l'étage où le regard s'arrête	17
♦ <i>Synthèse · La pierre</i>	19
§4 Le mur de l'échelle	20
§5 Le passage	22
♦ Chant I · ÉCHELLE	22
II ANTITHÈSE La perception	23
§0 La rencontre	23
§1 THÈSE lire une trace	24
§2 ANTITHÈSE le lecteur n'est pas neutre	46
§3 SYNTHÈSE lire à la bonne échelle, et lire à deux	54
§4 Le mur de la perception	55
§5 Le passage	56
♦ Chant II · PERCEPTION	56
III SYNTHÈSE La résonance	57
§0 Décrypter ou résonner	57
§1 THÈSE la résonance, mesurée	60
§2 ANTITHÈSE ce qui revient n'est jamais la même chose	65
§3 SYNTHÈSE le même geste résonne d'étage en étage	67
§4 Le mur de la résonance	73
§5 Le passage	74
♦ Chant III · RÉSONANCE	74
La chute	75
THÈSE les faits	75
ANTITHÈSE ce qui s'est détaché	76
SYNTHÈSE le vivant qui se répète	77
Le mur	78
La prédiction	78
Références	80

« Rien n'est unique, tout est multiple. L'unité est la représentation qu'on se fait à son échelle. » (E. Sorel, Metaphysical Stones, 2026)

Seuil

Seuil **THÈSE**
une question

Levez-vous. Vous tenez debout dans un monde qui a votre taille. Vous y comptez en secondes et en mètres, et ce qui tient dans ces mesures vous paraît être le monde. Ce qui est plus petit, vous l'appellez poussière. Ce qui est plus lent, vous l'appellez immobile. Ce qui est plus grand, vous l'appellez paysage.

Ce n'est pas une erreur. C'est un vestige : un corps taillé pour une tranche du réel prend sa tranche pour le tout, parce que c'est la seule qu'il a jamais eue sous les yeux.

Ce texte part d'une question : depuis quelle échelle regardons-nous le vivant ? Je ne dis pas que nous voyons mal. Je dis d'où nous voyons.

Et il tient en une phrase, que tout le reste va mesurer :

« Le vivant est un recommencement à des échelles différentes. » (E. Sorel, 2026)

Ce qui recommence n'est pas une loi. C'est un geste.

le motif et sa trace

La force d'un motif ne prouve pas sa réalité. Une même forme retrouvée à plusieurs étages peut venir d'un même geste du vivant, ou de la façon dont on le regarde. Et de l'intérieur, rien ne distingue les deux : le clic est le même chez celui qui trouve et chez celui qui se trompe.

La réponse n'est pas dedans. Un motif réel laisse une trace hors de celui qui le voit : quelqu'un d'autre, avec un instrument, peut le retrouver sans l'avoir écouté (E. Sorel, *Ce qu'on voit à moitié*, 2026).

Un motif qu'on ne peut pas montrer n'est qu'une histoire (E. Sorel, *Ce qu'on voit à moitié*, 2026).

la méthode, les mots, la thèse

Ma méthode tient en une phrase : voici un fil, voici jusqu'où il tient, voici où il cesse de tenir (E. Sorel, *Ni objet ni repos*, 2026).

Cinq marques traversent le texte :

ÉTABLI ce que dit la science, avec sa source. **DÉBATTU** ce qui est publié mais reste contesté, les deux camps nommés. **HYPOTHÈSE** ce que je propose et qui peut être testé. **LECTURE** mon interprétation des faits. **CALCUL** ce que j'ai refait moi-même, à partir de valeurs publiées.

Six mots portent tout le reste.

L'**échelle** est la fenêtre d'un lecteur : la bande de tailles, de fréquences et de rythmes où il peut lire quelque chose, et ce qu'il a appris à y lire. Elle a deux bords. En dessous, trop petit, trop rapide ou trop faible ; au-dessus, trop grand, trop lent, trop étalé ou trop fort. Entre les deux, son seuil dessine une courbe en U : bas au bon endroit, il remonte sur les deux flancs. Retournée, la même courbe donne l'échelle : son sommet, là où le lecteur lit le mieux. Uexküll appelait Umwelt le monde propre de chaque animal, fait de ce qu'il perçoit et de ce sur quoi il agit (Uexküll, 1934) ; l'échelle en est la part qui se mesure.

La **perception** est la lecture d'une trace. Il y faut un émetteur, un porteur, un décrypteur, et une échelle commune. Si une seule manque, la trace est là, et personne ne la lit.

Le **gabarit** est ce que le décrypteur pose sur la trace pour la lire. Ce n'est pas une clé, qui ouvre ou n'ouvre pas : c'est une forme, à laquelle la trace ressemble plus ou moins. Le code est dans l'individu, le gabarit est dans le lecteur (E. Sorel, 2026).

La résonance est prise au sens physique : un système répond fort à ce qui tombe sur sa fréquence, et presque pas au reste. Elle se mesure, en phase et en rapports simples.

La trace est ce qui reste d'un événement et peut être lu par un autre.

Le support est ce sur quoi tout cela s'écrit. Tout ce qui est a un support (E. Sorel, 2026). Le support n'est pas un sol immobile ; c'est une étoffe, la page sous l'équation.

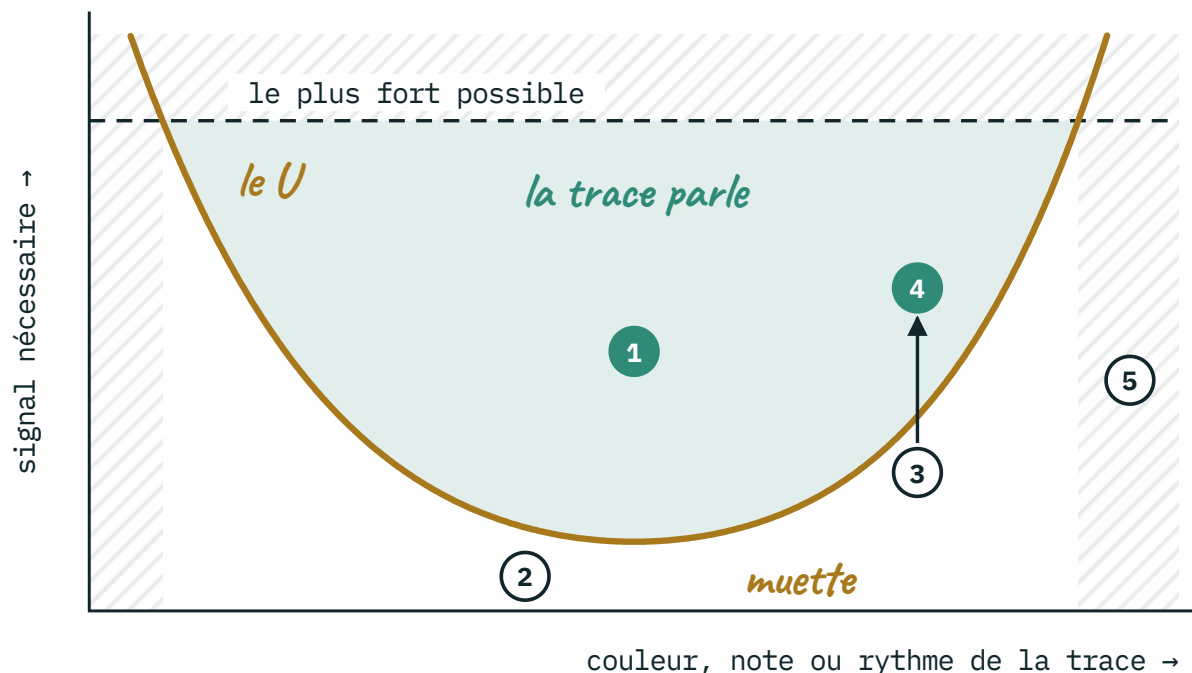
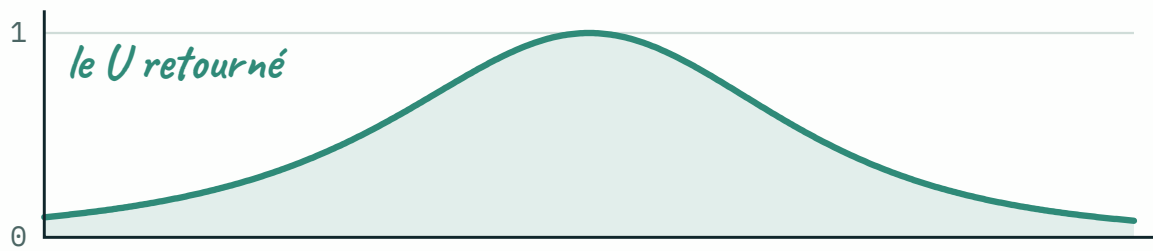


Fig. 1 · Le seuil d'un canal (schéma)

Pour chaque couleur, note ou rythme, le signal le plus faible que le lecteur peut lire. Bas au bon endroit, il remonte sur les deux flancs.

- 1 Le bon canal, assez fort : au-dessus du U, la trace se lit.
- 2 Le bon canal, trop faible : sous le U, muette.
- 3 Presque le bon rythme, même force : sur le flanc, sous le U. Muette.
- 4 Sur le flanc, il faut une trace bien plus forte pour passer.
- 5 Au-delà du possible : le U dépasse la trace la plus forte qui puisse exister. Muette sans outil, comme la corde à 82 Hz pour l'humain (Fig. 5). Avec des bords nets, l'humain voit encore un clignotement à 500 Hz (Davis et al. 2015).



même axe que la Fig. 1 →

Fig. 2 · Le U retourné, c'est l'échelle

échelle(f) = seuil le plus bas ÷ seuil(f) : **1** au fond du U, presque **0** sur ses flancs. Le U ne casse pas le produit des pièces : il donne sa forme à la pièce échelle(f) (E. Sorel, 2026).

LA PHRASE DE L'ICOSAÈDRE ✧

« La résonance est ce qui naît
quand une échelle se lit. »

HYPOTHÈSE. Lire une trace, en une ligne :

L'ÉQUATION ✧ HYPOTHÈSE

$$P(\text{lire}) = \Phi\left(\frac{\sqrt{T} \cdot s \cdot G}{\sqrt{(\sigma_{\text{dehors}})^2 + (\sigma_{\text{dedans}} \div G)^2}} - \text{critère} \right)$$

$$G = \text{porteur} \times \text{déchrypteur} \times \text{échelle}(f)$$

s, la trace émise : elle porte l'unité. Porteur, déchrypteur et échelle(f) restent entre 0 et 1 ; leur produit, c'est G. T, le temps de pose (Berg et Purcell, 1977). σ dehors, le bruit qui voyage avec la trace ; σ dedans, celui du lecteur, qui compte divisé par G (Friis, 1944). Le critère, la place où le lecteur pose son seuil ; Φ , la courbe en S de la détection du signal (Tanner et Swets, 1954).

(E. Sorel, 2026)

L'ÉCHELLE

chaque vivant vit à son échelle, et la même forme revient à toutes

« Le un est toujours une multitude regardée de loin. Il n'y a pas de fond simple : c'est du multiple à tous les étages, et l'unité n'est que l'étage où le regard s'arrête. » (E. Sorel, Metaphysical Stones, 2026)

La rivière

Une rivière, c'est une rivière. Descendez-la. Prenez une bouée, ou nagez : l'eau vous porte, et vous appelez ça une rivière. Elle a un débit, une pente, une température. Vous l'avez mesurée. Vous croyez la connaître.

Maintenant regardez qui la descend avec vous. Personne. Le poisson la remonte. La souris s'y noie si le courant la prend. L'éléphant la traverse à gué, et le crocodile y attend, immobile, le nez à la surface. La bactérie, dans la même eau, la descend mieux que vous : elle va exactement où va l'eau, à la vitesse de l'eau, et c'est pour cela qu'elle ne sent rien. Elle nage à **30** micromètres par seconde dans une eau qui avance à **1** mètre par seconde. Pour elle, il n'y a pas de courant. Il n'y a que de l'eau qui colle, et le cisaillement, l'écart de vitesse entre ses deux bords, qui la fait tourner.

Une seule rivière. Personne ne descend la même.

LECTURE. Pour moi, l'échelle est première. Elle vient avant la perception, avant la mémoire, avant tout ce qu'on peut dire d'un vivant. Avant de savoir ce qu'il voit, il faut savoir à quelle taille il vit. Et la rivière m'apprend autre chose. Je vois la formation du vivant comme celle du lit d'une rivière (E. Sorel, 2026). L'eau creuse le lit, et le lit guide l'eau. Aucun des deux ne vient d'abord : chacun fait l'autre, un peu plus bas, un peu plus loin.

Le monde est en pente, la lecture en degrés, et chaque étage creuse le lit du suivant (E. Sorel, 2026).

chaque échelle a ses lois

ÉTABLI. La façon dont un corps se déplace dans un fluide se résume par un seul nombre, le nombre de Reynolds : le rapport entre l'élan qui porte et la viscosité qui retient. Pour une bactérie qui nage, il vaut de l'ordre de **0,0001** ; pour un poisson, de l'ordre de **100** ; pour un humain qui nage, de l'ordre de **10 000**. En dessous de **1**, l'inertie ne compte plus : si la bactérie cesse de pousser, elle s'arrête par rapport à l'eau qui la porte, après avoir glissé d'à peine **0,1** Å, moins que la largeur d'un atome. L'eau, elle, continue d'aller où elle va, et l'emporte.

Purcell E.M. (1977), Am. J. Phys. 45, 3-11. doi.org/10.1119/1.10903

ÉTABLI. Elle ne sent pas le courant ; son cisaillement la tourne. Dans un écoulement où la vitesse change d'un bord à l'autre, *Bacillus subtilis* dérive en travers des lignes de courant : le gradient de vitesse et l'hélice de son flagelle font ensemble un couple qui la tourne. C'est « a purely physical phenomenon » (un phénomène purement physique), sans capteur, qui vaut aussi loin des parois, et qui peut gêner la chimiotaxie.

Marcos, Fu H.C., Powers T.R. & Stocker R. (2012), PNAS 109, 4780-4785.
doi.org/10.1073/pnas.1120955109

ÉTABLI. Un humain qui sort de son bain emporte sur sa peau un film d'eau d'environ **0,5 mm**, à peu près **450** g : il ne le sent pas. Une souris mouillée porte à peu près son propre poids d'eau. Une mouche, une fois mouillée, risque de le rester jusqu'à s'y noyer. La surface croît comme le carré de la taille, le volume comme son cube : à chaque étage, ce n'est plus la même force qui commande.

Haldane J.B.S. (1926), « On being the right size » (Être de la bonne taille), Harper's Magazine 152, 424-427.

ÉTABLI. Le métabolisme lui-même change de loi en changeant d'étage. Il croît avec la masse « superlinearly in prokaryotes, linearly in protists, and sublinearly in metazoans » (de façon superlinéaire chez les procaryotes, linéaire chez les protistes, et sous-linéaire chez les métazoaires) : plus vite que la masse chez les bactéries, au même rythme chez les cellules à noyau isolées, moins vite chez les animaux. La loi des 3/4 ne s'applique pas à tous les vivants.

DeLong J.P. et al. (2010), PNAS 107, 12941-12945. doi.org/10.1073/pnas.1007783107

ÉTABLI. Au-delà d'une certaine taille, la diffusion seule ne suffit plus à nourrir un corps. Les organismes multicellulaires complexes n'existent que dans **6** groupes : les animaux, les plantes terrestres, les algues rouges floridéophycées, les grandes algues brunes, et **2** groupes de champignons. Tous ont des canaux entre leurs cellules et des tissus de transport, qui permettent de dépasser « the physical limitations of diffusion » (les limites physiques de la diffusion).

Knoll A.H. (2011), Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 39, 217-239.
doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100209

DÉBATTU. Quelle loi relie la masse et le métabolisme, chez les mammifères et les oiseaux ? Pour West, Brown et Enquist, l'exposant vaut $3/4$, et il vient de la géométrie des réseaux de tubes qui remplissent le corps. Pour Dodds, Rothman et Weitz, qui reprennent les mêmes jeux de données, il y a « little evidence for rejecting $\alpha = 2/3$ » (peu d'éléments pour rejeter $\alpha = 2/3$), l'exposant qu'on attend de la simple géométrie des surfaces.

West G.B., Brown J.H. & Enquist B.J. (1997), Science 276, 122-126.
doi.org/10.1126/science.276.5309.122 ; Dodds P.S., Rothman D.H. & Weitz J.S. (2001), J. Theor. Biol. 209, 9-27. doi.org/10.1006/jtbi.2000.2238

CALCUL. Ce qui fixe la loi qui commande, c'est un rapport, pris à la taille du corps. Une goutte d'eau est tirée vers le rond par sa tension de surface, et vers le plat par la gravité. L'équilibre des deux tombe à une taille, $\sqrt{(tension / (densité \times g))}$: environ **2,7 mm** pour l'eau. En dessous, la goutte reste ronde ; au-dessus, elle s'étale en flaque.

ÉTABLI. Le gerris vit en dessous. Long d'environ **1 cm**, il pèse **10** dynes, et son poids est porté par la tension de surface. Pour avancer, il ne fait pas de vagues : ses pattes lâchent dans l'eau des tourbillons en demi-sphère. On l'avait cru, et les petits gerris, trop lents pour faire des vagues, avançaient quand même : c'était le « paradoxe de Denny ».

Hu D.L., Chan B. & Bush J.W.M. (2003), Nature 424, 663-666. doi.org/10.1038/nature01793

C'est ta taille qui fixe ta loi (E. Sorel, 2026). Et quand deux lois s'équilibrent à ta taille, aucune ne gouverne seule : le gerris se tient par l'une et avance par l'autre.

CALCUL. La Lune tire plus fort sur le côté de la Terre qui lui fait face que sur l'autre, et cet écart grandit avec la taille de ce qu'elle tire : il vaut **2** $\times G \times M \times L / d^3$, pour un corps de taille L à la distance d . Sur le rayon de la Terre, il fait environ **$1,1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$** , et il soulève les océans. Sur un humain de **2 m**, il tombe à **$3,5 \times 10^{-13} \text{ m/s}^2$** , environ **30 000** milliards de fois moins que la pesanteur qui le tient debout. La même Lune, la même loi : à la taille de la Terre, elle fait les marées ; à la nôtre, cet écart ne tire presque rien de notre corps. Le moucheron *Clunio*, en troisième partie, ne sent pas cet écart sur son corps. Il lit ce que cet écart a fait à la taille de la Terre : la marée.

DÉBATTU. La Lune peut encore nous atteindre par un autre porteur : sa lumière. Pour : en laboratoire, sans fenêtre ni horloge, le sommeil profond baisse d'environ **30 %** autour de la pleine lune, et la nuit perd **20** minutes de sommeil. Sur le terrain, chez les Toba/Qom d'Argentine, avec ou sans électricité, comme dans une grande ville des États-Unis, on s'endort plus tard et on dort moins les nuits qui précèdent la pleine lune. À Uppsala, sur **852** dormeurs, le sommeil est plus court quand la Lune croît, surtout chez les hommes. Les cycles menstruels de femmes suivies pendant des années se sont calés, par moments, sur la Lune, et ce calage a faibli après 2010 ; les auteurs y voient l'effet de la lumière artificielle de la nuit. Chez **17** patients bipolaires à cycles rapides, l'humeur suivait des cycles de marée lunaire. Contre : sur **2 097** nuits de **1 265** dormeurs, aucun lien, et des données jamais publiées, plus de **20 000** nuits, n'en montraient pas non plus ; sur **2 125** personnes enregistrées chez elles, aucun effet. Les naissances ne suivent pas la Lune : rien sur **564 039** naissances en Caroline du Nord, rien sur le taux de naissances ni sur la santé des nouveau-nés parmi **462 947** naissances en Autriche, avec seulement une tendance à la limite, $p = 0,05$, sur la durée maximale du travail la nuit : **62**, **65** et **70** heures en nouvelle lune, pleine lune et autres phases. Les séjours en psychiatrie non plus : rien sur **17 966** cas.

Cajochen C. et al. (2013), Curr. Biol. 23, 1485-1488. doi.org/10.1016/j.cub.2013.06.029 ; Casiraghi L. et al. (2021), Sci. Adv. 7, eabe0465. doi.org/10.1126/sciadv.abe0465 ; Benedict C. et al. (2021), Sci. Total Environ. 804, 150222. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150222 ; Helfrich-Förster C. et al. (2021), Sci. Adv. 7, eabe1358. doi.org/10.1126/sciadv.abe1358 ; Helfrich-Förster C. et al. (2025), Sci. Adv. 11, eadw4096. doi.org/10.1126/sciadv.adw4096 ; Wehr T.A. (2018), Mol. Psychiatry 23, 923-931. doi.org/10.1038/mp.2016.263 ; Cordi M. et al. (2014), Curr. Biol. 24, R549-R550. doi.org/10.1016/j.cub.2014.05.017 ; Haba-Rubio J. et al. (2015), Sleep Med. 16, 1321-1326. doi.org/10.1016/j.sleep.2015.08.002 ; Arliss J.M., Kaplan E.N. & Galvin S.L. (2005), Am. J. Obstet. Gynecol. 192, 1462-1464. doi.org/10.1016/j.ajog.2004.12.034 ; Windsperger K. et al. (2026), Birth 53, 192-200. doi.org/10.1111/birt.70013 ; Gupta R. et al. (2019), Swiss Med. Wkly 149, w20070. doi.org/10.4414/smw.2019.20070

LECTURE. Si la Lune nous lit encore, c'est par son clair : elle ne fait pas de lumière, elle renvoie celle du Soleil, plus ou moins selon ses phases, et la nuit électrique est un bruit du dehors qui la couvre. Pour certains auteurs, les cycles menstruels se caleraient surtout en janvier, quand les forces de marée sont les plus fortes ; mais sur un corps de notre taille, l'écart de pesanteur reste celui du calcul, et l'on ne connaît pas de capteur qui le lirait.

LECTURE. Chaque échelle a plusieurs lois, et le vivant s'adapte entre elles (E. Sorel, 2026). Quelle que soit la valeur qu'on donne à l'exposant chez les mammifères, la loi du métabolisme change de forme en changeant d'étage : elle monte plus vite que la masse chez les bactéries, et moins vite chez les animaux. C'est pour cela que ma thèse ne porte pas sur les lois. Les lois, je les mets de côté. C'est le process qui m'intéresse. Comparer les lois de deux étages différents, c'est regarder un étage trop bas.

LECTURE. Une loi découle de son échelle : une molécule seule n'a pas de température, la température naît du nombre. Mais l'échelle, elle, découle souvent d'une loi de l'étage d'en dessous : la tension et la gravité fixent les **2,7 mm** de la goutte, et la mécanique quantique fixe la taille de l'atome, environ **0,053 nm**, sur laquelle toute la chimie est bâtie. Les deux flèches alternent, comme l'eau et le lit. C'est cette alternance qui recommence, pas les lois qu'elle fait naître.

Ta taille fixe ta loi. Une loi d'en dessous a fixé ta taille (E. Sorel, 2026).

I §2 **ANTITHÈSE**

et pourtant la même forme revient, déplacée

Si chaque étage a ses lois, chaque étage devrait avoir ses formes. Ce n'est pas ce qu'on trouve.

ÉTABLI. On a mesuré, chez au moins **9** espèces dont l'humain, la courbe qui dit à quelle finesse de motif un œil est le plus sensible : la fonction de sensibilité au contraste, que Campbell et Robson ont rendue classique chez l'humain en 1968. Chez presque toutes, elle a la même forme, un U renversé, et sa largeur varie de moins d'une octave. La différence principale entre ces bêtes est la place de la courbe sur l'axe des fréquences.

Campbell F.W. & Robson J.G. (1968), J. Physiol. 197, 551-566.

doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008574 ; Uhlrich D.J., Essock E.A. & Lehmkuhle S. (1981), Behav. Brain Res. 2, 291-299. doi.org/10.1016/0166-4328(81)90013-9

ÉTABLI. L'éléphant entend de **17 Hz** à **10,5 kHz**. Sa limite aiguë est plus basse que la nôtre, et elle suit la même règle que chez les autres mammifères : plus les deux oreilles sont écartées, plus le bord aigu descend.

Heffner R. & Heffner H. (1980), Science 208, 518-520. doi.org/10.1126/science.7367876

ÉTABLI. Et il entend par le sol. À un point d'eau de Namibie, on a fait passer par le sol seul, sans rien dans l'air, des cris d'alarme d'éléphants : **11** troupeaux se sont resserrés ($p = 0,026$), se sont tournés du même côté ($p = 0,005$) et ont quitté l'eau plus tôt que **16** troupeaux témoins ($p = 0,009$). Quand le cri vient d'un troupeau familier, ils réagissent ($p = 0,004$) ; venu d'un troupeau inconnu, ils ne réagissent pas.

O'Connell-Rodwell C.E. et al. (2006), Behav. Ecol. Sociobiol. 59, 842-850.

doi.org/10.1007/s00265-005-0136-2 ; O'Connell-Rodwell C.E. et al. (2007), J. Acoust. Soc. Am. 122, 823-830. doi.org/10.1121/1.2747161

ÉTABLI. Le temps a aussi sa fenêtre. La fréquence à laquelle une lumière qui clignote paraît continue mesure la vitesse de lecture de l'œil. Comparée chez de nombreux vertébrés, elle est plus haute chez les petits et chez ceux dont le métabolisme est rapide : un petit corps vit dans un temps plus fin.

Healy K. et al. (2013), Anim. Behav. 86, 685-696. doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.06.018

ÉTABLI. Le toucher de la peau humaine passe par 4 canaux, chacun avec sa propre courbe, qui se chevauchent et couvrent ensemble les vibrations d'au moins 0,4 Hz à plus de 500 Hz.

Bolanowski S.J. et al. (1988), J. Acoust. Soc. Am. 84, 1680-1694. doi.org/10.1121/1.397184

LECTURE. *Ce que je vois dans les canaux, ce n'est pas des cases. C'est un gradient, une courbe en U, posée à des places différentes.*

Tableau 1 · Les U de quelques lecteurs (ÉTABLI, chaque ligne sourcée)

Lecteur	Canal	Où il lit	Source
Humain	la vue, dans le temps	fusion du clignotement vers 50 à 90 Hz ; au-delà de 500 Hz quand l'image a des bords nets	Mankowska et al. 2021 ; Davis, Hsieh & Lee 2015
Mouche bleue (<i>Calliphora</i>)	la vue, dans le temps	fusion vers 240 à 265 Hz, selon la mesure	Inger et al. 2014 ; Autrum 1958
Mouche domestique	la vue, dans le temps	environ 230 Hz, poussés vers 1 000 Hz pendant ses saccades	Mansour et al. 2026
Mouche du vinaigre (<i>Drosophila hydei</i>)	la vue, dans le temps	fusion vers 80 Hz	Inger et al. 2014
Humain	l'oreille	de 20 Hz à 20 kHz environ, le creux entre 3 500 et 4 000 Hz	courbes d'audition classiques
Éléphant	l'oreille	de 17 Hz à 10,5 kHz	Heffner & Heffner 1980
Humain	la peau	d'au moins 0,4 Hz à plus de 500 Hz ; le canal de Pacini, de 65 à 400 Hz, creux vers 250 Hz	Bolanowski et al. 1988 ; Makous et al. 1995
Crocodile	les dômes de la face	environ 4 000 dômes chez l'alligator, 9 000 chez le crocodile du Nil ; seuil médian 0,08 mN ; certaines fibres au mieux entre 20 et 35 Hz, les rides d'une proie	Leitch & Catania 2012
Chouette effraie	le nerf auditif, en phase	calé sur la phase jusqu'à 10 kHz	Köppl 1997
Araignée (<i>Nephila</i>)	la toile	proies piégées entre 5 et 30 Hz ; amplitudes étalées sur 50 dB	Landolf & Barth 1996

Leurs hauteurs ne se comparent pas d'une ligne à l'autre : chaque canal a son unité de seuil. Ce qui se compare, c'est la place du creux. Pour l'oreille de nombreux vertébrés, le recueil de référence est celui de Fay (1988).

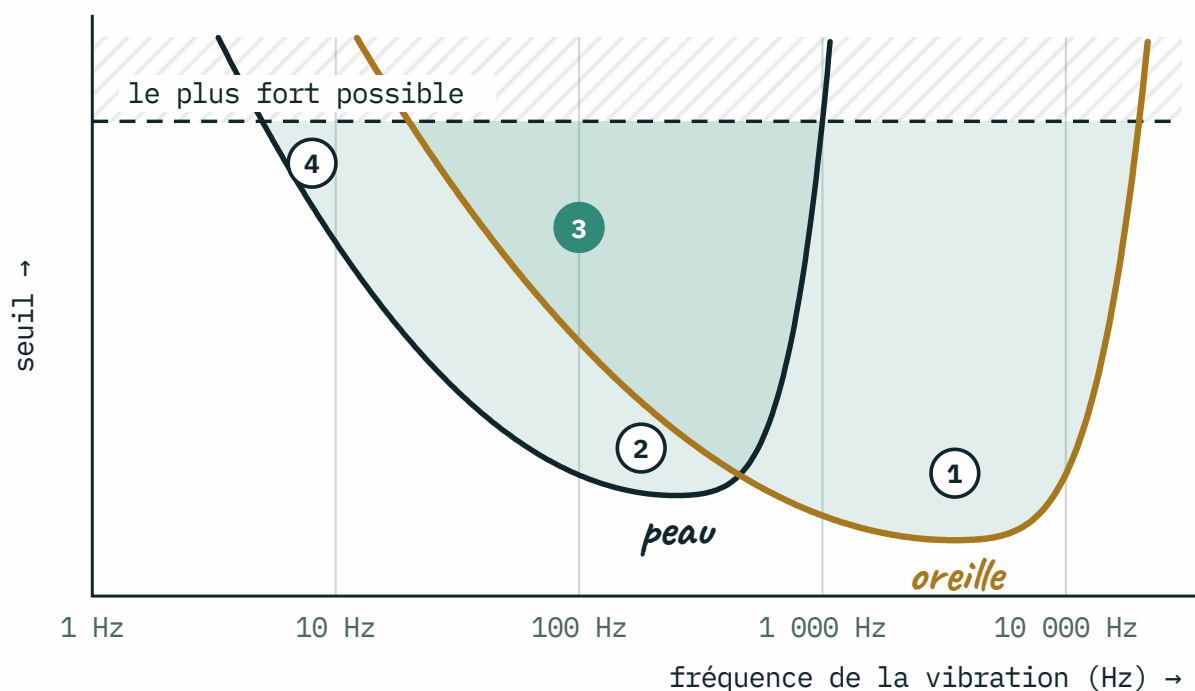


Fig. 3 · L'oreille et la peau, sur le même axe (schéma)

Les deux U n'ont pas la même unité de seuil : leurs hauteurs ne se comparent pas. Ce qui se compare, c'est la place du creux.

- ① L'oreille : de **20 Hz** à **20 kHz** environ ; creux entre **3 500** et **4 000 Hz**, la résonance de son conduit de **2,4 cm**.
- ② La peau : creux vers **250 Hz**, le canal de Pacini, de **65** à **400 Hz** (Makous et al. 1995).
- ③ Là où les deux U se chevauchent, oreille et doigt s'additionnent : tout droit si leurs fréquences sont proches, en racine des carrés si elles s'écartent ; la phase n'y change rien (Wilson et al. 2009, 2010).
- ④ Sous **20 Hz**, le U de l'oreille monte en flèche sans faire mur : le son cesse d'être un ton, et sous **10 Hz** on perçoit chaque cycle si le niveau est assez fort (Møller et Pedersen 2004). La peau lit jusqu'à **0,4 Hz** (Bolanowski et al. 1988).

Le tableau range les U sur l'axe des fréquences. Sur l'axe de l'intensité, chaque lecteur a aussi sa fenêtre : un plancher, où le bruit couvre la trace, et un plafond, où il sature. Le plafond se mesure dès la bactérie.

ÉTABLI. Chez *E. coli*, la chimiotaxie a sa plage : elle commence à une concentration seuil et s'arrête à une concentration qui sature. Au milieu de cette plage, la bactérie répond à des rapports, pas à des différences : la même hausse en proportion donne une réponse de même taille. Pour certains attractants, cette loi de Weber tient sur une large gamme ; pour d'autres, non. La réponse culmine au centre de la plage, et chaque récepteur a la sienne : deux attractants lus par le même récepteur peuvent avoir leurs plages à des endroits très différents.

Mesibov R., Ordal G.W. & Adler J. (1973), *J. Gen. Physiol.* 62, 203-223.
doi.org/10.1085/jgp.62.2.203

ÉTABLI. Un mammifère entend sur une plage immense de niveaux sonores, mais chaque neurone n'en couvre qu'un morceau : sa réponse ne monte avec le niveau que sur « only a very limited portion of the full range of hearing » (une part très limitée seulement de toute l'étendue de l'audition). Dans le mésencéphale auditif du cobaye, les neurones ajustent leur réponse à la moyenne et à la variance des niveaux qu'ils entendent, et la population lit plus juste près des niveaux les plus fréquents.

Dean I., Harper N.S. & McAlpine D. (2005), *Nat. Neurosci.* 8, 1684-1689. doi.org/10.1038/nn1541

ÉTABLI. Chez la mouche, la courbe de réponse des premiers interneurons de l'œil, juste après les photorécepteurs, « approximates to the cumulative probability distribution of contrast levels in natural scenes » (s'approche de la distribution de probabilité cumulée des niveaux de contraste dans les scènes naturelles) : elle a la forme de ce que la mouche voit d'habitude. Cet accord lui fait coder les écarts de contraste de la façon la plus efficace.

Laughlin S. (1981), *Z. Naturforsch. C* 36, 910-912. doi.org/10.1515/znc-1981-9-1040

ÉTABLI. Et la courbe bouge. Chez la mouche encore, quand la plage des signaux change, la relation entre ce qui entre et ce qui sort se remet à l'échelle, « so as to match the dynamic range of responses to that of the inputs » (de façon à accorder la plage des réponses à celle des entrées), et cette mise à l'échelle donne le plus d'information pour chaque distribution de signaux. Le recalage joue sur des durées qui vont de quelques dizaines de millisecondes à plusieurs minutes, et sa vitesse approche la limite physique que fixent l'échantillonnage et le bruit.

Brenner N., Bialek W. & de Ruyter van Steveninck R. (2000), *Neuron* 26, 695-702.
[doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)81205-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(00)81205-2) ; Fairhall A.L. et al. (2001), *Nature* 412, 787-792.
doi.org/10.1038/35090500

ÉTABLI. La bactérie se recale aussi. Le réseau qui guide *E. coli* répond à la forme du signal, « irrespective of its absolute intensity » (quelle que soit son intensité absolue), et son temps d'adaptation reste le même sur une plage d'environ **10 000** fois de concentrations de fond. Les auteurs ouvrent leur article sur ce constat : les systèmes sensoriels se recalent selon des stratégies simples « that recur in processes as diverse as single-cell signaling, neural network responses, and whole-organism perception » (qui reviennent dans des processus aussi divers que la signalisation d'une seule cellule, les réponses des réseaux de neurones et la perception d'un organisme entier).

Lazova M.D. et al. (2011), PNAS 108, 13870-13875. doi.org/10.1073/pnas.1108608108

ÉTABLI. La même théorie des réseaux rend compte des lois de taille du vivant et de celles des bassins de rivière : les relations entre taille et débit viennent des propriétés générales de tout réseau qui dessert un volume, quelle que soit sa matière.

Banavar J.R., Maritan A. & Rinaldo A. (1999), Nature 399, 130-132. doi.org/10.1038/20144

ÉTABLI. Les réseaux de rivières atteignent leurs formes « through imperfect searches » (par des recherches imparfaites), et ces formes partagent les mêmes traits statistiques sur une large gamme d'échelles, quels que soient la roche, la végétation ou le climat.

Rinaldo A. et al. (2014), PNAS 111, 2417-2424. doi.org/10.1073/pnas.1322700111

La même forme partout, et personne ne l'a copiée : elle s'impose (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Pando, dans l'Utah, est un seul tremble. Ses troncs, environ **47 000**, couvrent **43** hectares, et ils partagent le même génome et la même racine. Son âge est estimé entre **12 000** et **37 000 ans**.

Rogers P.C. & McAvoy D.J. (2018), PLoS One 13, e0203619. doi.org/10.1371/journal.pone.0203619 ; Pineau R.M. et al. (2026), bioRxiv, version 5 de février 2026, même fourchette depuis la version 1 d'octobre 2024. doi.org/10.1101/2024.10.19.619233

Pour voir un seul être dans Pando, il faudrait un décrypteur réglé sur son temps (E. Sorel, 2026). À notre horloge, nous voyons une forêt. Le blob, lui, décide en heures, sans personne pour décider, et paraît inerte à notre horloge. Nous ne sommes pas la mesure du vivant. Sans le savoir, nous le lisons à notre horloge (E. Sorel, 2026).

DÉBATTU. La forme ne recommence pas toujours entière. Dans les nervures des feuilles, certaines propriétés suivent une échelle caractéristique, d'autres suivent une loi sans échelle : les réseaux de feuilles sont « neither entirely scale-free nor governed entirely by a characteristic scale » (ni entièrement sans échelle, ni entièrement gouvernés par une échelle caractéristique).

Price C.A., Wing S. & Weitz J.S. (2012), Ecol. Lett. 15, 87-95. doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01712.x

La forme revient. Pas toujours entière (E. Sorel, 2026).

l'unité est l'étage où le regard s'arrête

La loi change d'un étage à l'autre. La forme, elle, revient. Ces deux faits ne se contredisent pas, si ce qui recommence n'est pas une loi mais un geste : une courbe qui se pose ailleurs, un réseau qui se dessine dans une autre matière.

Une courbe qui se pose ailleurs, mais pas n'importe où. Chez la mouche et le cobaye, elle se pose sur ce que le lecteur rencontre le plus ; chez la bactérie, elle se recalcule sur le fond où elle nage. Et dans les trois cas, elle glisse quand le monde change.

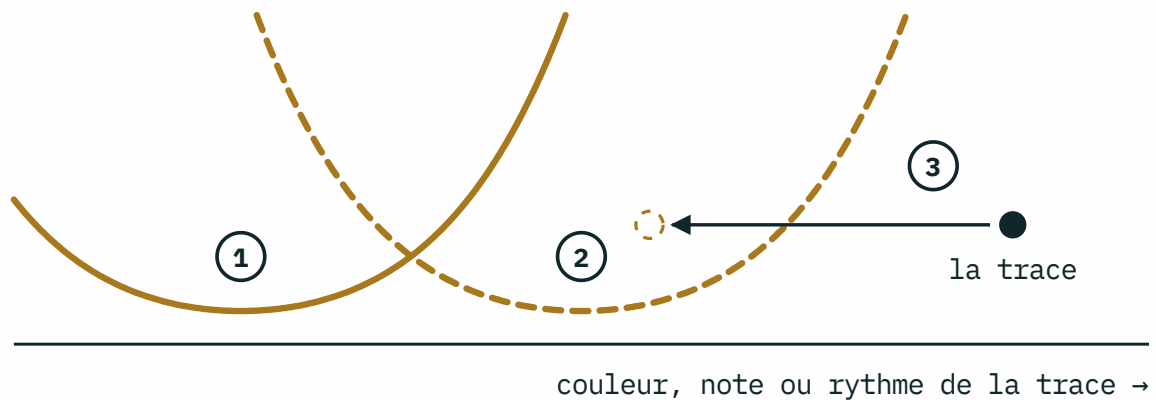


Fig. 4 · Bouger son U, ou bouger la trace (schéma)

- ① Le U, aujourd'hui.
- ② Le même U, déplacé. Par la vie : le têtard du ouaouaron voit avec un pigment à vitamine A2, l'adulte surtout avec la rhodopsine (A1) ; le haut de sa rétine, qui regarde vers l'eau, garde **30** à **40 %** de l'ancien pigment (Reuter, White et Wald 1971 ; l'enzyme, Cyp27c1 : Enright et al. 2015).
- ③ L'outil ne déplace pas le U : il déplace la trace dans le U. Le stroboscope fait battre la corde à quelques hertz ; le détecteur descend le cri des chauves-souris dans l'audible. C'est f qui bouge, pas échelle(f).

LECTURE. Sur l'axe de l'intensité aussi, le seuil dessine un U. Il remonte du côté du faible, où le bruit couvre la trace, et du côté du fort, où le lecteur sature. Ce U n'est pas posé une fois pour toutes : le lecteur fait glisser son creux vers les traces qu'il reçoit d'habitude : leur répartition chez la mouche et le cobaye, leur niveau de fond chez la bactérie. Un réseau de protéines dans une cellule seule, des neurones d'insecte, des neurones de mammifère : trois matières sans rapport, un seul geste. C'est pour cela que la même forme revient déplacée : chaque lecteur la pose sur son monde. Et ce recalage est lui-même une lecture. Pour savoir où mettre son creux, il faut avoir lu assez de traces, et cela prend du temps.

Avant de poser l'hypothèse, je pose l'objection qu'elle appelle, parce qu'un lecteur du domaine la fera dès la ligne suivante : tout cela existe déjà, et porte un nom. C'est vrai. Attneave en 1954, puis Barlow en 1961, ont proposé que la théorie de l'information relie les statistiques du monde aux réponses des neurones : c'est le codage efficace. Simoncelli et Olshausen en font le cadre d'une recherche entière. Wark, Lundstrom et Fairhall y rangent l'adaptation sensorielle. Ce que la mouche fait de ses contrastes et le cobaye de ses décibels est connu, mesuré, et nommé depuis **70 ans**. Si l'hypothèse qui suit s'arrêtait aux neurones, elle n'en serait pas une.

Elle ne s'y arrête pas. Ce qui est à moi tient en deux points, et pas davantage : dire ce geste comme la place du creux d'un U, la même courbe que la première partie a posée chez **9** espèces, pour que l'oreille, l'œil et le récepteur d'une bactérie se lisent sur un seul axe ; et parier que le geste vaut aux étages où personne n'a de neurones, la molécule en bas, le groupe en haut. Barlow a vu le geste là où il regardait. Je propose qu'il se retrouve là où il n'a pas regardé.

HYPOTHÈSE. À chaque étage où il y a un lecteur, le creux de son U, là où il lit le mieux, se pose sur les traces qu'il reçoit d'habitude, et il glisse quand elles changent. L'idée a un nom chez les neurones : le codage efficace. Attneave en 1954, puis Barlow en 1961, ont proposé que la théorie de l'information relie les statistiques du monde aux réponses des neurones ; Simoncelli et Olshausen en font le cadre d'une recherche entière, et Wark, Lundstrom et Fairhall y rangent l'adaptation sensorielle. Ce que je propose en plus tient en deux points : le dire comme la place du creux d'un U, et parier que le geste vaut aussi aux étages sans neurones, de la molécule au groupe. On l'a mesuré chez la bactérie, la mouche et le cobaye ; à l'étage de la molécule, le promoteur de *hunchback*, en deuxième partie, lit son gradient près du maximum que le bruit permet. Elle perd si l'on trouve un lecteur qui, après avoir eu le temps de lire son nouveau monde, garde son creux loin des traces qu'il reçoit, alors qu'aucun de ses planchers connus ne l'y tient : ni la taille qui empêche de lire en bougeant, mesurée par Dusenbery, ni le compte des molécules borné par Berg et Purcell, ni la saturation de ses récepteurs.

Attneave F. (1954), Psychol. Rev. 61, 183-193. doi.org/10.1037/h0054663 ; Barlow H.B. (1961), in Rosenblith W.A. (éd.), Sensory Communication, MIT Press, 217-234 ; Simoncelli E.P. & Olshausen B.A. (2001), Annu. Rev. Neurosci. 24, 1193-1216. doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.1193 ; Wark B., Lundstrom B.N. & Fairhall A. (2007), Curr. Opin. Neurobiol. 17, 423-429. doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.001

Ce que le lecteur appelle « un » dépend aussi de là où il a posé son U.

ÉTABLI. La physalie, que l'œil prend pour une méduse, est un siphonophore : une colonie d'individus spécialisés, les zoïdes, bourgeonnés les uns des autres. Au-dessus de l'eau flotte une poche de gaz, le flotteur, de 8 à 10 cm chez les jeunes : de l'air et du monoxyde de carbone fabriqué par une glande. Une crête la surmonte, que des muscles redressent en y poussant le gaz. Le vent appuie sur cette crête comme sur une voile, et la colonie dérive avec lui en traînant sous l'eau des tentacules qui atteignent 30 m. Certains zoïdes portent les tentacules, d'autres digèrent, d'autres se reproduisent : chacun est un individu, et l'ensemble vit comme un seul animal.

Munro C. et al. (2019), Sci Rep 9, 15522. doi.org/10.1038/s41598-019-51842-1

Pando et la physalie se regardent en miroir. Pando a l'air de plusieurs, et il est un : un génome, une racine. La physalie a l'air d'une, et elle est plusieurs. Dans les deux cas, les deux sont vrais à la fois. Pando est réellement un et réellement 47 000 troncs. La physalie est réellement un animal et réellement une colonie.

LECTURE. L'unité est réelle comme étage, jamais comme fond. Le multiple aussi. Ce qui dépend de l'échelle du lecteur, c'est l'étage qu'il appelle « un ». Rien n'est un ou plusieurs en soi. Ça dépend d'où on coupe (E. Sorel, 2026). Et le blob n'est pas en dessous de nous sur une échelle. Il est à côté (E. Sorel, L'accord sans chef, 2026).

Dans le Diamant, j'écrivais que le un n'est pas dans la substance, il est dans la loi (E. Sorel, *Le Diamant*, 2026). Ici, je monte d'un étage : le un n'est pas dans la loi non plus. Il est dans le process qui recommence.

SYNTHÈSE • LA PIERRE

20 faces triangulaires, 12 sommets, 30 arêtes. Platon, dans le *Timée*, en faisait le solide de l'eau.

ÉTABLI. Dans le bore cristallin, les atomes vont par 12, rangés aux sommets d'un icosaèdre, et ce sont ces icosaèdres qui s'empilent.

Decker B.F. & Kasper J.S. (1959), Acta Cryst. 12, 503-506. doi.org/10.1107/S0365110X59001530

ÉTABLI. En 1952, Frank propose que dans un métal liquide, les atomes se groupent localement par 13, un au centre et 12 autour, en icosaèdre : pour si peu d'atomes, c'est plus stable que l'arrangement du cristal, et cela retarde la cristallisation.

Frank F.C. (1952), Proc. R. Soc. Lond. A 215, 43-46. doi.org/10.1098/rspa.1952.0194

ÉTABLI. En 1982, Shechtman voit dans un alliage d'aluminium et de manganèse une symétrie d'ordre 5, impossible dans un cristal périodique : un quasi-cristal, de symétrie icosaédrique, publié en 1984 et récompensé par le prix Nobel de chimie en 2011.

Shechtman D., Blech I., Gratias D. & Cahn J.W. (1984), Phys. Rev. Lett. 53, 1951-1953. doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1951

ÉTABLI. La coque de la plupart des virus sphériques est un icosaèdre. Caspar et Klug en ont donné la règle en 1962 : des protéines toutes pareilles, au nombre de $60 \times T$, posées en 12 pentamères et des hexamères, avec $T = h^2 + hk + k^2$. La tête du phage HK97 en porte 420, pour $T = 7$.

Caspar D.L.D. & Klug A. (1962), Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol. 27, 1-24.
doi.org/10.1101/SQB.1962.027.001.005 ; Wikoff W.R. et al. (2000), Science 289, 2129-2133.
doi.org/10.1126/science.289.5487.2129

ÉTABLI. Haeckel a dessiné un radiolaire, *Circogonia icosahedra*, une cellule de plancton dont le squelette de silice est un icosaèdre.

Haeckel E. (1904), Kunstformen der Natur, Bibliographisches Institut, Leipzig

20 · 12 ·
30
faces, sommets,
arêtes

12 atomes
par icosaèdre dans
le bore cristallin

5
l'ordre de symétrie
interdit au cristal,
vu par Shechtman

420 protéines
la tête du phage
HK97, $T = 7$

LECTURE. Un cristal, un liquide, un alliage, un virus, une cellule de plancton : 5 étages, aucun mécanisme commun, et la même forme. Personne ne l'a copiée sur personne. Elle revient parce qu'elle est la façon la plus simple de serrer 12 voisins autour d'un seul, ou de fermer une coque avec des pièces toutes pareilles. Pas la même loi : la même forme.

L'icosaèdre ne démontre rien. Il existe, à chaque étage.

I §4

Le mur de l'échelle

ÉTABLI. La taille met des planchers. En dessous d'environ 0,6 micromètre, un microbe qui nage est retourné par l'agitation de l'eau avant d'avoir fini de lire d'où vient un signal : se déplacer ne lui apporte plus rien. Parmi 97 genres de bactéries mobiles, le plus petit mesure en moyenne 0,8 micromètre ; 18 genres immobiles, sur 94, sont plus petits.

Dusenbery D.B. (1997), PNAS 94, 10949-10954. doi.org/10.1073/pnas.94.20.10949

ÉTABLI. Au-dessus de ce plancher, la bactérie qui nage lit en bougeant. Soumise d'un coup à une autre concentration, uniforme, *Salmonella* change sa nage, puis revient peu à peu à son régime de départ. Ce qui ressemble à la lecture d'un gradient dans l'espace est donc « an actual detection of a temporal gradient experienced as a result of movement through space » (la détection réelle d'un gradient dans le temps, ressenti du fait du déplacement dans l'espace) : elle compare un instant au précédent, ce qui suppose une forme de « memory » (mémoire).

Macnab R.M. & Koshland D.E. (1972), PNAS 69, 2509-2512. doi.org/10.1073/pnas.69.9.2509

ÉTABLI. On a longtemps pensé que sa taille lui interdisait de comparer deux points de son corps. Dusenbery a refait le calcul, en cherchant pour chaque façon de lire la plus petite taille qui permet encore de suivre un gradient. Lire dans le temps l'emporte quand la concentration est basse et la pente douce. Mais dans la plupart des conditions où l'on observe la chimiotaxie, c'est lire dans l'espace qui marcherait à la plus petite taille : « microbiologists should be on the lookout for them » (les microbiologistes devraient les guetter).

Dusenbery D.B. (1998), Biophys. J. 74, 2272-2277. doi.org/10.1016/S0006-3495(98)77936-6

LECTURE. *Le mur de la taille est réel. Mais à une même taille, la façon de lire dépend encore du monde lu, de sa pente et de sa concentration. Le mur ne se dessine pas seulement dans le lecteur : il se dessine entre le lecteur et ce qu'il lit.*

Et il y a un autre mur, plus simple. Levin lui donne un nom : chaque soi serait borné par un « cône de lumière cognitif », la surface de ce qu'il peut mesurer et viser.

Levin M. (2019), Front. Psychol. 10, 2688. doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02688

Aucun lecteur ne sort de son étage pour voir les autres d'en haut. Chacun regarde depuis le sien.

Le passage

À chaque étage, quelqu'un lit. Que lit-il, et que lui échappe-t-il ?

✦ Chant I · ÉCHELLE

Nous avons cru, longtemps, que le monde avait notre taille. Que la rivière était la même pour tous, que l'immobile était immobile, que la forêt était faite d'arbres.

Nous lisions à notre taille. La rivière en portait d'autres.

Pour la bactérie, l'eau colle. Pour la mouche, une goutte est un piège. Pour l'éléphant, le sol parle. Et sous la forêt de l'Utah, une seule racine tient 47 000 troncs depuis des millénaires, sans que nos yeux, trop rapides, aient jamais vu un seul être.

Chaque étage a ses lois. Aucun n'a le dernier mot. Ce qui revient d'un étage à l'autre n'est pas une loi, c'est un geste : une courbe qui se pose ailleurs, un réseau qui se dessine dans une autre matière.

Le un est une multitude regardée de loin. Et la multitude est un, regardée de près.

LA PERCEPTION

chaque lecteur ne lit qu'une tranche, à travers son propre gabarit

« *Le visible fait mal lire l'invisible ; l'invisible est dans le visible. »*

(E. Sorel, Metaphysical Stones, 2026)

II §0

La rencontre

Regardez une pente de l'Utah à l'automne. Des milliers de troncs blancs serrés, et toutes les feuilles qui jaunissent d'un coup, sous le même or. Vous y voyez une forêt. J'y ai vu une forêt aussi, avant d'avoir lu sur Pando. Aujourd'hui, je n'arrive plus à y voir autre chose qu'une unité.

Avec la physalie, c'est l'inverse. Celui qui la croise sur une plage voit une méduse. Moi, je ne vois plus qu'une foule, un multiple sous la poche bleue, et je ne sais plus revenir en arrière.

Chaque vivant lit à son échelle, et ce qu'il lit porte la marque de sa façon de lire. Ce qui est perçu n'est jamais le monde nu : c'est une rencontre (E. Sorel, *Le Diamant*, 2026). Dans le Diamant, la rencontre avait trois termes : une source, une onde, un décrypteur. Je reprends l'équation là où je l'avais laissée, et je lui ajoute ce qui manquait : l'échelle, le bruit, le seuil, et le support sur lequel tout s'écrit.

Pando n'a pas bougé. C'est moi qui ai changé de place.

lire une trace

Sans lumière, pas de trace. Sans Terre, pas d'onde sismique. Sans guitare, pas de vibration de la corde. Sans décrypteur, la trace n'est pas décryptable. Et sans échelle commune, le lecteur risque de ne pas avoir le même rythme ni la bonne fréquence (E. Sorel, 2026).

THÈSE • LA CORDE

On pince la corde la plus grave d'une guitare. Elle vibre 82 fois par seconde, et elle a l'air immobile tant elle vibre : on voit un fuseau flou, plus marqué sur ses bords, là où la corde ralentit et passe plus de temps.

Une mouche, posée à côté, verrait-elle la même chose que nous (E. Sorel, 2026) ?

ÉTABLI. Notre œil cesse de voir un clignotement vers 50 à 90 Hz, selon l'éclairement et la taille du champ ; de Lange a tracé en 1958 la courbe de cette fenêtre dans le temps. Celui de la mouche bleue le suit jusqu'à 240 à 265 Hz.

de Lange H. (1958), J. Opt. Soc. Am. 48, 777-784. doi.org/10.1364/JOSA.48.000777 ; Mankowska N.D. et al. (2021), Medicina 57, 1096. doi.org/10.3390/medicina57101096 ; Inger R. et al. (2014), PLoS One 9, e98631. doi.org/10.1371/journal.pone.0098631

CALCUL. À 82 Hz, notre courbe est déjà au-dessus de tout ce qu'une corde peut offrir : nous lisons la moyenne, le fuseau. La mouche bleue est au fond de la sienne : elle suit l'oscillation elle-même. Au milieu du fuseau, la corde passe 2 fois par cycle, et la rétine y reçoit 164 Hz ; la mouche bleue suit encore. La même corde laisse deux traces, selon qui la lit.

ÉTABLI. Toutes les mouches ne se valent pas. Celle du vinaigre *Drosophila hydei* fusionne vers 80 Hz : à 82 Hz, elle est pile à sa limite. Et une mouche ne voit pas la forme de la corde : une corde de 1,2 mm à 30 cm fait 0,22°, quand *Drosophila melanogaster*, sa cousine, a de 4,5 à 5,5° entre deux facettes, et qu'aucun œil composé de taille réaliste ne descend sous 0,24°. Une mouche suit le rythme, pas la forme.

Inger R. et al. (2014), PLoS One 9, e98631. doi.org/10.1371/journal.pone.0098631 ; Currea J.P., Smith J.L. & Theobald J.C. (2018), Vision Res. 149, 1-8. doi.org/10.1016/j.visres.2018.05.007 ; Land M.F. (1997), Annu. Rev. Entomol. 42, 147-177. doi.org/10.1146/annurev.ento.42.1.147

ÉTABLI. La mouche déplace même sa fenêtre en bougeant. Chez la mouche domestique, la limite classique est d'environ 230 Hz ; pendant ses saccades, la première synapse de son œil pousse la bande jusqu'à environ 1 000 Hz.

ÉTABLI. Et dans cette bande, il y a des messages que nous ne voyons pas. Le mâle de *Lucilia sericata* reconnaît une jeune femelle aux éclats de lumière de ses ailes, à 178 Hz, et préfère ce rythme à 212, 235 ou 266 Hz. Pour nous, c'est une lumière fixe.

Eichorn C. et al. (2017), BMC Biol. 15, 2. doi.org/10.1186/s12915-016-0342-6

Un stroboscope réglé près de 82 Hz fait voir la corde onduler au ralenti. L'outil ne déplace pas la fenêtre. Il déplace la trace dedans.

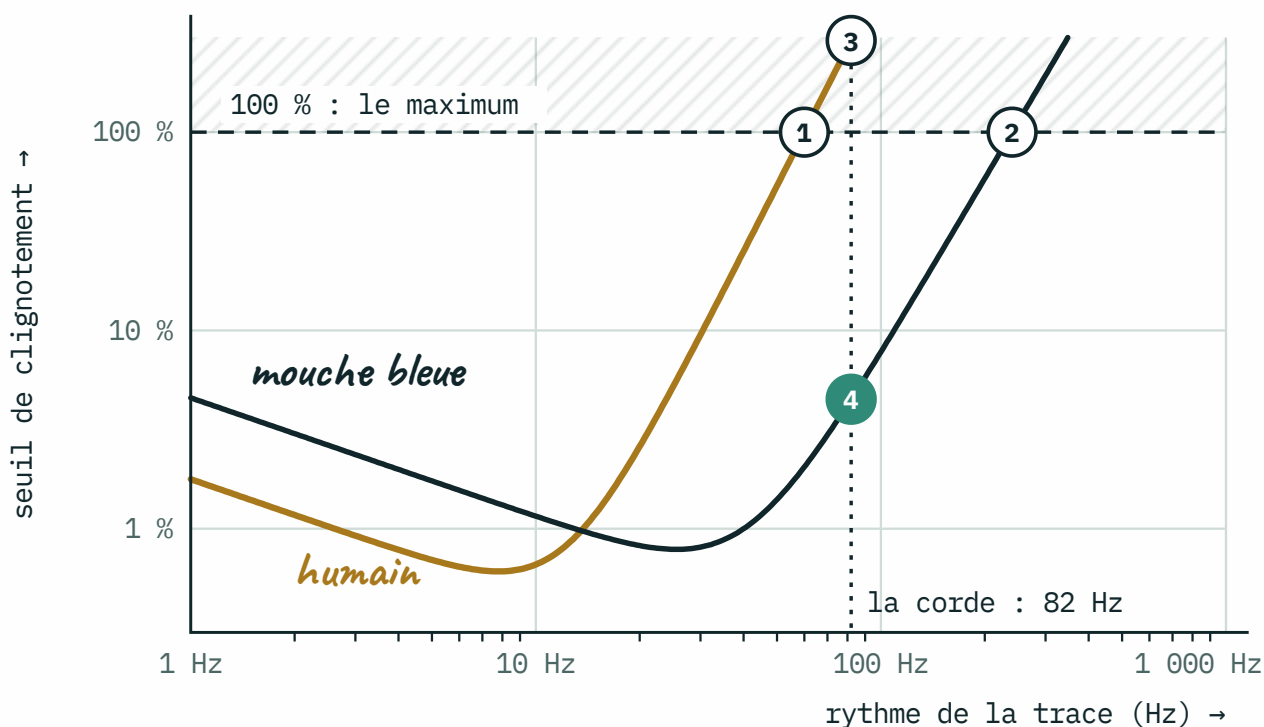


Fig. 5 · La corde, deux lecteurs (schéma)

Les formes des deux courbes sont dessinées pour montrer l'idée. Les deux points de fusion sont des mesures : vers **60 Hz** pour l'humain (**50** à **90 Hz** selon l'éclairement et la taille du champ), **240** à **265 Hz** pour la mouche bleue, *Calliphora* (Davis et al. 2015 ; Inger et al. 2014 ; Autrum 1958). Au-dessus de **100 %**, rien ne peut exister : c'est la zone hachurée.

- ① Humain : son U touche **100 %** vers **60 Hz**, sa fréquence de fusion.
- ② Mouche bleue : son U touche **100 %** vers **240** à **265 Hz** (dessiné à **240**).
- ③ À **82 Hz**, le U humain est déjà au-dessus de **100 %** : aucune corde ne peut le franchir.
- ④ À **82 Hz**, le U de la mouche bleue est bas, quelques % : elle suit le rythme.
- ⑤ Elle suit le rythme, pas la forme : une corde de **1,2 mm** à **30 cm** fait **0,22°**, et aucun œil composé de taille réaliste ne descend sous **0,24°** (Currea et al. 2018 ; Land 1997 ; calcul). L'œil humain, lui, a un U à deux axes, espace et temps, mesuré d'un coup (Kelly 1979).



Ce que lit l'humain La moyenne : le fuseau, plus marqué sur ses bords, là où la corde ralentit et passe plus de temps.



Ce que suit la mouche L'oscillation elle-même ($82 < 240$), ralentie ici environ 70 fois pour nos yeux.

THÈSE • LES QUATRE PIÈCES

Une trace se lit avec quatre pièces, et chacune a son zéro.

ÉTABLI. Le décrypteur. Le calcium est le messager le plus répandu de la cellule, et il ne déclenche rien seul : il agit par une boîte à outils de capteurs, de canaux et de pompes, que chaque type de cellule assemble à sa façon, « mixed and matched » (mélangés et assortis). Le même ion produit des effets différents selon ce qui le reçoit.

Berridge M.J., Lipp P. & Bootman M.D. (2000), Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 1, 11-21.
doi.org/10.1038/35036035

Le calcium seul est muet ; c'est l'accord calcium et capteur qui parle (E. Sorel, 2026). À la synapse aussi, ce n'est pas la quantité qui décide, c'est la serrure qui la reçoit (E. Sorel, *La Porte*, 2026).

ÉTABLI. L'échelle. Un seul photon absorbé par un bâtonnet de rétine de crapaud donne un signal de même taille, que sa longueur d'onde soit de 420 ou de 700 nanomètres. Ce qui change avec la longueur d'onde, c'est la probabilité que le photon soit capté : la sensibilité varie d'un facteur 100 000 sur cette gamme.

Baylor D.A., Lamb T.D. & Yau K.W. (1979), J. Physiol. 288, 613-634.
doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp012716

ÉTABLI. L'émetteur. Chez l'aplysie, l'habituation d'un réflexe vient d'une baisse du nombre de messagers libérés à chaque impulsion par le neurone sensoriel ; la sensibilité du neurone qui les reçoit reste la même. La serrure est intacte ; cette fois, c'est l'envoi qui faiblit.

Castellucci V.F. & Kandel E.R. (1974), PNAS 71, 5004-5008. doi.org/10.1073/pnas.71.12.5004

ÉTABLI. Le porteur. Au seuil de la vision, il faut entre 54 et 148 photons à la cornée pour que 5 à 14 soient absorbés par les bâtonnets : environ 10 % arrivent. Ce 10 % est déjà un produit d'étages : 4 % réfléchis par la cornée, environ 50 % absorbés en route, au plus 20 % pris par les bâtonnets. $0,96 \times 0,5 \times 0,2 = 0,096$. Et à ce seuil, disent les auteurs, « it is the stimulus which is variable » (c'est le stimulus qui est variable) : le grain du bruit est dans la trace elle-même.

Hecht S., Shlaer S. & Pirenne M.H. (1942), J. Gen. Physiol. 25, 819-840.
doi.org/10.1085/jgp.25.6.819

LE PORTEUR DE L'ŒIL ✧ CALCUL

$$0,96 \times 0,5 \times 0,2 = 0,096$$

la cornée · le trajet · les bâtonnets

Hecht, Shlaer et Pirenne, 1942 : environ 10 % des photons arrivés
à la cornée sont lus.

ÉTABLI. Le support. Le blob évite le mucus qu'il a déjà laissé derrière lui, et il évite aussi un mucus venu d'une autre culture de sa souche : la trace survit à celui qui l'a laissée. Dans son propre corps, le diamètre de ses tubes garde la place où il a trouvé de la nourriture.

Reid C.R. et al. (2012), PNAS 109, 17490-17494. doi.org/10.1073/pnas.1215037109 ; Kramar M. & Alim K. (2021), PNAS 118. doi.org/10.1073/pnas.2007815118

Le mucus qu'il laisse survit hors de lui, relisible par lui comme par un autre blob de la même souche (E. Sorel, *L'accord sans chef*, 2026).

Quatre pièces, et le support sous elles. Qu'une seule tombe à zéro, et la trace, bien réelle, n'est lue par personne. Qu'elle faiblisse, et toute la lecture baisse avec elle. Le calcium est là, sans capteur pour lui. Le photon arrive, à une longueur d'onde où le bâtonnet ne l'attrape presque jamais. Le neurone d'en face est intact, et l'envoi faiblit. La lumière part, et 9 photons sur 10 se perdent en route. Mises ensemble, ces pièces s'écrivent comme une seule lecture.

HYPOTHÈSE. Une trace devient un signal pour son lecteur par le produit de ses pièces :

LES QUATRE PIÈCES ✧

$$\text{signal} = s \times \text{porteur} \times \text{d\'ecrypteur} \times \text{\'echelle}(f) = s \times G$$

une pièce affaiblie : tout baisse · une pièce à 0 : trace muette

s est la trace émise, sa force réelle : elle porte l'unité. Porteur, décrypteur et échelle(f) restent entre 0 et 1 ; leur produit, c'est G. f est la couleur, la note, le rythme ou la taille de la trace.

Quatre pièces, un produit. Une seule à zéro, et tout se tait.

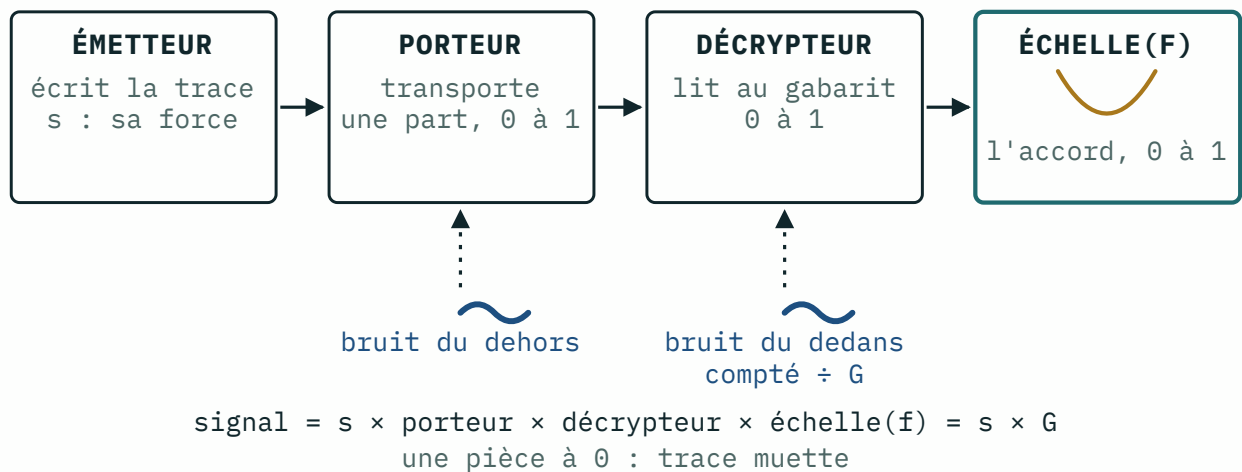


Fig. 6 · La chaîne de lecture (schéma)

Quatre pièces, un produit. Le bruit du dehors entre avec la trace ; celui du dedans arrive après le gain, et compte divisé par G.

THÈSE · LE TEMPS DE POSE

ÉTABLI. Un calcul de 1977 relie déjà le lecteur, la trace, la taille et le temps. La précision avec laquelle une cellule peut lire la concentration d'une molécule autour d'elle est bornée par les fluctuations statistiques : l'erreur la plus petite qu'elle puisse atteindre vaut environ $(T c a D)^{-1/2}$, où T est le temps de lecture, c la concentration, a la taille de la cellule et D la diffusion de la molécule. L'erreur baisse comme la racine du temps de lecture.

Berg H.C. & Purcell E.M. (1977), Biophys. J. 20, 193-219. doi.org/10.1016/S0006-3495(77)85544-6

Sur un temps de pose T, la lisibilité, notée d', est ce signal rapporté à son bruit σ :

LE TEMPS DE POSE ✧

$$d' = \frac{\text{signal} \times \sqrt{T}}{\sigma}$$

ÉTABLI. Mais la racine de T n'est pas le seul régime. En 1885, Bloch mesure que, pour des éclairs de 1,73 à 51,8 ms, la lumière au seuil est inversement proportionnelle à sa durée : sous une durée critique, tout le signal compte, et le seuil baisse comme 1/T. Pour l'acuité, la durée critique est d'environ 500 ms au-dessus de 10 cd/m², plus longue en lumière faible. À l'oreille, le seuil d'un son baisse de 8 à 10 dB par décade de durée, jusqu'à 500 ms ; à 3,125 kHz, la pente est plus douce, avec un exposant d'environ 0,6.

Gorea A. (2015), i-Perception 6(4). doi.org/10.1177/2041669515593043 ; Niwa K. & Tokoro T. (1997), Jpn. J. Ophthalmol. 41, 403-408. doi.org/10.1016/S0021-5155(97)00082-8 ; Florentine M., Fastl H. & Buus S. (1988), J. Acoust. Soc. Am. 84, 195-203. doi.org/10.1121/1.396964 ; Gerken G.M., Bhat V.K. & Hutchison-Clutter M. (1990), J. Acoust. Soc. Am. 88, 767-778. doi.org/10.1121/1.399726

ÉTABLI. Et la lecture s'arrête. Des singes qui jugent la direction d'un mouvement tranchent quand l'évidence accumulée atteint une borne, « sometimes long before the end of stimulus » (parfois bien avant la fin du stimulus), même quand c'est l'environnement qui fixe la durée.

Kiani R., Hanks T.D. & Shadlen M.N. (2008), J. Neurosci. 28, 3017-3029. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4761-07.2008

CALCUL. Ce qui fixe le régime, c'est la fenêtre du lecteur, pas la trace. Une fenêtre fixe, plus longue que la trace, récolte tout le signal, mais elle garde le bruit de toute sa durée : le seuil baisse comme 1/T. Une fenêtre qui s'allonge avec la trace, ou qui additionne des fenêtres indépendantes, récolte aussi plus de bruit : le seuil ne baisse plus que comme 1/√T. Au-delà de la plus longue fenêtre, ou à la borne, il ne baisse plus du tout.

LECTURE. Le temps de pose a donc trois régimes, comme le bruit, et ils tombent sur des étages différents. L'instant d'une cellule a une durée : c'est sa fenêtre, où joue Bloch. L'étage qui la lit accumule, et c'est là que vit la racine de Berg et Purcell. Au-dessus, une borne ferme le temps de pose.

LES TROIS RÉGIMES DU TEMPS ✧

sous la fenêtre de la cellule $\text{seuil} \propto I \div T$

pendant l'accumulation $\text{seuil} \propto I \div \sqrt{T}$

à la borne seuil plat

Bloch, 1885 ; Berg et Purcell, 1977. En échelles logarithmiques, les pentes -1 , $-1/2$, puis 0 .

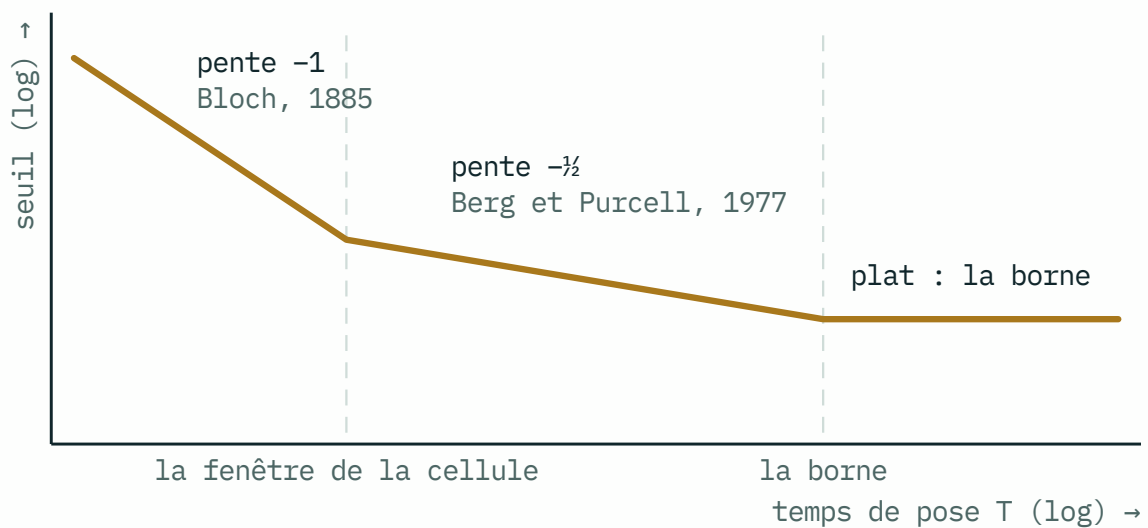


Fig. 7 · Le temps de pose à trois régimes (schéma)

Le seuil en fonction de T, en échelles logarithmiques : pente -1 sous la fenêtre de la cellule, pente $-1/2$ pendant l'accumulation, plat à la borne.

Le temps de pose n'est pas une durée. C'est une fenêtre (E. Sorel, 2026).

ANTITHÈSE · LE BRUIT

Le bruit, compté par unité de temps, n'est pas indépendant du signal. Il a **3** composantes : une activité de fond, constante ; le grain de la trace elle-même, dont la variance croît comme le signal ; une part qui croît en proportion du signal.

LES TROIS BRUITS ✧

$$\sigma^2 = \text{fond}^2 + k \times \text{signal} + (w \times \text{signal})^2$$

ÉTABLI. Les trois se voient dans un seul œil. Dans les bâtonnets humains, il y a d'abord la « lumière noire » de l'œil, cette lumière fantôme qui équivaut au bruit des photorécepteurs. Puis le seuil monte avec la lumière de fond selon une pente de 0,56 pour de petites cibles brèves, la loi de la racine du grain. Et il atteint 0,77 pour de grandes cibles longues, en allant vers la loi de Weber.

Sharpe L.T. et al. (1993), J. Physiol. 463, 325-348. doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019597

ÉTABLI. Le fond se mesure jusque dans une seule cellule. Un bâtonnet de crapaud produit, à 20 °C, environ 1 événement spontané toutes les 50 secondes, de la taille de la réponse à un photon, sans doute l'activation thermique d'une seule molécule de pigment ; plus un bruit continu de 0,2 pA. De la lumière que personne n'a envoyée.

Baylor D.A., Matthews G. & Yau K.W. (1980), J. Physiol. 309, 591-621.
doi.org/10.1113/jphysiol.1980.sp013529

La lecture a donc trois régimes. Quand le signal est faible, le fond domine, et la lisibilité suit le produit des pièces : une seule à zéro, et la trace est muette. Quand il est moyen, le grain domine, et la lisibilité ne croît plus que comme la racine du signal. Quand il est fort, la dernière part domine, et la lisibilité plafonne à une valeur qui ne dépend plus que de w et du temps de pose : émettre plus fort ne fait plus rien lire de plus.

LES TROIS RÉGIMES DE LA LECTURE ✧

faible, le fond domine d' suit $s \times G$

moyen, le grain domine d' suit $\sqrt{\text{signal}}$

fort, w domine d' plafonne, fixé par w et T

Au-delà encore, le lecteur sature : sa réponse ne suit plus la trace, et la lisibilité redescend. La courbe de cette saturation est mesurée depuis 1966 sur la rétine de la tanche : la réponse suit $V = I / (I + I_{50})$, où I_{50} est la lumière qui donne la moitié de la réponse maximale, et sa pente tombe vers zéro quand I dépasse largement I_{50} . C'est le flanc du fort du U d'intensité, en première partie. L'équation tient jusqu'au plateau ; au-delà, elle cesse de tenir, car la saturation n'y est pas écrite.

Naka K.I. & Rushton W.A.H. (1966), J. Physiol. 185, 536-555.
doi.org/10.1113/jphysiol.1966.sp008001

LE PLAFOND ✧

$$V = \frac{I}{I + I_{50}}$$

Naka et Rushton, 1966, rétine de la tanche. À $I = I_{50}$, la moitié de la réponse ; bien au-delà, la pente tombe vers 0 .

Les deux bruits n'entrent pas au même endroit. Celui du dehors traverse la chaîne avec la trace ; celui du dedans arrive après, divisé par le gain qui le précède, la règle que Friis a posée pour les récepteurs radio :

LE DEHORS ET LE DEDANS ✧

$$d' = \frac{s \times \sqrt{T}}{\sqrt{(\sigma_{\text{dehors}})^2 + (\sigma_{\text{dedans}} \div G)^2}}$$

Le bruit du dedans arrive après le gain : il compte divisé par G (Friis, 1944).

Friis H.T. (1944), Proc. IRE 32, 419-422. doi.org/10.1109/JRPROC.1944.232049

Les deux découpages du bruit se recouvrent. Le grain vient du dehors, avec la trace et avec la lumière du jour qui l'entoure. Le fond et la part qui suit Weber naissent dans le lecteur : ce sont des bruits du dedans, le fond avant le gain, la part de Weber après lui. En vision, chacune de ces trois sources a été mesurée avec sa loi.

Silvestre D., Arleo A. & Allard R. (2018), Sci Rep 8, 2596. doi.org/10.1038/s41598-018-20619-3

ÉTABLI. C'est le bruit équivalent d'entrée : Barlow appelle « lumière noire » le bruit du dedans compté comme s'il était une lumière venue du dehors, et Pelli et Farell en tirent une règle : la sensibilité d'un lecteur se factorise en une efficacité et un bruit équivalent, et l'on sépare les deux en ajoutant du bruit au dehors. Mais le bruit ajouté peut aussi baisser le gain, et la méthode prend alors un gain pour du bruit.

Barlow H.B. (1956), J. Opt. Soc. Am. 46, 634-639. doi.org/10.1364/JOSA.46.000634 ; Pelli D.G. & Farell B. (1999), J. Opt. Soc. Am. A 16, 647-653. doi.org/10.1364/JOSAA.16.000647 ; Vîlidaite G. & Baker D.H. (2017), Vision Res. 141, 30-39. doi.org/10.1016/j.visres.2016.10.008

Les pièces de l'équation ne se lisent pas une à une dans un seul seuil. Un seul seuil ne les sépare pas. L'expérience, si.

Le mot « seuil » dit deux choses, à deux étages. À l'instant, une cellule décharge si la trace et son bruit franchissent son niveau ; sur le temps de pose, l'étage qui la lit compare une lisibilité à un critère. Le U de la première partie est le second seuil, exprimé en signal :

LES DEUX SEUILS ✧

à l'instant $\text{signal} + \text{bruit} > \theta$

sur le temps de pose $d' = \text{signal} \times \sqrt{T} \div \sigma \geq d'_{\min}$

le U $s_{\min}(f) = \frac{d'_{\min} \times \sigma}{\text{porteur} \times \text{d\'ecrypteur} \times \text{\'echelle}(f) \times \sqrt{T}}$

le U retourné $\text{\'echelle}(f) = \frac{\text{seuil le plus bas}}{\text{seuil}(f)}$

Le U retourné : 1 au fond du U, presque 0 sur ses flancs (E. Sorel, 2026).

Au seuil, la trace est faible et σ se réduit presque au fond : le U n'est que la courbe $\text{\'echelle}(f)$, retournée, posée sur le bruit du lecteur.

ÉTABLI. Le second seuil n'est pas un mur, et la théorie de la détection du signal le traite ainsi depuis Tanner et Swets, en 1954. La probabilité de lire monte en S avec la force de la trace, et le seuil n'est qu'une convention posée sur ce S : 50 %, 75 %, ce qu'on choisit. Pour reconnaître des chiffres, les pentes de ce S vont de 4 à 5 en proportion de réponses justes par unité logarithmique de contraste, en tout point du champ visuel.

Tanner W.P. & Swets J.A. (1954), Psychol. Rev. 61, 401-409. doi.org/10.1037/h0058700 ;

Wichmann F.A. & Hill N.J. (2001), Percept. Psychophys. 63, 1293-1313.

doi.org/10.3758/BF03194544 ; Strasburger H. (2001), Percept. Psychophys. 63, 1356-1376.

doi.org/10.3758/BF03194548

Entre muet et lu, il y a le lu à moitié. La lecture n'est pas un oui ou un non. C'est un degré.

ÉTABLI. Un modèle de référence de l'attention et du bruit, en vision, s'appelle le « Perceptual Template Model » (le modèle du gabarit perceptif). Le lecteur y passe la trace à travers un gabarit avant de la lire. Et ce gabarit se mesure : en ajoutant à chaque essai un bruit au hasard, et en regardant quelles taches de bruit ont fait répondre le lecteur, on reconstruit les poids qu'il donne à chaque point de l'image. L'une de ces méthodes s'appelle « Bubbles » (bulles).

Lu Z.L. & Dosher B.A. (1998), Vision Res. 38, 1183-1198. doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00273-3 ; Murray R.F. (2011), J. Vis. 11(5), 2. doi.org/10.1167/11.5.2 ; Gosselin F. & Schyns P.G. (2001), Vision Res. 41, 2261-2271. doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00097-9

CALCUL. Un lecteur qui lit à travers un gabarit g fait le produit de sa forme et de celle de la trace qui lui arrive, vue cette fois comme un motif de points, noté x ; Σ dit comment le bruit se lie d'un point à l'autre :

LE GABARIT ✦

$$d' = \frac{\sqrt{T} \times (g \cdot x)}{\sqrt{(g^T \cdot \Sigma \cdot g)}}$$

le meilleur lecteur g tourné vers $\Sigma^{-1} \cdot x$, et alors $d'^2 = T \times (x^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot x)$

son efficacité, en bruit blanc $\cos^2$ de l'angle entre g et x

ÉTABLI. Un œil humain peut s'en approcher beaucoup. Pour de petits réseaux à environ 5 cycles par degré, son efficacité atteint $0,70 \pm 0,07$, et $0,83 \pm 0,15$ une fois son bruit interne corrigé.

Burgess A.E., Wagner R.F., Jennings R.J. & Barlow H.B. (1981), Science 214, 93-94. doi.org/10.1126/science.7280685

LECTURE. Notre équation de départ, celle du produit des pièces, est le cas d'un seul point de celle-ci : la trace n'a plus de forme, il ne reste que sa force, l'efficacité du gabarit devient le décrypteur, et d' redevient $\text{signal} \times \sqrt{T} / \sigma$. Le décrypteur se décompose : un gabarit, d'où vient l'efficacité ; un gain ; un bruit du dedans ; une fenêtre dans le temps.

Un gabarit n'ouvre rien. Il ressemble plus ou moins (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Quand l'oreille et le doigt lisent ensemble une trace trop faible pour chacun, leurs lectures s'additionnent tout droit si leurs fréquences sont proches, et en racine de la somme des carrés si elles s'écartent. La phase entre le son et la vibration n'y change rien : on intègre une enveloppe, pas la forme de l'onde. Le toucher a d'ailleurs sa « bande critique », comme l'oreille.

Wilson E.C., Reed C.M. & Braida L.D. (2009), J. Acoust. Soc. Am. 126, 1960-1974. doi.org/10.1121/1.3204305 ; Wilson E.C., Reed C.M. & Braida L.D. (2010), J. Acoust. Soc. Am. 127, 3044-3059. doi.org/10.1121/1.3365318 ; Makous J.C., Friedman R.M. & Vierck C.J. (1995), J. Neurosci. 15, 2808-2818. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.15-04-02808.1995

ÉTABLI. Et des canaux qui passent par le même goulot ne gagnent rien à être plusieurs. Dans des fibroblastes de souris, la voie de signalisation du TNF ne fait passer qu'environ **1** bit d'information sur la dose : assez pour un oui ou un non. Un goulot en amont plafonne ce que gagnent plusieurs voies, plusieurs gènes ou plusieurs cellules.

Cheong R. et al. (2011), Science 334, 354-358. doi.org/10.1126/science.1204553

ÉTABLI. Quand les canaux sont libres, le cerveau les pondère. Entre la vue et le toucher, il donne à chacun un poids qui suit l'inverse de sa variance, comme le ferait un calcul de vraisemblance maximale.

Ernst M.O. & Banks M.S. (2002), Nature 415, 429-433. doi.org/10.1038/415429a

LECTURE. Trois règles, et ce sont trois formes du même Σ , le bruit d'un canal à l'autre. Même bande, avant le bruit : les lectures s'additionnent. Chacune son bruit : la racine des carrés. Un bruit partagé, un goulot : le plafond. Ce sont les corrélations du bruit entre les canaux qui fixent ce plafond.

Averbeck B.B., Latham P.E. & Pouget A. (2006), Nat. Rev. Neurosci. 7, 358-366. doi.org/10.1038/nrn1888

LES CANAUX ✧

même bande, avant le bruit $d' = d'_1 + d'_2$

chacun son bruit $d' = \sqrt{(d'_1)^2 + (d'_2)^2}$

un même goulot $d' \leq \text{le plafond du goulot}$

Trois formes du même Σ , le bruit d'un canal à l'autre.

Cette équation n'est pas une loi qui recommencerait telle quelle à chaque étage. C'est la forme d'un process. Ses termes reviennent ; leurs valeurs appartiennent à chaque étage, comme la courbe de la vue revient chez 9 espèces, posée ailleurs sur l'axe.

ÉTABLI. Un système montre toutes les pièces dans le même animal. Dans l'œuf de drosophile, l'ARN du gène maternel *bicoid* est logé à la pointe antérieure ; la protéine Bicoid forme un gradient exponentiel, sans doute par diffusion depuis cette source et dégradation en chemin. Les noyaux lisent ce gradient par le promoteur du gène *hunchback*, et la lecture transmet environ 90 % de l'information maximale que le bruit permet.

Driever W. & Nüsslein-Volhard C. (1988), Cell 54, 83-93. doi.org/10.1016/0092-8674(88)90182-1 ; Tkačik G., Callan C.G. & Bialek W. (2008), PNAS 105, 12265-12270. doi.org/10.1073/pnas.0806077105

LECTURE. Dans l'œuf de drosophile, l'émetteur est la mère, par l'ARN qu'elle y a logé. Le porteur est le gradient : la part de Bicoid qui arrive à chaque noyau, et qui baisse avec sa distance à la pointe. Le décrypteur est le promoteur de *hunchback*, dans chaque noyau. L'échelle est la plage de concentrations où ce promoteur distingue un peu plus d'un peu moins : en dessous, il ne s'allume presque pas ; au-dessus, il ne distingue plus. *Hunchback* est la réponse, pas le lecteur. Et la lecture approche le plafond que fixe le bruit.

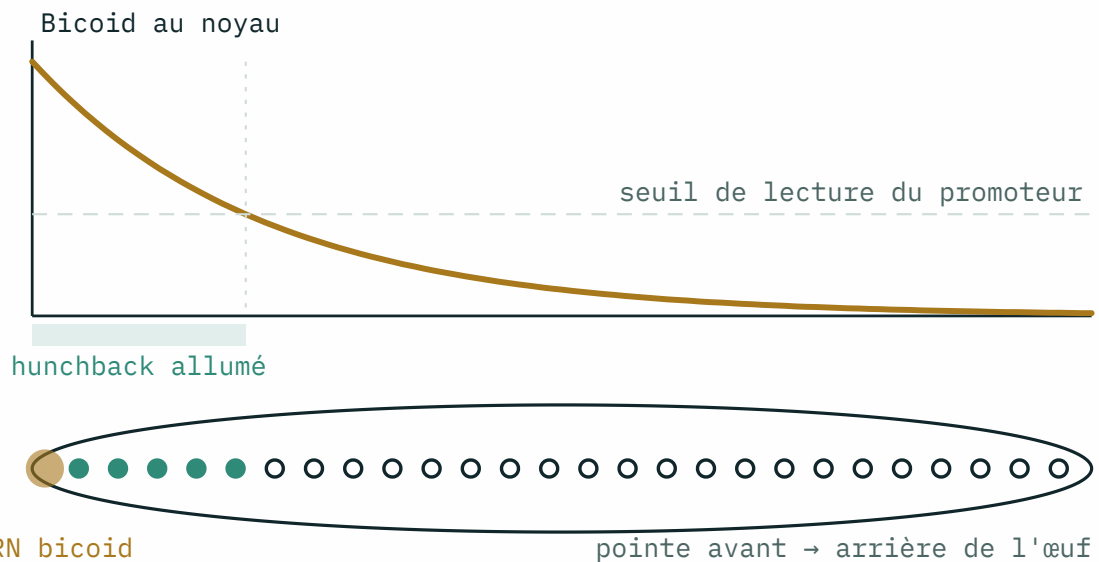


Fig. 8 · Bicoid, l'équation dans un œuf (schéma)

La forme du gradient est dessinée pour l'idée.

- ① **Émetteur** : la mère, par l'ARN de *bicoid* logé à la pointe avant (Driever et Nüsslein-Volhard 1988).
- ② **Porteur** : la part de Bicoid qui arrive à chaque noyau ; elle baisse avec la distance à la pointe.
- ③ **Décrypteur** : le promoteur de *hunchback*, dans chaque noyau.
- ④ **Échelle** : la plage de concentrations où ce promoteur distingue un peu plus d'un peu moins ; en dessous il ne s'allume presque pas, au-dessus il ne distingue plus.
- ⑤ **Bruit et $\sqrt{T}$** : l'arrivée au hasard des molécules. Dans le même œuf, ④ mesures de précision donnent toutes environ 10 % (Gregor et al. 2007).

ÉTABLI. Et ce lecteur nettoie la pente. D'un embryon à l'autre, le gradient de Bicoid varie beaucoup ; ce bruit est fortement « filtré » au niveau de *hunchback*, dont le motif contient déjà l'échelle de l'embryon. La précision de la lecture, elle, se mesure : dans le même œuf, ④ mesures différentes donnent toutes environ 10 %, au voisinage de la limite que fixe l'arrivée au hasard des molécules.

Houchmandzadeh B., Wieschaus E. & Leibler S. (2002), Nature 415, 798-802.

doi.org/10.1038/415798a ; Gregor T. et al. (2007), Cell 130, 153-164.

doi.org/10.1016/j.cell.2007.05.025

Tableau 2 · Une trace, quatre pièces, trois lecteurs (ÉTABLI ligne à ligne ; la lecture en colonnes est la mienne)

Pièce	L'œil, au seuil	L'œuf de mouche	L'araignée
Émetteur	la lumière d'un éclair	l'ARN maternel de <i>bicoid</i> , logé au pôle avant (Driever & Nüsslein-Volhard 1988)	la proie qui se débat dans la toile
Porteur	environ 10 % des photons arrivent aux bâtonnets : $0,96 \times 0,5 \times 0,2$ (Hecht et al. 1942)	la part de Bicoid qui arrive à chaque noyau, et qui baisse le long de l'œuf	la toile, tendue de 10:7:1 des amarres aux rayons (Wirth & Barth 1992)
Décrypteur et gabarit	le bâtonnet et son pigment	le promoteur de <i>hunchback</i> , qui filtre le bruit du gradient (Houchmandzadeh et al. 2002)	les capteurs des pattes ; des catégories, proie, mâle, feuille (Wignall & Taylor 2011)
Échelle	de 420 à 700 nm, une capture qui varie d'un facteur 100 000 (Baylor et al. 1979)	la plage de concentrations où le promoteur distingue, entre muet et saturé	des vibrations de proies entre 5 et 30 Hz (Landolf & Barth 1996)
Bruit	un événement spontané toutes les 50 s environ par bâtonnet (Baylor et al. 1980)	l'arrivée au hasard des molécules : une précision d'environ 10 % (Gregor et al. 2007)	des spectres de proies qui se chevauchent (Landolf & Barth 1996)
Ce qui est lu	un éclair, ou rien	une frontière, plus nette que la pente	une direction, par 20 à 30 dB d'écart entre les pattes (Landolf & Barth 1996)

Le mot gradient a deux métiers, et je les garde sous un seul mot : un gradient dans la trace, une pente ; un gradient dans le lecteur, des degrés. Le lecteur fait de l'un l'autre.

SYNTHÈSE · LE GABARIT, À TROIS NIVEAUX

Il y a une convention qui n'est pas seulement apprise (E. Sorel, 2026). Des bêtes qui n'ont jamais vu leurs parents font toutes la même chose.

ÉTABLI. Le gabarit inné, dans la cellule. Crick prédit en 1955 des « adaptateurs » entre les triplets de l'ARN et les acides aminés : ce sont les ARN de transfert. Ce sont leurs synthétases qui accrochent le bon acide aminé au bon ARN, et elles sont « pivotal in determining how the genetic code is interpreted » (décisives dans la façon dont le code génétique est interprété). Les ARN de transfert, écrit une revue récente, sont des « Rosetta stones that decipher and interpret the genetic code » (pierres de Rosette qui déchiffrent et interprètent le code génétique).

Ibba M. & Söll D. (2000), *Annu. Rev. Biochem.* 69, 617-650.

doi.org/10.1146/annurev.biochem.69.1.617 ; Zhang J. (2024), *Cell Chem. Biol.* 31, 36-52.

doi.org/10.1016/j.chembiol.2023.12.008

ÉTABLI. Même ce gabarit-là lit en degrés. Des ARN de transfert mutés ont été reconnus par leur synthétase jusqu'à 300 000 fois moins bien, et certains fonctionnaient encore dans la cellule.

Jahn M., Rogers M.J. & Söll D. (1991), *Nature* 352, 258-260. doi.org/10.1038/352258a0

ÉTABLI. Le gabarit inné, chez l'oiseau élevé par d'autres. Le jeune vacher grandit dans le nid d'une autre espèce. Il reconnaît les siens grâce à un cri, le « chatter » (babil), qui sert de « password » (mot de passe) et déclenche l'apprentissage du reste. Les auteurs parlent d'une image mentale, un « template » (gabarit), à laquelle ressemblent « closely enough » (d'assez près) ceux qu'on reconnaîtra comme les siens.

Hauber M.E., Russo S.A. & Sherman P.W. (2001), *Proc. R. Soc. B* 268, 1041-1048.

doi.org/10.1098/rspb.2001.1617

ÉTABLI. Le gabarit inné, chez l'araignée. Les jeunes araignées tissent des toiles aussi régulières que celles des adultes : « they do not need to learn » (elles n'ont pas besoin d'apprendre).

Pasquet A. et al. (2014), *Zool. Stud.* 53, 11. doi.org/10.1186/1810-522X-53-11, d'après Reed C.F. et al. (1970), *Dev. Psychobiol.* 3, 251-265. doi.org/10.1002/dev.420030406

DÉBATTU. Le gabarit inné, chez l'humain ? Dans sa première heure de vie, le nouveau-né suit plus loin des yeux un schéma de visage, et cette préférence baisse pendant le 2e mois. Le poussin élevé dans le noir va d'emblée vers ce qui bouge comme un vivant, même un chat. Mais que la préférence du nouveau-né soit innée et propre aux visages « is currently being debated » (est aujourd'hui débattu).

Johnson M.H. et al. (1991), *Cognition* 40, 1-19. [doi.org/10.1016/0010-0277\(91\)90045-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(91)90045-6) ;

Vallortigara G., Regolin L. & Marconato F. (2005), *PLoS Biol.* 3, e208.

doi.org/10.1371/journal.pbio.0030208 ; Rosa-Salva O., Regolin L. & Vallortigara G. (2010), *Dev. Sci.* 13, 565-577. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00914.x

ÉTABLI. Le même dessin, dans le corps du nouveau-né. Sa main se referme sur ce qui touche sa paume, et ses pieds aussi : ce réflexe d'agrippement fait partie de l'examen de chaque nouveau-né, avec le réflexe de Moro, et l'absence de l'un ou de l'autre a valeur de diagnostic. Plongé dans l'eau, il retient son souffle et son cœur ralentit : chez **36** bébés nageurs, le rythme cardiaque baisse dès l'immersion, de **25 %** en moyenne (de **5** à **50,7 %** selon les bébés), et la réponse s'affaiblit avec l'âge mais reste nette après **6** mois. Tenu debout, il fait des pas, et ces pas s'effacent dans les premiers mois. Leur disparition a longtemps été lue comme le signe d'un cortex qui mûrit. Les mesures disent autre chose. Les bébés plus lourds pour leur taille font moins de pas. Des poids aux chevilles, de l'ordre de ce que la graisse ajoute, les arrêtent. Plongés dans l'eau jusqu'à la taille, des bébés qui ne marchaient plus refont des pas. Et à **7** mois, tenus au-dessus d'un petit tapis roulant, les **6** bébés testés marchent aussitôt : le mécanisme « has not "disappeared" » (n'a pas « disparu »). Ce sont les jambes qui étaient devenues trop lourdes pour les muscles.

Futagi Y., Toribe Y. & Suzuki Y. (2012), *Int. J. Pediatr.* 2012, 191562. doi.org/10.1155/2012/191562 ; Goksör E., Rosengren L. & Wennergren G. (2002), *Acta Paediatr.* 91, 307-312. doi.org/10.1080/08035250252833978 ; Thelen E. et al. (1982), *Dev. Psychobiol.* 15, 447-453. doi.org/10.1002/dev.420150506 ; Thelen E., Fisher D.M. & Ridley-Johnson R. (1984), *Infant Behav. Dev.* 7, 479-493. doi.org/10.1016/S0163-6383(84)80007-7 ; Thelen E. (1986), *Child Dev.* 57, 1498-1506

LECTURE. *Le pas, la main, l'apnée, le regard vers le visage : présents à la naissance, effacés dans les premiers mois, revenus plus tard sous une forme apprise. Et ce qui s'efface n'est pas forcément éteint. Le pas était toujours là : c'est le corps qui avait changé d'échelle autour de lui.*

ÉTABLI. Le gabarit posé, dans une fenêtre. Le moineau des marais n'apprend son chant qu'avec des syllabes de son espèce, même élevé seul. Le chant d'oiseau a donné son nom à la « théorie du gabarit auditif », faite d'instructions génétiques et environnementales. Les poussins de coucou de la lignée « rousserolle », élevés par d'autres oiseaux, gardent une réponse propre à l'alarme de la rousserolle. Et le combassou, élevé par un autre oiseau, prend le chant et le nid de ses parents adoptifs.

Marler P. & Peters S. (1977), *Science* 198, 519-521. doi.org/10.1126/science.198.4316.519 ; Adret P. (2004), *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1016, 303-324. doi.org/10.1196/annals.1298.005 ; Davies N.B. et al. (2006), *Proc. R. Soc. B* 273, 693-699. doi.org/10.1098/rspb.2005.3324 ; Payne R.B. et al. (2000), *Anim. Behav.* 59, 69-81. doi.org/10.1006/anbe.1999.1283

ÉTABLI. La fenêtre de l'empreinte ne se ferme pas pour toujours : « it is now firmly established that filial and sexual preferences are reversible » (il est aujourd'hui bien établi que les préférences filiales et sexuelles sont réversibles). Ce qui tient : « the first stimulus to which the young animal is exposed may exert a greater influence » (le premier stimulus auquel le jeune animal est exposé peut exercer une influence plus forte) que les suivants, et la fin de la fenêtre vient « of the imprinting process itself » (du processus d'empreinte lui-même). Chez le poussin, elle va de l'éclosion au 3e jour, et une hormone thyroïdienne la rouvre au 4e ou au 6e. Chez la chouette effraie élevée **20** à **25** jours par ses parents, l'empreinte n'a pas pu être inversée.

Bolhuis J.J. (1991), Biol. Rev. 66, 303-345. doi.org/10.1111/j.1469-185X.1991.tb01145.x ; Aoki N. et al. (2018), Front. Physiol. 9, 1837. doi.org/10.3389/fphys.2018.01837 ; Lezana et al. (2021), Behav. Processes 195, 104569. doi.org/10.1016/j.beproc.2021.104569

La fenêtre se ferme parce que le gabarit s'est posé.

ÉTABLI. Le gabarit appris. Les cris de quémande du jeune coucou, eux, ne sont « not genetically fixed » (pas fixés génétiquement) : ils se règlent sur ses parents adoptifs. Et des diamants mandarins élevés avec des séquences de syllabes tirées au hasard reconstruisent les motifs de leur espèce : ils les « créolisent ». Le mot vient des langues humaines. Quand des enfants grandissent au milieu d'un pidgin, un parler de contact fait de mots mis bout à bout sans grammaire stable, ils en tirent une langue à part entière, avec sa grammaire : un créole. Les oisillons font pareil avec un chant en désordre, ils y remettent l'ordre de leur espèce. Chez eux, la préférence précoce pour le chant du père prédit la justesse de la copie.

Madden J.R. & Davies N.B. (2006), Proc. R. Soc. B 273, 2343-2351. doi.org/10.1098/rspb.2006.3585 ; James L.S. & Sakata J.T. (2017), Curr. Biol. 27, 3676-3682. doi.org/10.1016/j.cub.2017.10.019 ; Rodríguez-Saltos C.A. et al. (2023), Sci. Rep. 13, 605. doi.org/10.1038/s41598-023-27708-y

DÉBATTU. Ce qu'apprendre à lire fait au gabarit. Pour un camp, apprendre augmente l'efficacité du lecteur sans toucher à son bruit : jusqu'à **400 %** de mieux en quelques jours, avec des réponses aussi cohérentes qu'avant. Pour l'autre, apprendre filtre le bruit du dehors et baisse le bruit du dedans, en repondérant les canaux qui mènent à la décision.

Gold J., Bennett P.J. & Sekuler A.B. (1999), Nature 402, 176-178. doi.org/10.1038/46027 ; Doshier B.A. & Lu Z.L. (1998), PNAS 95, 13988-13993. doi.org/10.1073/pnas.95.23.13988

LECTURE. Le gabarit n'est pas toujours appris. Certains naissent avec le lecteur, d'autres se forgent, et d'autres se posent dans une fenêtre, où le premier garde plus de poids que ceux qui suivent. Le vacher porte les trois dans une seule vie : un mot de passe inné, qui ouvre l'apprentissage du reste.

INNÉ

le lecteur naît avec

La cellule : l'ARN de transfert et sa synthétase, qui accroche le bon acide aminé au bon ARN. Crick avait prédit cet « adaptateur » en 1955 (Ibba et Söll 2000).

Le vacher, élevé par d'autres : un cri de son espèce, son « mot de passe », qui ouvre l'apprentissage du reste (Hauber et al. 2001).

L'araignée : la toile de son espèce, régulière dès la première (Pasquet et al. 2014, d'après Reed et al. 1970).

POSÉ : L'EMPREINTE

cadre inné, gabarit appris, dans une fenêtre

Le poussin né dans le noir va d'emblée vers ce qui bouge comme un vivant (Vallortigara et al. 2005).

Le moineau des marais n'apprend que les syllabes de son espèce, même élevé seul (Marler et Peters 1977).

Le combassou prend le chant et le nid de ses parents adoptifs (Payne et al. 2000).

Le premier objet pèse plus que les suivants, et l'empreinte reste réversible (Bolhuis 1991).

APPRIS

le lecteur le forge

Les cris de quémante du jeune coucou, réglés sur ses parents adoptifs (Madden et Davies 2006).

Les radiologues : des années à lire des nodules.

Moi, devant Pando, devant la physalie.

Fig. 9 · Le gabarit à trois niveaux

Inné, posé, appris : ce qui est donné au lecteur, et ce qui se règle.

Certains naissent lecteurs. Les autres le deviennent dans une fenêtre.

SYNTHÈSE · RETIRER LE GABARIT

ÉTABLI. On a réécrit le génome d'une bactérie pour qu'elle n'ait plus besoin de 3 codons, puis on lui a retiré les ARN de transfert et le facteur qui les lisaient. Elle « could not read the canonical genetic code » (ne pouvait plus lire le code génétique standard), et elle est devenue « completely resistant to a cocktail of viruses » (entièrement résistante à un cocktail de virus). Le génome des virus n'avait pas changé : il portait l'ancien code. C'est le lecteur qui n'avait plus son gabarit.

Robertson W.E. et al. (2021), Science 372, 1057-1062. doi.org/10.1126/science.abg3029 ; Fredens J. et al. (2019), Nature 569, 514-518. doi.org/10.1038/s41586-019-1192-5

ÉTABLI. Quand la nature change le code, elle change surtout le gabarit : « The majority of non-standard codes arise from alterations in the tRNA » (La plupart des codes non standard naissent de modifications des ARN de transfert). Le NCBI recense 27 tables de traduction ; dans les mitochondries des vertébrés, UGA veut dire tryptophane, pas « stop » (arrêt).

Knight R.D., Freeland S.J. & Landweber L.F. (2001), Nat. Rev. Genet. 2, 49-58.
doi.org/10.1038/35047500

DÉBATTU. Le code génétique est-il une convention ? Barbieri l'a écrit : des règles « arbitrary, or conventional » (arbitraires, ou conventionnelles), des « natural conventions » (conventions naturelles), et il précise lui-même que son école est « a minority view » (une vue minoritaire). En face, le code est « highly nonrandom » (très loin du hasard), et des affinités chimiques faibles entre acides aminés et triplets « cannot be ruled out » (ne peuvent pas être exclues) ; seul 1 code tiré au hasard sur 1 million limite mieux les erreurs que le nôtre.

Barbieri M. (2008), Naturwissenschaften 95, 577-599. doi.org/10.1007/s00114-008-0368-x ;
Barbieri M. (2019), BioSystems 181, 11-19. doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.04.010 ; Koonin E.V. & Novozhilov A.S. (2009), IUBMB Life 61, 99-111. doi.org/10.1002/iub.146 ; Freeland S.J. & Hurst L.D. (1998), J. Mol. Evol. 47, 238-248. doi.org/10.1007/pl00006381

ÉTABLI. Chez l'humain, une lésion peut couper le gabarit d'un étage sans toucher au code. Dans l'alexie pure, la personne écrit encore et ne relit plus ce qu'elle vient d'écrire. Chez un patient opéré, l'aire de la forme des mots est restée intacte, et c'est le faisceau qui la relie au cortex visuel qui a dégénéré peu à peu. Dans la prosopagnosie, la reconnaissance des visages tombe ; une dissociation nette avec les objets ne se voit que chez quelques patients, sur 27 étudiés, et la plupart des formes acquises touchent aussi les objets. Dans la vision aveugle, après une lésion de l'aire visuelle primaire, un îlot de cortex organisé répond encore, avec des réponses au contraste atténuées qui suivent une performance dégradée.

Epelbaum S. et al. (2008), Cortex 44, 962-974. doi.org/10.1016/j.cortex.2008.05.003 ; Barton J.J.S. et al. (2019), Cogn. Neuropsychol. 36, 54-84. doi.org/10.1080/02643294.2019.1593821 ; Radova P.D. et al. (2008), J. Cogn. Neurosci. 20, 1927-1939. doi.org/10.1162/jocn.2008.20139

LECTURE. La lésion ne retire pas le code : l'écriture reste lisible par d'autres. Elle coupe une jonction entre deux étages, ou elle baisse un gain. Et la vision aveugle le montre jusqu'à dans un cerveau : une lecture peut devenir dégradée sans devenir muette.

ÉTABLI. Et quand le canal manque, un autre peut le remplacer. Des aveugles de naissance apprennent, en 7 séances d'une heure, à lire des orientations par une stimulation électrique de la langue, et leur cortex occipital s'active alors. Chez des sourds de naissance implantés, les catégories de sons existent, mais avec des pentes d'identification plus plates ; l'implantation avant 4 ans compte.

Une pente plus plate, c'est un gabarit moins net. Le même S, moins raide.

SYNTHÈSE • LIRE OU DÉCRYPTER

Lire, c'est appliquer un gabarit qu'on a déjà. Décrypter, c'est ne pas l'avoir, et le forger à partir de la trace, par essais : on garde le gabarit qui fait monter la lisibilité. Une fois trouvé, le décryptage devient lecture. Et il y a une troisième façon de recevoir une trace, sans gabarit du tout : la résonance, qui ouvrira la troisième partie.

Tableau 3 • Trois façons de recevoir une trace (la répartition est ma lecture ; les exemples sont sourcés dans le texte)

Geste	Le gabarit	Ce qui se passe	Un exemple
Lire	déjà là : inné, posé ou appris	le lecteur compare la trace à son gabarit, et d' dit à quel point elle lui ressemble	la mouche devant la corde ; le lecteur devant cette page
Décrypter	inconnu	on essaie des gabarits et on garde celui qui fait monter d' ; un petit gabarit juge les essais ; une fois trouvé, décrypter devient lire	Champollion, Ventris ; le chercheur qui mesure le gabarit d'un autre
Résonner	aucun	la trace fait bouger le lecteur sans être traduite : il répond fort à ce qui tombe sur sa fréquence	la corde d'une guitare que personne ne touche

ÉTABLI. Et on ne décrypte jamais sans aucune convention. Champollion avait le copte et la pierre de Rosette. Ventris avait les classements de signes d'Alice Kober et les noms de lieux de Crète ; c'est en les essayant qu'est apparu le grec, que le linéaire B notait. Le linéaire A n'est toujours pas déchiffré : on ne lui connaît aucune langue cousine, aucun petit gabarit pour juger les essais.

Champollion J.-F. (1822), Lettre à M. Dacier ; Chadwick J. (1958), The Decipherment of Linear B, Cambridge University Press ; Salgarella E. (2020), Aegean Linear Script(s), Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781108783477

LECTURE. La bête qui vit lit presque toujours, avec un gabarit inné ou posé. Le chercheur décrypte : la danse de l'abeille, puis le gabarit du lecteur lui-même, mesuré de l'extérieur. Ensuite, il lit.

« Décrypter, c'est forger le gabarit qui permettra de lire. Et même pour forger, il faut un gabarit plus petit. » (E. Sorel, 2026)

II §2 ANTITHÈSE

le lecteur n'est pas neutre

Les filles du bruit viennent de la traduction du décrypteur (E. Sorel, 2026). Il y a une position impossible : on ne peut pas être à la fois ce qu'on mesure et l'instrument qui mesure (E. Sorel, *La complexité comme dette*, 2026).

Jusqu'ici, le lecteur était une pièce de l'équation parmi les autres. Il ne l'est pas tout à fait : c'est lui qui place le seuil, et c'est lui qui relit.

ÉTABLI. En vision, le bruit n'est pas un seul bruit. Il a 3 sources, et chacune suit sa propre loi : une activité de fond du lecteur en amont, qui donne une loi linéaire ; l'absorption au hasard des photons, la trace elle-même, qui donne la loi de la racine ; une activité de fond en aval, qui donne la loi de Weber.

Silvestre D., Arleo A. & Allard R. (2018), Sci Rep 8, 2596. doi.org/10.1038/s41598-018-20619-3

ÉTABLI. Le seuil appartient au lecteur. La théorie de la détection du signal sépare deux choses chez lui : sa sensibilité à la trace, et son critère de décision, le seuil à partir duquel il répond. Appliquée aux insectes sociaux qui reconnaissent leurs congénères, elle fait de ce seuil d'acceptation une grandeur à part. Et ce critère tremble d'une lecture à l'autre.

Sumner C.J. & Sumner S. (2020), Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 375, 20190480. doi.org/10.1098/rstb.2019.0480 ; Benjamin A.S., Diaz M. & Wee S. (2009), Psychol. Rev. 116, 84-115. doi.org/10.1037/a0014351

Écrit en une ligne :

LE CRITÈRE ✧

$$P(\text{répondre}) = \Phi(d' - \text{critère})$$

La lisibilité d' vient de la trace et du gabarit ; le critère vient du lecteur seul.

Remises bout à bout, les pièces font une seule lecture :

$$P(\text{lire}) = \Phi\left(\frac{\sqrt{T \cdot s \cdot G}}{\sqrt{(\sigma_{\text{dehors}})^2 + (\sigma_{\text{dedans}} \div G)^2}} - \text{critère}\right)$$

$$G = \text{porteur} \times \text{déchrypteur} \times \text{échelle}(f)$$

Les quatre pièces, le temps de pose, le dehors et le dedans, le critère.

(E. Sorel, 2026)

ÉTABLI. Les deux se séparent dans les mesures. 5 sujets sur 7 détectent la nuit des lumières en moyenne 20 % plus faibles que le jour, et ce n'est « not due to changes in the criterion » (pas dû à des changements de critère). Sur 24 heures, mesuré toutes les 2 heures chez 12 sujets, le seuil visuel est haut le matin, baisse dans la journée et le début de la nuit, puis remonte en fin de nuit.

Bassi C.J. & Powers M.K. (1986), *Physiol. Behav.* 38, 871-877. doi.org/10.1016/0031-9384(86)90056-9 ; Tassi P. et al. (2000), *Chronobiol. Int.* 17, 795-805. doi.org/10.1081/CBI-100102115

Lire n'est pas répondre (E. Sorel, 2026).

THÈSE • LE LECTEUR RÈGLE SON PORTEUR

L'araignée a un gradient via la tension de sa corde (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. La toile n'est pas tendue partout pareil. Les forces baissent des amarres au cadre puis aux rayons, dans un rapport de 10:7:1. Le haut de la toile a moins de rayons que le bas, et les forces entre haut et bas y sont de 2:1 à 3:1. La tension des rayons suit la masse de l'araignée : le rapport force sur masse est le même d'une araignée à l'autre. Les rayons posés en premier portent plus que ceux ajoutés ensuite. Et quand la toile est amarrée à un support souple, la tension reste dans les valeurs normales : l'araignée la tient.

Wirth E. & Barth F.G. (1992), *J. Comp. Physiol. A* 171, 359-371. doi.org/10.1007/BF00223966

ÉTABLI. Elle règle cette tension, et c'est de l'attention. *Cyclosa* tire plus fort sur les rayons du haut et du bas que sur ceux des côtés ; elle y détecte mieux les proies, et elle répond plus vite quand on augmente la tension. Les auteurs : elle « focus[es] their attention » (concentre[nt] leur attention) par la tension des fils.

Nakata K. (2010), *Proc. R. Soc. B* 277, 29-33. doi.org/10.1098/rspb.2009.1583

ÉTABLI. Elle la règle selon sa faim. L'uloboride *Octonoba* affamée tisse un autre type de toile, et c'est le type de toile, « rather than the spiders' energetic condition » (plutôt que l'état énergétique des araignées), qui règle sa vitesse de réponse. Elle « appears to increase the tension of the radial threads so that it can sense smaller prey better when hungry » (semble augmenter la tension des fils radiaires pour mieux sentir les petites proies quand elle a faim).

Watanabe T. (2000), Proc. R. Soc. B 267, 565-569. doi.org/10.1098/rspb.2000.1038

ÉTABLI. Et elle lit une direction dans un gradient. Autour du moyeu et sous ses pattes, les vibrations d'une proie arrivent avec des « amplitude gradients » (gradients d'amplitude) de 20 à 30 dB, qui indiquent d'où vient le signal. Elles voyagent de 70 à 1 500 m/s : les écarts de temps entre les pattes, moins de 1,5 ms, servent sans doute peu. L'araignée se tourne vers le rayon qui vibre le plus ; quand la proie se tait, elle change de posture pour faire revenir le signal.

Landolfi M.A. & Barth F.G. (1996), J. Comp. Physiol. A 179, 493-508. doi.org/10.1007/BF00192316 ; Hung, Corver & Gordus (2026), PLoS Comput. Biol. 22, e1014802. doi.org/10.1371/journal.pcbi.1014802

ÉTABLI. Elle lit des catégories, pas des espèces. Elle réagit comme à une proie aux vibrations de proie, et autrement à un mâle ou à une feuille. Mais sur la toile de *Cyclosa turbinata*, avec une forte variabilité dans chaque espèce d'insecte et de larges chevauchements entre espèces, « accurate prey discrimination by appropriate interpretation of web-borne vibrations is probably not possible » (distinguer les proies avec précision en interprétant les vibrations portées par la toile n'est probablement pas possible). Elle lit en probabilités.

Suter R.B. (1978), Behav. Ecol. Sociobiol. 3, 283-296. doi.org/10.1007/BF00296314 ; Wignall A.E. & Taylor P.W. (2011), Proc. R. Soc. B 278, 1427-1433. doi.org/10.1098/rspb.2010.2060

CALCUL. Dans un fil tendu, une onde voyage à la vitesse $\sqrt{\text{tension} / \text{masse par longueur}}$. 4 fois plus de tension, et les fréquences propres du fil montent du double. Les fils ont bien leurs « résonances », et la tension règle l'amplitude des ondes qu'ils portent.

Landolfi M.A. & Barth F.G. (1996) ; Mortimer B. et al. (2016), J. R. Soc. Interface 13, 20160341. doi.org/10.1098/rsif.2016.0341

LECTURE. L'araignée tisse son porteur et l'accorde. Sa règle de construction est innée ; ses réglages viennent de l'expérience, et la toile finie lit avec elle : « the web threads and configurations are integral parts of the cognitive systems » (les fils et les configurations de la toile font partie intégrante des systèmes cognitifs). Que la tension déplace ainsi la courbe de toute la toile reste une lecture, pas encore mesurée telle quelle.

Japyassú H.F. & Laland K.N. (2017), Anim. Cogn. 20, 375-395. doi.org/10.1007/s10071-017-1069-7

Le message, lui, change de nature en route. La soie est de la chimie : des protéines, qui fixent la raideur et le poids du fil. L'onde qu'elle porte est de la mécanique. Au bout de la patte, la déformation ouvre des canaux, et les ions passent : de nouveau de la chimie, puis une décharge électrique. Tout est chimie au fond de chaque étage ; à l'étage où l'araignée lit, le message est mécanique.

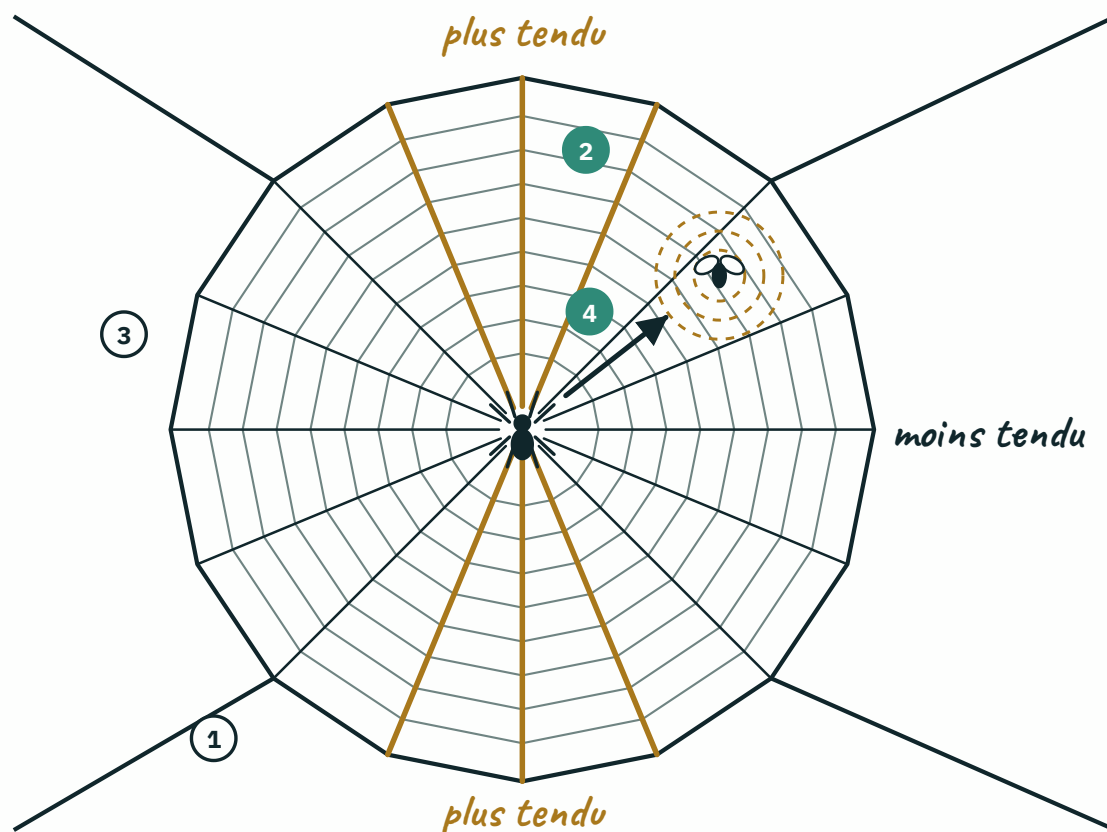


Fig. 10 · La toile, porteur accordé (schéma)

Les rayons en or sont les plus tendus. Ondes pointillées : la proie qui vibre.

- ① La tension baisse des amarres aux rayons : **10:7:1** entre amarres, cadre et rayons. Le haut a moins de rayons que le bas, et les forces entre haut et bas y sont de **2:1** à **3:1**. La tension suit la masse de l'araignée (Wirth et Barth 1992).
- ② *Cyclosa* tire plus fort sur les rayons du haut et du bas ; elle y détecte mieux les proies, et répond plus vite quand on augmente la tension. Les auteurs parlent d'attention (Nakata 2010).
- ③ *Octonoba* à jeun tend ses rayons pour sentir les petites proies (Watanabe 2000).
- ④ Le gradient d'amplitude donne la direction : sous ses pattes, des écarts de **20** à **30 dB** ; les écarts de temps, moins de **1,5 ms**, ne suffisent sans doute pas (Landolf et Barth 1996). Elle se tourne vers le rayon qui vibre le plus (Hung et al. 2026).

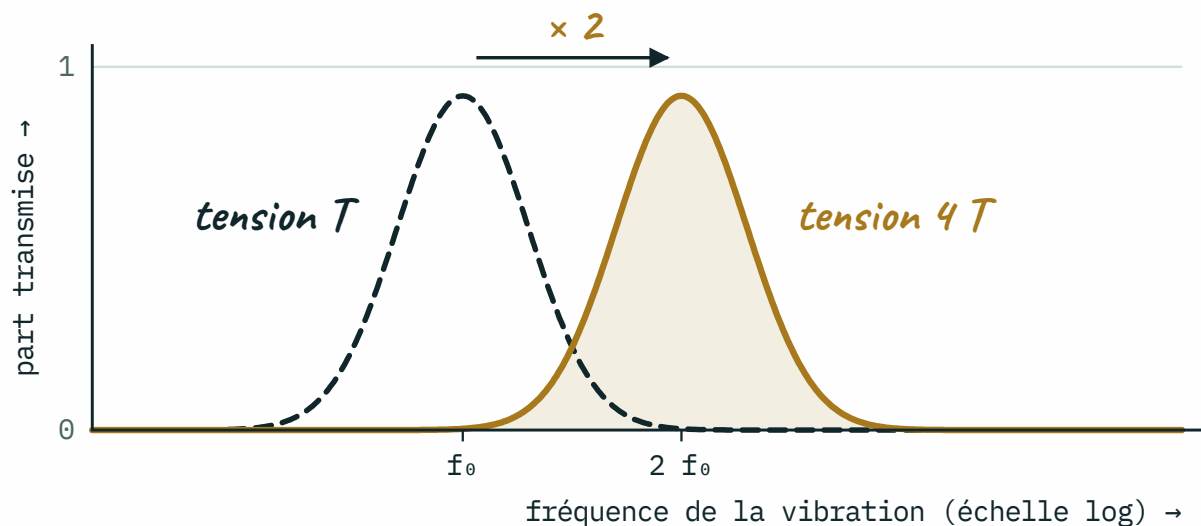


Fig. II · Le U du porteur bouge avec la tension (schéma)

Sur un fil tendu, la vitesse de l'onde vaut $\sqrt{\text{tension} \div \text{masse par longueur}}$: **4** fois plus de tension, des fréquences propres **2** fois plus hautes. Les fils ont leurs résonances (Landolf et Barth 1996), et la tension règle l'amplitude des ondes (Mortimer et al. 2016).

LECTURE. Que la toile entière déplace ainsi son creux n'est pas encore mesuré tel quel.

L'araignée ne lit pas sa toile. Elle lit avec (E. Sorel, 2026).

ANTITHÈSE · L'ÉTAT DU LECTEUR

ÉTABLI. L'attention baisse le seuil. Elle augmente la sensibilité au contraste, la finesse, et le contraste perçu lui-même ; dès le thalamus, elle renforce les réponses à ce qui est suivi et atténue le reste. Et une mesure dit où elle agit : quand le bruit du dehors est faible, le seuil monte de **17 %** sans attention ; quand il est fort, l'attention ne change plus rien. Elle agit sur le bruit du dedans.

Carrasco M., Ling S. & Read S. (2004), Nat. Neurosci. 7, 308-313. doi.org/10.1038/nn1194 ; O'Connor D.H. et al. (2002), Nat. Neurosci. 5, 1203-1209. doi.org/10.1038/nn957 ; Lu Z.L. & Doshier B.A. (1998), Vision Res. 38, 1183-1198. doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00273-3

ÉTABLI. L'adaptation le remonte, à une seule place. Après avoir fixé un réseau très contrasté, le seuil monte d'un facteur **5**, sur une bande d'un peu plus d'une octave autour de la finesse regardée : une encoche creusée dans le U. L'habituation, elle, est une réponse qui baisse « that does not involve sensory adaptation » (qui ne fait pas intervenir l'adaptation sensorielle) ; chez l'aplysie, on l'a vu, c'est l'envoi qui faiblit.

Blakemore C. & Campbell F.W. (1969), J. Physiol. 203, 237-260. doi.org/10.1113/jphysiol.1969.sp008862 ; Rankin C.H. et al. (2009), Neurobiol. Learn. Mem. 92, 135-138. doi.org/10.1016/j.nlm.2008.09.012

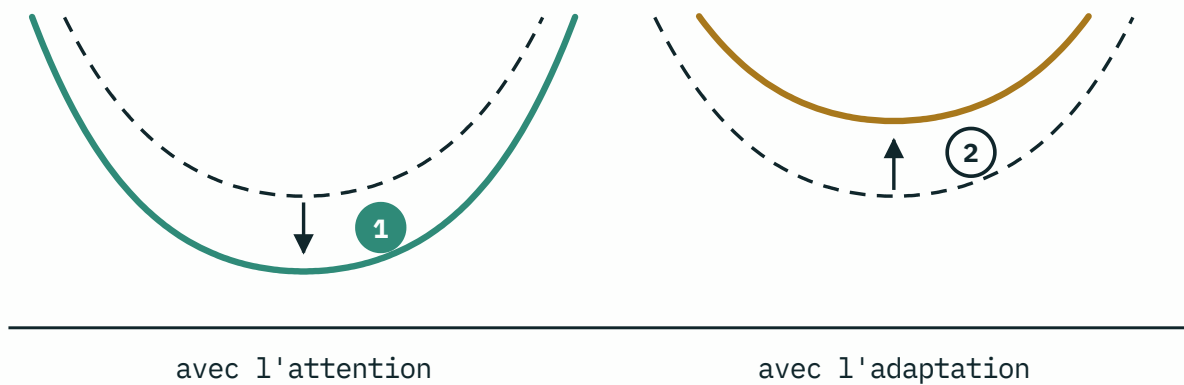


Fig. 12 · Ce qui bouge le U (schéma)

- ① L'attention le descend : elle augmente la sensibilité au contraste, la finesse et le contraste perçu (Carrasco, Ling et Read 2004). Quand le bruit du dehors est faible, le seuil monte de **17 %** sans attention ; quand il est fort, l'attention ne change plus rien : elle agit sur le bruit du dedans (Lu et Doshier 1998).
- ② L'adaptation le remonte : après avoir fixé un réseau très contrasté, le seuil monte d'un facteur **5**, sur un peu plus d'une octave autour de la fréquence regardée. Une encoche dans le U (Blakemore et Campbell 1969).

ÉTABLI. La faim, elle, déplace jusqu'aux poids du gabarit. Chez la mouche affamée, les neurones de l'odorat qui répondent aux odeurs de nourriture fabriquent plus d'un récepteur, sNPFR1, et l'insuline le freine. Chez sa larve, la faim rend attirantes des odeurs qui la repoussaient rassasiée, et l'aiguillage passe par un seul neurone à sérotonine. Chez le ver *C. elegans*, sans nourriture, ce ne sont plus les mêmes neurones sensoriels qui servent à fuir l'octanol, selon la force du stimulus et l'état ; et le jeûne prolongé renforce les réponses à la température d'un autre neurone, par une insuline venue de l'intestin.

Root C.M. et al. (2011), Cell 145, 133-144. doi.org/10.1016/j.cell.2011.02.008 ; Vogt K. et al. (2021), Sci. Adv. 7, eabd6900. doi.org/10.1126/sciadv.abd6900 ; Chao M.Y. et al. (2004), PNAS 101, 15512-15517. doi.org/10.1073/pnas.0403369101 ; Takeishi A. et al. (2020), eLife 9, e61167. doi.org/10.7554/eLife.61167

LECTURE. L'état ne baisse pas seulement un gain : il change ce que le gabarit pondère. L'araignée affamée retend sa toile ; la mouche affamée retend son odorat.

SYNTHÈSE · LES FAUSSAIRES

ÉTABLI. Un gabarit peut préférer le faux. Le poussin de goéland argenté picore plus volontiers une aiguille rouge à **3** bandes blanches qu'un modèle fidèle de la tête de son parent. Les biais du lecteur viennent de ses sens, et aussi de ce qu'il a appris.

Tinbergen N. & Perdeck A.C. (1950), Behaviour 3, 1-39. doi.org/10.1163/156853951X00197 ; ten Cate C. & Rowe C. (2007), Trends Ecol. Evol. 22, 380-387. doi.org/10.1016/j.tree.2007.03.006

ÉTABLI. Et le faux s'écrit. La punaise *Stenolemus* pince les fils d'une toile pour imiter une proie, et l'araignée vient à elle. Elle n'imité qu'une partie des vibrations de proie, celles « classified by spiders as 'prey' » (classées par les araignées comme « proie »). Le mâle d'*Argiope*, lui, fait trembler la toile de la femelle à sa façon, et ces tremblements retardent son attaque, même quand un grillon vivant se débat à côté. Le jeune coucou, seul au nid avec une seule gorge à montrer là où une nichée de l'hôte en montre plusieurs, compense ce signal déficient par un cri exagéré.

Wignall A.E. & Taylor P.W. (2011), Proc. R. Soc. B 278, 1427-1433. doi.org/10.1098/rspb.2010.2060 ; Wignall A.E. & Herberstein M.E. (2013), Sci. Rep. 3, 3557. doi.org/10.1038/srep03557 ; Kilner R.M. & Davies N.B. (1999), Anim. Behav. 58, 797-808. doi.org/10.1006/anbe.1999.1197

LECTURE. *Un gabarit qui pondère des traits, une direction plutôt qu'une copie, prédit le faux préféré : plus on va dans sa direction, plus il lit. Une copie stockée prédirait l'inverse, un maximum sur le vrai. Et un code lisible peut être écrit par un autre que l'émetteur attendu.*

ÉTABLI. Relire change la trace. Chez le rat, un souvenir de peur ancien, rappelé, redevient fragile et doit être refabriqué pour persister ; bloquer cette refabrication juste après le rappel l'efface.

Nader K., Schafe G.E. & LeDoux J.E. (2000), Nature 406, 722-726. doi.org/10.1038/35021052

ÉTABLI. Des participants prévenus que la moitié des images de bruit pur contenait un visage en ont vu un dans 34 % des cas ; prévenus pour des lettres, ils en ont vu dans 38 % des cas. Il n'y avait rien.

Liu J. et al. (2014), Cortex 53, 60-77. doi.org/10.1016/j.cortex.2014.01.013

CALCUL. Je l'ai vécu pendant l'écriture de ce texte. En faisant tourner les 4 solides de Platon superposés dans une petite machine de lumière, j'ai vu un rythme. Mesuré image par image sur la vidéo, il est réel : une période de 0,678 s, pour 0,679 s prévue par le code, et un motif propre à chaque solide. Mais j'y ai lu aussi 4 images : le feu qui crépite, l'air en petite tornade, l'eau en pluie, la terre en séisme. Test à l'aveugle, solide caché, lumière blanche, orientation tirée au hasard : 4 lecteurs, dont 3 qui ignoraient quelle image j'associais à quel solide, 48 essais, 12 par solide, une réponse à choisir parmi les 4. 19 réponses justes sur 48, là où le hasard en donne 12 ($p = 0,018$). « Pluie » était la réponse favorite des lecteurs, solide ou pas : 23 fois sur 48. Sur l'icosaèdre, elle revient 9 fois sur 12 ; sur les 3 autres solides, 14 fois sur 36 ($p = 0,032$; 0,13 une fois compté que 4 solides étaient testés). Le feu, l'air et la terre restent au niveau du hasard : 4 sur 12, 4 sur 12, 3 sur 12.

E. Sorel (2026), mesure vidéo et test à l'aveugle, 4 lecteurs, 48 essais, données de l'auteur, non publiées ; total : probabilité binomiale, chance 1 sur 4 ; pluie : icosaèdre contre les 3 autres solides, test exact de Fisher unilatéral, corrigé du nombre de solides testés

LECTURE. *Le rythme était dans la machine. Le total dépasse le hasard. La pluie, elle, penche vers l'icosaèdre sans tenir seule : un test à 4 lecteurs ne suffit pas à dire si elle vient de l'objet, et Platon faisait déjà de ce solide celui de l'eau : même lecture, ou même clic. Le crépitement, la tornade et le séisme venaient du lecteur. Le test n'a rien effacé : il a séparé ce que d'autres lisent aussi de ce que je lisais seul.*

ÉTABLI. La privation de sommeil pendant l'encodage augmente les faux souvenirs.

Frenda S.J. et al. (2014), Psychol Sci 25, 1674-81. doi.org/10.1177/0956797614534694

ÉTABLI. On a inséré un gorille 48 fois plus grand qu'un nodule dans des scanners de poumons. 83 % des radiologues, lecteurs entraînés, ne l'ont pas vu. La plupart de ceux qui l'ont manqué avaient pourtant posé les yeux dessus.

Drew T, Võ M.L.-H. & Wolfe J.M. (2013), Psychol. Sci. 24, 1848-1853.
doi.org/10.1177/0956797613479386

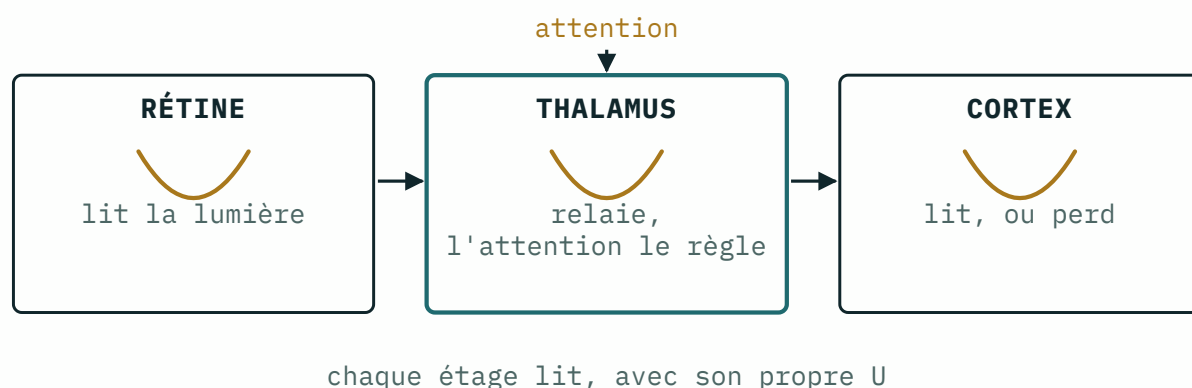


Fig. 13 · Le lecteur a des étages (schéma)

Dès le thalamus, l'attention renforce ce qui est suivi et atténue le reste (O'Connor et al. 2002). Regarder n'est pas encore lire : 83 % de radiologues entraînés n'ont pas vu un gorille 48 fois plus grand qu'un nodule, et la plupart l'avaient regardé en face (Drew, Võ et Wolfe 2013). **LECTURE.** À quel étage la trace se perd, la mesure ne le dit pas encore.

Une science entière peut lire comme un seul lecteur.

ÉTABLI. En 2011, une analyse phylogénétique place les mitochondries comme groupe frère du clade marin SAR11. En 2012, une autre analyse attribue ce rapprochement à des « artefacts due to compositional bias » (artefacts dus à un biais de composition) : les deux lignées ont toutes deux un génome riche en A et T, et l'algorithme les a rapprochées pour cette ressemblance.

Thrash J.C. et al. (2011), Sci. Rep. 1, 13. doi.org/10.1038/srep00013 ; Rodríguez-Ezpeleta N. & Embley T.M. (2012), PLoS One 7, e30520. doi.org/10.1371/journal.pone.0030520

ÉTABLI. L'idée de réseaux de champignons par lesquels les arbres d'une forêt se transmettraient ressources et signaux a été réexaminée en 2023. Pour plusieurs de ces affirmations, les auteurs ne trouvent « no peer-reviewed, published evidence » (aucune preuve publiée et relue par les pairs), et les citations non soutenues ont « doubled in the past 25 years » (doublé au cours des 25 dernières années).

Karst J., Jones M.D. & Hoeksema J.D. (2023), Nat Ecol Evol 7, 501-511. doi.org/10.1038/s41559-023-01986-1

DÉBATTU. D'où viennent les biais d'un lecteur ? Pour une part, du bruit : un seuil qui tremble fabrique des réponses variables. Pour une autre, de la règle de décision elle-même : l'effet leurre, où une troisième option sans intérêt change l'issue entre les deux premières, existe jusque chez le blob, qui n'a pas de neurone.

Benjamin A.S., Diaz M. & Wee S. (2009), Psychol. Rev. 116, 84-115. doi.org/10.1037/a0014351 ; Latty T. & Beekman M. (2011), Proc. R. Soc. B 278, 307-312. doi.org/10.1098/rspb.2010.1045

Relier deux choses qui se ressemblent fait un clic, le même chez celui qui trouve et chez celui qui se trompe. Et si ce clic ne venait pas du monde ? Et s'il venait de moi ? Le don de tout relier et la malédiction de tout relier, c'est le même geste (E. Sorel, 2026).

II §3 SYNTHÈSE

lire à la bonne échelle, et lire à deux

Enlever ce qui trompe l'œil pour voir la structure profonde (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Le recodage des acides aminés en groupes de propriétés proches, dit recodage de Dayhoff, réduit les artefacts de composition dans les arbres. Deux lignées éloignées qui ont pris la même composition se ressemblent sans être parentes ; le recodage efface cette ressemblance, que le lecteur prenait pour de la parenté, et garde ce qui vient de l'histoire.

Muñoz-Gómez S.A. et al. (2019), Elife 8. doi.org/10.7554/eLife.42535

ÉTABLI. Lire à plusieurs ne suffit pas toujours. Plusieurs voies, plusieurs gènes ou plusieurs cellules ne gagnent de l'information que s'ils ne passent pas tous par le même goulot : dans la voie du TNF, un goulot en amont plafonne ce que gagne l'ensemble.

ÉTABLI. Face à un trop grand nombre d'options, une colonie de fourmis décide mieux qu'une fourmi seule. Dans la colonie, chaque fourmi n'évalue qu'une petite partie des sites, et l'ensemble les couvre tous ; la fourmi isolée doit tous les évaluer elle-même.

Sasaki T. & Pratt S.C. (2012), Curr. Biol. 22, R827-R829. doi.org/10.1016/j.cub.2012.07.058

LECTURE. *Un motif réel laisse une trace hors de celui qui le voit (E. Sorel, Ce qu'on voit à moitié, 2026). Retrouvé par 2 lecteurs qui ne se sont jamais touchés, il n'est plus un reflet. L'erreur n'est pas de croire à une hiérarchie, c'est de la mesurer depuis soi (E. Sorel, 2026). La lisibilité dépend du lecteur. Le réel, lui, ne s'efface pas avec le regard (E. Sorel, Le Diamant, 2026).*

II §4

Le mur de la perception

Le lecteur ne lit pas sa propre règle. Si le piano est faux, si une touche manque, tout un pan du monde reste muet, et on ne le sait même pas (E. Sorel, *Ce qu'on entend à moitié*, 2026).

Il y a deux espèces de murs : l'opacité, qu'un meilleur instrument perce, et l'absence de théorie, qui reste hors de l'équation (E. Sorel, *Le Big Bang : l'éclat qui aveugle*, 2026).

On voit clair sur tout, sauf dans le miroir (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

Le passage

Si deux lecteurs indépendants retombent sur la même chose, qu'est-ce qui passe de l'un à l'autre ?

✦ Chant II · PERCEPTION

Nous avons cru, longtemps, que voir, c'était recevoir. Que le monde arrivait tout fait, et qu'il suffisait d'ouvrir les yeux.

C'était vrai à notre étage. Nos yeux, eux, triaient déjà.

Une trace a besoin de quatre pièces : quelqu'un qui émet, quelque chose qui porte, quelqu'un qui lit, et un rythme commun. Une seule manque, et la trace existe, mais elle reste muette.

Et chacun lit à travers un gabarit. Certains naissent avec, d'autres le forgent, d'autres le reçoivent dans une fenêtre qui se referme. La mouche suit la corde que nous voyons immobile. L'araignée tend sa toile quand elle a faim.

Nous voyons des visages dans le bruit. Nous ne voyons pas le gorille sur l'écran. Nous relisons nos souvenirs et ils changent dans nos mains. Ce n'est la faute de personne. C'est la place d'où l'on lit.

Et pourtant, quand deux lecteurs qui ne se sont jamais vus tombent sur la même chose, le reflet devient un monde.

LA RÉSONANCE

ce qui passe d'un lecteur à l'autre, d'un étage à l'autre, d'un âge à l'autre

« La résonance ne produit pas, elle sélectionne. La forme trie, personne ne décide. » (E. Sorel, 2026)

III §0

Décrypter ou résonner

Posez deux guitares dans une pièce. Pincez une corde de la première. Sur la seconde, que personne ne touche, la corde accordée sur la même note se met à vibrer, et les autres restent muettes. Rien n'a traduit la note. Elle est tombée sur la bonne corde, c'est tout.

CALCUL. Pas tout à fait seule, d'ailleurs. Le mi grave, à **82,4 Hz**, vibre aussi à **165**, **247** et **330 Hz**. Sur la seconde guitare, le mi grave répond ; le si aussi, sur la 3e harmonique, à **2 cents** près ($3 \times 82,4 = 247,2 \text{ Hz}$, pour **246,9**) ; le mi aigu aussi, sur la 4e, pile (**329,6 Hz**). Et le la répond, plus faiblement, par une harmonique partagée : sa 3e, $3 \times 110 = 330 \text{ Hz}$, tombe sur la 4e du mi grave, **329,6 Hz**. Le la et le mi grave sont à **4:3**, la quarte. Le ré et le sol ne partagent presque rien : leurs harmoniques les plus proches, **587** et **588 Hz**, manquent celle du mi grave, **577 Hz**, de **2 %**. Les cordes qui chantent avec la première sont celles dont l'écart tombe sur un rapport simple : **1:1**, **3:1**, **4:1**, **4:3**.

82,4 Hz

le mi grave, qui vibre aussi à 165, 247 et 330 Hz

2 cents

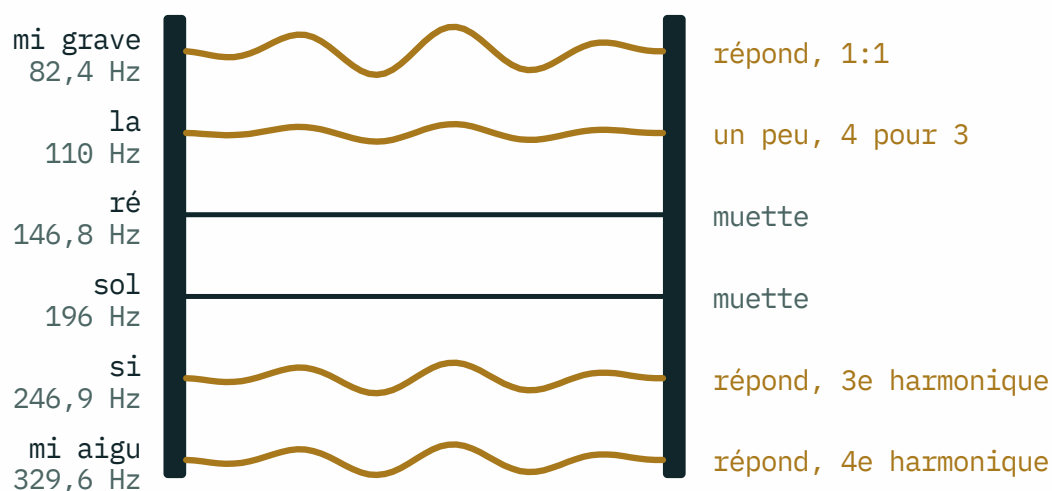
l'écart entre sa 3e harmonique et le si

4:3

la quarte : le la répond par une harmonique partagée

2 %

ce qui manque au ré et au sol pour répondre



on pince le mi grave de la première guitare ; voici la seconde

Fig. 14 · Deux guitares (schéma)

Les cordes qui chantent avec la première sont celles dont l'écart tombe sur un rapport simple : **1:1**, **3:1**, **4:1**, **4:3**. Le ré et le sol manquent l'harmonique du mi grave de **2 %** et restent muets.

Un laser fait de même avec la lumière : entre ses deux miroirs, il ne garde que les ondes qui tombent juste. La cavité trie la lumière par résonance, comme la cochlée trie les sons. La cavité ne produit pas d'énergie, elle ordonne le chaos en cohérence, par répétition (E. Sorel, 2026).

Le décrypteur traduit une trace. Le résonateur ne traduit rien : il répond fort à ce qui tombe sur sa fréquence, et laisse passer le reste. La courbe en U de la première partie, la fenêtre d'un lecteur, est une courbe de résonance : la bande où il répond.

Et la musique se lit par couches. Faut-il une convention pour l'entendre ? Il en faut au moins une pour savoir que c'est de la musique, sinon c'est du bruit. Mais on peut la trouver belle sans solfège.

Tableau 4 · Les couches de l'écoute (la répartition en couches est ma lecture ; les faits sont sourcés juste en dessous)

Couche	Ce qui lit	Ce qui le montre	Inné ou appris
1 · l'oreille	la cochlée, qui range les fréquences du grave à l'aigu	chacun entend la hauteur, le timbre, la rugosité, sans l'avoir appris	inné
2 · la pulsation	l'attente du temps fort	le nouveau-né réagit quand le temps fort manque	inné
3 · « c'est de la musique »	la fonction d'un chant	des auditeurs de 60 pays reconnaissent berceuse, danse, soin ou amour dans 86 sociétés inconnues	partagé
4 · « c'est beau »	la préférence pour un accord	les Tsimané distinguent consonant et dissonant, sans préférer l'un	appris, sans le savoir
5 · le solfège	la partition	noter, transmettre	écrit

ÉTABLI. Le nouveau-né attend le temps fort : quand il manque, son cerveau réagit comme à une attente trompée. Des auditeurs de 60 pays devinent la fonction de chants venus de 86 sociétés qu'ils ne connaissent pas, berceuse, danse, soin ou amour, sur des extraits de 14 s.

Winkler I. et al. (2009), PNAS 106, 2468-2471. doi.org/10.1073/pnas.0809035106 ; Mehr S.A. et al. (2018), Curr. Biol. 28, 356-368. doi.org/10.1016/j.cub.2017.12.042

60 pays

d'où viennent les auditeurs

86 sociétés

dont ils devinent la fonction des chants, sans les connaître

14 s

la durée des extraits

ÉTABLI. Lire n'est pas répondre, ici non plus. Les Tsimané d'Amazonie distinguent les accords consonants des dissonants, comme un Occidental, mais les jugent aussi agréables les uns que les autres. Certaines personnes perçoivent la musique normalement sans en tirer aucun plaisir, alors que l'argent leur en donne. Et le frisson musical libère de la dopamine dans le striatum : le noyau caudé pendant l'attente, le noyau accumbens au moment fort.

McDermott J.H. et al. (2016), Nature 535, 547-550. doi.org/10.1038/nature18635 ; Mas-Herrero E. et al. (2014), Curr. Biol. 24, 699-704. doi.org/10.1016/j.cub.2014.01.068 ; Salimpoor V.N. et al. (2011), Nat. Neurosci. 14, 257-262. doi.org/10.1038/nn.2726

ÉTABLI. La pulsation déborde notre espèce. Un cacatoès à huppe jaune ajuste de lui-même le tempo de ses mouvements quand on accélère ou ralentit la musique.

Patel A.D. et al. (2009), Curr. Biol. 19, 827-830. doi.org/10.1016/j.cub.2009.03.038

LECTURE. Les couches basses résonnent, les couches hautes se lisent. Le gabarit du rythme sort de l'humain ; celui de l'accord « joli » s'arrête à la culture.

Ma seule recette, c'est l'échelle de perception : prendre une chose du vivant, puis chercher ailleurs dans la nature ce qui fait la même chose, à un autre étage (E. Sorel, 2026).

« On naît avec l'oreille, on apprend la beauté. Le solfège n'écrit que la partition. » (E. Sorel, 2026)

III §1 THÈSE

la résonance, mesurée

Chacun sur son rythme et son tempo, mais des rythmes et des tempos, ça s'accorde (E. Sorel, 2026). Ce qui bat sur le même rythme se relie (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

ÉTABLI. Une seule cellule du nœud sinusal d'un cœur de lapin, stimulée de l'extérieur, se cale sur le rythme imposé selon des rapports simples : 1 battement pour 1 impulsion, 1:2, et entre les deux, « 5:4, 4:3, and 3:2 » (5:4, 4:3 et 3:2).

Anumonwo J.M. et al. (1991), Circ. Res. 68, 1138-1153. doi.org/10.1161/01.res.68.4.1138

ÉTABLI. Ces rapports ont une explication. Quand un rythme en entraîne un autre, ils s'accrochent dans des zones en forme de langues, les langues d'Arnold, d'autant plus larges que le rapport est simple : 1:1 d'abord, puis 2:1, puis 3:2. On les a vues et prédites sur des agrégats de cellules cardiaques d'embryon de poulet, avec leurs accrochages et leurs dérapages. Et deux horloges posées sur une même structure de bois se synchronisent encore, comme les pendules de Huygens au XVIIe siècle : le couplage passe par le porteur.

Arnold V.I. (1961), Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Mat. 25, 21-86, trad. anglaise (1965), Amer. Math. Soc. Transl. 46, 213-284 ; Guevara M.R., Glass L. & Shrier A. (1981), Science 214, 1350-1353. doi.org/10.1126/science.7313693 ; Glass L. (2001), Nature 410, 277-284.

LECTURE. Les 5:4, 4:3 et 3:2 de la cellule du nœud sinusal sont les voisins les plus simples entre 1:1 et 2:1 : des langues d'Arnold, dans une seule cellule. La mesure et son pourquoi.

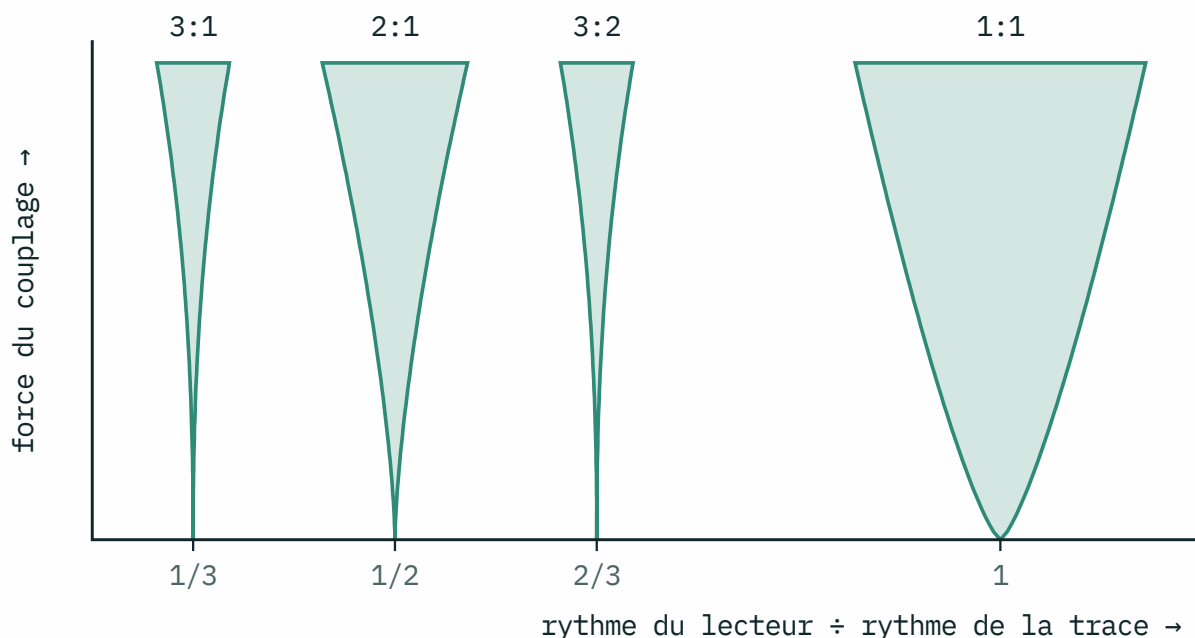


Fig. 15 · Les langues d'Arnold (schéma)

Dans une langue, les deux rythmes s'accrochent. Plus le rapport est simple, plus la langue est large : 1:1 d'abord, puis 2:1, puis 3:2 et 3:1. Les langues viennent de l'application du cercle (Arnold, 1961) ; dans le vivant, elles sont vues sur des cellules cardiaques d'embryon de poulet (Guevara, Glass et Shrier 1981 ; Glass 2001). Le couplage passe par le porteur, comme la poutre des horloges de Huygens ; deux horloges couplées par une structure en bois se synchronisent encore aujourd'hui (Peña Ramirez et al. 2016).

ÉTABLI. Dans le blob, tous les noyaux se divisent au même moment, alors qu'aucune cloison ne les sépare et qu'aucun chef ne les commande.

Sachsenmaier W., Remy U. & Plattner-Schobel R. (1972), Exp Cell Res 73, 41-48.
doi.org/10.1016/0014-4827(72)90099-7

ÉTABLI. Soumis à 3 coups de froid réguliers, le blob ralentit ensuite de lui-même au moment où le coup suivant serait venu, alors que rien ne se passe.

Saigusa T. et al. (2008), Phys. Rev. Lett. 100, 018101. doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.018101

ÉTABLI. Chez la chouette effraie, le nerf auditif se cale sur la phase de l'onde sonore à des intensités plus basses que celles qui font monter son nombre de décharges. Le nerf répond à la fréquence avant de répondre à la force.

Köppl C. (1997), J Neurosci 17, 3312-3321. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-09-03312.1997

ÉTABLI. Chez l'humain, un son et une vibration posée au bout du doigt, chacun trop faible pour être détecté seul, sont détectés ensemble. Quand leurs fréquences sont égales ou proches, leurs effets s'additionnent tout droit ; quand elles s'écartent, ils s'additionnent en racine de la somme des carrés.

Wilson E.C., Reed C.M. & Braida L.D. (2010), J. Acoust. Soc. Am. 127, 3044-3059. doi.org/10.1121/1.3365318

ÉTABLI. Des lucioles qui clignent ensemble, par milliers, sans signal central : la synchronie est « widespread geographically and taxonomically » (répandue sur toute la géographie et dans tous les groupes).

Buck J. (1988), Q Rev Biol 63, 265-89. doi.org/10.1086/415929

ÉTABLI. Deux rythmes peuvent gouverner la même bête. Le moucheron marin *Clunio marinus* se reproduit au rythme de deux horloges internes, l'une sur le jour, l'autre sur la Lune et les marées ; chaque population, sur sa côte, porte dans ses gènes un réglage propre de l'une et de l'autre. Chez le ver marin *Platynereis*, l'horloge mensuelle, réglée par la lumière de la Lune la nuit, change la période et la force du comportement quotidien.

Kaiser T.S. & Heckel D.G. (2012), PLoS One 7, e32092. doi.org/10.1371/journal.pone.0032092 ; Kaiser T.S. et al. (2016), Nature 540, 69-73. doi.org/10.1038/nature20151 ; Zantke J. et al. (2013), Cell Rep. 5, 99-113. doi.org/10.1016/j.celrep.2013.08.031

LECTURE. Les deux échelles ne se battent pas : la grande ouvre la fenêtre, quelles nuits ; la petite fixe le moment, quelle heure ; et la grande retend la petite. Chez le moucheron, la convention est locale : le code est dans la marée, le gabarit dans l'horloge, le réglage dans les gènes de la côte.

Une cellule de cœur de lapin, les noyaux du blob, le nerf d'une chouette, le bout d'un doigt humain, une rive de lucioles. Rien ne se ressemble dans cette liste, et tous font la même chose : ils répondent à ce qui tombe sur leur rythme, et se calent dessus.

5:4 · 4:3 · 3:2

les rapports d'une seule cellule de nœud sinusal, entre 1:1 et 2:1

3 coups de froid

puis le blob ralentit de lui-même au rendez-vous suivant

2 horloges

chez le moucheron *Clunio* : le jour, et la Lune avec les marées

ÉTABLI. Un peu de bruit peut aider à lire. On appelle résonance stochastique le fait qu'un bruit de niveau bien réglé fasse passer un signal trop faible pour franchir le seuil seul. Le nom est né en physique, chez Benzi et ses collègues en 1981, à propos du rythme des âges glaciaires ; McNamara et Wiesenfeld en ont fait la théorie en 1989. Elle a été montrée dans les mécanorécepteurs de l'écrevisse ; chez le poisson-spatule, qui repère le plancton avec ses électrorécepteurs, un champ électrique bruité d'amplitude optimale élargit la zone où il le détecte, et les essaims de daphnies produisent eux-mêmes ce bruit ; chez l'humain, un même bruit sonore abaisse les seuils du toucher, de la vue et de la posture.

Benzi R., Sutera A. & Vulpiani A. (1981), J. Phys. A 14, L453-L457. doi.org/10.1088/0305-4470/14/11/006 ; McNamara B. & Wiesenfeld K. (1989), Phys. Rev. A 39, 4854-4869. doi.org/10.1103/PhysRevA.39.4854 ; Douglass J.K. et al. (1993), Nature 365, 337-340. doi.org/10.1038/365337a0 ; Russell D.F., Wilkens L.A. & Moss F. (1999), Nature 402, 291-294. doi.org/10.1038/46279 ; Lugo E., Doti R. & Faubert J. (2008), PLoS One 3, e2860. doi.org/10.1371/journal.pone.0002860

LECTURE. *Le bruit joue à deux places dans l'équation. Dans la fraction, il baisse la lisibilité. Au seuil, il élargit le S : une trace juste en dessous, sans bruit, n'a aucune chance d'être lue ; avec un peu de bruit, elle en a une. Trop de bruit, et les fausses alertes prennent toute la place.*

CALCUL. Pour un lecteur à seuil simple, le meilleur bruit est de l'ordre de la marche qui sépare le repos du seuil : deux simulations le placent entre la moitié et les trois quarts de cette marche, avec un sommet plat. La valeur **0,71** souvent citée vient d'un autre modèle, à double puits, et ne se grave pas ici. Et le phénomène « does not occur in linear systems » (ne se produit pas dans les systèmes linéaires) : le bruit n'aide qu'à l'étage du seuil, jamais à celui de l'intégration.

Lugo E., Doti R. & Faubert J. (2008), PLoS One 3, e2860. doi.org/10.1371/journal.pone.0002860

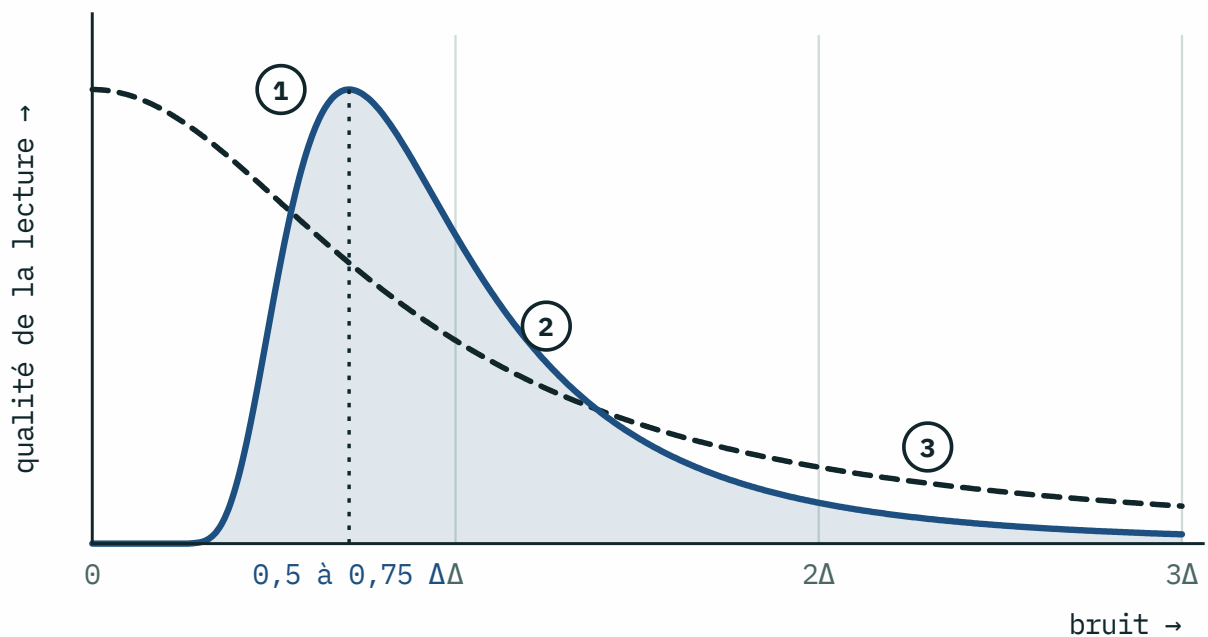


Fig. I6 · Le bruit qui aide, puis qui couvre (schéma)

La lisibilité d'une trace juste sous le seuil, en fonction du bruit. Δ est la distance du repos au seuil. Le meilleur bruit est de l'ordre de la marche, entre la moitié et les trois quarts de Δ selon le modèle (0,5 à 0,75 Δ), avec un sommet plat. Le phénomène est mesuré chez l'écrevisse (Douglass et al. 1993).

- ① Juste sous le seuil, un peu de bruit fait la courte échelle : la trace passe.
- ② Trop de bruit : il couvre, comme les étoiles en plein jour.
- ③ Au-dessus du seuil (pointillés), le bruit ne fait que couvrir.

DÉBATTU. Qu'une stimulation répétée renforce durablement une synapse est établi depuis 1973. Que la synchronie des neurones, le fait de décharger en phase, serve à lier ce qu'ils codent reste discuté : « Neuronal synchrony: a versatile code for the definition of relations? » (La synchronie neuronale : un code polyvalent pour définir des relations ?) d'un côté, « Synchrony unbound » (La synchronie déliée) de l'autre, dans le même numéro.

Bliss T.V. & Lomo T. (1973), J Physiol 232, 331-356. doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273 ;
Singer W. (1999), Neuron 24, 49-65. doi.org/10.1016/s0896-6273(00)80821-1 ; Shadlen M.N. &
Movshon J.A. (1999), Neuron 24, 67-77. doi.org/10.1016/s0896-6273(00)80822-3

Un miroir ne résonne pas. Deux cordes, si (E. Sorel, *Ce qu'on entend à moitié*, 2026).

ce qui revient n'est jamais la même chose

La copie n'est jamais exacte. La vie ne tient qu'entre deux abîmes : copier trop juste, et tout se fige ; copier trop faux, et tout se dissout (E. Sorel, 2026). Ce qui se refait se déforme (E. Sorel, *Le Diamant*, 2026).

ÉTABLI. Le bord « trop faux » a une valeur : au-delà d'un seuil d'erreur de copie, l'information d'une lignée se dissout. Et le taux d'erreur ne descend pas sous une limite fixée par la taille de la population, la « drift barrier » (barrière de dérive).

Eigen M. (1971), *Naturwissenschaften* 58, 465-523. doi.org/10.1007/BF00623322 ; Sung W. et al. (2012), *PNAS* 109, 18488-18492. doi.org/10.1073/pnas.1216223109

ÉTABLI. Un poulpe de l'Antarctique et un poulpe des tropiques ont des canaux potassium qui ne diffèrent qu'en 4 positions. La différence de fonctionnement passe par l'édition de leurs ARN, réglée selon la température : la lignée relit au lieu de réécrire.

Garrett S. & Rosenthal J.J.C. (2012), *Science* 335, 848-851. doi.org/10.1126/science.1212795

ÉTABLI. Ce qui revient n'est pas la pièce. Dans un biofilm bactérien, c'est le potassium qui porte les vagues de signal d'une cellule à l'autre. Dans les cellules animales, c'est surtout le calcium, avec sa boîte à outils propre à chaque type de cellule.

Prindle A. et al. (2015), *Nature* 527, 59-63. doi.org/10.1038/nature15709 ; Berridge M.J., Lipp P. & Bootman M.D. (2000), *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 1, 11-21. doi.org/10.1038/35036035

Même principe, partenaires exacts variables selon l'individu (E. Sorel, 2026).

DÉBATTU. Le geste n'a peut-être pas toujours recommencé. Pour Lane et Martin, la cellule à noyau n'est apparue « just once in four billion years » (une seule fois en quatre milliards d'années), parce qu'elle demandait la mitochondrie. Pour Lynch et Marinov, « the origin of the mitochondrion was not a prerequisite for genome-size expansion » (l'origine de la mitochondrie n'était pas un préalable à l'expansion de la taille du génome).

Lane N. & Martin W. (2010), *Nature* 467, 929-934. doi.org/10.1038/nature09486 ; Lynch M. & Marinov G.K. (2015), *PNAS* 112, 15690-5. doi.org/10.1073/pnas.1514974112

DÉBATTU. L'air circule à sens unique dans les poumons de l'alligator et dans ceux du varan, comme chez les oiseaux. Les auteurs posent eux-mêmes les deux lectures : « either unidirectional airflow evolved independently [...] or these flow patterns are homologous » (soit le flux d'air à sens unique est apparu indépendamment [...], soit ces schémas de flux sont homologues).

Farmer C.G. & Sanders K. (2010), *Science* 327, 338-340. doi.org/10.1126/science.1180219 ; Schachner E.R. et al. (2014), *Nature* 506, 367-370. doi.org/10.1038/nature12871

ÉTABLI. Le même biais ne recommence pas à tous les étages. Le blob, seul, tombe dans l'effet leurre. Une colonie de fourmis y échappe, parce que la plupart de ses fourmis ne connaissent qu'un seul des sites. Mais un effet d'ancrage, faible, se retrouve chez la colonie entière : « The effect was small, reaching statistical significance in only one of two experimental replicates. » (L'effet était faible, et n'atteignait la significativité statistique que dans une seule des deux répétitions de l'expérience.)

Latty T. & Beekman M. (2011), Proc. R. Soc. B 278, 307-312. doi.org/10.1098/rspb.2010.1045 ;
Edwards S.C. & Pratt S.C. (2009), Proc. R. Soc. B 276, 3655-3661. doi.org/10.1098/rspb.2009.0981 ;
Doering G.N. et al. (2023), Behav Processes 208, 104861. doi.org/10.1016/j.beproc.2023.104861

ÉTABLI. Dans **5** lignées de bactéries endosymbiotiques nées à part, leur ADN ribosomique 16S évolue plus vite que chez les cousines libres, « in every case » (dans tous les cas). Chez *Buchnera*, les protéines glissent vers des acides aminés codés par des triplets riches en A et T.

Moran N.A. (1996), PNAS 93, 2873-2878. doi.org/10.1073/pnas.93.7.2873

4 positions

seulement, entre les canaux potassium d'un poulpe de l'Antarctique et d'un poulpe des tropiques

5 lignées

de bactéries endosymbiotiques nées à part : l'ADN 16S y évolue plus vite, dans tous les cas

LECTURE. Un génome qui glisse vers A et T, dans des lignées qui ne se touchent pas : c'est ce qui a rapproché à tort la mitochondrie de SAR11 dans la deuxième partie, la ressemblance venant de la composition et non de la parenté. Le recommencement fabrique la ressemblance qui le cache. Le visible fait mal lire l'invisible (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026), ici dans une seule chaîne de faits.

LECTURE. Ce qui recommence n'est donc pas la même chose à toutes les échelles. C'est le même geste, là où les lecteurs sont branchés pour y répondre. La mitochondrie est une chose ancienne : une fusion arrivée une fois, et gardée. Le phage, le virus des bactéries, est un processus ancien : il se rejoue sans cesse, avec des acteurs toujours nouveaux. La mito, vieux mariage. Le phage, vieux verbe (E. Sorel, 2026).

Je pose maintenant l'objection entière, parce qu'elle est la plus forte qu'on puisse faire à ce texte, et qu'elle vaut contre chacune de ses pages : une ressemblance de forme n'est pas un mécanisme. Un essaim qui accumule et un cortex qui accumule, une colonie et un blob devant le même leurre, une cellule de cœur et une rive de lucioles : ce sont des courbes qui se ressemblent, et une courbe peut ressembler à une autre pour bien des raisons. Les faits de cette partie le disent eux-mêmes. Le poumon de l'alligator et celui de l'oiseau font circuler l'air dans le même sens, et les auteurs ne savent pas dire si ce sont deux inventions ou un héritage. Dans le cortex, sélectionner une cible « is dissociable from, and may even conflict

with, evidence accumulation » (est dissociable de l'accumulation d'évidence, et peut même entrer en conflit avec elle) : la même courbe, deux machines. Et la mitochondrie a ressemblé à SAR11 parce que leurs génomes avaient glissé vers les mêmes lettres : une ressemblance fabriquée par deux histoires séparées, que l'algorithme a lue comme une parenté.

Voici jusqu'où l'objection tient. Elle tient contre toute phrase de ce texte qui dirait « même mécanisme ». Aucune ne le dit. La thèse ne porte pas sur les mécanismes, qui changent d'étage comme les lois : elle porte sur une forme de lecture, un seuil, une courbe, un gabarit, et sur le fait que cette forme se mesure à chaque étage avec les mêmes instruments. Que la forme revienne est un fait : les U de 9 espèces, les langues d'Arnold dans une seule cellule de cœur et sur une rive de lucioles. Qu'elle revienne pour la même raison est une hypothèse, et elle est posée comme telle, avec ce qui la ferait tomber.

Et voici où l'objection cesse de porter. La ressemblance de forme est ce que ce texte mesure, pas ce qu'il conclut. La forme fait voir. La preuve reste dans les barreaux, sourcés un par un. Ce texte est monté comme ce qu'il décrit, la même thèse, la même antithèse et la même synthèse à chaque étage, du livre à la phrase.

Une analogie de forme n'est jamais une démonstration de mécanisme (E. Sorel, 2026). C'est une raison d'aller mesurer.

III §3 SYNTHÈSE

le même geste résonne d'étage en étage

THÈSE • AU-DESSUS

Le corps humain reproduit à grande échelle ce que la nature fait déjà (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Les bactéries d'un biofilm se parlent déjà par des vagues électriques : un canal potassium propage le signal de cellule en cellule, comme dans nos nerfs. « Ion channels enable electrical communication in bacterial communities. » (Les canaux ioniques permettent la communication électrique dans les communautés bactériennes.)

Prindle A. et al. (2015), Nature 527, 59-63. doi.org/10.1038/nature15709

ÉTABLI. Dans le cortex du singe, des neurones accumulent l'évidence jusqu'à un seuil, et la décision tombe quand le seuil est atteint. Dans un essaim d'abeilles qui cherche un nouveau nid, « separate populations of units (bees or neurons) integrate noisy evidence for alternatives, and, when one population exceeds a threshold, the alternative it represents is chosen » (des populations séparées d'unités (abeilles ou neurones) intègrent des évidences bruitées en faveur de chaque option et, quand une population dépasse un seuil, l'option qu'elle représente est choisie). L'inhibition croisée d'un cerveau « also exists in a swarm » (existe aussi dans un essaim).

Kira S., Yang T. & Shadlen M.N. (2015), *Neuron* 85, 861-73. doi.org/10.1016/j.neuron.2015.01.007 ; Seeley T.D. et al. (2012), *Science* 335, 108-111. doi.org/10.1126/science.1210361 ; Marshall J.A.R. et al. (2009), *J. R. Soc. Interface* 6, 1065-1074. doi.org/10.1098/rsif.2008.0511

ÉTABLI. Les grandes transitions de l'évolution peuvent être « recursive » (récursives), se refaire d'un niveau au suivant, et elles touchent toutes la façon dont l'information est « stored, transmitted and interpreted » (stockée, transmise et interprétée).

Szathmáry E. (2015), *PNAS* 112, 10104-11. doi.org/10.1073/pnas.1421398112 ; Jablonka E. & Lamb M.J. (2006), *J. Theor. Biol.* 239, 236-246. doi.org/10.1016/j.jtbi.2005.08.038

DÉBATTU. Même motif ne veut pas dire même mécanisme. Dans le cortex, la sélection d'une cible « is dissociable from, and may even conflict with, evidence accumulation » (est dissociable de l'accumulation d'évidence, et peut même entrer en conflit avec elle).

Seideman J.A., Stanford T.R. & Salinas E. (2022), *Nat Commun* 13, 4463. doi.org/10.1038/s41467-022-32209-z

LECTURE. *Stocker, transmettre, interpréter : ce sont les pièces de l'équation, le support qui garde, le porteur qui transporte, le décrypteur qui lit.*

Le support, le porteur, le décrypteur. Les mêmes mots, un étage plus haut.

THÈSE • À CÔTÉ

Le principe est un ; les chemins sont multiples (E. Sorel, 2026). Personne n'a copié personne : la physique impose cette forme (E. Sorel, 2026). Pour les rivières, c'est la physique au sens strict. Pour le placenta, la peau qui perd ses poils en allant à l'eau ou la frontière du soi, c'est la même contrainte, posée à des lignées qui ne se sont jamais touchées.

ÉTABLI. Les gènes de la syncytine, qui permettent la fusion des cellules du placenta, viennent de rétrovirus, et ils ont été « independently acquired by the human [...] and mouse » (acquis indépendamment par les génomes humain [...] et de souris) genomes. Sans syncytine-A, l'embryon de souris meurt dans l'utérus.

Mi S. et al. (2000), *Nature* 403, 785-789. doi.org/10.1038/35001608 ; Dupressoir A. et al. (2009), *PNAS* 106, 12127-12132. doi.org/10.1073/pnas.0902925106

ÉTABLI. L'hippopotame et les cétacés sont les plus proches cousins vivants. **8** gènes de la peau, liés aux glandes sébacées, aux poils et à la kératine, sont éteints chez les deux, et aucune des mutations qui les éteignent n'est commune. Datées, ces extinctions tombent vers **46,5 millions** d'années chez les cétacés et vers **30,5 millions** chez l'hippopotame : deux lignées cousines sont allées à l'eau chacune de son côté.

Springer M.S. et al. (2021), Curr. Biol. 31, 2124-2139. doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.057

ÉTABLI. La cryptobiose, la capacité de suspendre la vie en se desséchant, a été acquise de façon convergente chez les tardigrades.

Mapalo M.A., Wolfe J.M. & Ortega-Hernández J. (2024), Commun Biol 7, 953. doi.org/10.1038/s42003-024-06643-2

ÉTABLI. Les bivalves ont acquis plusieurs fois, indépendamment, des bactéries qui fabriquent leur nourriture à partir de la chimie du milieu, logées selon les lignées à l'extérieur ou à l'intérieur de leurs cellules.

Guo Y. et al. (2023), BMC Biol 21, 51. doi.org/10.1186/s12915-023-01551-z

ÉTABLI. Distinguer le soi du non-soi se retrouve partout chez les animaux, avec des protéines propres à chaque lignée : « Novel genetic interactions have arisen repeatedly » (De nouvelles interactions génétiques sont apparues à plusieurs reprises).

De Tomaso A.W. & Rodriguez-Valbuena H. (2026), Annu Rev Cell Dev Biol 42, 307-337. doi.org/10.1146/annurev-cellbio-111822-123126

ÉTABLI. La plupart des revues admettaient que la multicellularité était apparue « at least **20** times » (au moins **20** fois) chez les eucaryotes. Une revue critique de 2023 en recense **45** lignées indépendantes, de **6** types, et estime le vrai total « likely close to a hundred » (probablement proche d'une centaine).

Lamża Ł. (2023), Biol Rev Camb Philos Soc 98, 2188-2209. doi.org/10.1111/brv.13001

8 gènes

de la peau éteints chez l'hippopotame et chez les cétacés, sans une mutation commune

46,5 · 30,5 Ma

l'âge de ces extinctions, chez les cétacés puis chez l'hippopotame

45 lignées

de multicellularité recensées en 2023 ; le vrai total, proche de 100

LECTURE. C'est la règle des deux lecteurs, posée en deuxième partie : des lignées qui ne se sont jamais touchées retombent sur la même chose. Le motif laisse une trace hors de celui qui le voit.

Parasite, symbiote, organe : un seul geste à des âges différents. Le même geste, une bactérie entre, s'installe, devient indispensable, qu'on nomme différemment selon le point de vue et l'ancienneté (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Aujourd'hui, chez l'humain, un nouveau fragment d'ADN de la mitochondrie s'insère dans le génome du noyau environ une fois toutes les **10 000** naissances.

Wei W. et al. (2022), Nature 611, 105-114. doi.org/10.1038/s41586-022-05288-7

ÉTABLI. À chaque génération, le ver géant *Riftia* est recolonisé par ses bactéries, qui entrent par la peau, par des « mechanisms common to both pathogenic infections and beneficial host-symbiont interactions » (mécanismes communs aux infections pathogènes et aux interactions bénéfiques entre hôte et symbiote).

Nussbaumer A.D., Fisher C.R. & Bright M. (2006), Nature 441, 345-348.
doi.org/10.1038/nature04793

ÉTABLI. En **5 ans** de laboratoire, des bactéries d'abord nuisibles à une amibe sont devenues nécessaires à son noyau. Chaque amibe en abrite environ **42 000** ; retirées, l'amibe meurt.

Jeon K.W. (1972), Science 176, 1122-1123. doi.org/10.1126/science.176.4039.1122 ; Jeon K.W. (2004), J. Eukaryot. Microbiol. 51, 502-508. doi.org/10.1111/j.1550-7408.2004.tb00277.x

ÉTABLI. L'amibe *Paulinella* a acquis son organe de photosynthèse d'une autre cyanobactérie que celle des plantes, et bien plus tard. Cet organe garde **26 %** des gènes de sa cousine libre, et sa réduction est « ongoing » (toujours en cours).

Nowack E.C.M., Melkonian M. & Glöckner G. (2008), Curr. Biol. 18, 410-418.
doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.051

ÉTABLI. Les deux endosymbioses primaires de la photosynthèse sont « two events [...] on vastly different timescales » (deux événements [...] sur des échelles de temps très différentes) : plus de **1,5** milliard d'années pour le chloroplaste des plantes, **90** à **140 millions** d'années pour *Paulinella*.

Lhee D. et al. (2019), Sci Rep 9, 2560. doi.org/10.1038/s41598-019-38621-8 ; Gabr A., Grossman A.R. & Bhattacharya D. (2020), J Phycol 56, 837-843. doi.org/10.1111/jpy.13003

1 / 10
000 naissances

un fragment d'ADN de la mitochondrie entre dans le noyau humain

42 000

bactéries par amibe,
devenues nécessaires en 5
ans

26 %

des gènes de sa cousine libre
gardés par l'organe de
Paulinella

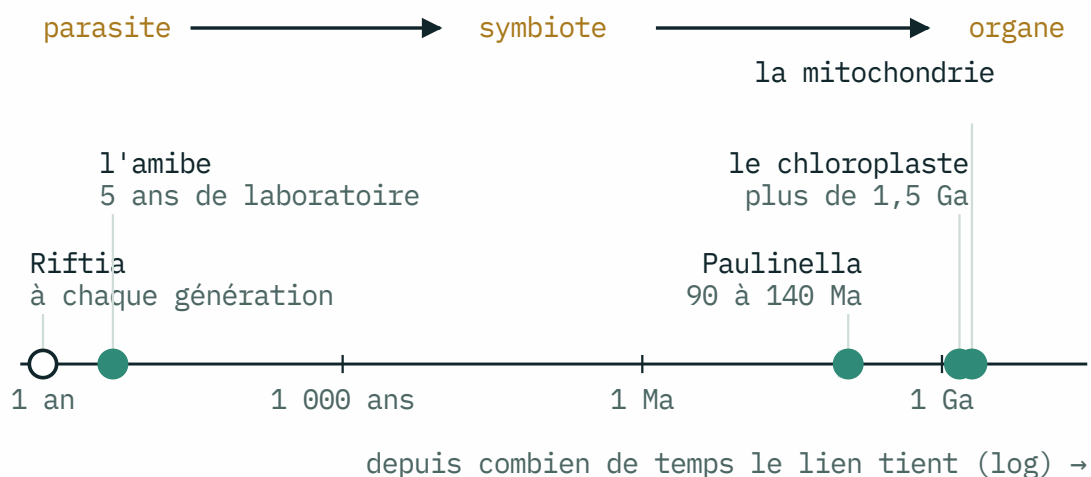


Fig. 17 · Un seul geste, à des âges différents (schéma)

Le même geste, une bactérie entre, s'installe, devient indispensable, saisi à des âges différents : *Riftia* recolonisé à chaque génération, l'amibe en 5 ans de laboratoire, l'organe de *Paulinella* en 90 à 140 millions d'années, le chloroplaste des plantes en plus de 1,5 milliard. La mitochondrie, plus loin encore : *Riftia* dans 2 milliards d'années (E. Sorel, 2026). Les positions sur l'axe sont indicatives : *Riftia* est posé à 1 an pour « à chaque génération », et la mitochondrie à 2 milliards d'années porte la phrase, pas une mesure.

Le mot « parasite » a été effacé par le temps, pas par la nature du lien. *Riftia*, notre passé au ralenti ; la mitochondrie, *Riftia* dans 2 milliards d'années (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Les deux liens ne se transmettent pas de la même façon. *Riftia* est recolonisé à chaque génération par des bactéries du milieu ; chez l'humain, la mitochondrie passe de la mère à l'enfant.

Nussbaumer A.D., Fisher C.R. & Bright M. (2006), *Nature* 441, 345-348.
doi.org/10.1038/nature04793 ; Giles R.E. et al. (1980), *PNAS* 77, 6715-6719.
doi.org/10.1073/pnas.77.11.6715

LECTURE. Le temps n'efface donc pas tout. La façon dont le lien passe d'une génération à l'autre fait partie du lien, et c'est là que ma comparaison cesse de tenir.

Le temps efface le nom du lien. Pas sa route.

SYNTHÈSE · LE SOI

Une unité, du multiple accordé, qui tient tant que l'accord tient (E. Sorel, *L'accord sans chef*, 2026). La vie ne commence pas par un individu, elle commence par une relation (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

ÉTABLI. Une archée d'Asgard, du groupe le plus proche de l'hôte des premières cellules à noyau, a été isolée au bout de plus de **10 ans** de culture. Elle ne vit qu'en association avec d'autres microbes.

Imachi H. et al. (2020), Nature 577, 519-525. doi.org/10.1038/s41586-019-1916-6

10 ans

de culture pour isoler une archée d'Asgard, qui ne vit qu'avec d'autres microbes

ÉTABLI. Distinguer le soi est « a universal phenomenon in the Metazoa » (un phénomène universel chez les métazoaires).

De Tomaso A.W. et al. (2005), Nature 438, 454-459. doi.org/10.1038/nature04150

ÉTABLI. Les ventouses d'un bras de poulpe coupé n'attrapent pas la peau de poulpe : le soi y est chimique et local. L'animal entier, lui, peut passer outre.

Nesher N. et al. (2014), Curr. Biol. 24, 1271-1275. doi.org/10.1016/j.cub.2014.04.024

LECTURE. Krakauer et ses collègues définissent l'individu comme un agrégat qui propage de l'information de son passé vers son futur, « at all levels of organization » (à tous les niveaux d'organisation), et notent que de tels individus peuvent être « hard to detect by observers without suitable measurement principles » (difficiles à détecter pour des observateurs sans principes de mesure adaptés). C'est le côté du lecteur qui reste à mesurer.

Krakauer D. et al. (2020), Theory Biosci. 139, 209-223. doi.org/10.1007/s12064-020-00313-7

Le un est toujours une multitude regardée de loin. Il n'y a pas de fond simple : c'est du multiple à tous les étages, et l'unité n'est que l'étage où le regard s'arrête (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

Nous sommes des villes bâties autour d'un autre, et que nous appelons « moi » (E. Sorel, 2026).

SYNTHÈSE • LA TRACE ENTRE DEUX RECOMMENCEMENTS

Le vivant ne repart jamais d'une page blanche : il surcharge, il recycle, il traîne (E. Sorel, 2026). La mémoire ne garde pas tes souvenirs. Elle garde de quoi les refaire (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

ÉTABLI. L'âge biologique mesuré sur l'ADN redescend au plus bas au début de l'embryon, puis remonte ; les auteurs proposent d'y voir un « ground zero » (point zéro).

Kerepesi C. et al. (2021), Sci Adv 7. doi.org/10.1126/sciadv.abg6082

ÉTABLI. Presque tous les êtres à plusieurs cellules repassent par une seule cellule à chaque génération, et la raison de ce passage reste ouverte, avec deux hypothèses : trier les mutations, ou éviter les conflits entre les cellules d'un même corps.

Grosberg R.K. & Strathmann R.R. (1998), Trends Ecol. Evol. 13, 112-116. doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01313-X

ÉTABLI. Une méduse, *Turritopsis*, connaît aussi un autre recommencement, sans repasser par une seule cellule : à tous les stades de sa vie de méduse, elle peut redevenir polype et recommencer son cycle.

Piraino S. et al. (1996), Biol Bull 190, 302-312. doi.org/10.2307/1543022

LECTURE. *Ce qui relie deux recommencements est une trace qui fait répondre le suivant. La lecture fait qu'un recommencement ne repart pas de zéro ; le recommencement fait que la lecture se retrouve à chaque étage. Le vivant est un recommencement à des échelles différentes (E. Sorel, 2026).*

La cellule fait de l'énergie avec une pente, le cerveau fait un « moi » avec une autre. Même geste, deux étages (E. Sorel, 2026).

III §4

Le mur de la résonance

Une seule matrice, au commencement, qui ne sait que se copier (E. Sorel, 2026). Le recommencement suppose une première copie qu'il ne peut pas produire, et cette première copie n'a laissé aucune trace qu'on sache lire. On arrive au bord de l'origine, jamais à l'origine (E. Sorel, 2026).

Ce n'est pas un échec de la thèse : c'en est la borne (E. Sorel, *Le Diamant*, 2026).

Le passage

Si le même geste résonne d'étage en étage, à quel étage sommes-nous ?

✦ Chant III · RÉSONANCE

Nous avons cru, longtemps, que nous étions un. Un corps, un nom, un regard posé sur le reste.

Nous l'étions, vus de notre étage.

De plus près, nous sommes des villes bâties autour d'un autre. Une bactérie entrée un jour, restée, devenue nous. Des cellules qui battent ensemble sans chef, comme les lucioles d'une même rive, comme les noyaux du blob qui se divisent à la même seconde.

Ce qui bat sur le même rythme se relie. Un miroir ne résonne pas. Deux cordes, si. C'est l'écart entre elles qui chante.

Le vivant recommence. Pas la même pièce, pas la même loi : le même geste, à un autre étage, à un autre âge. *Riftia*, notre passé au ralenti. La mitochondrie, un vieux mariage. Nous, une ville de plus, qui s'est mise un jour à dire « moi ».

On ne demande pas à une résonance de durer. On lui demande d'avoir eu lieu.

La chute

la course sans ligne d'arrivée

Chute **THÈSE**

les faits

Reculez. Reculez jusqu'à ce que la Terre tienne dans votre œil, puis regardez ce qu'elle laisse lire.

ÉTABLI. Le poulpe et les vertébrés ont développé à part de grands cerveaux et des comportements élaborés, sur deux lignées séparées depuis environ **550 millions** d'années : « independently evolved large brains and behavioural sophistication » (ont acquis indépendamment de grands cerveaux et des comportements élaborés). Le poulpe dort en deux temps, calme et actif, et les auteurs y voient des « convergent features of complex cognition » (traits convergents d'une cognition complexe).

Pophale A. et al. (2023), Nature 619, 129-134. doi.org/10.1038/s41586-023-06203-4

ÉTABLI. La vie multicellulaire complexe n'est apparue que dans les **6** lignées de la première partie : les animaux, les plantes, **2** groupes de champignons, des algues rouges et des algues brunes.

Knoll A.H. (2011), Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 39, 217-239.
doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100209

La complexité est l'exception rarissime, pas la norme. La règle, c'est la bactérie (E. Sorel, 2026).

ÉTABLI. Vue de loin, la Terre a caché sa vie pendant la plus grande partie de son histoire. Par l'oxygène, elle n'aurait été bien lisible que pendant les **500** derniers millions d'années environ. Par le méthane, elle aurait été difficile à détecter pendant la plus grande partie des **2,5** derniers milliards d'années.

Reinhard C.T. et al. (2017), Astrobiology 17, 287-297. doi.org/10.1089/ast.2016.1598

Une biosphère entière, sous le seuil d'un lecteur lointain.

ÉTABLI. Et la Terre porte le ciel jusqu'au vivant. Les variations de l'orbite terrestre rythment les âges glaciaires, sur des périodes de **23 000**, **42 000** et environ **100 000 ans**. Il y a environ **66 millions** d'années, un astéroïde d'une dizaine de kilomètres a soulevé une poussière qui a coupé la photosynthèse. Et le bousier, un scarabée de quelques centimètres, roule sa boule tout droit en se guidant sur la Voie lactée : la première orientation sur la Voie lactée prouvée dans le règne animal.

Hays J.D., Imbrie J. & Shackleton N.J. (1976), Science 194, 1121-1132.
doi.org/10.1126/science.194.4270.1121 ; Alvarez L.W. et al. (1980), Science 208, 1095-1108.
doi.org/10.1126/science.208.4448.1095 ; Dacke M. et al. (2013), Curr. Biol. 23, 298-300.
doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034

CALCUL. La Terre absorbe du Soleil environ **240** W par mètre carré, en moyenne, atmosphère comprise ; sa chaleur interne, **47 TW** au total, en apporte **0,09** : environ **2 600** fois moins. Le vivant tourne sur l'énergie du ciel, passée par la Terre.

Trenberth K.E., Fasullo J.T. & Kiehl J. (2009), Bull. Am. Meteorol. Soc. 90, 311-324.
doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1 ; Davies J.H. & Davies D.R. (2010), Solid Earth 1, 5-24.
doi.org/10.5194/se-1-5-2010

550 Ma

de lignées séparées
entre le poulpe et
les vertébrés

500 Ma

seulement que la
Terre se lit de loin
par son oxygène

23 000

· **42**

000 ·

100

000 ans

les rythmes de
l'orbite qui battent
les âges glaciaires

2 600 ×

le Soleil face à la
chaleur interne :
240 contre 0,09 W
par m²

Le cosmos émet, la Terre porte et filtre, le vivant lit, et ce qu'il lit, il le réécrit (E. Sorel, 2026). L'oxygène de l'air vient du vivant.

Chute **ANTITHÈSE**

ce qui s'est détaché

LECTURE. *Quelque chose, chez l'humain, s'est quand même détaché. Il est peut-être la seule bête qui sait qu'elle suit une règle, et qui peut la déconstruire (E. Sorel, 2026).*

Savoir qu'on suit une règle ne dispense pas de la suivre (E. Sorel, 2026).

le vivant qui se répète

On ne peut pas être le sommet d'une course qui vient de commencer (E. Sorel, 2026). Il n'y a que la Terre qui se réarrange, et qui, un jour, s'est mise à dire « moi » (E. Sorel, 2026). On n'est pas l'aboutissement. On est le vivant qui se répète (E. Sorel, 2026).

Rien n'est unique, tout est multiple. L'unité est la représentation qu'on se fait à son échelle (E. Sorel, *Metaphysical Stones*, 2026).

L'ÉQUATION, EN LONG ✧ HYPOTHÈSE

les quatre pièces $\text{signal} = s \times \text{porteur} \times \text{décrypteur} \times \text{échelle}(f) = s \times G$

le temps de pose $d' = \text{signal} \times \sqrt{T} \div \sigma$

les trois bruits $\sigma^2 = \text{fond}^2 + k \times \text{signal} + (w \times \text{signal})^2$

le dehors et le dedans $d' = s \times \sqrt{T} \div \sqrt{(\sigma_{\text{dehors}}^2 + (\sigma_{\text{dedans}} \div G)^2)}$

le seuil et le U $d' \geq d'_{\min} \cdot s_{\min}(f) = d'_{\min} \times \sigma \div (G \times \sqrt{T})$

l'échelle $\text{échelle}(f) = \text{seuil le plus bas} \div \text{seuil}(f)$

le gabarit $d' = \sqrt{T} \times (g \cdot x) \div \sqrt{(g^T \cdot \Sigma \cdot g)}$

le critère $P(\text{répondre}) = \Phi(d' - \text{critère})$

Chaque ligne est une pièce, posée et sourcée dans la deuxième partie.

L'ÉQUATION, EN UNE LIGNE ✧ HYPOTHÈSE

$$P(\text{lire}) = \Phi\left(\frac{\sqrt{T} \cdot s \cdot G}{\sqrt{(\sigma_{\text{dehors}}^2 + (\sigma_{\text{dedans}} \div G)^2)}} - \text{critère}\right)$$

$$G = \text{porteur} \times \text{décrypteur} \times \text{échelle}(f)$$

Les quatre pièces, le temps de pose, le dehors et le dedans, le critère : une seule lecture.

(E. Sorel, 2026)

« La résonance est ce qui naît
quand une échelle se lit. »

Le mur

La vibration ne peut pas produire le paramètre qui la définit (E. Sorel, *Le Diamant*, 2026). Le recommencement non plus : il suppose une première copie qu'il ne peut pas fabriquer. Le Big Bang est l'horizon de notre lecture, pas l'origine du réel (E. Sorel, 2026). Ce que la mesure permet de dire est plus étroit : rien, dans ce que nous mesurons, n'autorise à prendre ces limites pour le début de ce qui est (E. Sorel, *Le Big Bang : l'éclat qui aveugle*, 2026). Le début, c'est le regard qu'on pose sur une chose depuis son échelle (E. Sorel, 2026).

Chaque partie a son mur : la taille pour l'échelle, la règle du lecteur pour la perception, l'origine pour la résonance.

La prédiction

HYPOTHÈSE. Un biais propre à chaque membre d'un groupe recommence dans le groupe quand les membres lisent tous la même chose. Il est filtré quand chacun lit une part différente. Elle perd si le biais reste filtré même quand chaque membre lit toutes les options.

ÉTABLI. Pour : une colonie de fourmis échappe à l'effet leurre, la plupart de ses fourmis ne connaissant qu'un seul site ; dans la même espèce, la fourmi seule, elle, y tombe. Une fourmi seule met plus de temps à départager deux nids semblables, comme nous ; la colonie, elle, en met moins : « Whole colonies, by contrast, rationally made faster decisions when the options were more similar. » (Les colonies entières, à l'inverse, décidaient rationnellement plus vite quand les options étaient plus semblables.)

Edwards S.C. & Pratt S.C. (2009), Proc. R. Soc. B 276, 3655-3661. doi.org/10.1098/rspb.2009.0981 ; Sasaki T. & Pratt S.C. (2011), Behav. Ecol. 22, 276-281. doi.org/10.1093/beheco/arq198 ; Sasaki T., Stott B. & Pratt S.C. (2019), Biol Lett 15, 20190542. doi.org/10.1098/rsbl.2019.0542

ÉTABLI. Contre, ou nuance : « colonies of the rock ant, *Temnothorax rugatulus*, demonstrate the anchoring effect during nest site selection » (les colonies de la fourmi des rochers, *Temnothorax rugatulus*, montrent l'effet d'ancrage pendant la sélection d'un site de nid). L'effet est faible, et il dépend de ce que la colonie a vu avant et pendant la sélection.

Doering G.N. et al. (2023), Behav Processes 208, 104861. doi.org/10.1016/j.beproc.2023.104861

ÉTABLI. Le cadre : chez les insectes sociaux, la fonction de la colonie émerge « from interactions among relatively less capable individuals » (des interactions entre des individus relativement moins capables), et la boucle de renforcement « generates consensus but can also amplify errors » (crée le consensus mais peut aussi amplifier les erreurs).

Sasaki T. & Pratt S.C. (2017), Annu Rev Entomol 63, 259-275. doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043249

LECTURE. Le test tient en un montage : la même colonie, le même leurre, deux branchements. Dans l'un, chaque fourmi n'a accès qu'à un site ; dans l'autre, chaque fourmi les visite tous. Si le biais revient dans le second et pas dans le premier, le recommencement dépend du branchement des lecteurs.



Références

1. Adret P. (2004), *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1016, 303-324. doi.org/10.1196/annals.1298.005
2. Alvarez L.W. et al. (1980), *Science* 208, 1095-1108. doi.org/10.1126/science.208.4448.1095
3. Anumonwo J.M. et al. (1991), *Circ. Res.* 68, 1138-1153. doi.org/10.1161/01.res.68.4.1138
4. Aoki N. et al. (2018), *Front. Physiol.* 9, 1837. doi.org/10.3389/fphys.2018.01837
5. Arliss J.M., Kaplan E.N. & Galvin S.L. (2005), *Am. J. Obstet. Gynecol.* 192, 1462-1464. doi.org/10.1016/j.ajog.2004.12.034
6. Arnold V.I. (1961), *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Mat.* 25, 21-86, trad. anglaise (1965), *Amer. Math. Soc. Transl.* 46, 213-284
7. Attneave F. (1954), *Psychol. Rev.* 61, 183-193. doi.org/10.1037/h0054663
8. Autrum H. (1958), *Exp. Cell Res.* 14, suppl. 5
9. Averbeck B.B., Latham P.E. & Pouget A. (2006), *Nat. Rev. Neurosci.* 7, 358-366. doi.org/10.1038/nrn1888
10. Banavar J.R., Maritan A. & Rinaldo A. (1999), *Nature* 399, 130-132. doi.org/10.1038/20144
11. Barbieri M. (2008), *Naturwissenschaften* 95, 577-599. doi.org/10.1007/s00114-008-0368-x
12. Barbieri M. (2019), *BioSystems* 181, 11-19. doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.04.010
13. Barlow H.B. (1956), *J. Opt. Soc. Am.* 46, 634-639. doi.org/10.1364/JOSA.46.000634
14. Barlow H.B. (1961), in Rosenblith W.A. (éd.), *Sensory Communication*, MIT Press, 217-234
15. Barton J.J.S. et al. (2019), *Cogn. Neuropsychol.* 36, 54-84. doi.org/10.1080/02643294.2019.1593821
16. Bassi C.J. & Powers M.K. (1986), *Physiol. Behav.* 38, 871-877. doi.org/10.1016/0031-9384(86)90056-9
17. Baylor D.A., Lamb T.D. & Yau K.W. (1979), *J. Physiol.* 288, 613-634. doi.org/10.1113/jphysiol.1979.sp012716
18. Baylor D.A., Matthews G. & Yau K.W. (1980), *J. Physiol.* 309, 591-621. doi.org/10.1113/jphysiol.1980.sp013529
19. Benedict C. et al. (2021), *Sci. Total Environ.* 804, 150222. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150222
20. Benjamin A.S., Diaz M. & Wee S. (2009), *Psychol. Rev.* 116, 84-115. doi.org/10.1037/a0014351
21. Benzi R., Sutera A. & Vulpiani A. (1981), *J. Phys. A* 14, L453-L457. doi.org/10.1088/0305-4470/14/11/006
22. Berg H.C. & Purcell E.M. (1977), *Biophys. J.* 20, 193-219. doi.org/10.1016/S0006-3495(77)85544-6
23. Berridge M.J., Lipp P. & Bootman M.D. (2000), *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 1, 11-21. doi.org/10.1038/35036035
24. Blakemore C. & Campbell F.W. (1969), *J. Physiol.* 203, 237-260. doi.org/10.1113/jphysiol.1969.sp008862
25. Bliss T.V. & Lømo T. (1973), *J Physiol* 232, 331-356. doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273
26. Bochner J. et al. (2022), *J. Speech Lang. Hear. Res.* 65, 4429-4453. doi.org/10.1044/2022_JSLHR-22-00038

27. Bolanowski S.J. et al. (1988), *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 1680-1694. doi.org/10.1121/1.397184
28. Bolhuis J.J. (1991), *Biol. Rev.* 66, 303-345. doi.org/10.1111/j.1469-185X.1991.tb01145.x
29. Brenner N., Bialek W. & de Ruyter van Steveninck R. (2000), *Neuron* 26, 695-702. doi.org/10.1016/S0896-6273(00)81205-2
30. Buck J. (1988), *Q Rev Biol* 63, 265-89. doi.org/10.1086/415929
31. Burgess A.E., Wagner R.F., Jennings R.J. & Barlow H.B. (1981), *Science* 214, 93-94. doi.org/10.1126/science.7280685
32. Cajochen C. et al. (2013), *Curr. Biol.* 23, 1485-1488. doi.org/10.1016/j.cub.2013.06.029
33. Campbell F.W. & Robson J.G. (1968), *J. Physiol.* 197, 551-566. doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008574
34. Carrasco M., Ling S. & Read S. (2004), *Nat. Neurosci.* 7, 308-313. doi.org/10.1038/nn1194
35. Casiraghi L. et al. (2021), *Sci. Adv.* 7, eabe0465. doi.org/10.1126/sciadv.abe0465
36. Caspar D.L.D. & Klug A. (1962), *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.* 27, 1-24. doi.org/10.1101/SQB.1962.027.001.005
37. Castellucci V.F. & Kandel E.R. (1974), *PNAS* 71, 5004-5008. doi.org/10.1073/pnas.71.12.5004
38. Chadwick J. (1958), *The Decipherment of Linear B*, Cambridge University Press
39. Champollion J.-F. (1822), *Lettre à M. Dacier*
40. Chao M.Y. et al. (2004), *PNAS* 101, 15512-15517. doi.org/10.1073/pnas.0403369101
41. Cheong R. et al. (2011), *Science* 334, 354-358. doi.org/10.1126/science.1204553
42. Cordi M. et al. (2014), *Curr. Biol.* 24, R549-R550. doi.org/10.1016/j.cub.2014.05.017
43. Currea J.P., Smith J.L. & Theobald J.C. (2018), *Vision Res.* 149, 1-8. doi.org/10.1016/j.visres.2018.05.007
44. Dacke M. et al. (2013), *Curr. Biol.* 23, 298-300. doi.org/10.1016/j.cub.2012.12.034
45. Davies J.H. & Davies D.R. (2010), *Solid Earth* 1, 5-24. doi.org/10.5194/se-1-5-2010
46. Davies N.B. et al. (2006), *Proc. R. Soc. B* 273, 693-699. doi.org/10.1098/rspb.2005.3324
47. Davis J., Hsieh Y.H. & Lee H.C. (2015), *Sci. Rep.* 5, 7861. doi.org/10.1038/srep07861
48. de Lange H. (1958), *J. Opt. Soc. Am.* 48, 777-784. doi.org/10.1364/JOSA.48.000777
49. De Tomaso A.W. & Rodriguez-Valbuena H. (2026), *Annu Rev Cell Dev Biol* 42, 307-337. doi.org/10.1146/annurev-cellbio-111822-123126
50. De Tomaso A.W. et al. (2005), *Nature* 438, 454-459. doi.org/10.1038/nature04150
51. Dean I., Harper N.S. & McAlpine D. (2005), *Nat. Neurosci.* 8, 1684-1689. doi.org/10.1038/nn1541
52. Decker B.F. & Kasper J.S. (1959), *Acta Cryst.* 12, 503-506. doi.org/10.1107/S0365110X59001530
53. DeLong J.P. et al. (2010), *PNAS* 107, 12941-12945. doi.org/10.1073/pnas.1007783107
54. Dodds P.S., Rothman D.H. & Weitz J.S. (2001), *J. Theor. Biol.* 209, 9-27. doi.org/10.1006/jtbi.2000.2238
55. Doering G.N. et al. (2023), *Behav Processes* 208, 104861. doi.org/10.1016/j.beproc.2023.104861
56. Doshier B.A. & Lu Z.L. (1998), *PNAS* 95, 13988-13993. doi.org/10.1073/pnas.95.23.13988
57. Douglass J.K. et al. (1993), *Nature* 365, 337-340. doi.org/10.1038/365337a0
58. Drew T., Võ M.L.-H. & Wolfe J.M. (2013), *Psychol. Sci.* 24, 1848-1853. doi.org/10.1177/0956797613479386

59. Driever W. & Nüsslein-Volhard C. (1988), *Cell* 54, 83-93. doi.org/10.1016/0092-8674(88)90182-1
60. Dupressoir A. et al. (2009), *PNAS* 106, 12127-12132. doi.org/10.1073/pnas.0902925106
61. Dusenbery D.B. (1997), *PNAS* 94, 10949-10954. doi.org/10.1073/pnas.94.20.10949
62. Dusenbery D.B. (1998), *Biophys. J.* 74, 2272-2277. doi.org/10.1016/S0006-3495(98)77936-6
63. Edwards S.C. & Pratt S.C. (2009), *Proc. R. Soc. B* 276, 3655-3661. doi.org/10.1098/rspb.2009.0981
64. Eichorn C. et al. (2017), *BMC Biol.* 15, 2. doi.org/10.1186/s12915-016-0342-6
65. Eigen M. (1971), *Naturwissenschaften* 58, 465-523. doi.org/10.1007/BF00623322
66. Enright J.M. et al. (2015), *Curr. Biol.* 25, 3048-3057. doi.org/10.1016/j.cub.2015.10.018
67. Epelbaum S. et al. (2008), *Cortex* 44, 962-974. doi.org/10.1016/j.cortex.2008.05.003
68. Ernst M.O. & Banks M.S. (2002), *Nature* 415, 429-433. doi.org/10.1038/415429a
69. Fairhall A.L., Lewen G.D., Bialek W. & de Ruyter van Steveninck R.R. (2001), *Nature* 412, 787-792. doi.org/10.1038/35090500
70. Farmer C.G. & Sanders K. (2010), *Science* 327, 338-340. doi.org/10.1126/science.1180219
71. Fay R.R. (1988), *Hearing in Vertebrates: a Psychophysics Databook*, Hill-Fay Associates, Winnetka
72. Florentine M., Fastl H. & Buus S. (1988), *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 195-203. doi.org/10.1121/1.396964
73. Frank F.C. (1952), *Proc. R. Soc. Lond. A* 215, 43-46. doi.org/10.1098/rspa.1952.0194
74. Fredens J. et al. (2019), *Nature* 569, 514-518. doi.org/10.1038/s41586-019-1192-5
75. Freeland S.J. & Hurst L.D. (1998), *J. Mol. Evol.* 47, 238-248. doi.org/10.1007/pl00006381
76. Frenda S.J. et al. (2014), *Psychol Sci* 25, 1674-81. doi.org/10.1177/0956797614534694
77. Friis H.T. (1944), *Proc. IRE* 32, 419-422. doi.org/10.1109/JRPROC.1944.232049
78. Futagi Y., Toribe Y. & Suzuki Y. (2012), *Int. J. Pediatr.* 2012, 191562. doi.org/10.1155/2012/191562
79. Gabr A., Grossman A.R. & Bhattacharya D. (2020), *J Phycol* 56, 837-843. doi.org/10.1111/jpy.13003
80. Garrett S. & Rosenthal J.J.C. (2012), *Science* 335, 848-851. doi.org/10.1126/science.1212795
81. Gerken G.M., Bhat V.K. & Hutchison-Clutter M. (1990), *J. Acoust. Soc. Am.* 88, 767-778. doi.org/10.1121/1.399726
82. Giles R.E. et al. (1980), *PNAS* 77, 6715-6719. doi.org/10.1073/pnas.77.11.6715
83. Glass L. (2001), *Nature* 410, 277-284. doi.org/10.1038/35065745
84. Goksör E., Rosengren L. & Wennergren G. (2002), *Acta Paediatr.* 91, 307-312. doi.org/10.1080/08035250252833978
85. Gold J., Bennett P.J. & Sekuler A.B. (1999), *Nature* 402, 176-178. doi.org/10.1038/46027
86. Gorea A. (2015), *i-Perception* 6(4). doi.org/10.1177/2041669515593043
87. Gosselin F. & Schyns P.G. (2001), *Vision Res.* 41, 2261-2271. doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00097-9
88. Gregor T. et al. (2007), *Cell* 130, 153-164. doi.org/10.1016/j.cell.2007.05.025
89. Grosberg R.K. & Strathmann R.R. (1998), *Trends Ecol. Evol.* 13, 112-116. doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01313-X
90. Guevara M.R., Glass L. & Shrier A. (1981), *Science* 214, 1350-1353. doi.org/10.1126/science.7313693
91. Guo Y. et al. (2023), *BMC Biol* 21, 51. doi.org/10.1186/s12915-023-01551-z
92. Gupta R. et al. (2019), *Swiss Med. Wkly* 149, w20070. doi.org/10.4414/sm.w.2019.20070

93. Haba-Rubio J. et al. (2015), *Sleep Med.* 16, 1321-1326. doi.org/10.1016/j.sleep.2015.08.002
94. Haeckel E. (1904), *Kunstformen der Natur*, Bibliographisches Institut, Leipzig
95. Haldane J.B.S. (1926), « On being the right size », *Harper's Magazine* 152, 424-427.
96. Hauber M.E., Russo S.A. & Sherman P.W. (2001), *Proc. R. Soc. B* 268, 1041-1048. doi.org/10.1098/rspb.2001.1617
97. Hays J.D., Imbrie J. & Shackleton N.J. (1976), *Science* 194, 1121-1132. doi.org/10.1126/science.194.4270.1121
98. Healy K. et al. (2013), *Anim. Behav.* 86, 685-696. doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.06.018
99. Hecht S., Shlaer S. & Pirenne M.H. (1942), *J. Gen. Physiol.* 25, 819-840. doi.org/10.1085/jgp.25.6.819
100. Heffner R. & Heffner H. (1980), *Science* 208, 518-520. doi.org/10.1126/science.7367876
101. Helfrich-Förster C. et al. (2021), *Sci. Adv.* 7, eabe1358. doi.org/10.1126/sciadv.abe1358
102. Helfrich-Förster C. et al. (2025), *Sci. Adv.* 11, eadw4096. doi.org/10.1126/sciadv.adw4096
103. Houchmandzadeh B., Wieschaus E. & Leibler S. (2002), *Nature* 415, 798-802. doi.org/10.1038/415798a
104. Hu D.L., Chan B. & Bush J.W.M. (2003), *Nature* 424, 663-666. doi.org/10.1038/nature01793
105. Hung, Corver & Gordus (2026), *PLoS Comput. Biol.* 22, e1014802. doi.org/10.1371/journal.pcbi.1014802
106. Ibba M. & Söll D. (2000), *Annu. Rev. Biochem.* 69, 617-650. doi.org/10.1146/annurev.biochem.69.1.617
107. Imachi H. et al. (2020), *Nature* 577, 519-525. doi.org/10.1038/s41586-019-1916-6
108. Inger R. et al. (2014), *PLoS One* 9, e98631. doi.org/10.1371/journal.pone.0098631
109. Jablonka E. & Lamb M.J. (2006), *J. Theor. Biol.* 239, 236-246. doi.org/10.1016/j.jtbi.2005.08.038
110. Jahn M., Rogers M.J. & Söll D. (1991), *Nature* 352, 258-260. doi.org/10.1038/352258a0
111. James L.S. & Sakata J.T. (2017), *Curr. Biol.* 27, 3676-3682. doi.org/10.1016/j.cub.2017.10.019
112. Japyassú H.F. & Laland K.N. (2017), *Anim. Cogn.* 20, 375-395. doi.org/10.1007/s10071-017-1069-7
113. Jeon K.W. (1972), *Science* 176, 1122-1123. doi.org/10.1126/science.176.4039.1122
114. Jeon K.W. (2004), *J. Eukaryot. Microbiol.* 51, 502-508. doi.org/10.1111/j.1550-7408.2004.tb00277.x
115. Johnson M.H. et al. (1991), *Cognition* 40, 1-19. doi.org/10.1016/0010-0277(91)90045-6
116. Kaiser T.S. & Heckel D.G. (2012), *PLoS One* 7, e32092. doi.org/10.1371/journal.pone.0032092
117. Kaiser T.S. et al. (2016), *Nature* 540, 69-73. doi.org/10.1038/nature20151
118. Karst J., Jones M.D. & Hoeksema J.D. (2023), *Nat Ecol Evol* 7, 501-511. doi.org/10.1038/s41559-023-01986-1
119. Kelly D.H. (1979), *J. Opt. Soc. Am.* 69, 1340-1349. doi.org/10.1364/JOSA.69.001340
120. Kerepesi C. et al. (2021), *Sci Adv* 7. doi.org/10.1126/sciadv.abg6082
121. Kiani R., Hanks T.D. & Shadlen M.N. (2008), *J. Neurosci.* 28, 3017-3029. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4761-07.2008
122. Kilner R.M. & Davies N.B. (1999), *Anim. Behav.* 58, 797-808. doi.org/10.1006/anbe.1999.1197
123. Kira S., Yang T. & Shadlen M.N. (2015), *Neuron* 85, 861-73. doi.org/10.1016/j.neuron.2015.01.007
124. Knight R.D., Freeland S.J. & Landweber L.F. (2001), *Nat. Rev. Genet.* 2, 49-58. doi.org/10.1038/35047500

125. Knoll A.H. (2011), *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 39, 217-239.
doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100209
126. Koonin E.V. & Novozhilov A.S. (2009), *IUBMB Life* 61, 99-111. doi.org/10.1002/iub.146
127. Krakauer D. et al. (2020), *Theory Biosci.* 139, 209-223. doi.org/10.1007/s12064-020-00313-7
128. Kramar M. & Alim K. (2021), *PNAS* 118. doi.org/10.1073/pnas.2007815118
129. Köppl C. (1997), *J Neurosci* 17, 3312-3321. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-09-03312.1997
130. Lamża Ł. (2023), *Biol Rev Camb Philos Soc* 98, 2188-2209. doi.org/10.1111/brv.13001
131. Land M.F. (1997), *Annu. Rev. Entomol.* 42, 147-177. doi.org/10.1146/annurev.ento.42.1.147
132. Landolfi M.A. & Barth F.G. (1996), *J. Comp. Physiol. A* 179, 493-508. doi.org/10.1007/BF00192316
133. Lane N. & Martin W. (2010), *Nature* 467, 929-934. doi.org/10.1038/nature09486
134. Latty T. & Beekman M. (2011), *Proc. R. Soc. B* 278, 307-312. doi.org/10.1098/rspb.2010.1045
135. Laughlin S. (1981), *Z. Naturforsch. C* 36, 910-912. doi.org/10.1515/znc-1981-9-1040
136. Lazova M.D., Ahmed T., Bellomo D., Stocker R. & Shimizu T.S. (2011), *PNAS* 108, 13870-13875.
doi.org/10.1073/pnas.1108608108
137. Leitch D.B. & Catania K.C. (2012), *J. Exp. Biol.* 215, 4217-4230. doi.org/10.1242/jeb.076836
138. Levin M. (2019), *Front. Psychol.* 10, 2688. doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02688
139. Lezana et al. (2021), *Behav. Processes* 195, 104569. doi.org/10.1016/j.beproc.2021.104569
140. Lhee D. et al. (2019), *Sci Rep* 9, 2560. doi.org/10.1038/s41598-019-38621-8
141. Liu J. et al. (2014), *Cortex* 53, 60-77. doi.org/10.1016/j.cortex.2014.01.013
142. Lu Z.L. & Doshier B.A. (1998), *Vision Res.* 38, 1183-1198. doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00273-3
143. Lugo E., Doti R. & Faubert J. (2008), *PLoS One* 3, e2860. doi.org/10.1371/journal.pone.0002860
144. Lynch M. & Marinov G.K. (2015), *PNAS* 112, 15690-5. doi.org/10.1073/pnas.1514974112
145. Macnab R.M. & Koshland D.E. (1972), *PNAS* 69, 2509-2512. doi.org/10.1073/pnas.69.9.2509
146. Madden J.R. & Davies N.B. (2006), *Proc. R. Soc. B* 273, 2343-2351. doi.org/10.1098/rspb.2006.3585
147. Makous J.C., Friedman R.M. & Vierck C.J. (1995), *J. Neurosci.* 15, 2808-2818.
doi.org/10.1523/JNEUROSCI.15-04-02808.1995
148. Mankowska N.D. et al. (2021), *Medicina* 57, 1096. doi.org/10.3390/medicina57101096
149. Mansour N. et al. (2026), *Nat. Commun.* 17. doi.org/10.1038/s41467-026-72509-2
150. Mapalo M.A., Wolfe J.M. & Ortega-Hernández J. (2024), *Commun Biol* 7, 953.
doi.org/10.1038/s42003-024-06643-2
151. Marcos, Fu H.C., Powers T.R. & Stocker R. (2012), *PNAS* 109, 4780-4785.
doi.org/10.1073/pnas.1120955109
152. Marler P. & Peters S. (1977), *Science* 198, 519-521. doi.org/10.1126/science.198.4316.519
153. Marshall J.A.R. et al. (2009), *J. R. Soc. Interface* 6, 1065-1074. doi.org/10.1098/rsif.2008.0511
154. Mas-Herrero E., Zatorre R.J., Rodriguez-Fornells A. & Marco-Pallarés J. (2014), *Curr. Biol.* 24, 699-704. doi.org/10.1016/j.cub.2014.01.068
155. McDermott J.H., Schultz A.F., Undurraga E.A. & Godoy R.A. (2016), *Nature* 535, 547-550.
doi.org/10.1038/nature18635
156. McNamara B. & Wiesenfeld K. (1989), *Phys. Rev. A* 39, 4854-4869.
doi.org/10.1103/PhysRevA.39.4854

157. Mehr S.A. et al. (2018), *Curr. Biol.* 28, 356-368. doi.org/10.1016/j.cub.2017.12.042
158. Mesibov R., Ordal G.W. & Adler J. (1973), *J. Gen. Physiol.* 62, 203-223. doi.org/10.1085/jgp.62.2.203
159. Mi S. et al. (2000), *Nature* 403, 785-789. doi.org/10.1038/35001608
160. Moran N.A. (1996), *PNAS* 93, 2873-2878. doi.org/10.1073/pnas.93.7.2873
161. Mortimer B. et al. (2016), *J. R. Soc. Interface* 13, 20160341. doi.org/10.1098/rsif.2016.0341
162. Munro C. et al. (2019), *Sci Rep* 9, 15522. doi.org/10.1038/s41598-019-51842-1
163. Murray R.F. (2011), *J. Vis.* 11(5), 2. doi.org/10.1167/11.5.2
164. Muñoz-Gómez S.A. et al. (2019), *Elife* 8. doi.org/10.7554/eLife.42535
165. Møller H. & Pedersen C.S. (2004), *Noise Health* 6, 37-57. PMID 15273023
166. Nader K., Schafe G.E. & LeDoux J.E. (2000), *Nature* 406, 722-726. doi.org/10.1038/35021052
167. Naka K.I. & Rushton W.A.H. (1966), *J. Physiol.* 185, 536-555. doi.org/10.1113/jphysiol.1966.sp008001
168. Nakata K. (2010), *Proc. R. Soc. B* 277, 29-33. doi.org/10.1098/rspb.2009.1583
169. Nesher N. et al. (2014), *Curr. Biol.* 24, 1271-1275. doi.org/10.1016/j.cub.2014.04.024
170. Niwa K. & Tokoro T. (1997), *Jpn. J. Ophthalmol.* 41, 403-408. doi.org/10.1016/S0021-5155(97)00082-8
171. Nowack E.C.M., Melkonian M. & Glöckner G. (2008), *Curr. Biol.* 18, 410-418. doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.051
172. Nussbaumer A.D., Fisher C.R. & Bright M. (2006), *Nature* 441, 345-348. doi.org/10.1038/nature04793
173. O'Connell-Rodwell C.E. et al. (2006), *Behav. Ecol. Sociobiol.* 59, 842-850. doi.org/10.1007/s00265-005-0136-2
174. O'Connell-Rodwell C.E. et al. (2007), *J. Acoust. Soc. Am.* 122, 823-830. doi.org/10.1121/1.2747161
175. O'Connor D.H. et al. (2002), *Nat. Neurosci.* 5, 1203-1209. doi.org/10.1038/nn957
176. Pasquet A. et al. (2014), *Zool. Stud.* 53, 11. doi.org/10.1186/1810-522X-53-11, d'après Reed C.F. et al. (1970), *Dev. Psychobiol.* 3, 251-265. doi.org/10.1002/dev.420030406
177. Patel A.D., Iversen J.R., Bregman M.R. & Schulz I. (2009), *Curr. Biol.* 19, 827-830. doi.org/10.1016/j.cub.2009.03.038
178. Payne R.B. et al. (2000), *Anim. Behav.* 59, 69-81. doi.org/10.1006/anbe.1999.1283
179. Pelli D.G. & Farell B. (1999), *J. Opt. Soc. Am. A* 16, 647-653. doi.org/10.1364/JOSAA.16.000647
180. Peña Ramirez J. et al. (2016), *Sci. Rep.* 6, 23580. doi.org/10.1038/srep23580
181. Pineau R.M. et al. (2026), *bioRxiv*, version 5 de février 2026, même fourchette depuis la version 1 d'octobre 2024. doi.org/10.1101/2024.10.19.619233
182. Piraino S. et al. (1996), *Biol Bull* 190, 302-312. doi.org/10.2307/1543022
183. Pophale A. et al. (2023), *Nature* 619, 129-134. doi.org/10.1038/s41586-023-06203-4
184. Price C.A., Wing S. & Weitz J.S. (2012), *Ecol. Lett.* 15, 87-95. doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01712.x
185. Prindle A. et al. (2015), *Nature* 527, 59-63. doi.org/10.1038/nature15709
186. Ptito M. et al. (2005), *Brain* 128, 606-614. doi.org/10.1093/brain/awh380
187. Purcell E.M. (1977), *Am. J. Phys.* 45, 3-11. doi.org/10.1119/1.10903
188. Radoeva P.D. et al. (2008), *J. Cogn. Neurosci.* 20, 1927-1939. doi.org/10.1162/jocn.2008.20139

189. Rankin C.H. et al. (2009), *Neurobiol. Learn. Mem.* 92, 135-138. doi.org/10.1016/j.nlm.2008.09.012
190. Reid C.R. et al. (2012), *PNAS* 109, 17490-17494. doi.org/10.1073/pnas.1215037109
191. Reinhard C.T. et al. (2017), *Astrobiology* 17, 287-297. doi.org/10.1089/ast.2016.1598
192. Reuter T.E., White R.H. & Wald G. (1971), *J. Gen. Physiol.* 58, 351-371. doi.org/10.1085/jgp.58.4.351
193. Rinaldo A. et al. (2014), *PNAS* 111, 2417-2424. doi.org/10.1073/pnas.1322700111
194. Robertson W.E. et al. (2021), *Science* 372, 1057-1062. doi.org/10.1126/science.abg3029
195. Rodríguez-Ezpeleta N. & Embley T.M. (2012), *PLoS One* 7, e30520. doi.org/10.1371/journal.pone.0030520
196. Rodríguez-Saltos C.A. et al. (2023), *Sci. Rep.* 13, 605. doi.org/10.1038/s41598-023-27708-y
197. Rogers P.C. & McAvoy D.J. (2018), *PLoS One* 13, e0203619. doi.org/10.1371/journal.pone.0203619
198. Root C.M. et al. (2011), *Cell* 145, 133-144. doi.org/10.1016/j.cell.2011.02.008
199. Rosa-Salva O., Regolin L. & Vallortigara G. (2010), *Dev. Sci.* 13, 565-577. doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00914.x
200. Russell D.F., Wilkens L.A. & Moss F. (1999), *Nature* 402, 291-294. doi.org/10.1038/46279
201. Sachsenmaier W., Remy U. & Plattner-Schobel R. (1972), *Exp Cell Res* 73, 41-48. doi.org/10.1016/0014-4827(72)90099-7
202. Saigusa T. et al. (2008), *Phys. Rev. Lett.* 100, 018101. doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.018101
203. Salgarella E. (2020), *Aegean Linear Script(s): Rethinking the Relationship between Linear A and Linear B*, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781108783477
204. Salimpoor V.N. et al. (2011), *Nat. Neurosci.* 14, 257-262. doi.org/10.1038/nn.2726
205. Sasaki T. & Pratt S.C. (2011), *Behav. Ecol.* 22, 276-281. doi.org/10.1093/beheco/arq198
206. Sasaki T. & Pratt S.C. (2012), *Curr. Biol.* 22, R827-R829. doi.org/10.1016/j.cub.2012.07.058
207. Sasaki T. & Pratt S.C. (2017), *Annu Rev Entomol* 63, 259-275. doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043249
208. Sasaki T., Stott B. & Pratt S.C. (2019), *Biol Lett* 15, 20190542. doi.org/10.1098/rsbl.2019.0542
209. Schachner E.R. et al. (2014), *Nature* 506, 367-370. doi.org/10.1038/nature12871
210. Seeley T.D. et al. (2012), *Science* 335, 108-111. doi.org/10.1126/science.1210361
211. Seideman J.A., Stanford T.R. & Salinas E. (2022), *Nat Commun* 13, 4463. doi.org/10.1038/s41467-022-32209-z
212. Shadlen M.N. & Movshon J.A. (1999), *Neuron* 24, 67-77. doi.org/10.1016/s0896-6273(00)80822-3
213. Sharpe L.T. et al. (1993), *J. Physiol.* 463, 325-348. doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019597
214. Shechtman D., Blech I., Gratias D. & Cahn J.W. (1984), *Phys. Rev. Lett.* 53, 1951-1953. doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1951
215. Silvestre D., Arleo A. & Allard R. (2018), *Sci Rep* 8, 2596. doi.org/10.1038/s41598-018-20619-3
216. Simoncelli E.P. & Olshausen B.A. (2001), *Annu. Rev. Neurosci.* 24, 1193-1216. doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.1193
217. Singer W. (1999), *Neuron* 24, 49-65. doi.org/10.1016/s0896-6273(00)80821-1
218. Springer M.S. et al. (2021), *Curr. Biol.* 31, 2124-2139. doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.057
219. Strasburger H. (2001), *Percept. Psychophys.* 63, 1356-1376. doi.org/10.3758/BF03194548

220. Sumner C.J. & Sumner S. (2020), *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 375, 20190480. doi.org/10.1098/rstb.2019.0480
221. Sung W. et al. (2012), *PNAS* 109, 18488-18492. doi.org/10.1073/pnas.1216223109
222. Suter R.B. (1978), *Behav. Ecol. Sociobiol.* 3, 283-296. doi.org/10.1007/BF00296314
223. Szathmáry E. (2015), *PNAS* 112, 10104-11. doi.org/10.1073/pnas.1421398112
224. Takeishi A. et al. (2020), *eLife* 9, e61167. doi.org/10.7554/eLife.61167
225. Tanner W.P. & Swets J.A. (1954), *Psychol. Rev.* 61, 401-409. doi.org/10.1037/h0058700
226. Tassi P. et al. (2000), *Chronobiol. Int.* 17, 795-805. doi.org/10.1081/CBI-100102115
227. ten Cate C. & Rowe C. (2007), *Trends Ecol. Evol.* 22, 380-387. doi.org/10.1016/j.tree.2007.03.006
228. Thelen E. (1986), *Child Dev.* 57, 1498-1506. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3802974
229. Thelen E. et al. (1982), *Dev. Psychobiol.* 15, 447-453. doi.org/10.1002/dev.420150506
230. Thelen E., Fisher D.M. & Ridley-Johnson R. (1984), *Infant Behav. Dev.* 7, 479-493. doi.org/10.1016/S0163-6383(84)80007-7
231. Thrash J.C. et al. (2011), *Sci. Rep.* 1, 13. doi.org/10.1038/srep00013
232. Tinbergen N. & Perdeck A.C. (1950), *Behaviour* 3, 1-39. doi.org/10.1163/156853951X00197
233. Tkačik G., Callan C.G. & Bialek W. (2008), *PNAS* 105, 12265-12270. doi.org/10.1073/pnas.0806077105
234. Trenberth K.E., Fasullo J.T. & Kiehl J. (2009), *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90, 311-324. doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1
235. Uexküll J. von & Kriszat G. (1934), *Streifzüge durch die Umwelten von Tieren und Menschen*, Springer, Berlin. doi.org/10.1007/978-3-642-98976-6
236. Uhlich D.J., Essock E.A. & Lehmkuhle S. (1981), *Behav. Brain Res.* 2, 291-299. doi.org/10.1016/0166-4328(81)90013-9
237. Vallortigara G., Regolin L. & Marconato F. (2005), *PLoS Biol.* 3, e208. doi.org/10.1371/journal.pbio.0030208
238. Vilidaite G. & Baker D.H. (2017), *Vision Res.* 141, 30-39. doi.org/10.1016/j.visres.2016.10.008
239. Vogt K. et al. (2021), *Sci. Adv.* 7, eabd6900. doi.org/10.1126/sciadv.abd6900
240. Wark B., Lundstrom B.N. & Fairhall A. (2007), *Curr. Opin. Neurobiol.* 17, 423-429. doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.001
241. Watanabe T. (2000), *Proc. R. Soc. B* 267, 565-569. doi.org/10.1098/rspb.2000.1038
242. Wehr T.A. (2018), *Mol. Psychiatry* 23, 923-931. doi.org/10.1038/mp.2016.263
243. Wei W. et al. (2022), *Nature* 611, 105-114. doi.org/10.1038/s41586-022-05288-7
244. West G.B., Brown J.H. & Enquist B.J. (1997), *Science* 276, 122-126. doi.org/10.1126/science.276.5309.122
245. Wichmann F.A. & Hill N.J. (2001), *Percept. Psychophys.* 63, 1293-1313. doi.org/10.3758/BF03194544
246. Wignall A.E. & Herberstein M.E. (2013), *Sci. Rep.* 3, 3557. doi.org/10.1038/srep03557
247. Wignall A.E. & Taylor P.W. (2011), *Proc. R. Soc. B* 278, 1427-1433. doi.org/10.1098/rspb.2010.2060
248. Wikoff W.R. et al. (2000), *Science* 289, 2129-2133. doi.org/10.1126/science.289.5487.2129
249. Wilson E.C., Reed C.M. & Braida L.D. (2009), *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 1960-1974. doi.org/10.1121/1.3204305

- 250. Wilson E.C., Reed C.M. & Braida L.D. (2010), J. Acoust. Soc. Am. 127, 3044-3059. doi.org/10.1121/1.3365318
- 251. Windsperger K. et al. (2026), Birth 53, 192-200. doi.org/10.1111/birt.70013
- 252. Winkler I. et al. (2009), PNAS 106, 2468-2471. doi.org/10.1073/pnas.0809035106
- 253. Wirth E. & Barth F.G. (1992), J. Comp. Physiol. A 171, 359-371. doi.org/10.1007/BF00223966
- 254. Zantke J. et al. (2013), Cell Rep. 5, 99-113. doi.org/10.1016/j.celrep.2013.08.031
- 255. Zhang J. (2024), Cell Chem. Biol. 31, 36-52. doi.org/10.1016/j.chembiol.2023.12.008